

ISSN 1512-0120



# ენერჯიკა ENERGY

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
ენერჯეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

---

GEORGIAN TECHNICAL UNIVERSITY  
FACULTY OF POWER ENGINEERING AND TELECOMMUNICATION

---

სერიზ : “ენერჯეტიკის თანამედროვე პრობლემები  
და მათი გადაწყვეტის გზები”

---

SERIES : “MODERN PROBLEMS OF POWER ENGINEERING  
AND WAYS OF SOLVING THEM”

№ 2 (98)/2021

|

თბილისი, TBILISI

# ენერჯია

---

# ENERGY

სერია: „ენერჯეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი  
გადაწყვეტის გზები“

---

SERIES: “MODERN PROBLEMS OF POWER ENGINEERING  
AND WAYS OF SOLVING THEM”

**2 (98)/2021**

ნაწილი **I**  
Part

---

ჟურნალი დაფინანსებულია სს „თელასი“-ის მიერ

The magazine was funded by JSC "Telasi"

თბილისი-Tbilisi

ISSN 1512-0120



*ჟურნალ „ენერჯია“-ს თემატური გამოცემა „ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები“ დააფინანსა სს „თელასმა“*

მთავარი რედაქტორი - მერაბ ლორთქიფანიძე  
მთავარი რედაქტორის მოადგილე - შალვა გაგოშიძე

**საორგანიზაციო კომიტეტის პრეზიდიუმი:**

დავით გურგენიძე, ევგენი სოკოლი (უკრაინა), მიხეილ ზაგირნიაკი (უკრაინა), რევაზ არველაძე, ვლადიმერ კლეპიკოვი (უკრაინა), ბადურ ჭუნაშვილი, ალექსანდრე პეტროსიანი

**საორგანიზაციო კომიტეტი:**

ზვიად ვაშაკიძე, თეიმურაზ გამრეკელაშვილი, უჩა უჩანეიშვილი, ენვერ ჩიჩუა, დავით კახიანი, ემზარ ჩაჩხიანი, ნუგზარ ბერიძე, მიკოლა მუხა (უკრაინა), ალა დრანკოვა (უკრაინა), ვერა შამარდინა (უკრაინა), რომან ზაიცევი (უკრაინა), ალექსეი ჩერნი (უკრაინა), იგორ ორლოვსკი (პოლონეთი), მამუკა კობალია, სიმონ ნემსაძე, ლევან იმნაიშვილი, ევტიხი მაჭავარიანი, არჩილ სამადაშვილი, ომარ ზივზივაძე, მაია ტულუში, თორნიკე კიზირია, ომარ კილურაძე, თენგიზ მუსელიანი, ლენა შატაკიშვილი, თენგიზ ჯიშკარიანი

**ჟურნალის მომზადებაში მონაწილეობა მიიღეს:**

ინა თუმანიშვილი (ტექსტის რედაქტირება), ეთერი ზამბახიძე, ბაბილინა ბურჭულაძე, ნათელა ბარაბაძე (ტექსტის კომპიუტერული აწყობა)

---

***JSC “Telasi” sponsored the thematic issue of the magazine “Energy”  
“Modern Problems of Power Engineering and Ways of Solving them”***

**The editor -in-chief** – Merab Lortkipanidze  
**Deputy of the editor -in-chief** – Shalva Gagoshidze

**Presidium of the Organizing Committee:**

David Gurgenidze, Evgeni Sokol (Ukraine), Mykhaylo Zagirnyak (Ukraine), Revaz Arveladze, Vladimir Klepikov (Ukraine), Badur Tchunashvili, Alexander Petrosyan

**Organizing Committee:**

Zviad Vashakidze, Teimuraz Gamrekelashvili, Ucha Uchaneishvili, Enver Chichua, Davd Kakhiani, Emzar Chachkhiani, Nugzar Beridze, Mykola Mukha (Ukraine), Alla Drankova (Ukraine), Vira Shamardina (Ukraine), Roman Zaitsev (Ukraine), Oleksii Chorny (Ukraine), Igor Orlovsky (Poland), Mamuka Kobalia, Simon Nemsadze, Levan Imnaishvili, Evtikhy Matchavariani, Archil Samadashvili, Omar Zivzivadze, Maia Tughushi, Tornike Kiziria, Omar Kighuradze, Tengiz Museliani, Lena Shatakishvili, Tengiz Jishkariani

**In the preparation of the journal took part:**

Ina Tumanishvili (Text editing), Eteri Zambakhidze, Babilina Burchuladze, Natela Barabadze (Computer assembly of text)

ელექტრომექანიკური სისტემები, ელექტრომომხმარებლის ტექნოლოგიები  
**Electromechanical systems, Electrical energy consumption technologies**

|                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>В. Клепиков, В. Барский, Л. Волокита, Р. Апенченко, Р. Быканов, В. Собченко.</i> Математическая модель электропривода электротранспортного средства с синхронным реактивным двигателем .....                         | 5  |
| <i>Н. Анищенко, В. Залеский</i> Перспективы использования облачных технологий в задачах электропривода .....                                                                                                            | 10 |
| <i>Е. Назарова, В. Осадчий, С. Шульженко.</i> Исследование системы управления двухскоростным лифтом в условиях изменения напряжения питания .....                                                                       | 15 |
| <i>Е. Назарова, В. Осадчий, В. Брылистый.</i> Исследование энергетических характеристик электроприводов электрических транспортных средств .....                                                                        | 19 |
| <i>В. Шамардина, Е. Земцова.</i> Реализация алгоритма расчета механических характеристик многодвигательного асинхронного электропривода в режиме динамического торможения с самовозбуждением .....                      | 24 |
| <i>В. Бушер, Н. Муха, А. Шестака.</i> Особенности высоковольтных каскадных преобразователей частоты при компенсации повреждения Н-модулей .....                                                                         | 29 |
| <i>В. Tchunashvili, A. Petrosyan, A. Gvimradze, T. Gamrekelashvili.</i> Impact of reactive power compensation devices on electromagnetic processes in the power supply and electromagnetic cluttering formation .....   | 35 |
| <i>ბ. ჭუნაშვილი, მ. ქობალია, ა. პეტროსიანი, ნ. რთველაძე.</i> პარალელურად ჩართული სამძარღვა კაბელების ერთიდაიგივე ფაზების ძარღვებს შორის დატვირთვის დენის გადანაწილების გამოკვლევა და უთანაბრობის მიზეზების დადგენა..... | 39 |
| <i>T. Gamrekelashvili, M. Kvrivishvili, K. Tsereteli, N. Kvrivishvili.</i> Automation of 10kV distribution network site on the basis of short-circuit power indicators .....                                            | 43 |

ელექტროენერგეტიკური სისტემები და კომპლექსები. ძალური ელექტრონიკა  
**Electric power systems and complexes. Power electronics**

|                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Е. Сокол, В. Замаруев, Б. Стысло, А. Ересько.</i> Системы активной балансировки аккумуляторных батарей и их энергетическая эффективность .....                                  | 47 |
| <i>Ya. Yakhelef, M. Boulouh, F. Nafa, B. Smaani, A. K. Zarat.</i> Steady state performance improvement of state observer based drive systems under load variation conditions ..... | 54 |
| <i>A. Ivakhnov, O. Lazurenko, S. Fedorchuk.</i> Determining Power Energy Hub Boundaries at Decentralized Power Grid .....                                                          | 60 |
| <i>V. Kovalov, Yu. Kovalova.</i> Computer simulation of reactive power of induction motor with thyristor voltage converter .....                                                   | 65 |
| <i>Р. Зайцев.</i> Анализ схемотехнического решения блока электронной нагрузки .....                                                                                                | 71 |
| <i>В. Замаруев Б. Стысло.</i> Цифровая система управления для кооперативного преобразователя .....                                                                                 | 80 |

ინფორმაციული და ციფრული ტექნოლოგიები ენერგეტიკაში  
**Information and digital technologies in Energy Engineering**

|                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Ю. Коваль, Ю. Хуташвили, Н. Иашивили.</i> Вопросы обнаружения метана и моно оксида углерода одним полупроводниковым сенсором.....     | 87  |
| <i>В. Козубовский.</i> Современные электрохимические сенсоры сигнализаторов утечки газа.....                                             | 95  |
| <i>С. Орлов, С. Гетманец.</i> Газосигнализаторы ВАРТА – современный уровень надежности и качества                                        | 100 |
| <i>ლ. იმნაიშვილი, გ. გოდერძიშვილი, მ. ბედინეიშვილი, ნ. იაშვილი, თ. ჭილაძე.</i> გიორგი ნიკოლაძის არითმომეტრის აღდგენა საკითხისათვის ..... | 105 |
| <i>ლ. იმნაიშვილი, მ. ბედინეიშვილი, თ. თაღუა, თ. ჭილაძე.</i> SCADA თუ IoT? .....                                                          | 111 |



**ენერგოეფექტურობა და განახლებადი ენერჯის წყაროები.  
ენერგორესურსების დამზოგავი ტექნოლოგიები ენერგეტიკაში  
Energy efficiency and renewable energy sources.  
Energy Saving technologies in Power Engineering**

|                                                                                                                                                                    |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>P. Hovorov, V. Hovorov, A. Kindinova.</i> Smart-Grid technologies in small energy .....                                                                         | <b>116</b> |
| <i>A. Кулапин, К. Махотило.</i> Усовершенствованная поведенческая модель нагрузки бытового потребителя-просьюмера .....                                            | <b>120</b> |
| <i>D. Danylchenko, K. Minakova, A.Potryvai.</i> Modeling the influence of dustiness of photovoltaic modules on their performance in Matlab .....                   | <b>126</b> |
| <i>G. Tvauri, N. Gendzekhadze, M. Melikidze.</i> Solar Energy efficiency and renewable source as Georgia's energy independence .....                               | <b>132</b> |
| <i>З. Джабуа, А. Гигинеишвилми, С. Ферадзе.</i> Микротвёрдость плёнок моноантимонида эрбия .....                                                                   | <b>136</b> |
| <i>გ. არაბიძე, ნ. არაბიძე, ნ. ხოლოდოვი.</i> წყალბადის ტექნოლოგიების განვითარება მსოფლიოში და მისი გამოყენების პერსპექტივები საქართველოს ენერგეტიკულ სექტორში ..... | <b>139</b> |
| <i>ე. მაჭავარიანი, მ. გიხვაძე, ნ. ქსოვრელი.</i> დუღილის პროცესში წარმოქმნილი რეაქტიული ძალების მოქმედების ვიდეოგადაღების შედეგები .....                            | <b>145</b> |

**ენერგეტიკის ეკონომიკა, მენეჯმენტი, მართვა, რეგულირება  
Power engineering economics, management, administration, regulation**

|                                                                                                                                          |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>N. Dvali, E. Soselia, M. Melikidze.</i> Analysis of The UN Sustainable Development Goal 7 - Affordable & Clean Energy .....           | <b>149</b> |
| <i>A. Samadashvili, N. Kvaraia.</i> Impact of Covid-19 on the Energy Sector Supply Chains .....                                          | <b>153</b> |
| <i>Yu. Papizh.</i> Management of the energy economy of Ukraine: some aspects of the development of mining enterprises .....              | <b>158</b> |
| <i>Yu. Dubiei.</i> Factors of technological development of global power industry and their influence on the ukrainian energy sector..... | <b>164</b> |
| <i>M. Jishkariani.</i> Prerequisites for Hydro Power Plant Design...                                                                     | <b>167</b> |
| <i>D. Advadze, N. Lazashvili.</i> Elaboration of Sustainable Financing Taxonomy for Georgia .....                                        | <b>172</b> |
| <i>დ. ჩომხიძე, თ. ფილიპიძის.</i> ელექტროენერჯიაზე ტარიფების ზრდის ფაქტორები და მისი შემცირების პარადიგმა .....                           | <b>176</b> |

**სპეციალისტების მომზადება ენერგეტიკის მიმართულებით  
Training of specialists in the field of power engineering**

|                                                                                                                                                                                                                        |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Н. Зачена, Ю. Зачена, А. Черный, Л. Герасименко, О. Хребтова.</i> Оценка качества изучения учебных дисциплин в процессе профессиональной подготовки/переподготовки специалистов электроэнергетического профиля..... | <b>182</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|

ელექტრომექანიკური სისტემები. ელექტრომომხმარების ტექნოლოგიები  
Electromechanical systems. Electrical energy consumption technologies

**Математическая модель электропривода электротранспортного средства с синхронным реактивным двигателем**

**Владимир Клепиков, доктор техн. наук, профессор,**

Харьковский политехнический институт, г. Харьков, Украина, эл.почта: klepikov@kpi.kharkov.ua

**Виктор Барский, доктор техн. наук, профессор,**

Международный консорциум «Энергосбережение», г. Харьков, Украина, эл.почта: office@mke.com.ua

**Любовь Волокита,**

Международный консорциум «Энергосбережение», г. Харьков, Украина, эл.почта: office@mke.com.ua

**Роман Афенченко,**

Международный консорциум «Энергосбережение», г. Харьков, Украина, эл.почта: office@mke.com.ua

**Роман Быканов**

Международный консорциум «Энергосбережение», г. Харьков, Украина, эл.почта: office@mke.com.ua

**Виталий Собченко, аспирант**

Харьковский политехнический институт, г. Харьков, Украина, эл.почта: vitalii.sobchenko@ieee.khpi.edu.ua

**Аннотация.** Учитывая известные преимущества синхронного реактивного двигателя (СРД), с целью использования его для электротранспортного средства и изучения характеристик тягового электропривода (ЭП) на основе СРД. Рассмотрены вопросы построения функциональной схемы ЭП и математической модели электро-механической системы электро Автомобиля. Представлена функциональная схема электропривода, приведены уравнения механики, уравнения электро-механического преобразователя энергии и изложены принципы построения управления ЭП.

**Ключевые слова:** электропривод, электротранспорт, СРД, математическая модель.

**Mathematical model of electric vehicle drive with synchronous reluctance motor**

**Vladimir Klepikov, D.Sc in Engineering, Professor,**

Kharkiv Polytechnic Institute, Kharkiv, Ukraine, e-mail: klepikov@kpi.kharkov.ua

**Viktor Barskiy, D.Sc in Engineering, Professor,**

Mezhdunarodnyi konsortsium «Energoberezhenie», Kharkiv, Ukraine, e-mail: office@mke.com.ua

**Lubov Volokita,**

Mezhdunarodnyi konsortsium «Energoberezhenie», Kharkiv, Ukraine, e-mail: office@mke.com.ua

**Roman Afenchenko,**

Mezhdunarodnyi konsortsium «Energoberezhenie», Kharkiv, Ukraine, e-mail: office@mke.com.ua

**Roman Bykanov,**

Mezhdunarodnyi konsortsium «Energoberezhenie», Kharkiv, Ukraine, e-mail: office@mke.com.ua

**Vitalii Sobchenko, postgraduate student,**

Kharkiv Polytechnic Institute, Kharkiv, Ukraine, e-mail: vitalii.sobchenko@ieee.khpi.edu.ua

**Annotation.** Taking into account the known advantages of the synchronous reluctance motor (SynRM), in order to use it for electric vehicles and to study the characteristics of the traction electric drive (ED) on the basis of SynRM. The issues of constructing ED functional scheme and a mathematical model of the electric vehicle electromechanical system are considered. The functional scheme of electric drive is presented, equations of mechanics, equations of electromechanical energy converter are given and principles ED control construction are described.

**Keywords:** electric drive, electric vehicle, SynRM, mathematical model.

**Введение.** Наблюдаемый в настоящее время переход от двигателей внутреннего сгорания (ДВС) к тяговому автоматизированному электроприводу в транспортных средствах[1], неотвратим

и происходит достаточно стремительно. Это обусловлено необходимостью сбережения органических топливных энергоресурсов (ОТР), которые находят широкое применение в промышленности, для производства пластмассы, бытовой химии,

синтетических тканей, резиновой продукции и других продуктов и которые нужно сохранить для последующих поколений. Кроме того переход к электромобилям улучшает экологию окружающей среды, особенно в больших городах, за счет устранения выхлопных газов от автомобилей. Украина, которая лишь наполовину обеспечена топливными энергоресурсами, вынуждена затрачивать значительные валютные средства на их импорт и поэтому повышение энергоэффективности электроприводов имеет большое значение.

В Международном консорциуме «Энергосбережения» разрабатывается синхронный реактивный двигатель для использования в транспортных средствах с электроприводом: электромобили, гибридные автомобили, троллейбусы с автономным ходом (проезд с опущенными штангами), электробусы и др.

Достоинством СРД является отсутствие роторной обмотки, что существенно удешевляет стоимость двигателя и дает ряд других преимуществ:

- снижение потерь энергии;
- повышение надежности и срока службы;
- простота в эксплуатации.

Отличие синхронного реактивного двигателя от двигателя, используемого в известном вентильно-индукторном ЭП, является форма ротора. В СРД зубцы ротора имеют особую геометрию, согласующуюся с силовыми линиями магнитного потока. Одна из возможных форм пластин ротора СРД, представлена на рис. 1.

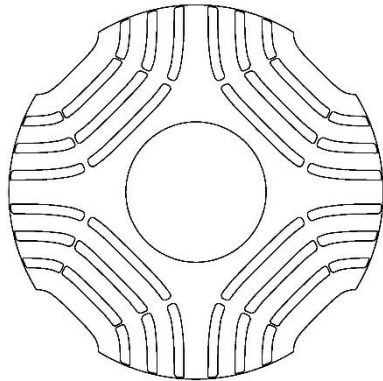


Рис. 1. Форма пластины ротора СРД

**Цель работы.** Построение математической модели электропривода электротранспортного средства с синхронным реактивным двигателем для последующих исследований динамических и статических процессов, протекающих в электромеханической системе.

**Описание системы ЭП.** На рис. 2 представлена обобщенная функциональная схема ЭП электротранспортного средства, в котором используется СРД в качестве тягового электродвигателя.

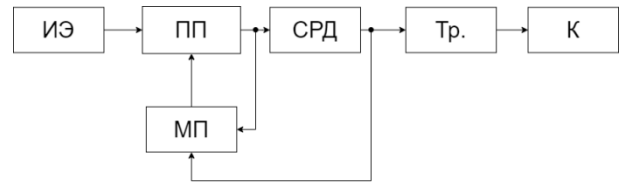


Рис. 2. Функциональная схема ЭП

Проведенные исследования и испытания созданного на кафедре АЕМС НТУ «ХПИ» электромобиля (ЭМБ) на базе автомобиля Lanos, показали целесообразность выполнения источника питания ИЭ в виде сочетания аккумуляторной батареи (АБ) с суперконденсаторной батареей (СБ) на базе ионисторов [2]. Такое гибридное исполнение источника электропитания позволяет существенно улучшить тепловой режим АБ. Это объясняется тем что, поскольку СБ принимает в тормозных режимах рекуперативную энергию движения, а при последующем трогании либо ускорении отдают ее ЭД, то через аккумуляторную батарею не протекают большие токи необходимые для создания динамического момента.

Для стандартных циклов городского движения (ECE 15, EUDC, EUDC, NEDC и др.) характерно наличие большого числа интервалов торможения и ускорения как это показано на рис. 3.

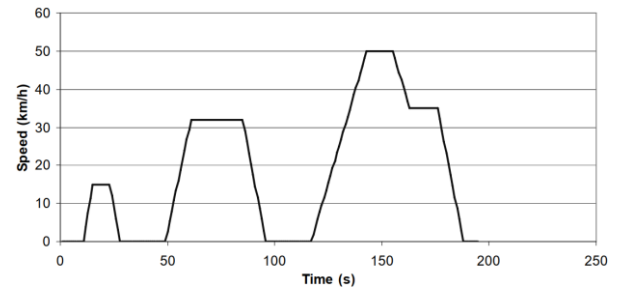


Рис. 3. Цикл городского движения ECE-15

В работе [2] проведен расчет степени снижения нагрузки на АБ при наличии СБ и при ее отсутствии в стандартном городском цикле ECE-15 и показано, что при отношении рекуперированной энергии к энергии, затраченной аккумуляторной батареей на движение равной 0,1, поток энергии протекающий через АБ почти в 1,4 раза меньше, чем при АБ без суперконденсаторной батареи.

Тип полупроводникового преобразователя ПП для питания ЭП определяется типом электродвигателя. Для СРД используется автономный инвертор, угловая скорость электродвигателя задается путем формирования необходимых выходной частоты инвертора и выходного напряжения методом широко импульсной модуляции.

Микропроцессорный блок МП формирует сигналы управления, определяющие порядок коммутации ключей автономного инвертора, обеспечивая низкое значение коэффициента искажения,

требуемую выходную частоту и напряжение для обеспечения требуемого момента двигателя.

В большинстве серийно-выпускаемых электромобилях коробка переключения передач (КПП) отсутствует, однако появились публикации [3], обосновывающие целесообразность применения упрощенной двухскоростной КПП с автоматическим переключением ступеней и согласованием скоростей валов. Наличие такой коробки [3] повышает энергоэффективность электропривода за счет выбора рационального сочетания значения скорости ЭД и развиваемого им момента, исходя из перемещения рабочей точки в зону с большим КПД. Утверждается, что применение подобной коробки не только расширяет диапазон регулирования скорости и момента ЭД, но и повышает энергоэффективность на 10-12%. В работе [4] была обоснована целесообразность синхронизации не только скорости валов КПП, но и их фаз, что повышает надежность и сокращает время переключения, а также упрощает форму кулачков муфты.

В состав трансмиссии Тр. входит симметричный дифференциал, обеспечивающий независимость вращения колес К при поворотах.

**Математическая модель.** Ниже предложена математическая модель электромеханической системы электропривода электротранспортного средства с синхронным реактивным двигателем.

Особенностью уравнений механики в математической модели является нелинейная зависимость силы сопротивления движению автомобиля, вследствие наличия в ней аэродинамической составляющей  $F_a$ , пропорциональной квадрату скорости движения автомобиля:

$$F_a = k_a v^2, \quad (1)$$

где  $v$  – линейная скорость ЭМБ, м/с;

$k_a$  – аэродинамический коэффициент:

Аэродинамический коэффициент зависит от площади лобового сопротивления, коэффициента обтекаемости и плотности воздуха [5]:

$$k_a = \frac{1}{2} C_x \rho_a S, \quad (2)$$

где  $C_x$  – коэффициент аэродинамического сопротивления (коэффициент обтекаемости),  $\text{Н} \cdot \text{с}^2 / (\text{м} \cdot \text{кг})$ ;

$\rho_a$  – плотность воздуха ( $1,29 \text{ кг/м}^3$  при нормальных условиях);

$S$  – площадь лобового сопротивления,  $\text{м}^2$ ;

Кроме аэродинамической силы, сопротивление движению оказывает сила трения качения колес  $F_{\text{тр}}$ :

$$F_{\text{тр}} = \mu m g \cos \alpha, \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения качения;

$m$  – масса ЭТ, кг;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $\alpha$  – угол наклона участка дороги.

В математической модели также учитывается увеличение силы сопротивления при движении

электротранспортного средства по дороге с уклоном:

$$F_y = mg \sin \alpha, \quad (4)$$

где  $F_y$  – сила сопротивления движению по наклонной плоскости, Н.

При составлении математической модели в отличие от наиболее часто используемого приведения механических величин к скорости вала двигателя, в настоящей модели осуществляется приведение к линейной скорости движения ЭТ.

В этом случае тяговое усилие  $F_T$  на колесах равно:

$$F_T = \frac{M i_{\text{ТР}} \eta_{\text{ТР}}}{r_K}, \quad (5)$$

где  $M$  – момент электродвигателя, Нм;  $\eta_{\text{ТР}}$  – КПД трансмиссии;  $r_K$  – радиус колеса, м;  $i_{\text{ТР}}$  – передаточное число трансмиссии:

$$i_{\text{ТР}} = i_{\text{КПП}} i_{\text{д}}, \quad (6)$$

где  $i_{\text{КПП}}$  – передаточное число КПП;  $i_{\text{д}}$  – передаточное число механического дифференциала.

Приведение вращающихся масс к линейной скорости осуществляется по соотношению:

$$m'_e = \frac{J_D}{(i_{\text{ТР}} r_K)^2} + \frac{4J_K}{r_K^2}, \quad (7)$$

где  $m'_e$  – приведенная масса вращающихся тел, кг;  $J_D$  – момент инерции двигателя,  $\text{кгм}^2$ ;  $J_K$  – момент инерции колеса,  $\text{кгм}^2$ .

Движение транспортного средства описывается известным соотношением:

$$F_T - F_c = m_{\Sigma} \frac{dv}{dt}, \quad (8)$$

где  $F_c$  – сила сопротивления движению, Н;

$\frac{dv}{dt}$  – ускорение ЭТ,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$m_{\Sigma}$  – полная приведенная масса, кг:

$$m_{\Sigma} = m_{\text{ЭТ}} + m'_e, \quad (9)$$

где  $m_{\text{ЭТ}}$  – масса электромобиля, кг.

Математическая модель синхронного реактивного двигателя строится при следующих допущениях [6, 7]:

1) Обмотки фаз статора ЭД имеют одинаковые параметры (число витков, активное сопротивление и др.);

2) распределение магнитного поля по окружности статора принимается синусоидальным;

3) неравномерность воздушного зазора между статором и ротором и изменение магнитной проводимости не учитывается;

4) механические потери и потери в стали не учитываются.

Уравнения СРД энергии базируются:

- на преобразовании Кларка, переход от неподвижной трехмерной системы координат А-В-С к неподвижной двухмерной системе  $\alpha$ - $\beta$ ;

- на преобразовании Парка, переход от неподвижной двухмерной системы  $\alpha$ - $\beta$  к подвижной двухмерной системе координат d-q. При этом ось d совпадает с осью полюса ротора, а ось q является перпендикулярной и имеет сдвиг относительно оси d 90 эл. град.

Система уравнений, описывающая электро-механическое преобразование энергии имеет вид:

$$\begin{cases} L_d \frac{di_d}{dt} = u_d - Ri_d + L_q \omega_{er} i_q \\ L_q \frac{di_q}{dt} = u_q - Ri_q - L_d \omega_{er} i_d \\ M = \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_d i_q \end{cases}, \quad (10)$$

где  $L_d, L_q$  – индуктивность по оси d и по оси q, соответственно, Гн;

$i_d, i_q$  – проекция обобщенного вектора тока на ось d и на ось q, соответственно, А;

$u_d, u_q$  – проекция обобщенного вектора напряжения на ось d и на ось q, соответственно, В;

$R$  – активное сопротивление статора, Ом;

$Z_p$  – количество пар полюсов ЭД;

$\omega_{er}$  – электрическая угловая скорость ротора, рад/с:  
 $\omega_{er} = Z_p \omega_m$ , (11)

где  $\omega_m$  – механическая угловая скорость ротора, рад/с.

Реализация соотношений (10)-(11) в структурной форме, используемая в компьютерной модели приведена на рис. 4.

Управление синхронным реактивным двигателем осуществляется по известным принципам построения систем векторного управления [6]. Варианты имитационных моделей данного способа управления в библиотеке SimPowerSystem Simulink приведены в литературе [8, 9].

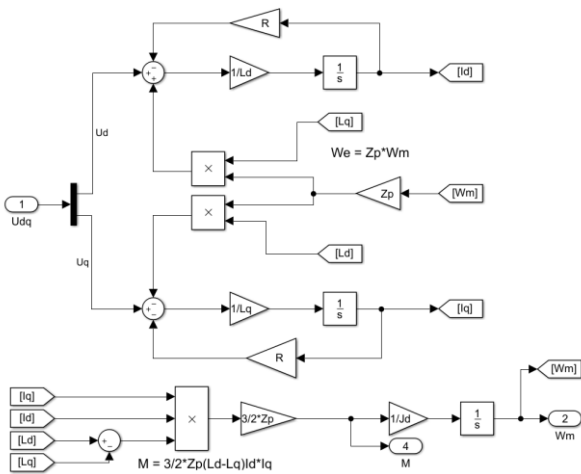


Рис. 4. Модель СРД в пакете Matlab/Simulink

**Заключение.** Совокупность вышеприведенных математических моделей создает возможность компьютерного моделирования электромагнитных и механических процессов в электро-механической системе и использование результатов моделирования для сопоставления с результатами испытаний и экспериментальных исследований, которые проводятся в настоящее время в Международном консорциуме «Энергосбережения».

### Литература

1. Шидловский А.К. Применение суперконденсаторов в автономном аккумуляторном электро-транспорте / В.Б. Павлов, А.В. Попов // Технічна електродинаміка. 2008. № 4. С. 43—47.
2. Volodymyr Klepikov, Andrii Rotaru. To use of supercapacitors in an electric vehicle's power supply. Advanced Technology (KhPIWeek), IEEE KhPI Week on, Kharkiv, 2020, pp. 446-449.
3. Ren Q., Crolla D. A. and Morris A. Effect of transmission design on Electric Vehicle (EV) performance, «IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference», Dearborn, 2009, pp. 1260-1265.
4. Клепиков В.Б., Сакун С.В., Курочкин Д.А. Керування електроприводом електромобіля з енергоефективною коробкою передач, Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика», № 9 (1334), 2019, с. 94-98.
5. Мацкерле Ю. Современный экономичный автомобиль/Пер. с чешск. В. Б. Иванова. М.: Машиностроение, 1987. 320 с.
6. Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока – Иваново: ИГЭУ, 2008. 298 с.
7. Кононенко, Е.В. Синхронные реактивные машины. М.: Энергия, 1970. 208 с.
8. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.
9. Synchronous reluctance machine torque control. Help center MathWorks. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/synchronous-reluctance-machine-torque-control.html> - Дата обращения 31 мая 2021.

### References (transliterated)

1. Volodymyr Klepikov, Andrii Rotaru. To use of supercapacitors in an electric vehicle's power supply. Advanced Technology (KhPIWeek), IEEE KhPI Week on, Kharkiv, 2020, pp. 446-449.
2. Ren Q., D. A Crolla and Morris A. Effect Of transmission design on Electric Vehicle (EV) performance, «IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference», Dearborn, 2009, pp. 1260-1265.

3. Spanoudakis P., Tsourveloudis N. C., Koumartzakis G., Krahtoudis A., Karpouzis T. and Tsinaris I. Evaluation of a 2-speed transmission on electric vehicle's energy consumption, «IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)», Florence, 2014, pp. 1 - 6.
4. Klepikov V.B., Sakun Ye.V., Kurochkin D.A. Keruvannia Elektroprivodom Elektromobilia Z Enerhoefektyvnoiu Korobkoiu Peredach, Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu «KhPI». Serii «Problemy Avtomatyzovanoho Elektroprivodu. Teoriia I Praktyka», №9 (1334), 2019, pp. 94-98.
5. Mackerle YU. Sovremennyj ekonomichnyj avtomobil'/Per. s cheshsk. V. B. Ivanova. M.: Mashinostroenie, 1987. 320 p.
6. Vinogradov, A.B. Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka – Ivanovo: IGEU, 2008. 298 p.
7. Kononenko, E.V. Sinhronnye reaktivnye mashiny. – M.: Energiya, 1970. – 208 p.
8. German-Galkin S.G. Matlab & Simulink. Proektirovanie mekhatronnyh sistem na PK. SPb.: KORONA-Vek, 2008. 368p.
9. Synchronous reluctance machine torque control. Help center MathWorks. Rezhim dostupa: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/synchronous-reluctance-machine-torque-control.html> - Data obrashcheniya 31 may 2021



## Перспективы использования облачных технологий в задачах электропривода

**Николай Анищенко** – кандидат технических наук, доцент

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры «Автоматизированные электромеханические системы»; г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0002-2720-3671; e-mail: [anishchenkonikolay@gmail.com](mailto:anishchenkonikolay@gmail.com)

**Валентин Залеский** – аспирант

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; г. Харьков, Украина; e-mail: [valentin11091994@gmail.com](mailto:valentin11091994@gmail.com)

**Аннотация.** Среди наиболее распространенных причин ведущих к отказу оборудования электроприводов на первый план выходят механические. Износ одного из механических узлов может привести к цепной реакции, что может повлечь за собой выход из строя не только механики, но и электрооборудования вместе с электроникой. Кроме того, даже не критический износ механических узлов влечет за собой изменения параметров автоматизированной системы управления, которые в свою очередь влияют на качество переходных процессов и устойчивость системы. Традиционные SCADA-системы и алгоритмы управления не соответствуют требованиям времени. В связи с этим представлены решения на базе сервисов, предоставляемых облачной платформой Amazon. Эти сервисы соответствуют предъявляемым требованиям, так как способны осуществить мониторинг, сигнализацию, прогнозирование и адаптацию к изменению параметров автоматизированной системы управления.

**Ключевые слова:** электропривод, автоматизированная система управления, устойчивость системы, облачная платформа, SCADA системы

## Prospects of using cloud technologies in solving electric drive tasks

**Nikolay Anishchenko**, Candidate of Technical Science, Professor

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, ORCID: 0000-0002-2720-3671; e-mail: [anishchenkonikolay@gmail.com](mailto:anishchenkonikolay@gmail.com).

**Valentyn Zaleskyi**, Doctoral Student

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: [valentin11091994@gmail.com](mailto:valentin11091994@gmail.com).

**Abstract.** Among failures in motor drive the mechanicals are the most common. The deterioration of one of the mechanical components can lead to a chain reaction, which can lead to not only mechanical failure, but also the electrical as well as electronics failure. Additionally, even non-critical wear of mechanical assemblies make changes in the automated control system parameters, which affects both the transient process quality and the system stability. Traditional SCADA systems and control algorithms do not meet the requirements of the time. Regarding this, solutions are presented based on services provided by Amazon cloud platform, which meet the requirements, since it's capable of monitoring, alarming, forecasting and adapting to changes in automates control system parameters.

**Keywords:** electric drive, automated control system, system stability, cloud platform, SCADA systems.

**Введение.** Известно, что среди наиболее распространенных причин ведущих к отказу оборудования электроприводов (ЭП) на первый план выходят механические. В качестве примера можно привести чрезмерный износ механических передач, шестерен редукторов (при их наличии), неисправности двигателя (перегрузка двигателя, износ подшипников, нарушенное центрирование).

Износ одного из механических узлов может привести к цепной реакции, что может повлечь за собой выход из строя не только механики, но и электрооборудования вместе с электроникой. При этом замена одного из узлов уже не поможет в решении проблемы.

Кроме того даже не критический износ механических узлов влечет за собой неприятные

последствия: к ним относятся изменения параметров (момент сопротивления, момент инерции, жесткость) автоматизированной системы управления (АСУ), которые в свою очередь влияют на качество переходных процессов (ПП) и устойчивость системы.

Поэтому с точки зрения обеспечения работоспособности системы важным является контроль износа посредством мониторинга параметров и сигнализации о выходе их за рамки допустимых пределов для проведения плановых ремонтов или замены узлов. Также немаловажным является адаптация АСУ к изменениям параметров вследствие механического износа.

Традиционные SCADA системы и алгоритмы управления не соответствуют требованиям

времени, т.к. их сложно масштабировать, они уязвимы перед хакерскими атаками, довольно сложно эффективно реализовать современные алгоритмы управления на базе машинного обучения (ограничены ресурсами устройств, на которых они реализованы), кроме того они не способны к прогнозированию неисправностей.

В связи с вышеперечисленными факторами целесообразна разработка решений на базе сервисов предоставляемых облачными платформами, которые соответствуют предъявляемым требованиям, т.к. способны осуществить мониторинг, сигнализацию, прогнозирование и адаптацию (благодаря машинному обучению).

На данный момент существует множество облачных платформ, среди которых лидерами являются Amazon Web Services (AWS) [1], Microsoft Azure [2] и Google Cloud Platform [3]. Сервисы, которые они предоставляют, схожи по своему принципу, поэтому в данной статье будут предложены решения на основании самой популярной платформы – AWS.

**Цель работы** состоит в рассмотрении решения вышеизложенных проблем за счет интеграции оборудования с облачной платформой Amazon, средствами ее сервисов.

**Изложение основного материала.** AWS IoT Core предоставляет программное обеспечение для устройств, которое помогает интегрировать устройства IoT (Internet of Things) в решения на основе AWS IoT [4] (рис. 1).

IoT – это сеть физических объектов, имеющих встроенные технологии, которые позволяют осуществлять взаимодействие с внешней средой, передавать сведения о своем состоянии и принимать информацию (данные) извне.

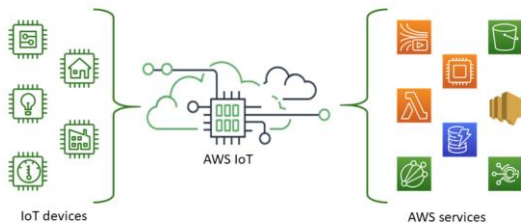


Рис. 1. Программное обеспечение AWS IoT

AWS IoT Core поддерживает следующие протоколы:

- MQTT (Message Queuing and Telemetry Transport);
- MQTT по WSS (Websockets Secure);
- HTTPS (Hypertext Transfer Protocol-Secure);
- LoRaWAN (Long Range Wide Area Network).

Архитектура AWS IoT Core представлена 3 блоками [5] (рис. 2):

- AWS IoT device software – предоставляет программное обеспечение для поддержки устройств IoT;
- AWS IoT control services – обеспечивают подключение к другим сервисам AWS IoT;
- AWS IoT data services – обеспечивают анализ данных, их визуализацию и обработку событий с устройств.

На рис.3 показано как посредством AWS IoT Core сервисов происходит коммуникация между устройством и другими сервисами платформы.

Связь с устройством защищена безопасными протоколами, использующими сертификаты X.509.

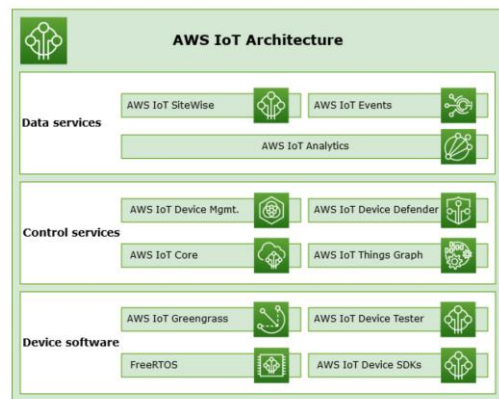


Рис. 2. Архитектура AWS IoT

Можно использовать протокол MQTT напрямую или MQTT через WebSocket для публикации и подписки. Message broker обеспечивает безопасный механизм для устройств и приложений AWS IoT для публикации и получения сообщений друг от друга. Rules engine передает данные от Message broker к другим сервисам платформы для хранения и дальнейшей обработки (на рисунке показана лишь часть сервисов). Device Shadow сервис сохраняет последние состояния устройства, чтобы приложения могли взаимодействовать с устройством даже, если оно вдруг окажется отключенным от сети.

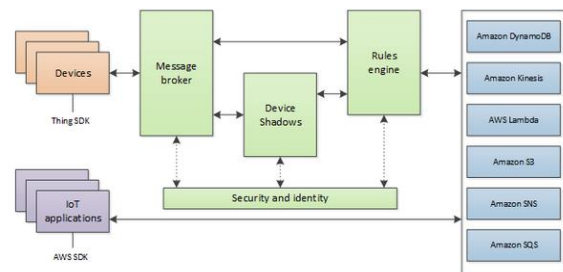


Рис. 3. Коммуникация между устройством и сервисами платформы

Среди наиболее популярных универсальных устройств, которые поддерживаются платформой, являются одноплатные компьютеры серии

Raspberry Pi [6] и контроллеры серии Arduino [7]. Количество подключаемых датчиков/устройств определяется серией конкретного устройства и количеством модулей подключаемых к его периферии.

Для интеграции универсальных устройств нужно проделать следующие шаги [8]:

- зарегистрировать устройство в сервисе AWS IoT (автоматически создастся эндпоинт);
- установить библиотеку AWS IoT Device SDK на устройство;
- привязать сертификат к зарегистрированному устройству и скопировать сертификаты на устройство;
- создать политику (policy) и привязать ее к устройству для обеспечения дополнительной безопасности.

Если говорить о специализированных устройствах, то на рынке появились компании, которые предоставляют интеграцию оборудования с облачными платформами.

Компания Softing предлагает аппаратный модуль и ПО tManager для интеграции программируемого логического контроллера (ПЛК) ControlLogix с облачными платформами [9], что позволяет подключить оборудование к AWS IoT Core буквально за 10 мин [10].

CloudRail предлагает свой аппаратный модуль CloudRail.Box и ПО для интеграции датчиков [11], ПЛК, SCADA систем [12].

CloudRail.Box использует удаленные модули ввода-вывода, так называемые IO-Link Masters, для подключения к датчикам. Один CloudRail.Box может взаимодействовать с 8 модулями ввода-вывода, если они находятся в одной сети. Каждый модуль ввода-вывода имеет 4 или 8 портов.

Каждый порт модуля ввода-вывода можно использовать как: вход IO-Link, выход IO-Link, цифровой вход, цифровой выход (необходимо использовать реле 24 В), аналоговый вход 4... 20 мА (с адаптером DP2200 или модулем AL2205), аналоговый выход 4... 20 мА (с модулем AL2205).

CloudRail.Box может работать либо с отдельно установленными датчиками и модулями ввода-вывода, либо использовать существующее оборудование, которое уже подключено к ПЛК (благодаря входу Y-Path).

OPC UA коннектор позволяет подключить любой источник OPC-UA, например ПЛК, системы SCADA или промежуточное программное обеспечение, такое как PTC Kerware или Ignition.

Рассмотрим, как может быть полезна интеграция с платформой для решения вышеизложенных проблем.

Ключевым элементом любого ЭП является электродвигатель и выход его из строя грозит как простоем оборудования, так и финансовыми затратами на его замену/ремонт. Поэтому хорошо

иметь возможность отслеживать ключевые параметры ЭД в реальном времени, получать оповещения о выходе таковых за рамки дозванных, а по возможности прогнозировать, когда параметры выйдут за эти рамки.

Согласно исследованию, проведенному Институтом инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) [13], 44% неисправностей электродвигателей связаны с подшипниками, а 24% – со статором.

Механические неполадки в подшипниках вызывают увеличение вибраций и отклонения тока от номинального, а также превышение заданной температуры двигателя под нагрузкой, что может быть обнаружено посредством датчиков вибрации, датчика тока и датчика температуры.

При наличии, например устройства Arduino Uno, которое интегрировано с платформой, а также подключенных датчиков:

- трехосевого акселерометра (ADXL345) для измерения вибрации;
- датчика тока (ACS712);
- датчика температуры (DS18B20)

при помощи сервисов IoT SiteWise Monitor[14], IoT Events [15], SNS [16], Sagemaker [17], Lambda [18] можно реализовать мониторинг, сигнализацию, прогнозирование механического износа и адаптацию АСУ.

Пересылая показания измерения датчиков через Message broker посредством Rule engine с помощью SiteWise Monitor можно осуществить мониторинг показаний в реальном времени. Посредством Rule engine мы также можем передавать показания в IoT Events для отправки сообщений с помощью SNS бригаде обслуживания при превышении допустимых значений.

Построение модели в Sagemaker, которая будет предсказывать будущие показания датчиков на основании текущих с помощью Long-Short-Term Memory алгоритма, позволит прогнозировать неисправности двигателя. Решение отличается от предыдущего тем, что показания датчиков через Message broker передаются в Lambda, где вызывается модель, прогноз которой уже передается в IoT Events. Если значение выходит за рамки допустимого, то отправляется оповещение бригаде обслуживания через SNS.

Рассмотрим случай адаптации параметров регулятора. Допустим, есть интегрированный с платформой ПЛК, на котором реализован ПИ-регулятор, который подает управляющий сигнал на силовой преобразователь. Тогда адаптацию АСУ к механическому износу можно осуществить, реализовав плановую автонастройку регулятора (один раз в определенный период времени) на базе облачных сервисов.

Для этого нужно предварительно построить и обучить модель нейросетевого настройщика в

сервисе Sagemaker, которая на основании параметров системы будет определять оптимальные значения пропорционального и интегрирующего коэффициентов усиления ПИ-регулятора.

После этого можно осуществлять перенастройку регулятора с помощью сервиса Lambda, который будет принимать новые параметры системы от Message broker посредством Rule engine согласно заданному расписанию, и вызывать модель нейронастройщика с новыми параметрами системы, а затем пересылать в ПЛК новые значения коэффициентов регулятора с помощью Message broker.

**Выводы.** Как видно из представленных решений, интеграция с облачной платформой AWS позволяет эффективно реализовать мониторинг, сигнализацию, прогнозирование параметров, свидетельствующих об износе механических узлов, а также адаптацию АСУ к влиянию механического износа.

Реализовав шаблон инфраструктуры в облачной платформе в виде кода (IaC) с помощью сервиса CloudFormation [19] можно быстро и легко масштабировать возрастающее количество нового оборудования и датчиков.

AWS гарантирует безопасность своей инфраструктуры 24\*7. Пользователь может автоматизировать процесс проверки безопасности приложений, что в сумме обеспечит надежную защиту от хакерских атак.

Реализация интеллектуальных способов управления в облаке посредством алгоритмов машинного обучения дает преимущество в быстродействии за счет неограниченного и гибкого выделения вычислительных ресурсов.

Предложенные решения позволят иметь оптимальное количество обслуживающего персонала, наличие на складах всех необходимых для ремонта комплектующих, неизменно качественную и бесперебойную работу оборудования.

#### Литература

1. Официальный сайт Amazon [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://aws.amazon.com/?nc2=h\\_lg](https://aws.amazon.com/?nc2=h_lg)
2. Официальный сайт Amazon Azure [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://azure.microsoft.com/en-us/>
3. Официальный сайт Amazon GCP [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cloud.google.com/>
4. Веб документация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.aws.amazon.com/iot/latest/developerguide/what-is-aws-iot.html>
5. Веб документация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.aws.amazon.com/iot/latest/developerguide/aws-iot-how-it-works.html>

6. Официальный сайт Raspberry Pi [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.raspberrypi.org/products/>
7. Официальный сайт Arduino [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.arduino.cc/en/Main/Products>
8. Веб документация [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.aws.amazon.com/iot/latest/developerguide/connecting-to-existing-device.html>
9. Веб документация [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://data-intelligence.softing.com/us/products/iot-gateways/rockwell-in-chassis-modules/eatm-tmanager-controllogix/>
10. Веб документация [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://data-intelligence.softing.com/us/tmanager-connects-controllogix-and-compactlogix-to-aws-iot-sitewise-for-industrial-analytics-at-scale/>
11. Веб документация [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cloudrail.com/cloudrail-iot-box/io-link-connector/>
12. Веб документация [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cloudrail.com/cloudrail-iot-box/opc-ua-connector/>
13. S. Korkua, H. Jain, W. Lee, C. Kwan, "Wireless Health Monitoring System for Vibration Detection of Induction Motors", IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), 2010.
14. Веб документация [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.aws.amazon.com/iot-sitewise/latest/userguide/what-is-sitewise.html>
15. Веб документация [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.aws.amazon.com/iotevents/latest/developerguide/what-is-iotevents.html>
16. Веб документация [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.aws.amazon.com/sns/latest/dg/welcome.html>
17. Веб документация [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://aws.amazon.com/sagemaker/>
18. Веб документация [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://aws.amazon.com/lambda/>

#### References (transliterated)

1. Ofizialny site Amazon [Electrony resurs]. – Regim dostupa: [https://aws.amazon.com/?nc2=h\\_lg](https://aws.amazon.com/?nc2=h_lg)
2. Ofizialny site Amazon Azure [Electrony resurs]. – Regim dostupa: <https://azure.microsoft.com/en-us/>
3. Ofizialny site Amazon GCP [Electrony resurs]. – Regim dostupa: <https://cloud.google.com/>
4. Veb dokumentaciya [Electrony resurs]. – Regim dostupa: <https://docs.aws.amazon.com/iot/latest/developerguide/what-is-aws-iot.html>

5. Veb dokumentaciya [Electrony resurs]. – Regim dostupa: <https://docs.aws.amazon.com/iot/latest/developerguide/aws-iot-how-it-works.html>
6. Oficialny site Raspberry Pi [Electrony resurs]. – Regim dostupa: <https://www.raspberrypi.org/products/>
7. Oficialny site Arduino [Electrony resurs]. – Regim dostupa: <https://www.arduino.cc/en/Main/Products>
8. Veb dokumentaciya [Electrony resurs]. – Regim dostupa: <https://docs.aws.amazon.com/iot/latest/developerguide/connecting-to-existing-device.html>
9. Veb dokumentaciya [Electrony resurs]. – Regim dostupa: <https://data-intelligence.softing.com/us/products/iot-gateways/rockwell-in-chassis-modules/eatm-tmanager-controllogix/>
10. Veb dokumentaciya [Electrony resurs]. – Regim dostupa: <https://data-intelligence.softing.com/us/tmanager-connects-controllogix-and-compactlogix-to-aws-iot-sitewise-for-industrial-analytics-at-scale/>
11. Veb dokumentaciya [Electrony resurs]. – Regim dostupa: <https://cloudrail.com/cloudrail-iot-box/ io-link-connector/>
12. Veb dokumentaciya [Electrony resurs]. – Regim dostupa: <https://cloudrail.com/cloudrail-iot-box/opc-ua-connector/>
13. S. Korkua, H. Jain, W. Lee, C. Kwan, “Wireless Health Monitoring System for Vibration Detection of Induction Motors”, IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference(I&CPS), 2010.
14. Veb dokumentaciya [Electrony resurs]. – Regim dostupa: <https://docs.aws.amazon.com/iot-sitewise/latest/userguide/what-is-sitewise.html>
15. Veb dokumentaciya [Electrony resurs]. – Regim dostupa: <https://docs.aws.amazon.com/iotevents/latest/developerguide/what-is-iotevents.html>
16. Veb dokumentaciya [Electrony resurs]. – Regim dostupa: <https://docs.aws.amazon.com/sns/latest/dg/welcome.html>
17. Veb dokumentaciya [Electrony resurs]. – Regim dostupa: <https://aws.amazon.com/sagemaker/>
18. Veb dokumentaciya [Electrony resurs]. – Regim dostupa: <https://aws.amazon.com/lambda/>



## Исследование системы управления двухскоростным лифтом в условиях изменения напряжения питания

**Елена Назарова**, кандидат технических наук, доцент  
Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, nazarova16@gmail.com  
**Владимир Осадчий**, кандидат технических наук, доцент  
Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, w.osadchiy@gmail.com  
**Сергей Шульженко**, аспирант  
Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, serega\_shulzhenko14@ukr.net

**Аннотация.** Создана имитационная модель двухскоростного электропривода лифта и определена зависимость точности остановки от степени загрузки кабины лифта. На основе предложенного метода идентификации разработана система управления, снижающая влияние степени загрузки кабины лифта на точность его позиционирования. Исследовано влияние изменения напряжения питания на точность разработанной системы управления.

**Ключевые слова:** лифт, система автоматического управления, напряжение питания, точность позиционирования.

## Investigation of a two-speed elevator control system under conditions of changing supply voltage

**Olena Nazarova**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Zaporizhzhie Polytechnic National University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: nazarova16@gmail.com  
**Volodymyr Osadchyy**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Zaporizhzhie Polytechnic National University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: w.osadchiy@gmail.com  
**Serhii Shulzhenko**, Postgraduate  
Zaporizhzhie Polytechnic National University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: serega\_shulzhenko14@ukr.net

**Annotation.** A simulation model of a two-speed electric drive of the elevator has been created and the dependence of the stopping accuracy on the degree of loading of the elevator car has been determined. On the basis of the proposed identification method, a control system has been developed that reduces the influence of the degree of loading of the elevator car on the accuracy of its positioning. The influence of changes in the supply voltage on the accuracy of the developed control system has been investigated.

**Keywords:** elevator, automatic control system, supply voltage, positioning accuracy.

**Введение.** Растущий парк лифтов требует непрерывного совершенствования техники монтажа и технического обслуживания этих машин с целью повышения надежности и безопасности их применения. Главными технико-экономическими показателями при обосновании технических решений различных систем лифтовых электроприводов является способность обеспечить оптимальные комфортные условия перевозки, энергетическую эффективность и массогабаритные показатели. Как показывают исследования, лифты находятся в разделе оборудования с повышенными энергозатратами, так как на них приходится до 10% всего энергопотребления здания или сооружения [1]. Цена на электроэнергию постоянно увеличивается, в связи с этим возникает вопрос ее сбережения и способов экономичного использования оборудования. Согласно представленным расчетам в [2] существует возможность определения энергопотребления лифтовой установки, при различных режимах работы,

путем снятия значений необходимых параметров непосредственно на исследуемом лифте. Таким образом, данный метод применим ко всем видам лифтовых установок как установленных давно, так и новых. В результате этого расчета можно определить эффективность использования определенной лифтовой установки для данных условий эксплуатации.

**Цель работы** – разработать систему управления двухскоростным лифтом, исследовать влияния напряжения питания сети на ее работу посредством компьютерного моделирования.

### Материалы исследования.

Современным и актуальным направлением развития электромеханики является переход от неуправляемых автоматизированных систем в управляемых, которые обеспечивают значительное улучшение динамических и энергетических показателей электропривода и механизма. В области лифтов - это замена неуправляемых асинхронных элект-



троп приводов с двухскоростными двигателями на частотно управляемые электропривода с односкоростными двигателями, а также внедрение безредукторных лебедок с тихоходными приводными двигателями [3].

Для решения проблемы модернизации устаревшего лифтового оборудования проведен анализ наиболее популярных кинематических схем. Так же на начальном этапе исследования определено, что большое количество эксплуатируемых лифтов имеют двухскоростные асинхронные электропривода. Поэтому был взят за основу двигатель типа 4АН-250-6/24НЛБ мощностью 16/4 кВт. Принята кинематическая схема с машинным помещением, расположенным сверху. Рассчитана и построена механическая характеристика электропривода на основании использования формулы Клосса.

Некоторое количество исследований [4,5] была направлена на подробное изучение влияния электрических помех на работу лифта, исследования механических и электромеханических характеристик электропривода, альтернатив использования микропроцессорных САУ. Но идентификация массы груза, находящегося в кабине, осталась почти без внимания [6].

С целью упрощения описания системы процессы, связанные с наличием упругих связей между элементами лифта, не рассматривались. Модель лифта, представлена на рис.1, это сложная система, которая в свою очередь состоит из ряда подсистем: асинхронного двухскоростного электродвигателя, момента сопротивления, момента инерции, тормоза

и так далее. Асинхронный двигатель представлен подсистемой AD1 на основе упрощенной формулы Клосса. Изменение значения синхронной скорости с 1000 об / мин на 250 об / мин осуществляется переключателем на входе подсистемы. Критический момент для малой скорости принято 70% от критического момента для большой скорости.

Подсистема момента сопротивления Moment soprotiv выражена уравнением (1)

$$M_c = \frac{g \cdot r \cdot (m_{gr} + m_{kab} - m_{pr})}{2 \cdot i \cdot \eta_n}, \quad (1)$$

где  $r$  – радиус канатоведущего шкива;  $m_{gr}$  – масса груза;  $m_{kab}$  – масса кабины;  $m_{pr}$  – масса противовеса;  $i$  – передаточное число редуктора;  $\eta_n$  – КПД подъемной установки, учитывающий трение в направляющих.

Блок момента инерции представлен уравнением (2)

$$J = \frac{r^2 \cdot (m_{gr} + m_{kab} + m_{pr} + m_{kan})}{i^2} + J_0, \quad (2)$$

где  $m_{kan}$  – масса канатов;  $J_0$  – момент инерции ротора.

Для различных степеней загрузки кабины от 0 до 100% с шагом 20% было проведено моделирование для определения угловой скорости вращения.

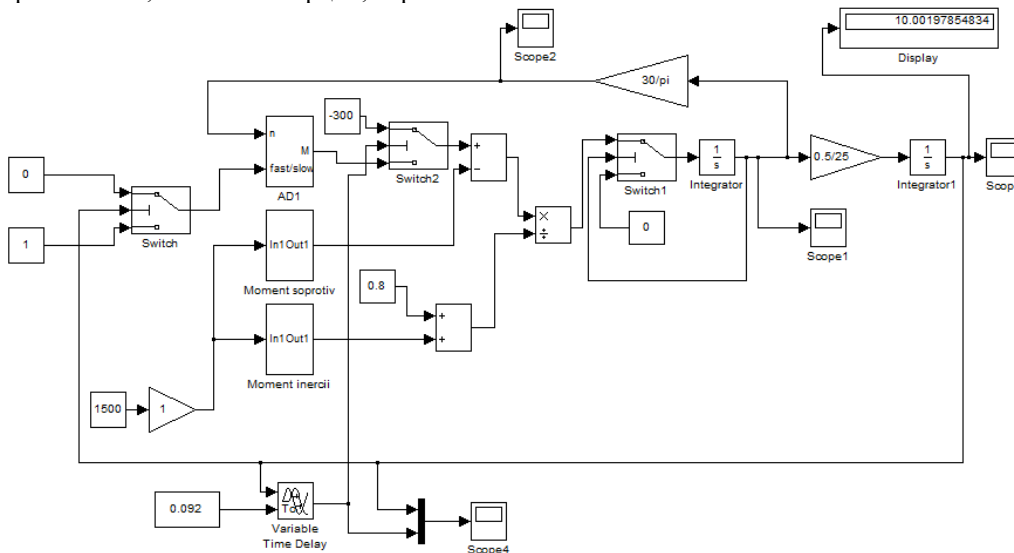


Рис. 1. Структурна схема модели лифта

На основании результатов, подтверждающих адекватность разработанных компьютерной и физической моделей к последней добавлено модель подсистемы измерения скорости вращения вала двигателя [6]. Также была разработана подсистема,

позволяющая рассчитать ширину импульса в начальный момент движения кабины. Определено, что достаточно первых 12 импульсов, т.е. тех, что получены с датчика за первые два оборота вала двигателя. Проведено моделирование для различ-

ных степеней загрузки. Для дальнейших расчетов сделано предположение, выбрать 8 промежуточных значений степени загрузки кабины, как образцовые, условно стандартные от -20 до 120% с шагом 20%. Данное предположение сделано для более высокой точности определения степени загрузки кабины в интервалах от 0 до 10% и от 90 до 100% загрузки кабины. В предыдущих исследованиях расчеты происходили в среде программы Excel. Для улучшения качества и скорости обработки результатов моделирования, все расчеты и преобразования теперь происходят непосредственно в имитационной модели лифта в среде Matlab Simulink (рис. 2).

Значение импульсов, полученные в результате первых двух оборотов вала двигателя при пуске, попадают в подсистему определения среднеквадратичных значений, где происходит сравнение со стандартными значениями степени загрузки кабины. После расчета суммы среднеквадратичных значений импульсов происходит построение условной параболы и определения ее экстремума. Уравнение параболы находится через рассчитанные коэффициенты матрицы для каждого интервала степени загрузки кабины отдельно.

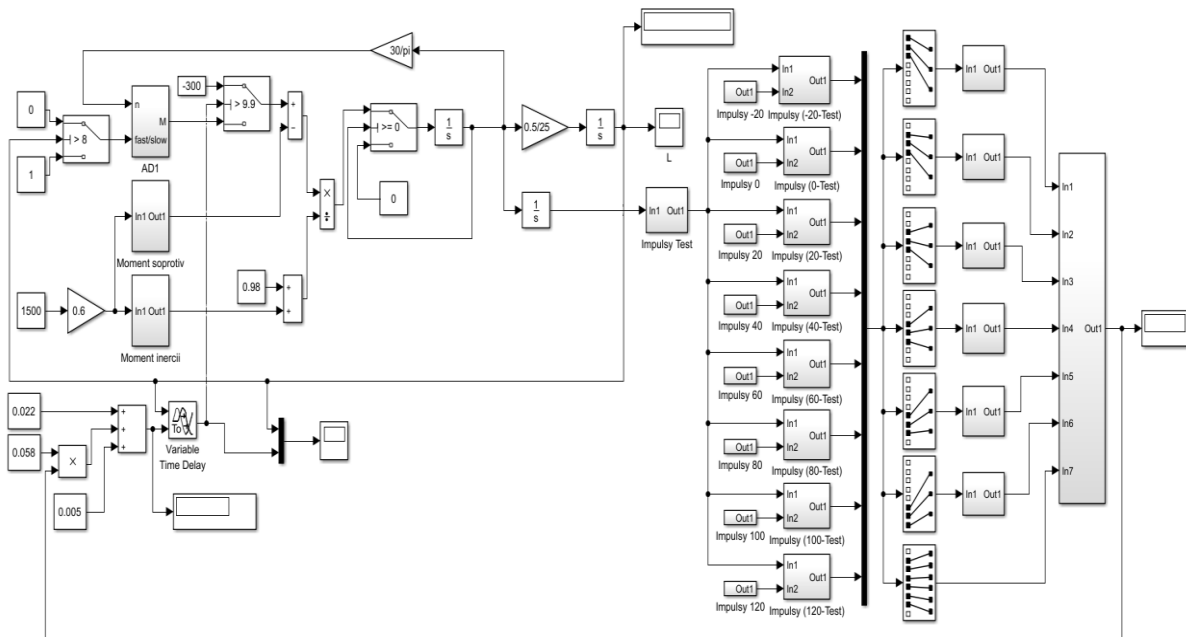


Рис. 2. Имитационная модель системы управления лифта с идентификацией

В результате моделирования в диапазоне загрузки от 0 до 100% получено, что степень загрузки кабины существенно влияет на скорость вращения двигателя при разгоне. Так как время разгона разное, то и точность позиционирования для различной степени загрузки будет меняться. Для повышения точности остановки в заданном положении для разных степеней загрузки аналитическим способом вычислена временная задержка перед остановкой (рис. 3). Она корректирует время отключения двигателя и наложения тормоза в момент точной остановки.

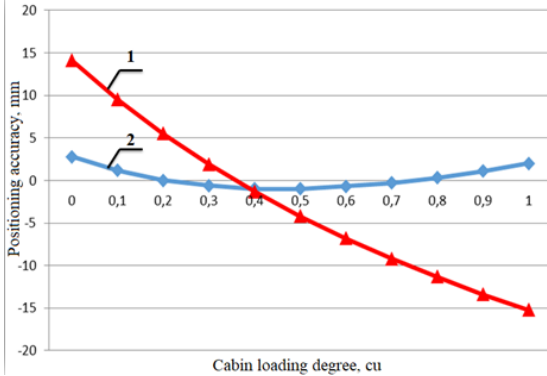
Это предварительное моделирование показало, что при применении метода идентификации и использовании временной задержки, в первом приближении, можно добиться уменьшения ошибки позиционирования почти в 5 раз. После определения степени загрузки, значение попадает на второй этап работы системы управления. Здесь оно влияет на расчет времени начала торможения и точность

позиционирования. Значение загрузки корректируется с помощью поправочных коэффициентов.

Рассчитанное значение в качестве временной задержки задается в блоке "Variable Time Delay». Данный метод идентификации степени загрузки имеет погрешность в пределах  $\pm 5\%$ , что считаем допустимым. Имитационная модель лифта, разработанная в среде Matlab / Simulink, взята за основу [3] и [6] для исследования влияния сетевого напряжения на работу всех электроприборов и устройств, а также как система управления в целом.

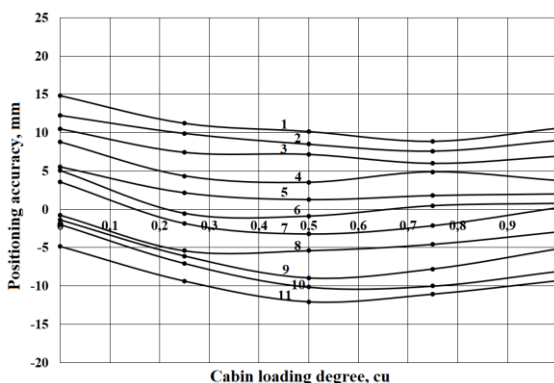
Согласно утвержденным и действующим ГОСТам и международным стандартам, которые регулируют и контролируют качество подаваемого напряжения к потребителям указано, что при нормальных условиях оперирования напряжение питания не должно отличаться от номинального напряжения системы больше чем на  $\pm 10\%$ , при этом нормальным отклонением считается  $\pm 5\%$  [7-9].

С учетом внесенных вышеуказанных изменений было проведено моделирование для разных степеней загрузки, а также для различных отклонений значений напряжения питания от номинальных



რის. 3. Зависимость точности останова от степени загрузки кабины: 1 – система без идентификации; 2 – система с идентификацией

380 В. Принято, что необходимо и достаточно показать зависимости влияния на точность останова изменения напряжения при следующих отклонениях от номинального: 0%, ±2%, ±5%, ±8%, ±10%, ±12%. Результаты моделирования, представленные на рис. 2, показывают, что изменение напряжения питания сети влияет на точность позиционирования. При увеличении напряжения питания наблюдается смещение всей линии высоты позиционирования с относительно постоянным шагом, что говорит о некой прямопропорциональной зависимости. Для рис. 4 приняты следующие обозначения: 1 – график изменения точности позиционирования при напряжении питания 334,4 В; 2 – тоже при 342 В; 3 – тоже при 349,6 В; 4 – тоже при 361 В; 5 – тоже при 372,4 В; 6 – тоже при 380 В; 7 – тоже при 387,6 В; 8 – тоже при 399 В; 9 – тоже при 410,4 В; 10 – тоже при 418 В; 11 – тоже при 425,6 В.



რის. 4. Зависимость погрешности позиционирования от величины напряжения питания при различных степенях загрузки кабины с использованием метода идентификации

Из полученных графиков видно, что при изменении напряжения питания метод идентификации недостаточно эффективен. Однако при нахождении зависимостей влияния напряжения питания на расчеты возможна корректировка точности позиционирования с целью уменьшения диапазона останова.

### Выводы

Создана имитационная модель двухскоростного лифтового электропривода позволяет определить зависимость точности позиционирования от степени загрузки кабины лифта.

Использование предложенного метода идентификации в замкнутой системе управления электроприводом лифта обеспечивает повышение точности его позиционирования.

Дальнейшие исследования планируются в направлении разработки системы управления электроприводом лифта, которая минимизирует влияние изменения напряжения питания на точность позиционирования.

### References

- Selik, F. Energy consumption by little-used lifts in standby mode // Lift. 2010. No. 1. pp. 47-51. Available at: [https://yadi.sk/d/i\\_eltvqp8FjYo](https://yadi.sk/d/i_eltvqp8FjYo).
- ISO 25745 "Energy performance of lifts, escalators and moving walks".
- Osadchyy, V. V., Nazarova, O.S., Shulzhenko, S.S. "Identification of the loading rate of a two-speed elevator // Electrical and computer systems, vol. 27(103), pp. 103-111. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.27.103.2018.11>.
- Ihedioha Ahmed C., Anyanwu A.M. Implementation of an Elevator's Position-Controlled Electric Drive // International Journal of Trend in Research and Development, Volume 3(5), 2016. - p.19-23. Available at: <http://www.ijtrd.com/papers/IJTRD4105.pdf>
- Yingjie Liu, Hejun Yu, Gang Li, Zhongxing Li, Xingjun Wu. Modeling and Simulation of the drive system of elevator based on AMESIM /3rd International Conference on Material, Mechanical and Manufacturing Engineering (IC3ME 2015). Available at: <http://download.atlantipress.com/php/downloadpaper.php?id=25837827>.
- Nazarova O., Osadchyy V., Shulzhenko S. Accuracy improving of the two-speed elevator positioning by the identification of loading degree // International Conference «Modern Electrical and Energy Systems» (MEES-2019), September 23-25, 2019 Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, pp. 50-53. DOI: 10.1109/MEES.2019.8896414
- EN 81-20:2014 Safety Rules for the Construction and Installation of Lifts-Lifts for the Transport of Persons and Goods.
- GOST 29322-2014 (IEC 60038: 2009) Standard voltages
- DSTU EN 60034-1: 2016 Rotating electrical machines. Part 1. Ratings and performance (EN 60034-1:2010; EN 60034-1:2010/AC:2010, IDT).

## Исследование энергетических характеристик электроприводов электрических транспортных средств

**Елена Назарова**, кандидат технических наук, доцент  
Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, nazarova16@gmail.com  
**Владимир Осадчий**, кандидат технических наук, доцент  
Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, w.osadchiy@gmail.com  
**Виктор Брылистый**, аспирант  
Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, 77vitya77@gmail.com

**Аннотация.** *Обосновано применение четырехприводной силовой установки электрического транспортного средства. Разработана имитационная модель, учитывающая положение центра масс транспортного средства. Проведены исследования с целью получения зависимости потребляемой частотным приводом электрической мощности от частоты вращения вала двигателя и создаваемого им момента.*

**Ключевые слова:** *лабораторный стенд, привода электромобилей, энергетические характеристики, моделирование*

## Research of the energy characteristics of electric drives of electric vehicles

**Olena Nazarova**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Zaporizhzhie Polytechnic National University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: nazarova16@gmail.com  
**Volodymyr Osadchyy**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Zaporizhzhie Polytechnic National University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: w.osadchiy@gmail.com  
**Victor Brilystyi**, Postgraduate  
Zaporizhzhie Polytechnic National University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: 77vitya77@gmail.com

**Annotation.** *The use of a four-drive power plant of an electric vehicle has been substantiated. A simulation model has been developed that takes into account the position of the vehicle mass center. Research has been carried out in order to obtain the dependence of the electrical power consumed by the frequency drive on the rotational speed of the engine shaft and the torque generated by it.*

**Keywords:** *laboratory stand, electric vehicle drives, energy characteristics, simulation.*

**Введение.** Современное состояние мирового рынка транспортных средств характеризуется существенным увеличением доли электрических транспортных средств (ЭТС) в общем объеме производства. Одними из основных задач развития ЭТС является увеличение пробега без подзарядки и улучшения показателей безопасности пассажиров и условий перевозки груза. Увеличение пробега может быть достигнуто как за счет совершенствования аккумуляторной батареи так и путем повышения энергоэффективности электропривода. Безопасность пассажиров в значительной степени зависит от управляемости транспортного средства. Поэтому актуальной проблемой является повышение показателей управляемости и энергоэффективности ЭТС средствами электропривода [1].

С целью максимальной реализации преимуществ электропривода, как основной силовой установки транспортного средства, сформулированы основные требования к системе автоматического управления силовой установкой и к транспортному средству: высокие показатели управляемости и проходимости транспортного средства; обеспечение максимального уровня безопасности водителя и

пассажиров, находящихся в транспортном средстве и участников движения; минимизация затрат энергии в различных режимах езды; соответствие показателя цена/качество сложившейся ситуации на рынке электромобилей; экономически обоснованное использование электропривода и микропроцессорных систем управления вместо механических узлов управления моментом; максимально возможный учет в конструкции транспортного средства требований по компоновке элементов электропривода.

Обоснование применения 4-х приводной силовой установки сводится к возможности конструкционной реализации 4-х приводной силовой установки; способности данной системы на выполнение всех требований, отражающих максимальную реализацию преимуществ электропривода, как силовой установки современного транспортного средства; тенденции современного автомобилестроения, как подтверждение реализуемости и правильности выбранного решения.

Большинство исследований по вопросу энергетических характеристик проводятся в рамках

отрасли применения приводов и направлены на разработку мер по снижению затрат энергии. Так в работе [2] проведено исследование энергетических характеристик электрооборудования на масложировом предприятии. В результате предложены меры по мониторингу и снижению потребляемой энергии. В работе [3] представлен сравнительный анализ энергопотребления приводов в системе водоснабжения. Результат данного исследования говорит о том, что недостаточно иметь привод с более высоким КПД для обеспечения рационального потребления энергии.

Касаемо тематики электромобилей работы [4,5] посвящены исследованию влияния различных внешних факторов (в частности – стиль вождения) на энергоэффективность приводов электромобилей.

В работе [6] проведено моделирование энергопотребления электромобиля BMW i3 с удовлетворяющим уровнем точности. Данные планируются использоваться для уточнения запаса хода.

Исходя из проведенного анализа можно сделать вывод, что исследование приводов, с точки зрения энергетических затрат, имеет отраслевую специфику, рассматриваются в рамках области

применения и редко афишируются. Рассмотрение вопроса затрат энергии приводов электромобилей встречаются в источниках описывающих, характеристики проводов уже серийных транспортных средств.

**Материалы исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: определение структуры САУ распределения моментом; определение зависимости допустимых моментов колес от скорости движения и радиуса поворота автомобиля; выбор тяговых двигателей в зависимости от конструкционных особенностей, мощностных показателей и энергетических затрат.

Структура САУ распределения крутящего момента 4-х приводной силовой установки представлена на рис. 1 [1], где  $K_A$  – положение педали акселератора;  $K_B$  – положение педали тормоза;  $\varphi_S$  – угол поворота рулевого колеса; Torque control system (TCS) – микропроцессорная система управления распределением момента; Drive – электропривод; Wheel – колесо. Подсистема Drive представлена частотным преобразователем (FC) и двигателем (Motor).

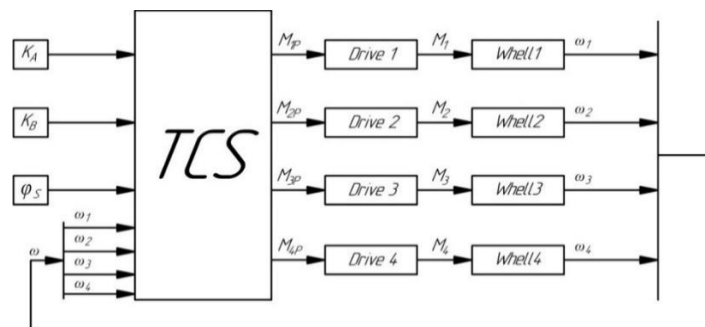


Рис. 1. Структурная схема САУ распределения крутящего момента 4-х приводной силовой установки

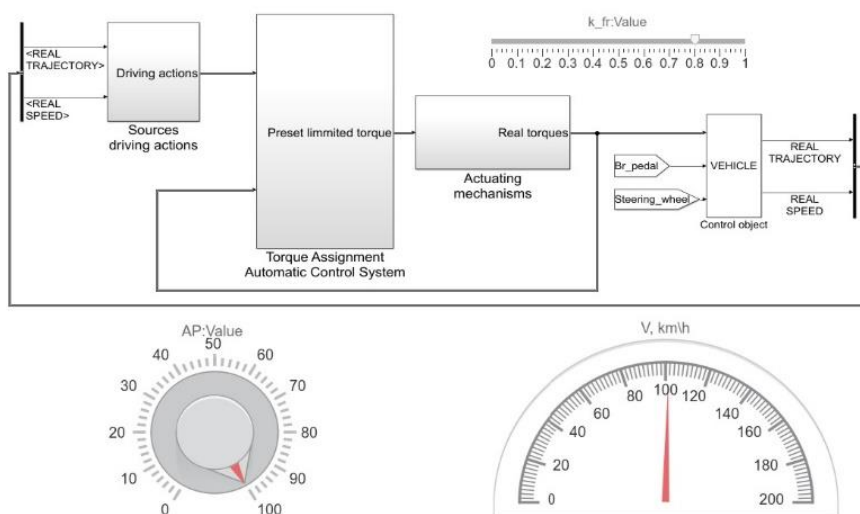


Рис. 2 – Компьютерная модель АСУ ЭТС

Известно, что наибольшее количество энергии потребляется при разгоне транспортного средства. Поэтому данный режим является наиболее интересным с точки зрения повышения энергоэффективности. Процесс разгона сопровождается как динамическим изменением значений максимально допустимых моментов, в следствии влияния положения центра масс так и динамическим изменением КПД, который, по мере увеличения скорости, сначала возрастает (за счет уменьшения доли потерь, обусловленных сопротивлением обмоток), затем, после достижения максимума – уменьшается (за счет увеличения доли потерь в магнитной системе) [1]. Минимум потребления энергии при разгоне можно достичь нахождением положения центра масс, способствующего, в зависимости от конструкции и типа привода, наиболее правильному перераспределению сил с точки зрения динамики разгона, и определение передаточного числа, обеспечивающего нахождение максимума КПД внутри интервала между начальной и конечной скоростью разгона. Эффективное положение центра масс определяется путем моделирования разгона транспортного средства с варьируемым положением центра масс для различных типов приводов (передний, задний, полный).

Точное значение передаточного числа может быть получено путем математического моделирования процесса разгона с учетом реальных зависимостей КПД от скорости вращения вала двигателя и момента на нём. Для этого был создан лабораторного стенда для получения указанных зависимостей.

Полученные экспериментальные данные, позволят уточнить модель объекта управления (электропривод) с точки зрения затрат энергии, что дает возможность определить механические параметры транспортного средства и синтезировать систему управления минимизирующую затраты энергии при обработке задающего воздействия

Таблица 1 - Результаты моделирования

|         | Oz | t,s   |       |      | Oz | a, m/s <sup>2</sup> |      |      |
|---------|----|-------|-------|------|----|---------------------|------|------|
| 4-drive | 3  | 6,84  | 6,10  | 5,52 | 3  | 4,30                | 4,80 | 5,30 |
|         | 2  | 6,49  | 5,79  | 5,25 | 2  | 4,50                | 5,10 | 5,60 |
|         | 1  | 6,14  | 5,49  | 5,00 | 1  | 4,80                | 5,40 | 6,00 |
|         | Ox | 1     | 2     | 3    | Ox | 1                   | 2    | 3    |
| Rear    | 3  | 4,73  | 4,73  | 5,07 | 3  | 6,40                | 6,30 | 5,90 |
|         | 2  | 4,73  | 4,74  | 5,78 | 2  | 6,40                | 6,20 | 5,20 |
|         | 1  | 4,73  | 5,23  | 6,49 | 1  | 6,40                | 5,70 | 4,60 |
|         | Ox | 1     | 2     | 3    | Ox | 1                   | 2    | 3    |
| Front   | 3  | 13,80 | 10,98 | 9,13 | 3  | 2,12                | 2,60 | 3,20 |
|         | 2  | 13,06 | 10,39 | 8,65 | 2  | 2,20                | 2,80 | 3,40 |
|         | 1  | 12,32 | 9,81  | 8,17 | 1  | 2,40                | 3,00 | 3,60 |
|         | Ox | 1     | 2     | 3    | Ox | 1                   | 2    | 3    |

В ходе определения эффективного положения центра масс разработана математическая модель, структура которой представлена на рис. 2 [7].

Математическое моделирование проводилось при таких начальных условиях: масса ТС – 1730 kg; база ТС – 2,875 m ; коэффициент аэродинамического сопротивления – 0.25; коэффициент трения с поверхностью – 0.8; радиус колеса – 0.334 m ; для 4-х приводного ТС значение максимального момента для каждого из колес – 925 N·m , для заднего привода – по 1850 N·m на каждое из задних колес и для переднего привода – по 1850 N·m на каждое из передних колес.

Проведено компьютерное моделирование разгона от 0 до 100 km/h со 100% нажатием педали акселератора для 9 различных положений центра масс и 3-х различных приводов [8]. Результаты динамики разгона отражены в табл. 1.

Результаты моделирования показали, что полный привод со смещенным вперед центром масс является наиболее предпочтительным с точки зрения распределения реакций опор, влияющих на безопасность и управляемость ТС. Учет полученных результатов в САУ ТС позволяет определить наиболее эффективный тип привода в зависимости от массогабаритных показателей, что позволит более точно определить заданный допустимый момент на приводе.

Для определения зависимости КПД от текущих значений скорости и момента, разработан стенд, состоящий из 3-х подсистем: управления, механической и измерительной (рис 3).

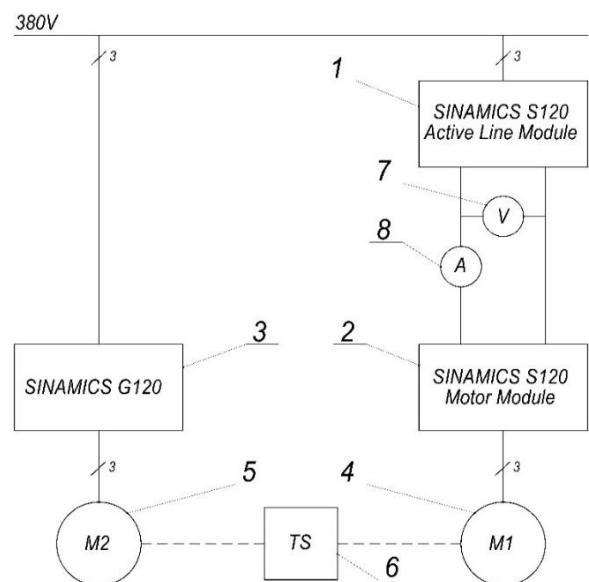


Рис. 3. Структура силовой части стенда

Подсистема управления включает два частотных преобразователя фирмы Siemens и вспомогательное оборудование, осуществляющие связь частотных



преобразователей с механической подсистемой и органами ручного управления.

Программное обеспечение подсистемы управления написано в среде разработки Siemens: Step7, TIA Portal, STARTER. На рис. 2 подсистема состоит из элементов: 1,2 и 3.

Механическая подсистема состоит из 2-х двигателей мощностью 1,1 кВт каждый с зубчатыми колесами на валах, зубчатого ремня, осуществляющего механическую связь двигателей, и узла измерения момента (6), включающего в себя два зубчатых колеса, оси которых жестко связаны между собой и через тензометрический датчик крепятся к основанию.

Измерительная подсистема состоит из PLC Siemens CPU 315DP включающего в себя модуль SIWAREX U, обрабатывающий сигнал с датчика (6), а также вольтметра (7) и амперметра (8), измеряющих напряжение и ток звена постоянного тока ПЧ исследуемого привода.

Описанный стенд позволяет определить зависимость КПД исследуемого привода от скорости вращения вала и момента сопротивления.

С целью получения энергетической характеристики исследуемого привода разработана и собрана механическая часть стенда, которая посредством ременной передачи позволяет создавать на исследуемом двигателе (4), с помощью нагрузочного (5), крутящий момент и измерять возникающее усилие с помощью тензометрического датчика силы (6).

В ходе эксперимента вначале производился синхронный разгон исследуемого и нагрузочного приводов, затем с помощью уменьшения значения заданной скорости вращения нагрузочного двигателя создавался момент сопротивления для исследуемого привода.

Таблица 2. Экспериментальные данные для угловой скорости = 1500 об/мин

| U, V | I, point | T, ACP | T, N·m | I, A | PeI, W  | Pmech, W | η, o.e. |
|------|----------|--------|--------|------|---------|----------|---------|
| 600  | 10       | 13613  | 0,13   | 0,50 | 300,00  | 20,10    | 0,07    |
| 600  | 15       | 18770  | 1,23   | 0,75 | 450,00  | 193,02   | 0,43    |
| 600  | 20       | 22650  | 2,06   | 1,00 | 600,00  | 323,13   | 0,54    |
| 600  | 25       | 26583  | 2,90   | 1,25 | 750,00  | 455,01   | 0,61    |
| 600  | 30       | 30264  | 3,68   | 1,50 | 900,00  | 578,45   | 0,64    |
| 600  | 35       | 33564  | 4,39   | 1,75 | 1050,00 | 689,10   | 0,66    |
| 600  | 40       | 36944  | 5,11   | 2,00 | 1200,00 | 802,44   | 0,67    |
| 600  | 45       | 40129  | 5,79   | 2,25 | 1350,00 | 909,25   | 0,67    |
| 600  | 50       | 43112  | 6,43   | 2,50 | 1500,00 | 1009,27  | 0,67    |
| 600  | 55       | 46140  | 7,08   | 2,75 | 1650,00 | 1110,81  | 0,67    |
| 600  | 60       | 49245  | 7,74   | 3,00 | 1800,00 | 1214,93  | 0,67    |
| 600  | 65       | 51830  | 8,29   | 3,25 | 1950,00 | 1301,61  | 0,67    |
| 600  | 70       | 54572  | 8,88   | 3,50 | 2100,00 | 1393,56  | 0,66    |

Изменяя момент сопротивления, устанавливались значения тока, кратные 0,25А. Указанные действия выполнялись для синхронных частот вращения от 500 до 2250 об/мин с шагом 250 об/мин. В табл. 2 приведены результаты измерений для синхронной скорости, равной 1500 об/мин.

Таблица 3. Интерполированные экспериментальные данные для угловой скорости 1500 об/мин

| U, V | M, N·m | I, A | PeI, W  | Pmech, W | η, o.e. |
|------|--------|------|---------|----------|---------|
| 600  | 0,5    | 0,58 | 350,66  | 78,50    | 0,22    |
| 600  | 1      | 0,70 | 418,75  | 157,00   | 0,37    |
| 600  | 1,5    | 0,83 | 498,97  | 235,50   | 0,47    |
| 600  | 2      | 0,98 | 589,47  | 314,00   | 0,53    |
| 600  | 2,5    | 1,13 | 678,90  | 392,50   | 0,58    |
| 600  | 3      | 1,28 | 769,43  | 471,00   | 0,61    |
| 600  | 3,5    | 1,44 | 864,82  | 549,50   | 0,64    |
| 600  | 4      | 1,61 | 967,17  | 628,00   | 0,65    |
| 600  | 4,5    | 1,79 | 1073,02 | 706,50   | 0,66    |
| 600  | 5      | 1,96 | 1175,50 | 785,00   | 0,67    |
| 600  | 5,5    | 2,14 | 1285,75 | 863,50   | 0,67    |
| 600  | 6      | 2,33 | 1399,12 | 942,00   | 0,67    |
| 600  | 6,5    | 2,53 | 1516,58 | 1020,50  | 0,67    |
| 600  | 7      | 2,72 | 1632,55 | 1099,00  | 0,67    |
| 600  | 7,5    | 2,91 | 1746,08 | 1177,50  | 0,67    |
| 600  | 8      | 3,12 | 1871,07 | 1256,00  | 0,67    |
| 600  | 8,5    | 3,34 | 2003,65 | 1334,50  | 0,67    |
| 600  | 9      | 3,55 | 2132,96 | 1413,00  | 0,66    |
| 600  | 0,5    | 0,58 | 350,66  | 78,50    | 0,22    |
| 600  | 1      | 0,70 | 418,75  | 157,00   | 0,37    |

Для удобства проведения эксперимента шаг нагрузки был выбран – 5 делений амперметра, однако для получения корректной энергетической характеристики необходимо провести интерполяцию значений токов с фиксированным шагом по крутящему моменту и пересчитать параметры мощностей и динамического КПД. Результат приведен в таблице 3.

**Выводы.** Полный привод со смещенным вперед центром масс достигая близких значений к лучшему результату динамики разгона и обеспечивая при этом на передней оси около 60% веса ТС является наиболее предпочтительным с точки зрения управляемости, безопасности и эффективности использования массогабаритных показателей при разгоне.

Разработанный лабораторный стенд позволяет получить математическую модель электрического частотно-управляемого привода, учитывающую

непостоянство КПД двигателя, обусловленное перераспределением электрических и электромагнитных потерь при увеличении частоты вращения ротора.

Использование полученной на стенде зависимости потребляемой приводом электрической мощности от угловой скорости и момента двигателя позволяет для конкретного расположения центра масс электрического транспортного средства найти значения мощностей двигателей и передаточных чисел редукторов передней и задней оси, обеспечивающих минимальное потребление энергии при разгоне от 0 до 100 км/час за заданное время.

### Литература

1. Осадчий, В.В. Структура системы управления 4-х приводной силовой установки для электрических транспортных средств/В.В. Осадчий, Е.С. Назарова, В.В. Брылистый // Проблемы региональной энергетики, 2019. № 1-2(41) 2019. С. 65-73. DOI: 10.5281/zenodo.3239150.

2. Rashid Jalilov, Saidmurod Latipov and Alisher Choriyeu, "Development of energy characteristics of electric drives of technological equipment and normalization of electric consumption of fat-and-oil enterprise", E3S Web of Conf., 216 (2020) 01141. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601141>.

3. Victor Goman, Safarbek Oshurbekov, Vadim Kazakbaev, Vladimir Prakht and Vladimir Dmitrievskii "Energy Efficiency Analysis of Fixed-Speed Pump

Drives with Various Types of Motors", Appl. Sci. 2019, 9(24), 5295; <https://doi.org/10.3390/app9245295>.

4. Kezhen Hu, Jianping Wu, Mingyu Liu, "Exploring the Energy Efficiency of Electric Vehicles with Driving Behavioral Data from a Field Test and Questionnaire", Journal of Advanced Transportation, vol. 2018, Article ID 1074817, 14 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/1074817>.

5. Bingham C., Walsh C., Carroll S. "Impact of driving characteristics on electric vehicle energy consumption and range", IET Intelligent Transport Systems, vol. 6, Issue 1, March 2012, pp. 29 – 35. DOI: 10.1049/iet-its.2010.0137.

6. Ilyès Miri, Abbas Fotouhi, Nathan Ewin "Electric vehicle energy consumption modelling and estimation - A case study", International Journal of Energy Research, vol. 45, Issue 1, pp.501-520. <https://doi.org/10.1002/er.5700>.

7. Nazarova O., Osadchyy V. and Brylysty V. "Research on the Influence of the Position of the Electric Vehicles Mass Center on Their Characteristics," 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240824.

8. Olena S. Nazarova, Volodymyr V. Osadchyy, Victor V. Brylysty "Computer simulation of electric vehicle acceleration processes with different positions of the mass center" // Applied Aspects of Information Technology 2020; Vol.3 No.3: 154–164. DOI: 10.15276/aait.01. 2020. 4

### Реализация алгоритма расчета механических характеристик многодвигательного асинхронного электропривода в режиме динамического торможения с самовозбуждением

**Вера Шамардина** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры «Автоматизированные электромеханические системы»; г. Харьков, Украина; e-mail: [verascha@i.ua](mailto:verascha@i.ua).  
**Екатерина Земцова** – студентка, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: [zemsova1702@gmail.com](mailto:zemsova1702@gmail.com).

**Аннотация.** В современных условиях постоянно повышаются требования к энергоэффективности и эксплуатационным характеристикам электроприводов. В многодвигательных электроприводах механизмов передвижения кранов и рельсовых транспортных средств с асинхронными двигателями с фазным ротором на решение этих задач направлены использование режима динамического торможения с самовозбуждением, а также обеспечение синхронизации частот вращения роторов. Правильная эксплуатация электроприводов невозможна без знания механических характеристик двигателей. Однако используемые методы расчета характеристик недостаточно точны или устарели, что обуславливает интерес к применению в расчетах современных пакетов прикладных программ. Цель работы состоит в компьютерной реализации алгоритма расчетов механических характеристик в режиме динамического торможения с самовозбуждением для многодвигательного электропривода с синхронизацией частот вращения асинхронных двигателей с электрической связью роторов по цепи выпрямленного тока. В результате работы получена структурная алгоритмическая модель, позволяющая корректно выполнять такие расчеты с использованием пакета Matlab. Модель исключает графические операции при учете степени насыщения двигателей, позволяет учитывать параметры статорных обмоток и влияние нагрузок взаимосвязанных приводных двигателей. Результаты теоретических исследований подтверждены в ходе эксперимента.

**Ключевые слова:** многодвигательный асинхронный электропривод; динамическое торможение с самовозбуждением; компьютерное моделирование; механические характеристики.

### Implementation of the algorithm for calculating the mechanical characteristics of a multi-motor asynchronous electric drive in the dynamic braking mode with self-excitation

**Vira Shamardina** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent/Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: [verascha@i.ua](mailto:verascha@i.ua).  
**Kateryna Zemtsova** – student, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: [zemsova1702@gmail.com](mailto:zemsova1702@gmail.com).

**Annotation.** In modern conditions, the requirements for energy efficiency and performance of electric drives are constantly increasing. In multi-motorelectric drives of mechanisms for the movement of cranes and rail vehicles with asynchronous motors with a phaserotor, the use of a mode of dynamic braking with self-excitation and ensuring synchronization of the rotational speeds of the rotors is aimed at solving these problems. Correct operation of the electric drives is impossible without knowledge of the mechanical characteristics of the motors. However, the methods used for the calculating, the characteristics are not accurate enough or outdated, which determines the interest in the use of modern software packages. The purpose of the work is to implement a computer algorithm for calculating mechanical characteristics in the dynamic braking mode with self-excitation for a multi-motorelectric drive with synchronization of the rotational speed of asynchronous motors with electrical connection of the rotors along the rectified current circuit. As a result of the work, a structural algorithmic model was obtained, which allows to correctly perform such calculations using the Matlab package. The model excludes graphic operations when taking into account the degree of saturation of the motors, allow taking into account the parameters of the stator windings and the effect of loads of jointly operating drive motors. The results of theoretical studies were confirmed during the experiment.

**Keywords:** multi-motor asynchronous electric drive; dynamic braking with self-excitation; computer modelling; mechanical characteristics.

**Введение.** Электроприводы (ЭП) на базе асинхронных двигателей с фазным ротором (АДФР) достаточно часто выполняются многодвигательными. В ЭП большой мощности это

позволяет уменьшить его габариты, а в ЭП передвижения грузоподъемных кранов или рельсовых транспортных средств - существенно упростить кинематическую схему механизмов. В

таких приводах двигатели должны иметь идентичные параметры. Достичь это сложно, поэтому даже при одинаковой нагрузке неизбежны рассогласования частот вращения приводных двигателей, что проявляется в рывках и перекосах конструкции механизмов при движении, в буксовании ходовых колес, преждевременном выходе из строя одного из двигателей, в износе реборд колес, рельсовых путей и разрушении металлоконструкций транспортных средств.

В многодвигательных ЭП на базе АДФ пускотормозные процессы сопровождаются, как правило, высоким расходом электроэнергии. Поэтому, решая задачу синхронизации частот вращения двигателей, целесообразно обеспечить и повышение энергоэффективности ЭП [1,2]. Примером реализации такого подхода могут служить выпускаемые промышленностью панели П6502, предназначенные для управления АДФ в многодвигательных ЭП крановых механизмов подъема и передвижения с управляемым магнитным контроллером с динамическим торможением с самовозбуждением (ДТС) СМКД-АДФ [3]. Расчет механических характеристик (МХ) в режиме ДТС для таких панелей выполняется по известной методике [4,5], базирующейся на допущениях, что ЭП однодвигательный, питание обмотки статора осуществляется от независимого источника постоянного тока, влияние параметров статорной обмотки не учитывается. Методика предполагает выполнение графоаналитических операций, трудоемка и не учитывает особенностей взаимосвязанного многодвигательного ЭП.

**Цель работы** состоит в компьютерной реализации алгоритма расчетов МХ в режиме ДТС для многодвигательного ЭП с синхронизацией частот вращения АДФ, обеспечиваемой электрической связью роторов по цепи выпрямленного тока.

**Изложение основного материала.** В целом ряде схемных решений в качестве базовой используется схема асинхронного многодвигательного ЭП с электрической связью роторов по цепи выпрямленного тока, представленная на рис.1. Одновременное включение всех двигателей М1, М2, ..., М<sub>n</sub> механизма и равномерность распределения нагрузки между ними обеспечивается тем, что переключение в цепях статоров и роторов осуществляется общими коммутирующими аппаратами, а роторные обмотки электрически связаны между собой через трехфазные выпрямительные мосты UZ1, UZ2, ..., UZ<sub>n</sub>, включенные на общий пускорегулирующий резистор R<sub>d</sub>. Для реализации режима ДТС, используется выпрямленный ток роторов, величина

которого определяется значением сопротивления R<sub>dm</sub>, которое шунтирует обмотки статоров при торможении двигателей. Дополнительно ЭП может иметь узел подпитки (на схеме не показан).

В режиме ДТС параметры схемы замещения АДФ зависят от степени насыщения магнитной системы, определяемой по кривой намагничивания (КР). В расчетах Целесообразно представить универсальную КР крановых АД аналитической зависимостью, полученной с использованием метода наименьших квадратов:

$$x_{\mu} = 0,0066 + \frac{1,2}{\sqrt{0,456 + i_{\mu}^2}}, \quad (1)$$

где  $x_{\mu}$  – относительное реактивное сопротивление намагничивания (базовое -  $x_{\mu m}$ );  
 $i_{\mu}$  – относительный ток намагничивания обмотки статора (базовый -  $i_{\mu m}$ ).

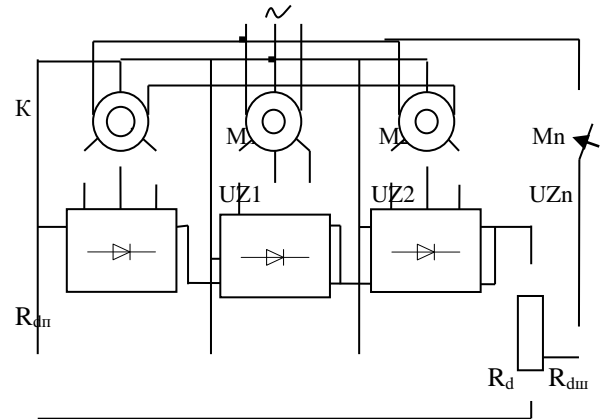


Рис. 1. Упрощенная схема силовых цепей базового многодвигательного электропривода

При разработке структурной модели для расчета МХ за основу приняты соотношения [6], полученные в результате представления многосвязного n-двигательного ЭП односвязной системой и Г-образной схемой замещения. В относительных единицах расчетные зависимости для МХ v-го АД имеют вид:

$$s_v = \frac{\sigma \cdot (r'_{rv} + R'_{ev})}{\sqrt{\frac{i_{\mu v}^2 \cdot \sigma^2 \cdot x_{\mu v}^2}{(i'_{rv})^2} - (x_{sv} + \sigma \cdot x'_{rv})^2} - r_{sv}}; \quad (2)$$

$$i'_{rv} = \frac{i_{\mu v}}{\sqrt{K_d^2 \cdot K_H^2 - \frac{1}{\sigma^2} - 2 \cdot (x_{sv} + \sigma \cdot x'_{rv})^2 / (\sigma^2 \cdot x_{\mu v})}}; \quad (3)$$

$$\mu_v = \frac{(i'_{rv})^2 \cdot (r'_{rv} + R'_{ev})}{s_v}, \quad (4)$$

где  $s_v$ ,  $\mu_v$  – скольжение и тормозной момент  $v$ -го двигателя;

$x_{sv}$ ,  $r_{sv}$  – индуктивное и активное сопротивление статорной обмотки  $v$ -го двигателя;

$x'_{rv}$ ,  $r'_{rv}$ ,  $i'_{rv}$  – индуктивное, активное сопротивление и ток роторной обмотки  $v$ -го двигателя, приведенные к статорной обмотке;

$x_{\mu v}$  – реактивное сопротивление контура намагничивания;

$i_{\mu v}$  – ток намагничивания обмотки статора;

$\sigma$  – коэффициент рассеивания магнитного потока;

$R'_{ev}$  – приведенное к статору эквивалентное сопротивление роторной цепи, которое зависит от токов нагрузки взаимосвязанных роторов АД;

$K_d$  – схемный коэффициент, он учитывает число приводных двигателей; коэффициенты схемы выпрямления, трансформации двигателя, шунтирования выпрямителя, приведения постоянного тока возбуждения к эквивалентному трехфазному току;

$K_H$  – коэффициент, учитывающий нагрузку взаимосвязано работающих приводных АД.

На рис. 2 представлена структурная Simulink-модель в среде Matlab, которая содержит блок определения реактивного сопротивления  $x_{\mu v}$  контура намагничивания, а также позволяет выполнять необходимые расчеты для построения МХ в соответствии с зависимостями (2)-(4). Исходные данные приводных АД формируются в m-файле.

Появление тормозного момента, т.е. самовозбуждение двигателя, происходит при выполнении условия:

$$K_d \cdot K_H > \sqrt{\frac{r_{sv}^2 + (x_{sv} + \sigma \cdot x'_{rv})^2}{\sigma^2 \cdot x_{\mu v}^2} + \frac{1}{\sigma^2} + \frac{2 \cdot (x_{sv} + \sigma \cdot x'_{rv})}{\sigma^2 \cdot x_{\mu v}}}, \quad (5)$$

которое показывает, что самовозбуждение зависит от параметров обмоток и нагрузок приводных АД.

Если пренебречь параметрами статорной обмотки (общепринятое допущение  $x_{sv}=0$ ,  $r_{sv}=0$ ), получим кривую 2 (рис. 3) зависимости  $K_d \cdot K_H = f(i_{\mu})$ , которая проходит значительно ниже кривой 1 ( $x_{sv} \neq 0$ ,  $r_{sv} \neq 0$ ), в области насыщенного состояния машины, при котором осуществляется переход в режим ДТС. Таким образом, при учете параметров статорных обмоток фактически область само-

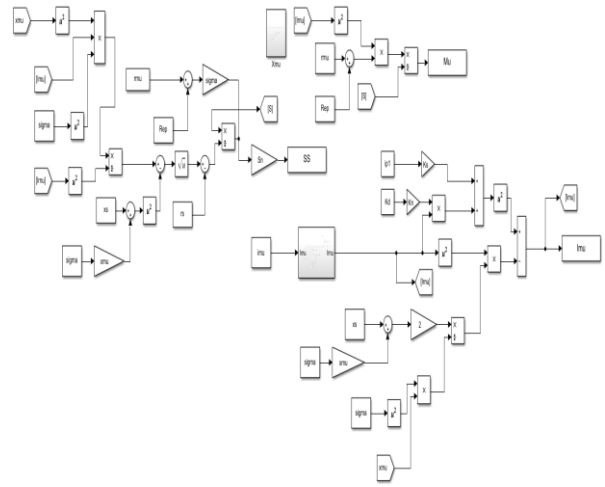


Рис. 2. Simulink-модель для расчета МХ многодвигательного асинхронного ЭП

возбуждения приводных АД меньше, чем при  $x_{sv}=0$ ,  $r_{sv}=0$ . В ходе проектирования крановых ЭП это обстоятельство необходимо учитывать при выборе параметров отдельных элементов.

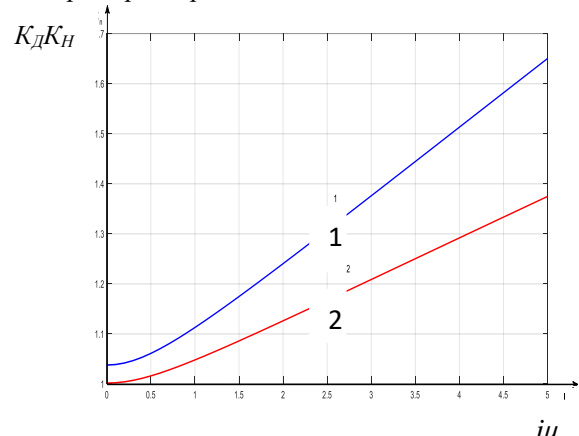


Рис. 3. Область самовозбуждения АДФ в многодвигательном электроприводе  
 1 - с учетом  $x_{sv}$ ,  $r_{sv}$ ; 2 - без учета  $x_{sv}$ ,  $r_{sv}$ .

Результаты расчетов МХ для схемы двухдвигательного асинхронного ЭП (рис.1) с использованием самовозбуждаемых двигателей МТФ 312-6 приведены на рис. 4. Расчеты приведены для  $R_{dн}=0$  при  $K_{ш}=0,6$ ;  $K_{ш}=0,8$ , а также для  $R_{dн}=0,5\Omega$  при  $K_{ш}=0,5$ ;  $K_{ш}=0,8$ ;  $K_{ш}=1,0$ . Здесь  $K_{ш}$  – коэффициент шунтирования выпрямителей в цепи роторов, значение которого определяет величину выпрямленного напряжения, подаваемого на статорные обмотки двигателей в режиме ДТС.

$$K_{ш} = \frac{R_{dш}}{R_{dш} + r_{sn}}, \quad (6)$$





#### References (transliterated)

1. Tishchenko V.N. Sovremennoe sostoyanie elektroprivodov gruzopod"emnykh mekhanizmov / V.N. Tishchenko, V.M. Kolotilo // Visnik NTU KhPI. Tem. vipusk 45. - 2005. - S. 301-306.
2. Andrienko, P. Synchronizing Properties of Impulse-Current Controlled Electric Drive of Coordinated Rotation in the Circuit of Electrically Coupled Rectifiers of the Rotor, [Text] / P. Andrienko, D. Andrienko, A. Andrienko, O. Nemykina, O. Blyzniakov //2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-5, DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240846.
3. Tipovye elektroprivody kranovykh mekhanizmov. URL: <https://studfile.net/preview/2264125/page:4/> (data obrashcheniya 01.04.2021).
4. Raschet mekhanicheskikh kharakteristik asinkhronnykh dvigatelei s faznym rotorom v rezhime dinamicheskogo tormozheniya s samovozbuzhdeniem po universal'nyim krivym (metod zavoda «Dinamo»). URL: <http://vdvzhke.ru/jelektrodvigateli/kranovye-jelektrodvigateli/raschet-harakteristik-asinhronnyh-dvigatlej/harakteristiki-asinhronnyh-dvigatlej.html>.( data obrashcheniya 10.03.2021).
5. Sistemy kranovogo elektroprivoda. URL: [http://alyos.ru/enciklopediya/tlektrooborudovanie\\_i\\_tlektrosnabzhenie\\_beregovih\\_ustanovok\\_rechnogo\\_transporta/sistemi\\_kranovih\\_elektroprivodov.html](http://alyos.ru/enciklopediya/tlektrooborudovanie_i_tlektrosnabzhenie_beregovih_ustanovok_rechnogo_transporta/sistemi_kranovih_elektroprivodov.html). (data obrashcheniya 17.04.2021).
6. Shamardina V.M. Rezhim dinamichnogo gal'muvannya z samozbudzhennyam asinkhronnikh bagatodvigunnikh elektroprivodiv/ V.M. Shamardina, K.O. Zemtsova// XIV Mizhnarodna naukovo-praktichna konferentsiya magistrantiv ta aspirantiv «Teoretichni ta praktichni doslidzhennya molodikh naukovtsiv» [01-04 grudnya 2020 roku]: materialy konferentsii, za red. prof. Є.I. Sokola. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2020. pp. 156-157.

## Особенности высоковольтных каскадных преобразователей частоты при компенсации повреждения Н-модулей

**Виктор Бушер**, д.т.н, профессор

Национальный университет "Одесская морская академия", Одесса, Украина.

E-mail: victor.v.bousher@gmail.com

**Николай Муха**, д.т.н, профессор

Национальный университет "Одесская морская академия", Одесса, Украина.

E-mail: n.mukha52@gmail.com

**Анатолий Шестака**, ст. преподаватель

Национальный университет "Одесская морская академия", Одесса, Украина.

E-mail: a.shestaka@gmail.com

**Аннотация.** Применение высоковольтных преобразователей частоты является одним из самых перспективных направлений в современных мощных электроприводах. Среди таких преобразователей из-за повышенной надежности, сохранения работоспособности при повреждении одного или нескольких силовых модулей, возможности быстрого ремонта благодаря модульной конструкции наиболее распространенными становятся многоуровневые каскадные инверторы с Н-мостами. В работе проанализирован метод балансировки линейных напряжений, при использовании которого для уменьшения динамических нагрузок необходимо сохранять пространственное положение треугольника линейных напряжений 1-й гармоники, а угол сдвига 3-й гармоники устанавливать в соответствии с начальным углом сдвига неповрежденной фазы. Это обеспечивает самые малые динамические электрические и электромеханические нагрузки при аварии силовых модулей. Предоставлены методы расчета, таблицы, графики, поясняющие принципы реализации этого метода в системах управления электроприводами.

**Ключевые слова:** многоуровневый высоковольтный каскадный преобразователь частоты, автономный инвертор напряжения, полные гармонические искажения, оптимизированный метод балансировки линейных напряжений.

## Features of damage compensation for H-modules in high-voltage cascade frequency converters

**Victor Busher**, ScD, professor,

National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine. E-mail: [victor.v.bousher@gmail.com](mailto:victor.v.bousher@gmail.com)

**Nikolai Mukha**, ScD, professor,

National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine. E-mail: [n.mukha52@gmail.com](mailto:n.mukha52@gmail.com)

**Anatoliy Shestaka**, Lecturer,

National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine. E-mail: [a.shestaka@gmail.com](mailto:a.shestaka@gmail.com)

**Annotation.** The use of high-voltage frequency converters is one of the most promising areas in modern powerful electric drives. Among such converters, due to the increased reliability, preservation of operability in the event of damage to one or more power modules, the possibility of quick repair due to the modular design, the most common are multilevel cascade inverters with H-bridges. The paper analyzes the method of balancing phase-to-phase voltages. When using this method, to reduce dynamic loads, it is necessary to maintain the spatial position of the triangle of the phase-to-phase voltages of the 1st harmonic, and set the shift angle of the 3rd harmonic in accordance with the initial shift angle of the undamaged phase. This provides the smallest dynamic electrical and electromechanical loads in the event of a power module failure. Methods of calculation, tables, graphs are provided that explain the principles of implementation of this method in control systems of electric drives.

**Key words:** multilevel high-voltage cascaded H-bridge frequency converter, autonomous voltage inverter, total harmonic distortion, optimized phase-to-phase voltage balancing method.

**Введение.** Высоковольтные каскадные преобразователи частоты распространяются в различных областях техники с мощными потребителями. Их использование обеспечивает многократное уменьшение расхода электро-технических материалов, прежде всего меди, уменьшение массы электрических машин и кабелей, а

также улучшает энергетические показатели – THD (Total Harmonic Distortion), EEDI (Energy Efficiency Design Index) и EEOI (Energy Efficiency Operational Index) [1, 2].

**Анализ проблемы.** С точки зрения надежности, живучести наиболее привлекательны каскадные многоуровневые преобразователи с  $N$  H-bridge

ячейками в каждой фазе, которые включаются последовательно. Каждая ячейка является отдельным 4-квადрантным ШИМ инвертором, топология которого определяется силовыми элементами (IGBT, GTO, IGCT, SGCT). Независимость инверторов и гальваническая развязка между блоками питания каждого из них позволяет легко диагностировать неисправность и исключать модуль из работы с помощью групп электромеханических или электронных выключателей Alarm (рис. 1), не останавливая исполнительный механизм [3–5].

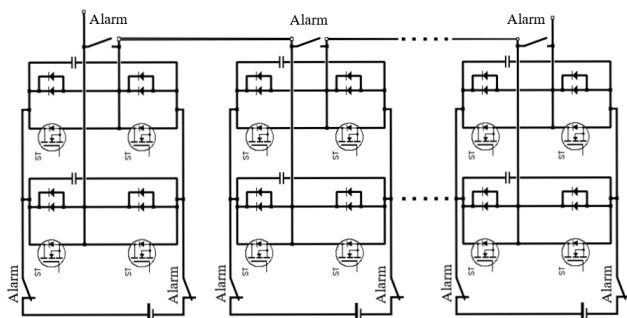


Рис. 1. Подключение H-модулей и аварийных переключателей в одной фазе

Кроме того, одновременно со срабатыванием силовых выключателей Alarm, изменяется алгоритм работы системы управления другими ячейками – гармонический сигнал необходимой амплитуды и частоты для каждой фазы после аварии подается на другую последовательность опорных треугольных сигналов с учетом количества исправных ячеек. Принципы управления инверторов определяются как типом ключей, так и методами ШИМ, среди которых наибольший показатель использования мощности источника питания обеспечивает пространственно-векторная модуляция SVPWM или дополнение фазного напряжения 3-й гармоникой [6–8].

Но для предотвращения дисбаланса фазовых токов и, как следствие, ударных нагрузок необходимо изменить не только опорные сигналы [9–13]. Используют различные методы коррекции. Так, в Allen Bradley HV FC 6000 после обнаружения дефекта в одной из фаз замыкают одноименные модули в других фазах [14]. Но в этом случае напряжение падает в  $(N-1)/N$  раз, что, например, для наиболее распространенных 5- или 6-уровневых инверторов составляет 20 и 16% соответственно. В преобразователях частоты SIEMENS серии Robicon PERFECT HARMONY используют метод балансировки линейных напряжений путем изменения междуфазных углов и условного смещения нулевой точки [15–17].

Однако нерешенными остаются задачи уменьшения динамических нагрузок в момент перехода от штатного к аварийным режимам, особенно при повреждении нескольких модулей, и оценки

возможности использования 3-й гармоники в аварийном режиме при изменении междуфазных углов для первой гармоники напряжения.

**Цель работы** – разработка метода балансировки линейных напряжений в многоуровневых каскадных преобразователях с минимальными ударными нагрузками при переходе к аварийному режиму работы с одновременным дополнением фазных напряжений 3-й гармоникой.

**Материалы исследования.** В электрических машинах колебания электромагнитного момента возникают как в результате ступенчатого изменения амплитуды, так и из-за поворота векторов линейных напряжений. Поэтому при повреждении H-модулей необходимо так повернуть векторы фазных напряжений, чтобы обеспечить симметрию и неизменное пространственное положение линейных напряжений (рис. 2).

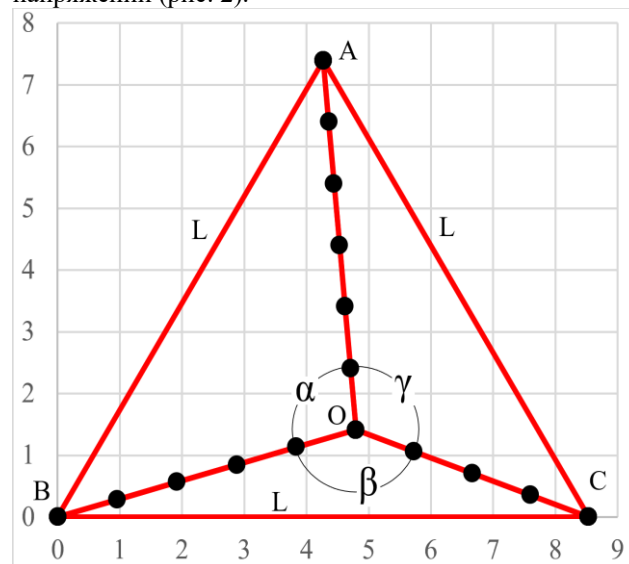


Рис. 2. Векторы линейных и фазных напряжений при аварии в 6-уровневом инверторе

Подробно метод расчета амплитуды линейного напряжения и углов сдвига при возникновении асимметрии фазных напряжений описан в работе [18]. Но для дальнейшего понимания материала кратко изложим основные положения.

Перейдем к относительным единицам, считая, что каждый H-модуль создает условную единицу напряжения  $U$ . Тогда количество ячеек совпадает с фазным напряжением, в штатном режиме  $N_A = N_B = N_C = N$ , линейное напряжение  $L_0 = \sqrt{3}N$ , сдвиги между векторами фазных напряжений  $\alpha = \beta = \gamma = 120^\circ = 2\pi/3$ . При повреждении ячеек в общем случае  $N_A \neq N_B \neq N_C$ ,  $L < L_0$ , углы отличаются от  $120^\circ$ . Поиск углов и величины линейного напряжения  $L$  в аварийном режиме осуществляется путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} N_A^2 + N_B^2 - 2N_A N_B \cos(\alpha) = L^2, \\ N_B^2 + N_C^2 - 2N_B N_C \cos(\beta) = L^2, \\ N_C^2 + N_A^2 - 2N_C N_A \cos(\gamma) = L^2, \\ \alpha + \beta + \gamma = 2\pi. \end{cases}$$

В общем случае решение может быть найдено итерационными методами, самый быстрый из которых основан на теореме Герона. Учитывая, что площадь  $S_{\Delta ABC}$  равна сумме площадей внутренних треугольников, получаем условие:

$$S_{\Delta ABC} = S_{\Delta AOB} + S_{\Delta BOC} + S_{\Delta COA} = \sqrt{3}L^2 / 4,$$

где площади внутренних треугольников находим по формулам:

$$\begin{aligned} S_{\Delta AOB}^2 &= \frac{2N_A^2 N_B^2 + 2N_A^2 L^2 + 2N_B^2 L^2 - N_A^4 - N_B^4 - L^4}{16}, \\ S_{\Delta BOC}^2 &= \frac{2N_B^2 N_C^2 + 2N_B^2 L^2 + 2N_C^2 L^2 - N_B^4 - N_C^4 - L^4}{16}, \\ S_{\Delta COA}^2 &= \frac{2N_C^2 N_A^2 + 2N_C^2 L^2 + 2N_A^2 L^2 - N_C^4 - N_A^4 - L^4}{16}, \end{aligned}$$

Таблица 1. Сдвиги фаз при балансировке линейных напряжения 4-6-уровневых инверторов

| $N_a$    | $N_b$    | $N_c$    | $\alpha$     | $\beta$      | $\gamma$     | $L$          | $L^*$       | $L_{old}^*$ | $L^* - L_{old}^*$ |
|----------|----------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------------|
| <b>6</b> | <b>6</b> | <b>6</b> | <b>120.0</b> | <b>120.0</b> | <b>120.0</b> | <b>10.39</b> | <b>1.00</b> | <b>1.00</b> | <b>0.00</b>       |
| 6        | 6        | <b>5</b> | 109.2        | 125.4        | 125.4        | 9.78         | 0.94        | 0.83        | <b>0.11</b>       |
| 6        | <b>5</b> | <b>5</b> | 113.1        | 133.7        | 113.1        | 9.20         | 0.88        | 0.83        | <b>0.05</b>       |
| 6        | <b>5</b> | <b>4</b> | 101.4        | 142.8        | 115.8        | 8.54         | 0.82        | 0.67        | <b>0.15</b>       |
| 6        | <b>4</b> | <b>4</b> | 101.4        | 157.2        | 101.4        | 7.84         | 0.75        | 0.67        | <b>0.08</b>       |
| <b>5</b> | <b>5</b> | <b>5</b> | <b>120.0</b> | <b>120.0</b> | <b>120.0</b> | <b>8.66</b>  | <b>1.00</b> | <b>1.00</b> | <b>0.00</b>       |
| 5        | 5        | <b>4</b> | 107.2        | 126.4        | 126.4        | 8.05         | 0.93        | 0.80        | <b>0.07</b>       |
| 5        | <b>4</b> | <b>4</b> | 111.3        | 137.4        | 111.3        | 7.45         | 0.86        | 0.80        | <b>0.06</b>       |
| 5        | <b>4</b> | <b>3</b> | 96.9         | 150.0        | 113.1        | 6.77         | 0.78        | 0.60        | <b>0.18</b>       |
| 5        | <b>3</b> | <b>3</b> | 93.6         | 172.9        | 93.6         | 5.99         | 0.69        | 0.60        | <b>0.09</b>       |
| <b>4</b> | <b>4</b> | <b>4</b> | <b>120.0</b> | <b>120.0</b> | <b>120.0</b> | <b>6.93</b>  | <b>1.00</b> | <b>1.00</b> | <b>0.00</b>       |
| 4        | 4        | <b>3</b> | 104.0        | 128.0        | 128.0        | 6.31         | 0.91        | 0.75        | <b>0.16</b>       |
| 4        | <b>3</b> | <b>3</b> | 108.2        | 143.6        | 108.2        | 5.70         | 0.82        | 0.75        | <b>0.07</b>       |
| 4        | <b>3</b> | <b>2</b> | 89.0         | 164.5        | 106.6        | 4.96         | 0.72        | 0.50        | <b>0.12</b>       |

Следующий шаг – сохранение пространственного положения векторов линейных напряжений – достигается поворотом фазных напряжений на углы:

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{N_B}{L} \sin(\alpha)\right), \\ \beta_0 &= \alpha_0 + \alpha, \\ \gamma_0 &= \beta_0 + \beta. \end{aligned}$$

При повреждении ячеек  $S_{\Delta ABC}$  уменьшается. Соответственно, решение может быть найдено простым перебором в одном цикле значений  $L$  от  $L_0$  до  $N_{\min}$  с некоторой заданной точностью. Расчет завершается при  $S_{\Delta ABC} - S_{\Delta AOB} - S_{\Delta BOC} - S_{\Delta COA} \leq 0$ . Такой алгоритм в сотни раз быстрее, чем традиционно используемый поиск углов, который необходимо осуществлять перебором или итерациями в двух вложенных циклах. После определения  $L$  значения углов находят по теореме косинусов.

Ниже в табл. 1 приведены несколько решений для 4-6-уровневых инверторов. Также в таблице показана амплитуда линейных напряжений  $L^*$  по отношению к амплитуде исправного преобразователя и эта величина сопоставлена с  $L_{old}^*$  для случая симметричного отключения модулей в неповрежденных фазах. Видно, что в 4-6-уровневых преобразователях метод балансировки обеспечивает напряжение на 5...18% больше.

В системе Matlab / Simulink построена модель, которая реализует управление по приведенным принципам в 5-уровневом преобразователе частоты при аварии, в результате которой остаются работать 5-4-3 модуля в фазах А, В, С соответственно. Во время аварии алгоритм ШИМ для каждой фазы изменяется – в соответствии с количеством неповрежденных ячеек изменяются опорные уровни треугольных сигналов так, чтобы суммарная амплитуда совпадала с количеством целых ячеек.

Анализ переходных процессов показал, что при аварии (в момент времени 0.75 s) в номинальном режиме работы напряжение уменьшается, но благодаря сохранению пространственного положения векторов линейных напряжений колебания электромагнитного момента имеют наименьшую амплитуду из возможных, а при частоте до 39 Hz работа двигателя продолжается без изменений (рис. 3).

В модели использован метод суммирования синусоидальных сигналов напряжений с третьей гармоникой с амплитудой  $\frac{f}{f_n} \frac{L}{6\sqrt{3}}$ , близкий по эффективности к пространственно-векторной модуляции. Важно отметить, что в штатном режиме этот метод позволяет повысить действующее значение первой гармоники почти на 16 %, но в аварийном режиме этот показатель уменьшается из-за искажения формы фазных напряжений – симметрия вершук нарушается во всех фазах и при неудачно выбранном сдвиге фаз для 3-й гармоники может возникнуть необходимость снижения задания напряжения более, чем на 34 %.

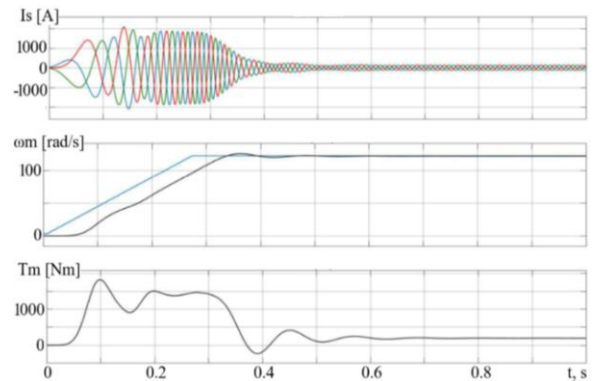
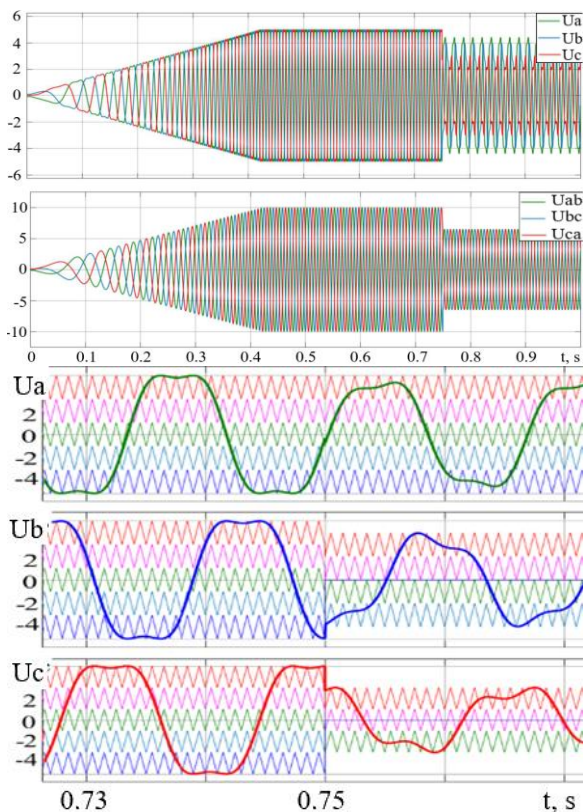


Рис. 3. Переходные процессы фазных и линейных напряжений, токов статора, скорости и момента в электроприводе при 39 Hz

Для поиска оптимального сдвига фаз третьей гармоники после аварии вычисляется квадратичная разница между максимально-возможным и абсолютным значениями напряжения в каждой фазе по отношению к максимальному и суммирует эти величины:

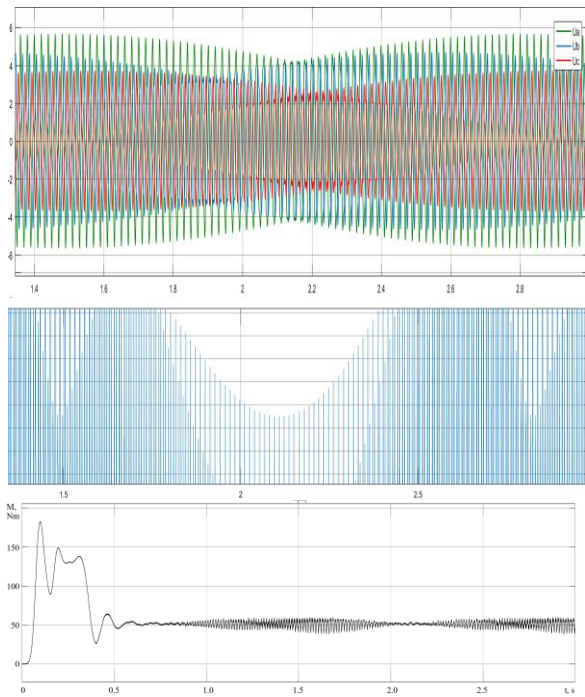
$$Y = \sqrt{\frac{(Na - |Ua|)^2}{Na^2} + \frac{(Nb - |Ub|)^2}{Nb^2} + \frac{(Nc - |Uc|)^2}{Nc^2}}$$

Эта функция соответствует относительному запасу напряжения по отношению к уровню треугольных опорных сигналов.

Для поиска решения этой задачи во время переходного процесса угол сдвига 3-й гармоники медленно увеличивается так, чтобы за время моделирования он изменился не менее, чем на  $2\pi/3$ . При этом амплитуда 1-й гармоники остается постоянной, но суммарное напряжение каждой фазы изменяется от номинальной до 1.34 номинальной величины.

Увеличенный фрагмент полученного графика функции  $Y$  приведен на рис. 4. Предложенная функция имеет экстремум (минимум пиковых значений) в момент времени  $\sim 2.1$  s, когда угол становится кратным  $2\pi/3$ , что точно совпадает со сдвигом 1-й гармоники в неповрежденной фазе. По графикам напряжений фаз видно, что в оптимальной точке амплитуда каждого из них близка к минимуму, но не совпадает с ним. Функция  $Y$  позволяет найти наилучшее соотношение, обеспечивая таким образом наименьшее падение напряжения при возникновении аварии.





რის. 4. Напряжения фаз А, В, С, график функции  $Y$ , график электромагнитного момента при изменении сдвига 3-й гармоники

Результаты подтверждает и график переходного процесса момента. Двигатель разогнан до максимально возможной скорости, которую обеспечивает преобразователь частоты при поврежденных ячейках. Точно в момент экстремума функции  $Y$  пульсации момента с высокой частотой отсутствуют – это означает, что третья гармоника во всех фазах не привела к превышению заданного значения напряжения над возможным уровнем треугольных опорных сигналов, то есть третья гармоника ШИМ-сигналов точно соответствует заданным значениям амплитуды и фазового сдвига расчетного сигнала, при которых не происходит

## References

1. Glazeva O.V. 2018. The use of high-voltage frequency converters as a method of increasing the energy efficiency index at the marine industry Materials of the scientific-methodical conference “Ship engineering, electronics and automation” pp 70–78.
2. Urbaniak M., Kardas-Cinal E. and Jacyna M. 2019. Optimization of Energetic Train Cooperation Symmetry 11(9), 1175; <https://doi.org/10.3390/sym11091175>.
3. Burdasov B.K., Nesterov S. A. and Fedotov Yu. B. 2015. Frequency converters for high-voltage AC drives APRIORI Series Natural and technical sciences 4 pp 2–15.

воздействия на электромагнитные процессы в электрической машине.

При этом для точного воспроизведения формы фазных напряжений необходимо ограничивать амплитуду 1-й гармоники на уровне, лишь на 4 % меньше, чем при неповрежденных ячейках. Следовательно, коэффициент использования источника остается выше на 12 % по сравнению с подачей только напряжения первой гармоники. Таким образом, методом моделирования доказано, что оптимальной для смещения 3-й гармоники является величина начального сдвига 1-й гармоники неповрежденной фазы.

**Выводы.** В работе проанализирован и получил существенное развитие метод балансировки линейных напряжений. Показано, что для уменьшения динамических нагрузок необходимо сохранять пространственное положение треугольника линейных напряжений, а угол сдвига 3-й гармоники (для повышения эффективности использования источника питания) необходимо устанавливать равным начальному углу сдвига неповрежденной фазы. При выполнении этих условий заданное значение напряжения при аварии необходимо уменьшать не более, чем на 4 %.

Это исключает разрывы в законах управления напряжениями и сдвигами фаз в многоуровневых каскадных инверторах при повреждении ячеек, и таким образом обеспечивает минимизацию динамических перегрузок в электрической и электромеханической системе в переходных и установившихся режимах. Предоставлено необходимое математическое обеспечение для расчета таблиц, заносимых в память микроконтроллера, поясняющее принципы реализации этого метода в системах управления электроприводами.

4. Malinowski M, Gopakumar K, Rodriguez J and Pérez M. A. 2010. A Survey on Cascaded Multilevel Inverters IEEE Transactions on Industrial Electronics 57 7 pp 2197–2206.
5. Manimala V., Geetha N. and Renuga P. 2011. Design and simulation of five level cascaded inverter using multilevel sinusoidal pulse width modulation strategies IEEE 3rd International Conference on Electronics Computer Technology 2 pp 280–283. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5941701>.
6. McGrath B. P. and Holmes D.G. 2002. Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters IEEE Transactions on Industrial Electronics 49 4 pp 858–867.

7. Grahame D. 2003. Pulse width modulation for power converters. Principles and practice (New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.) p 724.
8. Kolpakov A. 2009 Multilevel Converter Control Algorithms Silovaya Elektron. 2 pp.57–65. [https://power-e.ru/wp-content/uploads/2009\\_2\\_57.pdf](https://power-e.ru/wp-content/uploads/2009_2_57.pdf).
9. High voltage frequency converters series N5000 // [http://www.tekhar.com/Programma/HYUNDAI/index\\_V\\_V\\_invert.html](http://www.tekhar.com/Programma/HYUNDAI/index_V_V_invert.html).
10. Frequency converters VEDADRIVE 315–25000 kVA // [www.danfoss.ru/VLT](http://www.danfoss.ru/VLT).
11. Busher V.V. 2020. Research of high-voltage frequency converters in ship electric power systems 9th Conference on Ships' Electrical Engineering, Electronics and Automation NU «OMA» Publ pp 231–237. [femire.onma.edu.ua/docs/conf/Материалы%20конф\\_2019.pdf](http://femire.onma.edu.ua/docs/conf/Материалы%20конф_2019.pdf)
12. Krishnapriya S. and Unnikrishnan L. 2015. Multilevel Inverter Fed Induction Motor Drives, International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET) 04 09 pp 60–64
13. Rudyk T., Szczepański E., Jacyna M. 2019. Safety factor in the sustainable fleet management model. Archives of Transport, 49(1), 103-114. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.2780>.
14. PowerFlex 6000 Medium Voltage Variable Frequency Drive Firmware, Parameters, and Troubleshooting Manual Catalog Number 6000G//Publication 6000-TD004E-EN-P - September 2019. <http://www.rockwellautomation.com/support>
15. High voltage frequency converters Robicon PERFECT HARMONY 225 kW–120 MW // [www.siemens.com/robicon-perfect-harmony](http://www.siemens.com/robicon-perfect-harmony)
16. Puchkov A. P. and Osipov O.I. 2018. Correction of the Control System of a Multilevel Converter with a Defect in the Power cell of its Inverter Electrotechnical Systems and Complexes 3 40 pp 42–46
17. Gorodny A., Dymerecs A., Kut Y., Denisov Y., Natalia D. 2020. Generalized method of commutation processes calculation in high-frequency switched-mode power converters Advances in Intelligent Systems and Computing 1019 pp. 71–80.
18. Busher V. et al. 2020. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 985 012021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012021>.



## Impact of reactive power compensation devices on electromagnetic processes in the power supply and electromagnetic cluttering formation

**Badur Tchunashvili**, Doctor of Science, Professor,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [b.chunashvili@gtu.ge](mailto:b.chunashvili@gtu.ge)

**Alexander Petrosyan**, PhD, Associate Professor,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [a.petrosyan@gtu.ge](mailto:a.petrosyan@gtu.ge)

**Archil Gvimradze**, doctoral student,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [a.gvimradze@gtu.ge](mailto:a.gvimradze@gtu.ge)

**Teimuraz Gamrekelashvili**, PhD, Assistant,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [temo.gamrekelashvili@gmail.com](mailto:temo.gamrekelashvili@gmail.com)

**Annotation.** Research has shown that reactive power compensations devices which are equipped with step regulated capacitor batteries, there are dynamic processes in the connected power supply system. They are produced by switching currents of transitional processes and different electromagnetic cluttering are in presence. That is determined, that during switch-on the short period overvoltage and during switch-off the deep voltage drop are dominate. For the existing step-regulated reactive power compensation devices, capacitor battery to supply connection scheme is proposed which decreases the transition currents and electromagnetic cluttering significantly. At the same time it is approved, that during new power system design for manufacture, it is more relevant to use compensation devices with transistor management system and smooth regulation ability. Abovementioned devices provide reactive power compensation demanded and exclude electromagnetic cluttering.

**Keywords:** Reactive power, Compensation device, step regulation, smooth regulation, electromagnetic, cluttering.

**Introduction.** Nowadays the main goal is to reduce electricity loses and gain electro technical parameters in the power supply system [1]. At the same time the main way out is to reduce the reactive power consumption by compensation and prevent power system from reactive power throughput [2]. It is significant to mention that for the compensation mostly static capacitor batteries (compensation device, CD) are used. During step commutation electromagnetic dynamic processes occur and different kind of electromagnetic cluttering (EC) are produced. As a result, in a supply system, power loses are increased and reliability and efficiency are decreased.

**Purpose of the work.** The main goal of the given paper is to get reactive power compensation device with capacitance step regulation, which assure current jerk reduction at the step connection/disconnection and retain electromagnetizing cluttering as low as possible. At the same time development of recommendations for the new power supply systems for reactive power compensation device usage with smooth step regulation ability.

**Research results.** According to existing methods, during power supply design to solve various exploitation and design subjects, active and reactive daily diagrams are used [3] (Fig. 1). For the factories to achieve reactive power factor improvement, for the compensation device step quantity and each step value determination one or half hour reactive power daily diagrams are used [4].

Should be mentioned that consumers connected to the power supply system contain different type electro technical devices and complexes (Fig. 2). All these

devices are equipped with individual management systems and serve to different technological processes [5].

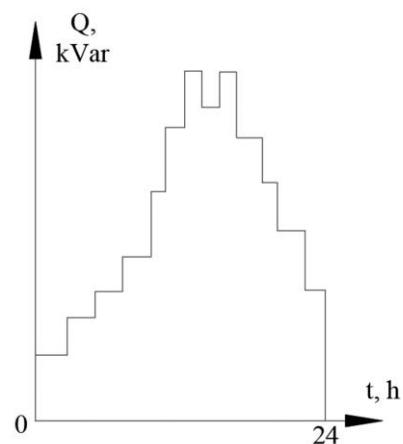


Fig. 1. Typical daily electrical load diagram

Based on above mentioned, electro technical devices and complexes connection happens gradually and sum of reactive power rise happens not rapidly, but smoothly. As a result reactive power gain for the factory is low and load curve looks like shown in (Fig. 3). From figure is seen that real load for factory significantly differs from step load. It can be determined, that reactive power consumption for the factory changes quasy-smoothly and there is no electromagnetic processes produced in the power supply.

For the power supply system to improve reactive power factor, reactive power compensation device (CD) with static capacitor batteries and step-regulation ability

are used [6]. Therefore, management of the power of CD is based on step-compensation diagram [7].

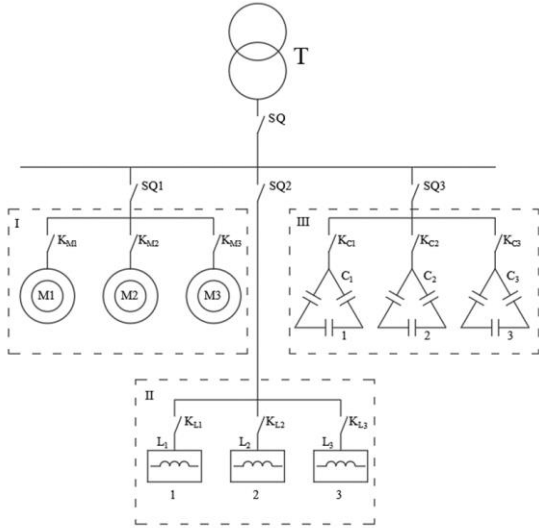


Fig. 2. Typical scheme of factory

In this case when factory reactive power reaches predetermined value, CD will instantly connect battery ( $C_1, C_2, C_3$ ) with reactive power ( $Q_{C1}, Q_{C2}, Q_{C3}$ ) through commutator ( $K_1, K_2, K_3$ ) to power supply system. Due to this instant connection of capacitor battery, dynamic processes and electromagnetic cluttering in the power system will occur.

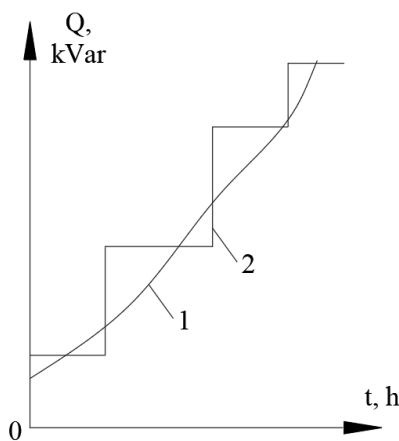


Fig. 3. Reactive power diagram

It is notable, that among electromagnetic cluttering, during connection of capacitance to the system high voltage jump while during disconnection voltage drop is dominant.

At the same time due to capacitance connection there is reactive power current curve distortion which cause high frequency harmonics in power system.

It is important to note that electromagnetic cluttering caused by step-commutation of CD decreases system performance, electromagnetic compatibility and efficiency.

It is notable, that as higher is quantity of steps in power consumption daily diagram, higher is commutation frequency of CD steps. As higher is power generated by capacitor battery, higher is electromagnetic cluttering amplitude produced.

As study data analyze shows it is necessary to perform actions to reduce current jerks during step commutation of CD.

To reduce current jerks produced, during commutation, transition process formation based method is proposed. Current limitation achieved by using active ( $R_{sh1}, R_{sh2}, R_{sh3}$ ) resistances in series with CD's each step (Fig. 4). Connection of  $R_{sh1}, R_{sh2}, R_{sh3}$  resistances is realized using shunt  $K_{R1}, K_{R2}, K_{R3}$  block. As a result during switch on each step is connected through active resistance and current limitation takes place. After transition process is completed CD control unit will switch shunt contacts on and capacitor battery will be connected to power supply directly. The same takes place during switch off, but in that case shunt contacts will switch off first and main commutation block contacts afterwards.

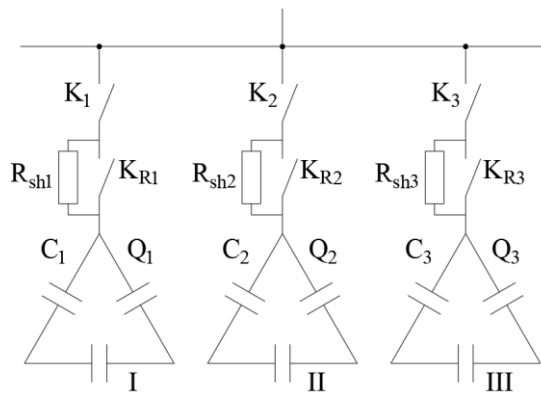


Fig. 4. Schematic diagram of optimal reactive power factor compensation device

It is important, that shunt resistance values and their influence duration are determined by power system and compensation device (CD) parameters. Resistance values and transition process duration can be easily calculated using fundamentals of electric engineering.

Compensation device controller system with smooth regulation ability is designed [8]. Power control in the above mentioned CD accomplished using transistor based limitation blocks and reactive current curves remain undistorted sinusoidal shapes. Based on that CD usage in the new power networks assures reactive power factor complete compensation and excludes electromagnetic cluttering.

## Conclusions

1. It is justified, that in a high power factories connection of electro technological complexes made step by step and as a result reactive power increases slightly. Electromagnetic processes proceed insignificant and no electromagnetic cluttering takes place;

2. By study is determined, that in a power system, reactive power factor regulation using high power capacitor batteries, there are electromagnetic cluttering caused by step commutation.

3. Proved, that in a power system among electromagnetic cluttering during switch-on the short period overvoltage is dominant and during switch-off the deep voltage drop.

4. For the existing power supply compensation devices commutation device is proposed. Which provides step-connection current and electromagnetic cluttering reduction.

5. Proved, that during newly designed power system for the manufacture it is reasonable to use compensation device with smooth regulation ability. Above mentioned device will realize reactive power factor full correction and at the same time will not produce electromagnetic cluttering at all.

## References (Literature)

1. Техническая коллекция Schneider Electric. Выпуск № 22. Гармонические искажения в электрических сетях и их снижение. М.: ЗАО «Шнейдер Электрик» 2008, с. 32.
2. Чунашвили Б.М., Петросян А.М., Шавелашвили Г.В., Тугуши М.А. Улучшение коэффициента реактивной мощности технологического комплекса с групповым асинхронным электроприводом. ISSN 2079-3944. г. Харьков (Украина) Вісник НТУ «ХПІ». 2015. No 12 (1121). с. 89-92.
3. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий/ Учебник для студентов высших учебных заведений М.: Интернет Инжиниринг, 2005. 672.
4. Чунашвили Б.М., Кобаля М.И., Петросян А.М., Гвимрадзе А. Дж. Определение и оценка уровня асимметрии реактивной нагрузки электропотребителей. ISBN 978-9941-453-03-8 //VI-международная конференция – энергетика: региональные проблемы и перспективы развития. Сб. статей. г. Кутаиси (Грузия) 2016 г. стр. 8-11.

5. Руководство по устройству электроустановок. Технические решения Schneider Electric. М.: ЗАО «Шнейдер Электрик» 2009, с. 469.
6. Вагин Г.Я. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике// Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов. Н. Новгород: Изд-во НГТУ, 2014.
7. Чунашвили Б.М., Кобаля М.И., Петросян А.М., Гвимрадзе А.Дж. Результаты исследований компенсации реактивной мощности при асимметричной нагрузке// Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": Темат. вып.: «ПАЭП. Теория и практика. Силовая электроника и энергоэффективность» №27. (1249- г. Харьков (Украина). 2017. С. 30-39.
8. ალექსანდრე პეტროსიანი რეაქტიული სიმძლავრის სტატიკური საკომპენსაციო დანადგარის მდორე რეგულირების მართვის სისტემის დამუშავება//დოქტორის აკადემიური ხარისხის დისერტაცია// საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, 2014. 104 გვ.

## References (Literature)

1. Tekhnicheskaya kolektsia "Schneider Electric". Vipusk № 22. Garmonicheskie iskajenia v elektricheskikh setiakh i ikh snijenie. [Harmonic distortion in electrical networks and their reduction] М.: ЗАО «Shneider Elektrik» 2008, s.32.
2. Chunashvili B.M., Petrosyan A.M., Shavelashvili G.V., Tugushu M,A,. Uluchshenie koeficienta reaktivnoy moshnosti tekhnologicheskogo kompleksa s grupovim asinkhronnim elektroprivodom. [Improvement of the reactive power factor of a technological complex with a group asynchronous electric drive]. ISSN 2079-3944. G. Kharkov (Ukraine) Visnik NTU «KhPI» 2015. No 12 (1121). s. 89-92
3. Kudrin B.I. Elektrosnabjenie promishlennikh predpriatii. Uchebnik dlia studentov bisshikh uchebnikh zavedenii-M.: [Power supply of industrial enterprises.Textbook for students of higher educational institutions M] Internet injinering, 2005. 672
4. Chunashvili B.M., Kobalia M.I., Petrosyan A.M., Gvimradze A.Dj. Opredelenie I otsenka urovnia asimetrii reaktivnoi nagruzki elektrpotrebitelei. [Determination and evaluation of the level of asymmetry of the reactive load of electric consumers.] ISBN 978-9941-453-03-8 // VI – Mejdunarodnaia konferentsia – Energetika:

Regionalnie problem I perspektivi razvitiia. Sbornik statei. G. Kutaisi (Gruzia) 2916 g. Str. 8.

5. Rukovodstvo po ustroistvu elektroustanovok. Tekhnicheskie reshenia "Schneider Electric". Moskva: ZAO «Shneider Elektrik» [Manual for the device of electrical installations. Technical solutions of Schneider Electric.] 2009, S. 469.

6. Vagin G. Ya. Elektromagnitnaia sovместimost v elektroenergetike // [ctromagnetic compatibility in the electric power industry.]// G. Ya. Vagin, A.A. Sovostyanov. – N. Novgorod: Izd-vo NGTU, 2014.

7. Chunashvili B.M., Kobalia M.I., Petrosyan A.M., Gvimradze A.Dj. Rezultati issledovaniia komensatsi reaktivnoi moshnosti pri asimmetrichnoi nagruzke [Results of studies of reactive power compensation under asymmetric load.] // Vestnik Hats. Un-ta "KhPI": Temat vip.: «PAEP. Teoria I praktika. Silovaia elektronika I energoefektivnost» №27 (1249- g. Kharkov (Ukraina) – 2017. – S. 30-39.
8. Aleksandre Petrosiani reaktiuli simdzlavis statikuri sakompensatsio danadgaris mdore regulirebis martvis sistemis damushaveba. [Processing of the control system of reactive power static compensatory unit regulation.] // Doktoris akademiuri khariskhis disertatsia // Sakartvelos teknikuri universiteti , Tbilisi, 2014 p.104

**პარალელურად ჩართული სამძარღვა კაბელების ერთიდაიგივე ფაზების ძარღვებს შორის დატვირთვის დენის გადანაწილების გამოკვლევა და უთანაბრობის მიზეზების დადგენა**

**ბადური ჭუნაშვილი**, ტ.მ.დ., პროფესორი

საქ. ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, e-mail: [b.chunashvili@gtu.ge](mailto:b.chunashvili@gtu.ge)

**მამუკა კობალია**, ტ.მ.კ., პროფესორი

საქ. ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, e-mail: [mamuka.kobalia@yahoo.com](mailto:mamuka.kobalia@yahoo.com)

**ალექსანდრე პეტროსიანი**, აკად. დოქტორი, ასოცირებული პროფესორი

საქ. ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, e-mail: [a.petrosyan@gtu.ge](mailto:a.petrosyan@gtu.ge)

**ნათია რთველაძე**

საქ. ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, e-mail: [natia.rtveldze@gmail.com](mailto:natia.rtveldze@gmail.com)

**ანოტაცია.** პარალელურად ჩართული სამძარღვა კაბელების ერთიდაიგივე ფაზების ძარღვებს შორის დატვირთვის დენის გადანაწილებასთან დაკავშირებით ჩატარებული კვლევების შედეგად დადასტურებულია, რომ მიუხედავად კაბელების პარამეტრების იდენტურობისა და ერთნაირი საექსპლუატაციო პირობებისა, ერთიდაიგივე ფაზების ძარღვებში გამავალი დენები მნიშვნელოვნად განსხვავდება ერთმანეთისაგან. დასაბუთებულია, რომ რიგ შემთხვევაში, მეტად დატვირთულ ძარღვში გამავალი დენი მნიშვნელოვნად აღემატება კაბელის ხანგრძლივ რეჟიმში გახურების პირობით გათვალისწინებულ დასაშვებ დენს. დადასტურებულია, რომ მიუხედავად ორივე კაბელში გამავალი ჯამური დენების სიმეტრიულობისა, ცალკეულ კაბელის ძარღვებში გამავალი დენები ასიმეტრიულია. დადგენილია, რომ პარალელურად ჩართულ ძარღვებს შორის გამავალი დენების სხვაობა ძირითადად განპირობებულია კაბალის საწყისსა და ბოლოში მიერთებების გარდამავალი წინააღმდეგობათა სხვაობით. დადასტურებულია, რომ პარალელურად ჩართული კაბელების ერთიდაიგივე ძარღვებს შორის გამავალი დენების სხვაობაზე დაფუძნებული განივი დიფერენციალური დაცვის საშუალებით გარდამავალ წინააღმდეგობებს შორის განსხვავების განსაზღვრა შეუძლებელია, რადგან სხვაობის დენი დიდმნიშვნელოვნად დამოკიდებულია ჯამურ დენზე. შემოთავაზებულია, პარალელურად ჩართული ერთიდაიგივე ფაზების ძარღვების წინააღმდეგობებს შორის უთანაბრობის გამოვლენისა და განსაზღვრის მეთოდი.

**საკვანძო სიტყვები:** კაბელები, სამძარღვა, პარალელურად ჩართული, გარდამავალი, წინააღმდეგობა, დატვირთვის დენი, ასიმეტრია, უთანაბრობა.

**Investigation of the distribution of load currents and the establishment of the reasons for the uneven distribution between parallel-connected three-core cables with the same name phases**

**Badur Tchunashvili**, Doctor of Science, Professor,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [b.chunashvili@gtu.ge](mailto:b.chunashvili@gtu.ge)

**Mamuka Kobalia**, Candidate of Science, Professor,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [mamuka.kobalia@yahoo.com](mailto:mamuka.kobalia@yahoo.com)

**Alexander Petrosyan**, PhD, Associate Professor,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [a.petrosyan@gtu.ge](mailto:a.petrosyan@gtu.ge)

**Natia Rtveldze**, doctoral student,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [natia.rtveldze@gmail.com](mailto:natia.rtveldze@gmail.com)

**Annotation.** Studies on the distribution of load currents between the phase cores of the parallel-connected three-core cables with the same name phases are confirmed by the fact that despite the identity of the cable parameters and the same operating conditions, the currents in the same name phase cores are significantly different from each other. It is substantiated that in some cases, the current, which flows in the more loaded core is significantly higher than the cable's long-term heating allowance. It is proved that despite the symmetry of the total currents flowing in both cables, the currents flowing in the individual cable strands are asymmetric. It is established that the difference in currents which flow between the parallel-connected cores is mainly due to the difference in the transient resistances, which are at the beginning and end of the cable. It is proved, that it is impossible to determine the difference between the transient resistances by means of a transverse differential protection, based on the difference in output currents between the single-

core cables of the parallel-connected cables, because the difference current is highly dependent on the total current. A method for detecting and determining the dissimilarity between the resistances of cores involved in parallel is proposed.  
**Keywords:** Cables, Wiring, Parallel connected, Transition, Resistance, Load current, Asymmetry, Inequality.

**შესავალი.** დღეის მდგომარეობით თანამედროვე ქალაქების ელექტრომომარაგების სისტემის საშუალო ძაბვის გამანაწილებელ ქსელზე მომხმარებელთა მიერ მოთხოვნილი დიდი სიმძლავრეების მიერთების მიმართულები მნიშვნელოვნად გაიზარდა. ეს ეხება, როგორც საყოფაცხოვრებო, ასევე არასაყოფაცხოვრებო სექტორს, რაც განაპირობა ქალაქის ფართის ერთეულზე ხვედრითი საანგარიშო ელექტრული დატვირთვების მნიშვნელოვანმა გაზრდამ [1]. სიმძლავრეების გაზრდა საყოფაცხოვრებო სექტორში განაპირობა დაბალსართულიანი და კერძო საცხოვრებელი სახლების მრავალსართულიანი საცხოვრებელი კომპლექსებით ჩანაცვლებამ, ხოლო არასაყოფაცხოვრებო სექტორში კი - სავაჭრო და კომერციული ინფრასტრუქტურის ფართო მშენებლობებმა, სადაც გათბობის, გაგრილების, ვენტილაციის სისტემებისა და სხვა დამხმარე მექანიზმებისათვის გამოყენებულია ელექტროენერგიაზე მომუშავე თანამედროვე ტიპის დიდი სიმძლავრის ელექტრომწიფობილობები. მაგალითად, ბოლო პერიოდში სს „თელასის“ გამანაწილებელ ქსელზე მიერთებული ახლი სიმძლავრეების მოცულობამ დაახლოებით 150-200 მვტ-ს მიაღწია [2].

**ამოცანის დასმა.** ელექტრომომარაგების გამანაწილებელ ქსელში ელექტრომომხმარებელთა გაზრდილი სიმძლავრეების ჩართვამ და როგორც ქალაქის მჭიდრო დასახლებიდან, ასევე ქალაქის ადმინისტრაციული სამსახურების მიერ საკაბელო ქსელის მშენებლობისათვის აუცილებელი საკაბელო ტრასების მშენებლობისათვის საჭირო კორიდორების შეზღუდვებიდან გამომდინარე, აუცილებელი გახდა 110/35/10/6 კვ-ის გამანაწილებელი ქვესადგურებიდან სიმძლავრეები გამოტანილი იქნას 10/6 კვ-ის ცენტრალურ გამანაწილებელ პუნქტებში, საიდანაც შემდგომ შესაძლებელი იქნება მომხმარებლების მოთხოვნების დაკმაყოფილება [3]. დღეისათვის გამანაწილებელ კომპანიებში ელექტროენერგიის გაზრდილი მოთხოვნების უზრუნველყოფის მიზნით, 6(10) კვ-ის ძაბვის საფეხურზე სიმძლავრეების გამოტანის პროცესის

განსახორციელებლად გამოყენებულია სამფაზა „XLPE“ იზოლაციის მქონე საკაბელო ხაზების დაწყვილების მეთოდი, რადგან დიდი სიმძლავრის გამოტანა აღნიშნული მარკის მაქსიმალური კვეთის ერთი კაბელის საშუალებით, რომელიც შეადგენს 240 მმ<sup>2</sup>, ფაქტიურად შეუძლებელია. შესაბამისად, ელექტრომომარაგების ქსელების წინაშე ურთულესი ტექნიკური პრობლემების წარმოქმნა [4]. ასევე, საშუალო ძაბვის დამწვევი ქვესადგურების სიმძლავრისა და თითოეულ ქვესადგურში ძალოვანი ტრანსფორმატორების რაოდენობის გაზრდის გამო, საჭირო გახდა საკაბელო ქსელი სამფაზა პარალელური კაბელებით შესრულება [5].

პრაქტიკულმა დაკვირვებებმა გვიჩვენა [6], რომ სამფაზა კაბელების დაწყვილების მეთოდით სიმძლავრის გადაცემა იწვევს საკაბელო ხაზების საექსპლუატაციო პირობების გაუარესებას და მათი საექსპლუატაციო პერიოდის შემცირებას, ასევე ავარიული რეჟიმების დროს ზრდის ავარიის ლიკვიდაციის პერიოდს, რაც თავის მხრივ საგრძნობლად მოქმედებს მომხმარებელთა ელექტრომომარაგების საიმედოობის მაჩვენებელზე „SAIDI“, რადგან იგი პირდაპირაა დამოკიდებული ავარიის ლიკვიდაციის დროზე. აღსანიშნავია რომ, პარალელურად ჩართული კაბელებით შესრულებულ ქსელებში, განსხვავებით თითო კაბელებით შესრულებულისა, გაუთვალისწინებელი ელექტრომაგნიტური დინამიკური პროცესები წარმოიქმნება, რის შედეგად რთულდება მომხმარებელთა მუშაობის პირობები, უარესდება ქსელის ენერგეტიკული და ელექტროენერგიის ხარისხის მაჩვენებლები, ენერგოეფექტურობა და რთულდება ელექტრომაგნიტური თავსებადობის პირობები. ამავდროულად, წარმოიქმნება ერთიდაიგივე ფაზის პარალელურად ჩართულ ძარღვებში გამავალი დენების უთანაბრობა, რაც ხშირ შემთხვევაში კაბელების გადახურების და ავარიის გამომწვევი მიზეზი ხდება.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, პარალელურად ჩართულ კაბელებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესების შესწავლა, მათი წარმოქმნის მიზეზების დადგენა და მათ



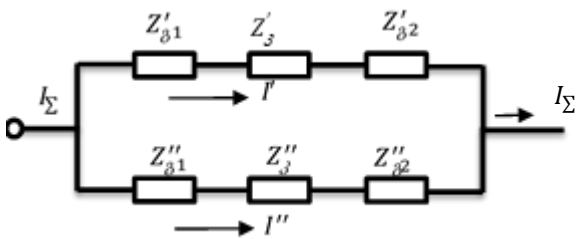
მიერ გამოწვეული უარყოფითი შედეგების შეფასება ერთერთ აქტუალურ პრობლემას წარმოადგენს.

**ამოცანის მიზანი**

სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს ქალაქების ელექტრომომარაგების სისტემის საშუალო ძაბვის გამანაწილებელ ქსელში გამოყენებული პარალელურად ჩართულ კაბელებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური დინამიკური პროცესების გამოკვლევის საფუძველზე დადგენილ იქნეს პარალელურად ჩართულ კაბელების ძარღვებს შორის გამავალი დენების უთანაბრობის გამომწვევი მიზეზები, დამუშავებულ იქნეს უთანაბრობის გამოვლენისა და სხვაობის დენის განსაზღვრის მეთოდი.

**კვლევის შედეგები**

პარალელურად ჩართულ კაბელებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევისათვის შედგენილია პარალელურად ჩართული კაბელების ერთიდაიგივე ფაზის ძარღვების შეერთების ჩანაცვლების სქემა (ნახ. 1). ნახაზზე დატანილია შემდეგი აღნიშვნები:  $Z'_{\beta 1}$  და  $Z''_{\beta 1}$  - პირველი კაბელის ძარღვის დასაწყისსა და ბოლოში მიერთების კონტაქტის გარდამავალი წინააღმდეგობა, ომი;  $Z'_\beta$  - პირველი კაბელის ძარღვის წინააღმდეგობა, ომი;  $Z'_{\beta 2}$  და  $Z''_{\beta 2}$  - მეორე კაბელის ძარღვის დასაწყისსა და ბოლოში მიერთების კონტაქტის გარდამავალი წინააღმდეგობა, ომი;  $Z''_\beta$  - მეორე კაბელის ძარღვის წინააღმდეგობა, ომი;  $I'$  და  $I''$  - შესაბამისად, პირველ და მეორე კაბელში გამავალი დენი, ა;  $I_\Sigma$  - ჯამური დატვირთვის დენი, ა.



ნახ. 1. პარალელურად ჩართული კაბელების ერთიდაიგივე ფაზის ძარღვების შეერთების ჩანაცვლების სქემა

სქემაზე მოცემული შენაცვლების სქემისათვის, ცნობილი მეთოდების [7] საფუძველზე, შედგენილია გამოსახულებები:

$$\begin{aligned} \Delta Z &= Z' - Z''; \\ \Delta U &= I'Z' = I''Z''; \\ K_{\text{ყოთ } Z} &= \frac{Z'}{Z''}; \\ I_\Sigma &= I' + I''; \\ \Delta I &= I' - I''; \\ K_{\text{ყოთ } I} &= \frac{I''}{I'} \end{aligned} \quad (1)$$

სადაც

$Z'$  და  $Z''$  - შესაბამისად, პირველი და მეორე კაბელის ერთიდაიგივე ფაზის ჯამური წინააღმდეგობაა, ომი;  $\Delta Z$  - ძარღვების ჯამური წინააღმდეგობებს შორის განსხვავებაა, ომი;  $\Delta U$  - ძაბვის ვარდნაა; ა, ვ;  $K_{\text{ყოთ } Z}$  - კაბელების ერთიდაიგივე ფაზის ძარღვების წინააღმდეგობებს შორის უთანაბრობის კოეფიციენტი;  $\Delta I$  - კაბელების ერთიდაიგივე ფაზის ძარღვებში გამავალ დენებს შორის სხვაობაა, ა;  $K_{\text{ყოთ } I}$  - კაბელების ერთიდაიგივე ფაზის ძარღვებში გამავალი დენებს შორის უთანაბრობის კოეფიციენტი. აღსანიშნავია, რომ კაბელის მიერთების კონტაქტი ექსპლუატაციის პერიოდში თანდათან უარესდება. ამავდროულად, კონტაქტის გარდამავალი წინააღმდეგობა გამავალი დენის ფუნქციაში იცვლება ( $R_\beta = f(I)$ ).

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, პარალელურად ჩართული კაბელების ერთიდაიგივე ფაზის ძარღვებში გამავალი დენების უთანაბრობა გამოწვეულია ძარღვების საწყისსა და ბოლოში მიერთების კონტაქტების გარდამავალი წინააღმდეგობების განსხვავების შედეგად.

წარმოდგენილი (1) გამოსახულებების გარდაქმნის საფუძველზე, მიღებულია კაბელების ძარღვების დენებს შორის სხვაობის ჯამურ დატვირთვის დენზე დამოკიდებულების ფორმულა:

$$\Delta I = K_{\text{ყოთ } Z} I_\Sigma \quad (2)$$

როგორც (2) გამოსახულებიდან ჩანს, პარალელურად ჩართული კაბელების ერთი ფაზის ძარღვებში გამავალ დენებს შორის სხვაობა  $\Delta I$ , ერთიდაიგივე წინააღმდეგობის უთანაბრობის კოეფიციენტის  $K_{\text{ყოთ } Z}$  პირობებში, დიდმნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ორივე ძარღვში გამავალი ჯამური დენის  $I_\Sigma$  სიდიდეზე.

მნიშვნელოვანია, რომ პარალელურად ჩართული ძარღვები კაბელების დაცვისათვის

ხშირ შემთხვევაში გამოიყენება განივი დიფერენციალური დაცვა [8]. რადგან, განივი დიფერენციალური დაცვის პრინციპი დაფუძნებულია სხვადასხვა კაბელის ერთიდაიგივე ფაზის ძარღვებში გამავალი დენების სხვაობაზე, გამჭოლი მოკლედ შერთვებისას, გარდამავალი წინააღმდეგობების უთანაბრობით განპირობებული დენის მნიშვნელობამ შეიძლება გადააჭარბოს დაცვის ამოქმედების დენს და ადგილი ჰქონდეს საკაბელო ხაზის ყალბ ამორთვას.

### დასკვნა

1. ნაქსოვი პოლიეთილენის იზოლაციის მქონე პარალელურად ჩართული სამძარღვა კაბელების ერთიდაიგივე ფაზის ძარღვებს შორის დატვირთვის დენის გადანაწილებასთან დაკავშირებით ჩატარებული კვლევების შედეგებით დადასტურებულია, რომ მიუხედავად კაბელების პარამეტრების იდენტურობისა და ერთნაირი საექსპლუატაციო პირობებისა, ერთიდაიგივე ფაზების ძარღვებში გამავალი დენები მნიშვნელოვნად განსხვავებულია ერთმანეთისაგან;

2. ქ. თბილისის ელექტრომომარაგების სისტემის საშუალო ძაბვის ქსელებში ჩატარებული ექსპერიმენტული გამოკვლევებით დასაბუთებულია, რომ რიგ შემთხვევაში, მეტად დატვირთული ძარღვში გამავალი დენი მნიშვნელოვნად აჭარბებს კაბელის, ხანგრძლივ რეჟიმში გახურების პირობით გათვალისწინებულ დასაშვებ საპასპორტო დენს;

3. დადასტურებულია, რომ მიუხედავად ორივე კაბელში გამავალი ჯამური დენების სიმეტრიულობისა, ცალკეული კაბელის ძარღვებში გამავალი დენები ასიმეტრიულია;

4. პარალელურად ჩართული კაბელების შენაცვლების სქემის პარამეტრების ხარისხობრივი და რაოდენობრივი ანალიზის საფუძველზე დადგენილია, რომ პარალელურად ჩართულ ძარღვებს შორის გამავალი დენების სხვაობა ძირითადად განპირობებულია კაბელის დასაწყისსა და ბოლოში მიერთებების კონტაქტის გარდამავალ წინააღმდეგობათა უთანაბრობით;

5. დადასტურებულია, რომ პარალელურად ჩართულ კაბელების ერთიდაიგივე

ძარღვებს შორის გამავალი დენების სხვაობაზე დაფუძნებული განივი დიფერენციალური დაცვის საშუალებით წინააღმდეგობებს შორის განსხვავების განსაზღვრა შეუძლებელია, რადგან სხვაობის დენი დიდმნიშვნელოვნად დამოკიდებულია ჯამურ დენის სიდიდეზე;

6. შემოთავაზებულია, პარალელურად ჩართული ერთიდაიგივე ფაზების ძარღვების წინააღმდეგობებს შორის უთანაბრობის გამოვლენის მეთოდი, რომელიც დაფუძნებულია ერთიდაიგივე ფაზის პარალელურად ჩართულ ძარღვებში გამავალი ჯამური დენისა და ძარღვებში გამავალი დენების სხვაობის ერთდროულ კონტროლის პრინციპზე.

### ლიტერატურა

1. საქართველოს ენერგეტიკისა და წყალმომარაგების მარეგულირებელი ეროვნული კომისიის 18.12.2020 წლის #75/2 გადაწყვეტილებით დამტკიცებული სს „თელასის“ ქსელის განვითარების ხუთწლიანი გეგმა, 2021-2025 წწ.
2. Отчёт о результатах производственной деятельности АО «Теласи» за 2020 год, утверждённой техническим руководителем Общества от 10.02.2021.
3. Аварии и технологические нарушения за период с 01.01.2020 г. по 31.12.2020 г. на объектах АО «Теласи». Краткий отчет инцидентов и прерывании на период 2020 год. Отдел анализа и развития сети г. Тбилиси. 2021.
4. Техника и технология выбора, строительства и эксплуатации кабельных линий 0,4-110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена - Стандарт организации АО «Теласи» 2018.
5. Проект по электроснабжению нового жилого комплекса «Дирси» от ПС авиазавод мощностью 9 МВА. 2012.
6. Статистика повреждаемости кабелей 6(10) кВ в распределительной сети АО «Теласи» на период 2019-2020 г, основные причины и мероприятия по их устранению/Отчёт производственно-технической службы от 10.03.2021.
7. Ананичева С.С., Мызин А.Л. Схемы замещения и установившиеся режимы электрических сетей – Екатеринбург УрФУ 2012.
8. <https://www.ruscable.ru/info/pue/3-2.html>

## Automation of 10kV distribution network site on the basis of short-circuit power indicators

**Teimuraz Gamrekelashvili**, PhD, Head of Production and Technical Service of JSC "Telasi",  
Tbilisi, Georgia, e-mail: t.gamrekelashvili@telasi.ge

**Malkhaz Kvrivishvili**, PhD, Leading engineer of Production and Technical Service of JSC "Telasi",  
Tbilisi, Georgia, e-mail: malkhaz.kvrivishvili@telasi.ge

**Konstantin Tsereteli**, candidate of technical sciences, professor, Georgian Technical University,  
Tbilisi, Georgia, e-mail: [tseretelik@gtu.ge](mailto:tseretelik@gtu.ge)

**Nikoloz Kvrivishvili**, PHD. Leading engineer of telemechanics and automatic sistem direction JSC "Telasi",  
E-mail: n.kvrivishvili@telasi.ge

**Annotation.** In order to minimize the power outage time, increase the quality of energy supplied, operative and rapid detection of damage in areas that are not equipped with circuit breakers and have multiple branches, the paper proposes a project to install short-circuit current indicators in a given area of the network.

With the help of such a decision, there is an opportunity to promptly identify the damaged area, turn it off, and then turn on the main line, in time to restore nutrition to undamaged destinations. All of this ultimately improves the uninterrupted power supply settings.

**Keywords:** short-circuit current indicator, power outage time, end-user branches.

**Introduction.** The paper discusses the study and design of a 10 kV distribution network site automation tool based on short-circuit current indicators.

As it is known, the 6-10 kV distribution network is the last link of the e-customer supply. The final result of the whole process of energy production, transmission and distribution depends on the smooth and hopeful work of this link.

### Particularity of branched networks

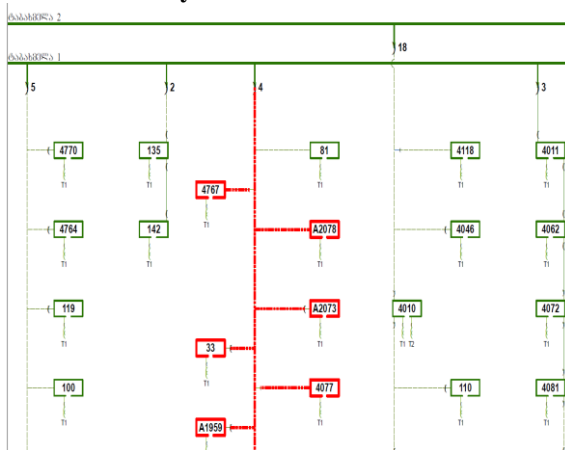


Fig. 1. Branch networks dispatch scheme

**Current methods of finding damages.** Typically, such sites are powered by the base cells of the basic 110/35/10 kV substations. Power is transmitted through the overhead or cable transmission lines in radial directions to which the end-user branches of the grid are connected. The cells are communicated by load breakers directly by hand control, and the sections from the corresponding branch to the consumer substation by so-called dry switches.

Appropriate measures for one of the 10 kV distribution network areas have been studied and discussed in order to improve the reliability of e-energy supply.

A study and analysis of the precinct network, its configuration, equipment condition, management tools, operating procedures has been conducted.

When elements of such a branch are damaged, as a rule, in the best case, the output cell of the main transmission line or a higher hierarchical stage of the substation, such as an input or a section breaker, can be automatically switched off. As a result, several trunks with their numerous branches are left without power. In such cases, as a rule, the damage is found primitively by hand. The disconnected joints are connected in sequence, thus looking for the damaged trunk. Branch search by sequential shutdown. This procedure takes a long time, sometimes several hours, which fundamentally degrades the customer's energy supply. SC current indicator ИК3-В31.

The paper researches, studies and processes to increase the reliability and efficiency supply through short-circuit current indicators. The following issues are discussed in sequence in the master thesis:

1. 10 kV network site survey
2. Reliability analysis,
3. Review of available means of fault detection
4. Review of DC power indicators,
5. Specification and selection of their technical parameters.
6. Calculation of short-circuit currents on transmission line and its branches,
7. Identification and selection, selection of short-circuit installations at the appropriate points in the network area

8. Calculation of protection settings.

9. Development of operating instructions for the created system and drawing conclusions.

**Short circuit indicators.** The purpose of the ICS-K4-TN short-circuit indicator is to determine the location and direction of the 6-35 kV overhead and cable transmission lines. The indicator operates on transmission lines, both in isolated neutral network and grounded neutral.

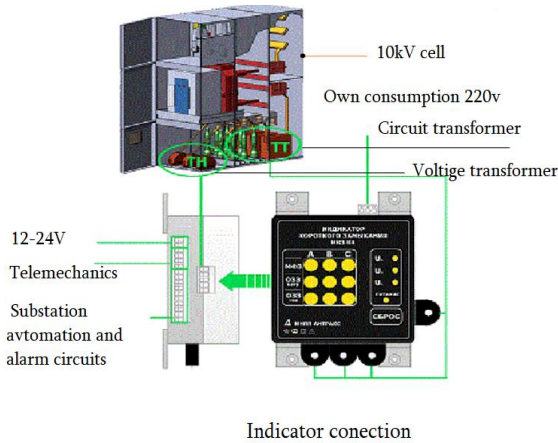


Fig. 2. SC current indicator IK3-B31

The indicator is attached to the cell of the dispensing device, both on its front wall and in its side plane. One or more colored signs with light reflective coating in light yellow color. Information is transmitted simultaneously through the telemechanics system. After the time set on the timer, the indicator returns to the initial state.

One or more parameters fixed by the indicator are used to determine the search direction: the value of the emergency currents, the time of the accident, the accuracy of one second, and the type of accident.

Special software is used to view the accident settings or to set up the indicator, information from the indicator can be transmitted through the MODBUS protocol.

**Destination.**

The ICZ-B31 indicator belongs to the class of devices for protection of the damaged area and is intended for detection of the damaged area in case of unilateral feeding on 6-110 kV transmission lines.

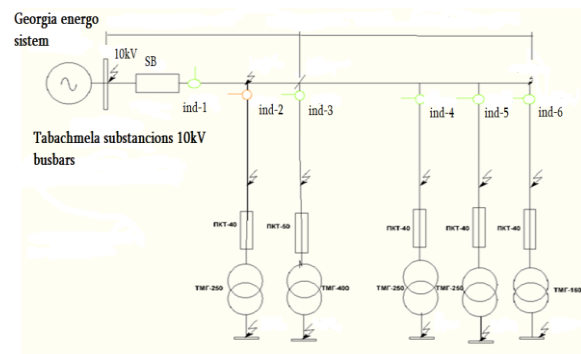
The indicator can be installed regardless of the suspension configuration and the number of chains on the transmission line, with a conductor diameter of 7-40 mm. The indicator is mounted directly on the line conductor by hanging. This is done using a mounting barbell without turning off the line. Fig. Hanging 25 indicators without interrupting the voltage supply to the line.

The indicator detects accidental processes if the current exceeds 25 amps.

The set can consist of two or three indicators. Accordingly, IK3-B31B2 and IK3-B31B3. The ICZ-B31B2 can detect two-phase or three-phase short circuits, while the ICZ-B31B3 can detect both single-phase and interphase short circuits.

**Methodology of finding damaged points.** The principle of modernization is as follows: The feed main output feeder is equipped with a short-circuit current indicator, which not only records the fact of short-circuit current, but also the parameters and time of this current for both phase-to-phase and ground-to-ground short-circuits. Accordingly, not only the fact of damage is fixed, but also indirect information about the place of damage is created. Simultaneously, the information is transmitted to the dispatcher control panel. The received information is processed by the dispatcher and the action scenario of the replacement emergency brigade is processed.

At this stage, the substation feeds back to all undamaged directions, while the brigade passes over the damaged direction. Thus, the indicator accelerates the search for the damaged direction and excludes the inclusion of a series of directions in the shutdown operations. In addition, the beginnings of the branches are worked out with indicators. Optical alarm starts working on the damaged direction, which allows the damaged branch to be identified. The brigade turns off the damaged direction and then the appropriate feeder is activated in the substation, thus restoring the feeding of the highway users. The indicator of the damaged branch indicates the location of the damage on it and then the repair work begins.



Coordination diagram of short-circuit indicators

Fig. 3. Coordination diagram of short-circuit indicators

The device runs internal email battery charge control. When the battery charge level is less than 20%, the LED starts flashing yellow with a dual flash every 5 minutes. In this case it is necessary to replace the battery within the next 6 months.

The device will run automatically after replacing the battery.



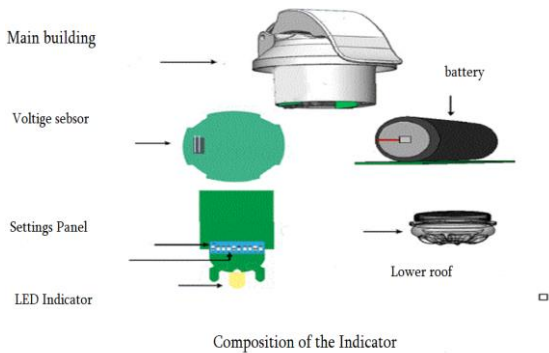


Fig. 4. Composition of SC indicator IK3-B31

**Calculation of short-circuit currents, protections and short-circuit indicators. For a branched transmission line.**

In order to calculate the short-circuit indicator set-up report, it is necessary to know the short-circuit currents at each characteristic point of the section of the reporting network area.

In our case, the 35/10 kV substation and the outgoing transmission line with the corresponding branches are given. As well as the descent of the hanging structure indicators, which must control the outlet currents in the branch and must fix them.

Installing SC current indicators on the 10 kV substations of the substation will allow us to quickly detect the damaged direction out of the section, turn it off and restore power to those directions that are not damaged.

**Telemechanics.**

A device of telemechanics, it is a whole complex of devices that performs management, signaling, telemetry in a number of fields, including the energy sector.

Today, telemechanics devices play an important role in the economy of energy facilities.

The tasks of telemechanics are: centralized management in real time, reliable and reliable delivery of information, efficient use of the communication channel, implementation of operational management control, scalability and compatibility.

Telemechanics currently occupies an important part in the energy economy. Relay protection and automation tools are a single complex with telemechanics. Telemechanics devices seriously increase the quality of operational dispatch services, which ultimately increases the quality of service of facilities and with the help of reliability means can reduce operating costs.

In order to increase the efficiency of the implemented short-circuit power indicators, it is necessary to connect this system to the JSC "Telasi" dispatch control panel.

For this purpose, the paper uses the software-technical complex Ersi already implemented and working in Telasi. This complex allows operative information to be transmitted from objects in a voice and voice format. It can be used for remote control and telemetry functions.

The implementation of this system is required primarily on substations where there is no local operational personnel. The complex can also synchronize the internal time of the object with astronomical time. It is also possible to transmit data to adjacent systems via standard transmission protocols - IEC 60870-104 as well as receiving and transmitting commands from adjacent devices. Also remembering and registering AC settings, remote diagnostics of built-in and connected modems via Ethernet RS networks.

The external view of the RC telemechanical system is shown in the photo below:

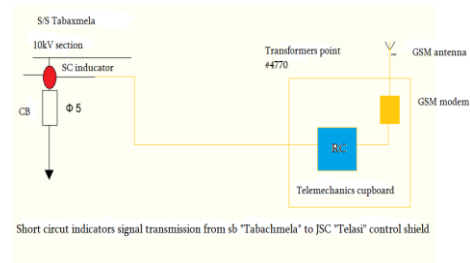


Fig. 5. SC signal transmission



Fig. 6. Set of telemechanics from the transformer station

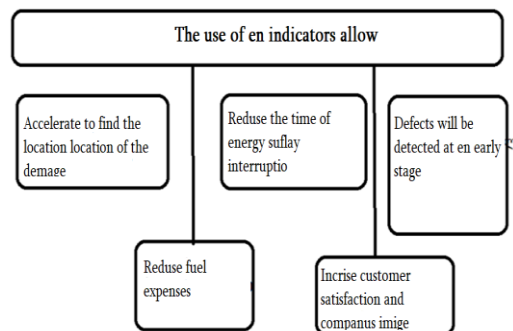


Fig. 7. Results of using indicators of short-circuit current

### Conclusions

As a result of research and analysis of the issues discussed in the master's thesis, it was determined:

1. In a 10 kV branch network, due to damage to any of its elements, as a result of emergency shutdown, not only the damaged direction is cut off, but also the entire supply line with all branches.
2. Finding and eliminating the damaged area is done primitively, turning the branches on and off through the emergency areas.
3. The existing procedure worsens the reliability and quality of the customer's energy supply.
4. Classical laboratory methods for detecting damage are ineffective in this case, requiring a lot of time and laboratory measurements.
5. Modern indicators of short-circuit current instantly fix the type of MSH, accident parameters and time.
6. According to the observed parameters, the damaged direction is quickly determined and the undamaged directions of the network are operatively switched on.
7. According to the parameters recorded in the damaged direction and based on the calculated (pre) currents, the place of the lesion is quickly determined

and it is operatively liquidated without any preliminary laboratory measurements.

8. The information received as a result of the damage is immediately transferred to JSC Telasi Dispatcher Shield for operational decision making.

9. The process of crash elimination process should fundamentally change the reliability and quality of the network.

### References

1. Shvedov G.V. Electrosnabjenie gorodov; electropotreblenie, rashotnie nagruzki, raspreditelnie seti. M.: Izdatelskii dom. M.E.I, 2012-268 st.
2. Taranov M.A. Ecspluatacia electrooborudovania. M.: Forum, 2016-176st.
3. Shalit G.M. Opredelenie mest povrejdienia v electriceskix seti. M.: Energoatomizdat, 1982-310st.
4. Raschot tokov korotkogo zamikania v elctrisetiax 0,4-35kv, Golubev M.B. 1980g.
5. Indikator korotkogo zamikania IKZ-K4-A-TM, E



ელექტროენერგეტიკური სისტემები და კომპლექსები. ძალური ელექტრონიკა  
Electric power systems and complexes. Power electronics

Системы активной балансировки аккумуляторных батарей  
и их энергетическая эффективность

**Евгений Сокол**, д.т.н., профессор

НТУ «Харьковский политехнический институт», Украина, e-mail: [evgen.sokol@khpi.edu.ua](mailto:evgen.sokol@khpi.edu.ua)

**Владимир Замаруев**, к.т.н., профессор

НТУ «Харьковский политехнический институт», Украина, e-mail: [volodymyr.zamaruiev@khpi.edu.ua](mailto:volodymyr.zamaruiev@khpi.edu.ua)

**Богдан Стысло**, к.т.н. доцент

НТУ «Харьковский политехнический институт», Украина, e-mail: [bohndan.styslo@khpi.edu.ua](mailto:bohndan.styslo@khpi.edu.ua)

**Александр Ереско**, к.т.н. доцент

НТУ «Харьковский политехнический институт», Украина, e-mail: [oleksandr.eresko@khpi.edu.ua](mailto:oleksandr.eresko@khpi.edu.ua)

**Аннотация.** В работе выполнен обзор существующих схемных решений устройств для балансировки аккумуляторных батарей. Описаны принцип балансировки на основе емкостного и индуктивного буферного элементов. Показаны особенности их работы и основные расчеты каждого из типов устройств. Для схем с трансформаторной топологией указано расчетные значения для определения балансирующего тока. На основании анализа схемных решений, численно определены и доказана эффективность использования схемных решений на основе индуктивных буферных элементов.

**Ключевые слова.** БСНЭ, DC/DC преобразователь, активная балансировка, энергоэффективность, буферный элемент, трансформаторная балансировка.

Features of the operation of active battery balancing systems

**Yevgen Sokol**, Doctor of Technical Sciences, Professor

Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, NTU "KhPI" (Ukraine, Kharkiv), e-mail: [evgen.sokol@khpi.edu.ua](mailto:evgen.sokol@khpi.edu.ua)

**Volodymyr Zamaruiev**, Candidate Degree in Technical Science, Professor,

NTU "KhPI" (Ukraine, Kharkiv), e-mail: [volodymyr.zamaruiev@khpi.edu.ua](mailto:volodymyr.zamaruiev@khpi.edu.ua)

**Bohdan Styslo**, Candidate Degree in Technical Science, Associate Professor,

NTU "KhPI" (Ukraine, Kharkiv), e-mail: [bohndan.styslo@khpi.edu.ua](mailto:bohndan.styslo@khpi.edu.ua)

**Aleksandr Eresko**, Candidate Degree in Technical Science,

Associate Professor, NTU "KhPI" (Ukraine, Kharkiv), e-mail: [oleksandr.eresko@khpi.edu.ua](mailto:oleksandr.eresko@khpi.edu.ua)

**Summary.** The paper provides an overview of the existing circuit solutions of balancing devices for storage batteries. The principle of balancing based on a capacitive and inductive buffer element is described. The features of their work and the main calculated dependencies of each of the types of devices are shown. For circuits with transformer topology, the calculated values are indicated to determine the balancing current. Based on the analysis of circuit solutions, the effectiveness of the use of circuit solutions based on inductive buffer elements is numerically determined and proved..

**Keywords:** BESS, DC/DC converter, active balancing, efficiency, buffer element, transformer balancing

**Постановка задачи.** В последнее время, разработчики устройств преобразовательной техники уделяют повышенное внимание структурам, имеющих в своем составе электрохимические накопители электрической энергии (аккумуляторные батареи – АБ) – батарейным системам накопления энергии (БСНЭ). Однако, их применение в системах электропитания требует использования ряда дополнительных специализированных преобразователей электрической энергии как согласующих – обеспечивающих связь между БСНЭ и сетью [1], так и сервисных – обеспечивающих безопасный режим работы

накопителей. Безопасность работы АБ обеспечивается, в том числе, выравниванием уровней напряжения на последовательно соединенных ячейках, контролем за соблюдением предельных уровней напряжения на каждом из накопителей БСНЭ [2]. Известно, что АБ на основе лития имеют ряд преимуществ над свинцово-кислотными, но требуют более жесткого соблюдения условий эксплуатации: поддержания заданного напряжения на элементе АБ (ЭАБ) на всем интервале заряд-разрядного цикла. Так, регламентированный разработчиком диапазон напряжения на LiFePO<sub>4</sub> ЭАБ составляет 2,0 - 3,65 В [3]. Выход за нижнюю границу

вызывает преждевременное «старение» батареи, а выход за верхнюю – может привести к окончательному выходу накопителя из строя.

Мощные АБ для БСНЭ и систем автономного электропитания используются в виде стеков, состоящих из последовательно-параллельного соединения ЭАБ (накопителей). Во время их эксплуатации возникает проблема неравномерного разряда или заряда, для компенсации которой необходимо выполнять балансировку уровней напряжения в ЭАБ стека. Существует большое количество схемных решений, осуществляющих выравнивание напряжения. Условно их можно разделить на две большие группы: системы пассивной и активной балансировки. Первую группу иногда называют «резисторной балансировкой» [4-6]. Практически вся избыточная энергия батарей с повышенным напряжением рассеивается в виде тепла на резистивных регулирующих элементах, что, безусловно, является существенным недостатком пассивного метода. Такой метод обычно используют в недорогих маломощных устройствах. При активном методе балансировки [7-15] для передачи энергии от батарей с избыточным зарядом к менее заряженным батареям используются промежуточный накопитель энергии. В качестве таких буферных элементов применяются конденсаторы или индуктивности, потери энергии в которых незначительны.

Целью данной работы является сравнительный анализ эффективности существующих схем активной балансировки и определение численного значения эффективности их использования.

**Системы активной балансировки с емкостным буферным элементом.** Принцип работы балансира поясняется на рис. 1. Для передачи энергии между двумя ЭАБ  $B1$  и  $B2$ , буферный конденсатор  $C1$  сначала подключается с помощью ключей  $S1$  и  $S2$  к ЭАБ  $B1$  (Рис. 1, а). За время  $\Delta t_1$  (Рис. 1, в) он заряжается до напряжения на ЭАБ  $B1 - u_{B1}$ . На следующем этапе работы схемы (Рис. 1, б), заряженный до величины  $u_{B1}$  конденсатор подключается к ЭАБ  $B2$ , имеющему меньший по сравнению с ЭАБ  $B1$  уровень заряда.

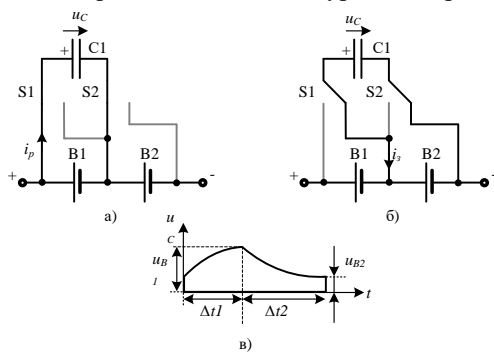


Рис. 1. Принцип работы емкостного балансира

Следует отметить, что алгоритм переключения конденсатора при противоположном значении уровней напряжений аккумуляторов (ЭАБ  $B2$  имеет

избыточный заряд, а ЭАБ  $B1$  – недостаточный) не изменяется, а это значит, что нет необходимости четкого определения – какой из пары ЭАБ имеет больший уровень напряжения, что позволяет обходиться без датчиков напряжения.

Модифицированная схема балансира с одним переключающимся конденсатором, приведенная на рис. 2, содержит датчик, измеряющий напряжение на конденсаторе, для контроля за напряжением на каждом из ЭАБ стека. Выводы датчика показаны на рисунке терминалами + и -. Балансир требует наличия удвоенного, по отношению к количеству элементов стека  $N$ , числа ключей переменного тока –  $2*N$ . С помощью двух ключей балансирующий конденсатор  $C$  может быть подключен к любому из ЭАБ стека.

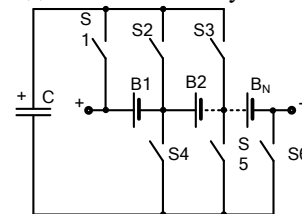


Рис. 2. Модифицированная схема емкостного балансира

В схеме (рис. 2) решена проблема передачи энергии между двумя произвольными ЭАБ стека, в том числе, находящихся на его противоположных концах, поскольку преобразователь имеет возможность целенаправленной – «адресной» передачи энергии минуя включенные между «донором» и «акцептором» аккумуляторы. Измеряя напряжение на конденсаторе, система управления может определить текущее значение разбалансировки в стеке. Использование единственного переключающегося конденсатора, упрощает процесс измерения напряжения на ЭАБ и уменьшает количество необходимых датчиков напряжения.

Всем существующим схемам балансиров на основе емкостного буферного элемента присущ существенный недостаток: заряд конденсатора при отборе от аккумулятора-донора избыточной энергии и его разряд во время передачи энергии к аккумулятору-акцептору происходит неконтролируемым током, фактически ограниченным только внутренними сопротивлениями элементов. Таким образом, основным недостатком балансиров с емкостным буферным элементом является низкий КПД системы промежуточного хранения энергии, определяемый режимом заряда конденсатора с резистивным токоограничением и ненормируемые токи в цепях заряда.

**Системы активной балансировки с индуктивным буферным элементом.** Дуальными по отношению к рассмотренным выше, являются схемы активной балансировки, где в качестве буферного элемента используется индуктивность дросселя  $L$  [16-20]. Схема балансировки для  $N$  батарей приведена на

рис. 3. Она состоит из  $N-1$  дросселей, используемых в качестве буферного элемента, и  $2N-2$  ключей.

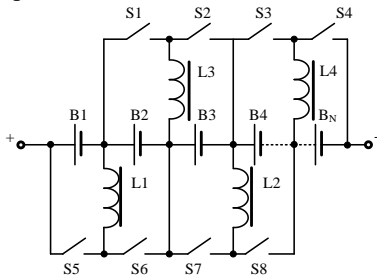


Рис. 3. Схема активного балансира с переключающимися индуктивностями

Рассмотрим принцип балансировки на примере двух батарей (Рис.4). Для передачи энергии между двумя ЭАБ  $B1$  и  $B2$  буферный дроссель  $L1$  сначала подключается с помощью ключа  $S1$  к ЭАБ  $B1$  (Рис. 4, а). За время  $\Delta t_1$  (Рис. 4, б) ток в нем нарастает до заданного значения. На следующем этапе работы схемы  $\Delta t_2$  дроссель  $L1$  подключается с помощью ключа  $S2$  к ЭАБ  $B2$ , передавая ему накопленную энергию.

В качестве ключей могут быть использованы *MOSFET*-транзисторы, как показано на рис. 4, а. В этом случае на втором полупериоде работы схемы (интервал  $\Delta t_2$ ) можно не осуществлять управление ключом  $S2$ , поскольку направление протекания тока  $i_2$  является прямым по отношению к диоду, который присутствует во внутренней структуре транзистора.

Работа балансира напоминает работу обратного широтно-импульсного преобразователя, поэтому, балансир может работать в двух режимах: прерывистого и непрерывного тока.

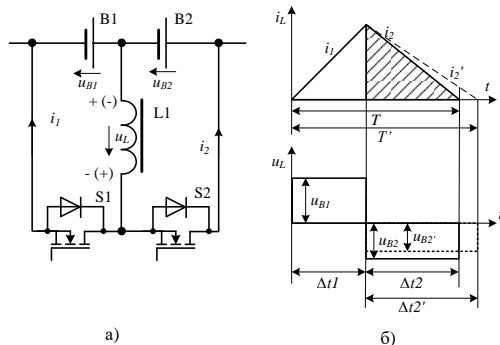


Рис. 4. Принцип работы преобразователя (а) и диаграммы тока и напряжения на обмотке индуктивного буферного элемента (б)

В первом случае вся энергия, которая была накоплена в течение первого полупериода, передается к аккумулятору-акцептору за время второго полупериода, и ток  $i_2$  успевает спасть до нуля. Во втором режиме за время  $\Delta t_2$  к аккумулятору-акцептору передается только часть энергии, которая была накоплена в течение первого полупериода и ток дросселя к нулю не спадает. Второй режим позволяет

уменьшить пульсации тока, однако, вызывает увеличение мощности потерь при коммутации в ключах, поскольку коммутация происходит при ненулевом значении тока [21, 22].

**Активные балансиры на основе многообмоточных трансформаторов.** Отдельным классом активных балансиры являются схемы, где в качестве буферного элемента для передачи энергии между АБ используется многообмоточный трансформатор или несколько трансформаторов. Такие схемные решения позволяют совместить в себе функции балансировки и системы энергоменеджмента батареи. В ряде работ [23-25] предлагается схема с топологией, приведенной на рис. 5. В работах [26, 27] предлагается вместо нескольких отдельных трансформаторов использовать один многообмоточный трансформатор. В этом случае достаточным является применение одной вторичной обмотки  $w_2$  и диода  $VD1$ . Схема преобразователя выполнена по принципу обратногоходовой технологии преобразования и требует  $N$  ключей. Принцип балансировки рассмотрим на следующем примере. Предположим, что трансформаторы имеют коэффициент трансформации  $Kt=1$  и изменение напряжения ЭАБ на интервале балансировки пренебрежимо мало. Пусть ЭАБ  $B1$  имеет избыточный заряд по сравнению с другими ЭАБ стека  $B1-B_N$ . На первом такте работы схемы замыкается ключ  $S1$ . В первичной обмотке трансформатора (интервал  $t_0 - t_1$  на рис. 6) начинает линейно возрастать ток от нулевого значения до значения  $i_{1MAX}$ . В это время происходит накопление энергии в сердечнике трансформатора  $TV1$ , и, соответственно, уменьшение ее в ЭАБ  $B1$ . Напряжение на обмотках трансформатора  $TV1$  (на всех обмотках в случае многообмоточного трансформатора) соответствует напряжению с полярностью, указанной на рис. 5 без скобок. К диодам  $VD1-VD_N$  приложено обратное напряжение и ток во вторичных обмотках в это время не протекает.

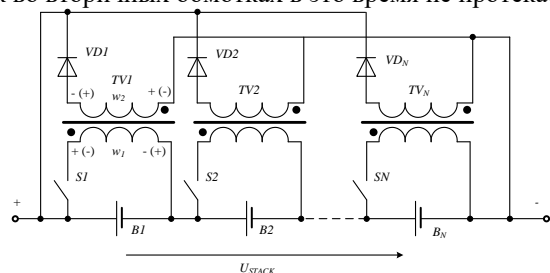


Рис. 5. Активный балансир на основе обратногоходовой топологии с возвращением избыточной энергии в стек

В момент времени  $t_1$  выполняется отключение ключа  $S1$  и смена интервалов работы балансира. Напряжение на обмотках трансформатора меняет знак на противоположный (на рис. 5 указано в скобках). На втором такте работы (интервал времени  $t_1 - t_2$  на

рис. 6) начинается интервал возврата накопленной энергии к стеку B1-B<sub>N</sub>.

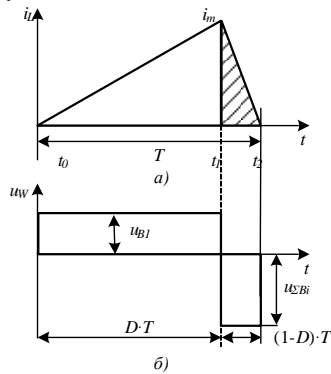


Рис. 6. Диаграммы тока и напряжения на обмотках трансформатора

Диаграммы токов и напряжения на рис. 6 иллюстрируют соотношение временных интервалах при коэффициенте трансформации  $K_{тр} = 1$ . Соотношение интервалов  $t_0 - t_1$  и  $t_1 - t_2$  определяется соотношением суммарного напряжения стека к напряжению на аккумуляторе-доноре. Среднее значение тока  $i_{1AV}$ , характеризующее скорость разряда аккумулятора-донора на первом интервале работы схемы и среднее значение тока  $i_{2AV}$ , характеризующее скорость заряда ЭАБ стека составляет, соответственно

$$i_{1AV} = \frac{D \cdot T \cdot i_m}{2} \quad (1)$$

$$i_{2AV} = \frac{T \cdot (1-D) \cdot i_m}{2} \quad (2)$$

Из анализа (1) и (2) и рис. 6 видно, что скорость разряда аккумулятора-донора выше скорости заряда любого из ЭАБ стека. Это определяет жесткие требования к системе управления балансиrom при разряде АБ, в случае необходимости предотвращения снижения напряжения ЭАБ стека ниже границы допустимого диапазона. Поскольку на интервале времени  $t_1 - t_2$  (рис. 6) происходит заряд всех ЭАБ средним током величиной  $i_{2AV}$ , в том числе, и аккумулятора-донора, который разряжался на предыдущем такте работы схемы, значение эквивалентного среднего значения разрядного тока донора должно быть скорректированным на величину зарядного тока:

$$i_{1AV}^* = i_{1AV} - i_{2AV} = \frac{(2 \cdot D - 1) \cdot T \cdot i_m}{2} \quad (3)$$

**Анализ эффективности буферных элементов в схемах активных балансиров.** Как отмечалось выше, передача энергии между ЭАБ стека при активной балансировке, выполняется с помощью индуктивного или емкостного буферного элемента. Рассмотрим процессы, протекающие в цепях передачи энергии для двух типов буферных элементов. На рис. 7, а, б приведены упрощенные схемы цепей балансировки и их операторные схемы замещения на этапах

накопления энергии (рис. 7, г, е) и ее передачи (рис. 7, в, д). Выполняется условие  $U_{B2} > U_{B1}$ .

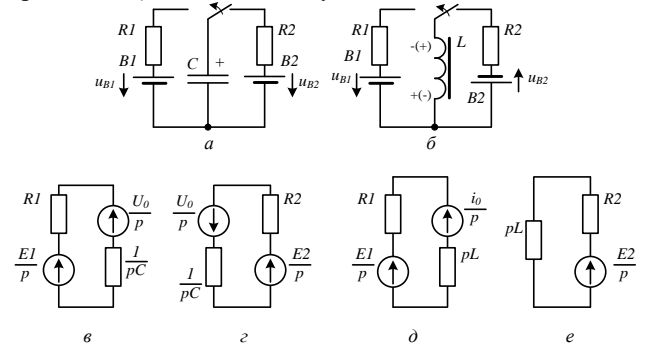


Рисунок 7 – К определению эффективности типа буферного элемента

Для схемы с емкостным буферным элементом, в установившемся режиме, на интервале накопления энергии начальное значение напряжения на буферном элементе составляет  $U_{B1}$  (рис. 7, в). Тогда, операторные уравнения, описывающие процессы заряда емкости описываются следующим образом:

$$I_{C\_ch} = \frac{\frac{E2}{p} - \frac{E1}{p}}{R2 + \frac{1}{pC}} \quad (4)$$

$$U_{C\_ch} = \frac{\left( \frac{E2}{p} - \frac{E1}{p} \right) \left( R2 + \frac{1}{pC} \right)}{pC} \quad (5)$$

После выполнения обратного преобразования Лапласа, получим их оригиналы

$$I_{C\_ch} = e^{-\frac{t}{C \cdot R2}} \cdot \frac{(E2 - E1)}{R2} \quad (6)$$

$$U_{C\_ch} = - \left( e^{-\frac{t}{C \cdot R2}} - 1 \right) \cdot (E2 - E1) + E2 \quad (7)$$

На интервале передачи энергии операторные уравнения, описывающие процессы разряда емкости описываются следующим образом

$$I_{C\_disch} = \frac{\frac{E1}{p} - \frac{E2}{p}}{R1 + \frac{1}{pC}} \quad (8)$$

$$U_{C\_disch} = \frac{\left( \frac{E1}{p} - \frac{E2}{p} \right) \left( R1 + \frac{1}{pC} \right)}{pC} \quad (9)$$

После выполнения обратного преобразования Лапласа, получим их оригиналы:

$$I_{C\_disch} = \frac{e^{-\frac{t}{C \cdot R1}} \cdot (E1 - E2)}{R1} \quad (10)$$

$$U_{C\_disch} = E1 - \left( e^{-\frac{t}{C \cdot R1}} - 1 \right) \cdot (E2 - E1) \quad (11)$$

Для схемы с индуктивным буферным элементом на интервале накопления энергии начальное значение тока в буферном элементе отсутствует (рис. 7, е). Операторные уравнения, описывающие процесс накопления энергии в индуктивном буферном элементе (процесс роста тока) описываются следующим образом

$$I_{L\_ch} = \frac{E2}{R2 + pL}. \quad (12)$$

После выполнения обратного преобразования Лапласа, получим их оригиналы:

$$I_{L\_ch} = - \frac{E2 \cdot \left( e^{-\frac{t \cdot R2}{L}} - 1 \right)}{R2}. \quad (13)$$

На интервале передачи энергии операторное уравнение, описывающее процесс спада тока индуктивности, описывается следующим образом:

$$I_{L\_disch} = \frac{\left( Li_0 - \frac{E1}{p} \right)}{R1 + pL}. \quad (14)$$

После выполнения обратного преобразования Лапласа, получим оригинал тока индуктивного буферного элемента:

$$I_{L\_disch} = \frac{E1 \cdot e^{-\frac{R1 \cdot t}{L}} - E1 + R1 \cdot i_0 \cdot e^{-\frac{R1 \cdot t}{L}}}{R1}. \quad (15)$$

Таким образом, ток в буферных элементах изменяется по закону:

$$I_C(t) = \begin{cases} \frac{e^{-\frac{t}{C \cdot R2}} \cdot (E2 - E1)}{R2}, & \text{при } t \leq T/2; \\ \frac{e^{-\frac{t}{C \cdot R1}} \cdot (E1 - E2)}{R1}, & \text{при } t > T/2 \end{cases} \quad (16)$$

$$I_L(t) = \begin{cases} - \frac{E2 \cdot \left( e^{-\frac{t \cdot R2}{L}} - 1 \right)}{R2}, & \text{при } t \leq T/2 \\ \frac{E1 \cdot e^{-\frac{R1 \cdot t}{L}} - E1 + R1 \cdot i_0 \cdot e^{-\frac{R1 \cdot t}{L}}}{R1}, & \text{при } t > T/2 \end{cases} \quad (17)$$

Выполним расчет эффективности применения различных типов буферных элементов путем сравнения энергии, передаваемой за один такт преобразования при условии равенства действующих значений токов  $I_L$ ,  $I_C$ .

Пусть, происходит балансировка двух  $LiFePO_4$  АБ с предельно допустимым уровнем разбалансировки (в этом случае будет достигнута максимальная эффективность емкостного балансира). Зададимся емкостью буферного конденсатора  $C = 100$  мкФ и напряжением на ЭАБ  $E1 = 2,0$  В;  $E2 = 3,65$  В.

Величина энергии, которая передается за один такт работы схемы составляет:

$$W_C = \frac{C \cdot (E2 - E1)^2}{2} = \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot (3,6 - 2,0)^2}{2} = 1,36 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}. \quad (18)$$

Определим действующее значение тока  $I_C$ :

$$I_{C\_RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_C^2 dt} = 9,5 A. \quad (19)$$

Определим параметры индуктивного буферного элемента, который обеспечит такое же значение действующего тока на той же частоте преобразования:  $I_{C\_RMS} = I_{L\_RMS}$ ;

Амплитудное значение тока в индуктивности составляет

$$I_m = I_{C\_RMS} \cdot \sqrt{3} = 9,5 \cdot \sqrt{3} \approx 16,5 A. \quad (20)$$

При уровнях напряжения на ЭАБ  $E1 = 2,0$  В;  $E2 = 3,65$  В, для работы схемы в режиме предельно прерывистого магнитного потока, продолжительность накопления энергии в индуктивности составляет

$$t_u = \frac{E1}{E1 + E2} \cdot T, \quad (21)$$

где  $E1$ ,  $E2$  – значение напряжения на аккумуляторе-доноре и аккумуляторе-акцепторе соответственно;  $T$  – период преобразования, для данного примера  $T = 60$  мкс.

$$t_u = \frac{2}{2 + 3,65} \cdot 60 \cdot 10^{-6} = 21 \cdot 10^{-6} \text{ с} \quad (22)$$

Определим значение буферной индуктивности  $L$ , ток в которой возрастает до значения  $I_m$  за время  $t_u$  при подключении ее к источнику напряжения  $E2$

$$L = \frac{E2 \cdot t_u}{I_m}. \quad (23)$$

$$L = \frac{3,65 \cdot 21 \cdot 10^{-6}}{16,5} = 6,6 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \quad (24)$$

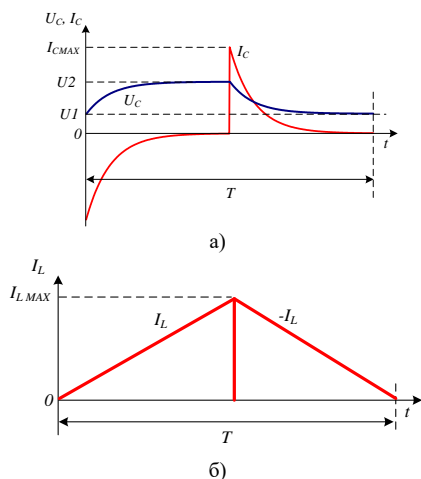
Определим величину энергии, передаваемой за один такт работы индуктивного балансира в рассмотренном выше примере:

$$W_L = \frac{L \cdot I_m^2}{2} = \frac{6,6 \cdot 10^{-6} \cdot 16,5^2}{2} = 9 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}. \quad (25)$$

При условии принятого выше предположения о равенстве действующих значений тока балансировки и частоты преобразования, можно дать оценку эффективности емкостного и индуктивного буферного элемента схемы активного балансира сравнив значения энергий  $W_L$  и  $W_C$

$$\frac{W_L}{W_C} = \frac{9 \cdot 10^{-4}}{1,36 \cdot 10^{-4}} \approx 7 \quad (26)$$

Полученное значение характеризует эффективность применения в схемах активного балансировки индуктивного буферного элемента по сравнению с емкостным. При уменьшении величины разбалансировки ЭАБ  $B1$ ,  $B2$  отношение (26) значительно увеличивается, и достигает своего максимального значения (порядка 1000) при условии  $U_{B1} \approx U_{B2} \approx (U_{MAX} = 3,65 \text{ В})$ . Кроме указанного выше критерия, следует обратить внимание и на формы зарядного и разрядного токов при использовании емкостного и индуктивного буферных элементов:



რის. 8. Машинограммы тока и напряжения буферного конденсатора (а) и буферной индуктивности (б)

Амплитудное значение тока в схемах с емкостным буферным элементом (рис. 8, а) ограничено лишь внутренними паразитными сопротивлениями элементов схемы. Поэтому, при относительно большом значении разбалансировки, в элементах схемы (в том числе АБ) выделяется значительная величина энергии потерь в виде тепловой энергии, что негативно сказывается на параметрах АБ. Высокая скорость нарастания тока отрицательно сказывается на электромагнитной совместимости балансира с остальной электронной аппаратурой. Амплитудное значение тока в схеме на основе индуктивных буферных элементов (рис. 8, б) ограничено величиной индуктивности. Оно может быть рассчитано на этапе проектирования устройства. Кроме того, обеспечение системой управления гранично-прерывистого режима работы преобразователя позволяет уменьшить коммутационные потери в силовых ключах схемы и позволяет повысить эффективность работы в целом.

**Выводы.** Безопасность использования электрохимических накопителей требует применения специализированных балансирующих устройств. Наиболее эффективными, с энергетической точки зрения, являются системы активной балансировки. Анализ математической модели работы двух типов буферных элементов (емкостного и индуктивного) позволил дать качественную оценку их эффективности. Емкостные, по сравнению с индуктивными – не только имеют худшие энергетические характеристики, но и не позволяют выполнять «масштабирование» устройства без существенного усложнения системы управления.

При большом количестве накопителей (более трёх) следует отдать предпочтение трансформаторным системам балансировки, являющимся частным случаем индуктивных систем.

## Литერატურა/ References

1. Y. Sokol, V. Ivakhno, V. Zamaruiev and B. Styslo, "Full Soft Switching Dual DC/DC Converter With Four-Quadrant Switch for Systems With Battery Energy Storage System," 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 155-160.
2. E. Sokol, V. Zamaruiev, S. Kryvosheev, B. Styslo and V. Makarov, "The specificity of electrical energy storage unit application," 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kiev, 2017, pp. 432-435.
3. <http://www.a123systems.com/>
4. Lindemark B. Individual cell voltage equalizers (ICE) for reliable battery performance / B. Lindemark // In Proc. IEEE 13th Int. Telecommun. Energy Conf., Kyoto, Japan, Nov. 1991, pp. 196–201.
5. Stuart A. T. Fast equalization for large lithium ion batteries / A. T. Stuart, W. Zhu // IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag. 2009. V.24. N 7, pp. 27–31.
6. Zhang X. The design and implementation of smart battery management system balance technology / X. Zhang, P. Liu, D.Wang // J. Converg. Inf. Technol. 2011. v. 6. № 5, pp. 108–116.
7. Pascual C. Switched capacitor system for automatic series battery equalization / C. Pascual, P. T. Krein // in Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo, – 1997, pp. 848 – 854.
8. Design of a charge equalizer based on battery modularization / P. Hong-Sun, K. Chol-Ho, P. Ki-Bum and oth. // IEEE Trans. Veh. Technol. 2009. V.58. N7, pp. 3938 – 3946.
9. Baughman A. C. Double-tiered switched-capacitor battery charge equalization technique / A. C. Baughman, M. Ferdowsi // IEEE Trans. Ind. Electron. 2008. V.55. N7, pp. 2277 – 2285.
10. Yuanmao Y. Zero current switching switched capacitor zero voltage gap automatic equalization system for series battery string / Y. Yuanmao, K. W. E. Cheng, Y. P. B. Yeung // IEEE Trans. Power Electron. 2012. V. 27. N 7, pp. 3234 – 3242.
11. A modularized charge equalizer for an HEV lithium-ion battery string / H. S. Park, C. E. Kim, C. H. Kim and oth. // IEEE Trans. Power Electron. 2009. V. 56. N5, pp. 1464 – 1476.
12. A cell selective charge equalizer using multi-output converter with auxiliary transformer / M. Y. Kim, C. H. Kim, S. Y. Cho, and oth. // 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia, Jeju, 2011, pp. 310 – 317.
13. Nishijima K. PWM controlled simple and high performance battery balancing system / K. Nishijima, H. Sakamoto, K. Harada // In Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf., 2000, pp. 517 – 520.
14. Cassani P. A. Design, testing and validation of a simplified control scheme for a novel plug-in hybrid electric vehicle battery cell equalizer / P. Cassani, S.



- Willamson // IEEE Trans. Ind. Electron. 2010. V. 57. N12, pp. 3956 – 3962.
15. Moo C. Parallel operation of battery power modules / C. Moo, K. S. Ng, Y. Hsieh // IEEE Trans. Energy Convers. 2008. V.23. N2, pp. 701 – 707.
16. A modularized charge equalizer for an HEV lithium-ion battery string / H. S. Park, C. E. Kim, C. H. Kim and oth. // IEEE Trans. Power Electron. 2009. V. 56. N5. P. 1464–1476.
17. A cell selective charge equalizer using multi-output converter with auxiliary transformer / M. Y. Kim, C. H. Kim, S. Y. Cho, and oth. // 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia, Jeju, 2011, pp. 310 – 317.
18. Nishijima K. PWM controlled simple and high performance battery balancing system / K. Nishijima, H. Sakamoto, K. Harada // In Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf., 2000, pp. 517 – 520.
19. Cassani P. A. Design, testing and validation of a simplified control scheme for a novel plug-in hybrid electric vehicle battery cell equalizer / P. Cassani, S. Willamson // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2010. – V. 57. – N12, pp. 3956 – 3962.
20. Moo C. Parallel operation of battery power modules / C. Moo, K. S. Ng, Y. Hsieh // IEEE Trans. Energy Convers. 2008. V.23. N2, pp. 701 – 707.
21. Rashid M. H. Power electronics handbook : devices, circuits and applications handbook / M.H. Rasshid // Elsevier Inc, 2011.
22. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Mykhalkiv S., Ravlyuk V. A method for calculating the parameters of the sine filter of the frequency converter, taking into account the criterion of starting current limitation and pulse-width modulation frequency. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 1, No. 8 (109), pp.6 – 16.
23. A new two-switch flyback battery equalizer with low voltage stress on the switches / H. S. Kim, K. B. Park, S. H. Park and oth. // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, CA, 2009, pp. 511 – 516.
24. A bidirectional flyback cell equalizer for series-connected lithium iron phosphate batteries // 6th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA), Hong Kong, 2015, pp. 1 – 5.
25. Hoque M. M. Optimal algorithms for the charge equalisation controller of series connected lithium-ion battery cells in electric vehicle applications / M. M. Hoque, M. A. Hannan, A. Mohamed // In IET Electrical Systems in Transportation. 2017. V.7. N4, pp. 267 – 277.
26. Park J. H. Multi-output differential power processing system using boost-flyback converter for voltage balancing / J. H. Park, K. T. Kim // International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (SigTelCom), Da Nang, 2017, pp. 139 – 142.
27. Hoque M. M. Optimal algorithms for the charge equalisation controller of series connected lithium-ion battery cells in electric vehicle applications / M. M. Hoque, M. A. Hannan, A. Mohamed // In IET Electrical Systems in Transportation. 2017. V.7. N4, pp. 267 – 277.

## Steady state performance improvement of state observer based drive systems under load variation conditions

**Yassine Yakhelef**, Doctor of Science, Associate Professor,

M'hamed Bougara University, Boumerdes, Algeria, e-mail: [mr.yakhelef@yahoo.fr](mailto:mr.yakhelef@yahoo.fr)

**Messaoud Boulouh**, Doctor of Science, Professor,

8 Mai 1945 University, Guelma, Algeria, e-mail: [messaoudboulouh@gmail.com](mailto:messaoudboulouh@gmail.com)

**Fares Nafa**, Doctor of Science, Assistant Professor,

M'hamed Bougara University, Boumerdes, Algeria, e-mail: [fares.nafa@gmail.com](mailto:fares.nafa@gmail.com)

**Billel Smaani**, Doctor of Science, Assistant Professor,

M'hamed Bougara University, Boumerdes, Algeria, e-mail: [b.smaani@univ-boumerdes.dz](mailto:b.smaani@univ-boumerdes.dz)

**Abdel Kader Zarat** Ph.D (Petersburg University),

General Director Technical Assistant, Cement Factory-GICA, Algeria, e-mail: [zaratq@hotmail.com](mailto:zaratq@hotmail.com)

**Annotation:** *DC drive systems are extensively employed in various industrial applications, particularly in heavy industries such as paper and steel plants where they are characterized by joint elasticity and some aspects of non linearity; this is mainly due to the long shaft coupling the driving motor and the load. These inherent properties make the drive system very sensitive to load changes and variation, for which the widely used PI controller cannot withstand alone to accurately track these variations leading to a substantial effect on the quality of final product and can even influence the stability performance of the feedback control system. In this paper we study the accuracy performance of those systems when subjected to suddenly changed load torque; where a feed-forward compensating technique is used to alter the whole feedback control system which allows for compensating the effects of these changes and variations. Furthermore, an improvement of system's order of astaticism as well as its steady state performance is achieved. The simulation results have shown a noticeable and important achievement of this objective.*

**Key Words:** *Direct-current (DC) drive, proportional-integral (PI) controller, state observer, load torque variation, steady state performance, Order of astaticism, Feed-Forward compensation.*

**Introduction.** A high performance motor drive system requires good dynamic speed control, accurate tracking and load disturbance responses. The superiority of torque-speed characteristics offered by the separately excited DC motor, which provide excellent speed controllability regarding the precise, wide, simple, and continuous control characteristics; have made this type of motor drives still employed in a multitude of industrial and manufacturing processes such as pulp, paper and steel rolling mills, conveyors, mining, robotics, electrical traction and other applications where speed and position control of the motor are required [1]. Regarding the extensive employment of these electromechanical drive systems, the need to improve their control quality and performance for these industrial applications is crucial. The objective is to increase the production quality of industrial processes and to use rationally the material resources of these industries. From the technological and economical viewpoint, this issue becomes persistent and mandatory in view of the fact that these DC drive based control systems are characterized by joint elasticity and some aspects of non linearity; due mainly to the long shaft coupling the driving motor and the load. These inherent properties make the drive system very sensitive to even small load changes and variation, and therefore can greatly affect the quality of the final product and even influence the stability performance of the feedback control system, where the PI control algorithm is widely exploited

to control the operating speed of the drive motor. In effect, the use of this control algorithm alone in these industrial conditions and circumstances may be effectively justified in the case of small change or variation of system load torque provided that an appropriate controller tuning method is used such as, minimax, GA and PSO, FL [2-8]. Unfortunately, in event of substantial speed and /or torque variation, this conventional controller become unable alone to track accurately these variations and preventing, therefore, the deviation from the desired performance [9].

To cope with this serious control problem, researchers have, continuously, worked to design compensating control techniques and ensuring, therefore, high operational performances.

In this vein, the design and implementation of state observer based drive control system represents the best choice that preserves simplicity, reliability and cost effectiveness of the whole drive control system [10, 11]. This, however, did not definitely solve the problem of enhancing accuracy performance and following with high order of astaticism the changed load torque even with the optimally tuning of the PI speed controller [6], [12].

Attention is, particularly, given to this subject throughout the multitude of methods and techniques which are proposed in literature. In this vein we can find the use of proportional gain method [13], the integral control technique [14], sliding mode control (SMC) [15,

16, 17, 18], adaptive sliding mode control method [19, 20, 21], adaptive neural network (NN) control method [22, 23] and fuzzy-neural networks hybrid controllers [24-26].

Besides all these methods, the feed-forward compensation is an alternative approach widely employed to enhance the quality and performance of control system in different engineering branches. It consists of altering the structure of the control system by adding a compensating branch in the forward path of the closed loop system. Many techniques have used this approach to improve the tracking and accuracy performance of feedback control systems. In the literature, we can find the use of Neural Network (NN) based feed-forward method [27], the Fuzzy logic control [28], and the optimal transfer function feedforward compensator [9]. Other forms of feed-forward compensators are also studied in [29].

As a continuation to the work done and published in [9], where the effect of input reference changes on systems stability and accuracy performances have been studied and improved by the use of the proposed feed-forward compensating control technique, in this paper the same compensator is applied to improve both accuracy performance of PI speed controlled and reduced order state observer based DC drive system particularly designed for steel and paper rolling mill industrial applications when subjected to load torque sudden changes. Therefore, its structure is organised as follows: section 2 is devoted to present the DC motor model that is used in the drive as well as its speed control functional structure. In section 3, the accuracy performance due to variable load torque is theoretical assessed and analysed, and in section 4, the proposed feed-forward compensator is explained and applied to achieve improvement of system's accuracy performance, a fact that is justified by the simulation results. Finally, the potential control performance and quality that can be achieved with the proposed compensation scheme is pointed out in the conclusion.

### Description of dc drive control system

1. *Model of the dc motor*, In this study, the DC motor is used to drive a mechanical load characterised by the inertia  $J$  and load torque  $T_L$ , which is taken variable. The dynamics of this electromechanical system is described by the following equations [30]:

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_b \quad (1)$$

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + \beta_m \omega_m + T_L \quad (2)$$

$$E_b = K_b \omega_m \quad (3)$$

$$T_e = K_t I_a \quad (4)$$

Where the physical parameters are:

$V_a$  : The input terminal voltage (source), (V);  $E_b$  : The back e.m.f, (V);  $R_a$  : The armature resistance, (Ohm);

$I_a$  :The armature current (Amp);  $L_a$  :The armature inductance, (H);  $J$  :The inertia moment of the motor rotor and load, (Kg.m<sup>2</sup>);  $T_e$  :The motor torque, (N.m);  $\omega_m$  : The speed of the shaft and the load (angular velocity), (rad/s);  $\beta_m$  :The coefficient of viscous friction of the mechanical system, (N.m.s/rad);  $K_b$  : The motor constant (V.s/rad);  $K_t$  : The torque factor constant, (N.m/Amp).

2. *Structure of the control loop*, the closed loop control of the drive system has basically two feedback loops; the outer loop is a speed feedback loop consisting of PI type controller, and an inner current feedback loop of PI type controller. The speed controller output is the reference for the current controller and the output of the current controller is the input to the pulse width modulated (PWM) generator that controls the motor input voltage, with the speed and current feedback signals are supplied via the designed reduced three order state observer [10].

The elaborated block diagram of the whole studied control drive system is as depicted in Fig.1.

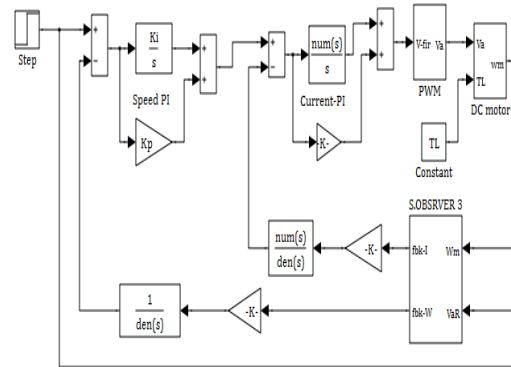


Fig. 1. Simulink block diagram model of PI speed controller and reduced order state observer based DC drive system

**Effect of load variation on system's accuracy.** To study the effect of load torque disturbance on the accuracy performance of the drive speed response, we consider representing, in the frequency domain, the block diagram of fig.1 by the general block diagram of fig.2.

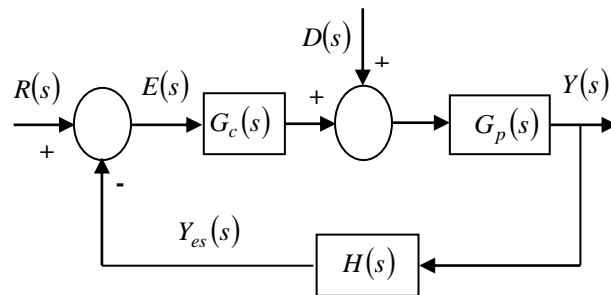


Fig. 2. General block diagram of DC drive control system with load disturbance account

With  $R(s)$  and  $D(s)$  represent, respectively the reference input and load torque disturbance signals.  $Y(s)$  and  $Y_{es}(s)$  are, respectively, the actual and estimated output speed signals.  $E(s)$  is the tracking error signal of closed loop system.  $G_c(s)$ ,  $G_p(s)$  and  $H(s)$  are, respectively, the corresponding transfer functions of the controller, the controlled plant and the state observer (the feedback path).

According to this simplified block diagram, the control tracking error can be defined as:

$$E(s) = R(s) - Y_{es}(s) \quad (5)$$

$$E(s) = \frac{R(s)}{1 + H(s)G_c(s)G_p(s)} - \frac{H(s)G_p(s)D(s)}{1 + H(s)G_c(s)G_p(s)} \quad (6)$$

Also:

$$E(s) = E_R(s) + E_D(s) \quad (7)$$

Where:

$$E_R(s) = \frac{R(s)}{1 + H(s)G_c(s)G_p(s)} \text{ is the tracking error due to the input reference signal and}$$

$$E_D(s) = -\frac{H(s)G_p(s)D(s)}{1 + H(s)G_c(s)G_p(s)} \text{ is the error due load disturbance signal.}$$

If we define the transfer functions  $G_c(s)$ ,  $G_p(s)$  and  $H(s)$  as:

$$G_c(s) = \frac{N_c(s)}{s^{\alpha_c} D_c(s)} = \frac{b_{mc}s^{mc} + b_{mc-1}s^{mc-1} + \dots + b_{0c}}{s^{\alpha_c} (a_{nc}s^{nc} + a_{nc-1}s^{nc-1} + \dots + a_{0c})}$$

$$G_p(s) = \frac{N_p(s)}{s^{\alpha_p} D_p(s)} = \frac{b_{mp}s^{mp} + b_{mp-1}s^{mp-1} + \dots + b_{0p}}{s^{\alpha_p} (a_{np}s^{np} + a_{np-1}s^{np-1} + \dots + a_{0p})}$$

$$H(s) = \frac{N_h(s)}{s^{\alpha_h} D_h(s)} = \frac{b_{mh}s^{mh} + b_{mh-1}s^{mh-1} + \dots + b_{0h}}{s^{\alpha_h} (a_{nh}s^{nh} + a_{nh-1}s^{nh-1} + \dots + a_{0h})}$$

$$G_{OL}(s) = \frac{N_{OL}(s)}{s^{\alpha} D_{OL}(s)} = \frac{K_{OL}(1 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_ms^m)}{s^{\alpha} (1 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n)} \quad (8)$$

The parameter ' $\alpha$ ' is called the order of astatism of the open loop transfer function of the system  $G_{OL}(s)$ , which physically represents the number of integrators in the forward path of the feedback system.

Accordingly:

$$E_R(s) = \frac{R(s)}{1 + H(s)G_c(s)G_p(s)} = \frac{R(s)}{1 + G_{OL}(s)} \quad (9)$$

Considering the fact that the system is initially operating under the step set point applied at the input reference and using the final value theorem, the end result of steady state error due set point input can be expressed as:

$$e_{ss}^R = \lim_{s \rightarrow 0} \left( \frac{C_0 s^{\alpha+1}}{s^{\alpha} + K_{OL}} \right) \quad (10)$$

On the other hand, the tracking error due to load torque disturbance can finally be expressed as:

$$E_D(s) = -\frac{s^{\alpha_c} D_C(s) N_P(s) N_H(s)}{N_{OL}(s) + s^{\alpha} D_{OL}(s)} D(s) \quad (11)$$

Obviously, the total tracking error strongly depends also on the form of input disturbance signal  $D(s)$ . Consequently, to study and analyze the effect of sudden changes of this disturbance signal, the following polynomial form of order ' $q$ ' in the time domain is being used to simulate a variable load torque.

$$d(t) = \frac{t^q}{q!} u(t) = C_q \cdot t^q \cdot u(t), t \geq 0 \quad (12)$$

With  $C_q$  and  $u(t)$  represent respectively an arbitrary constant and the unit step function.

In the frequency domain, this disturbance signal is expressed as:

$$D(s) = \frac{C_q}{s^{q+1}} \quad (13)$$

Assuming the stability of the system and using the final value theorem, the steady state error can be evaluated as:

$$e_{ss}^D = e^D(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} e^D(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s E_D(s) \quad (14)$$

$$e_{ss}^D = \lim_{s \rightarrow 0} -\frac{C_q K_p K_h}{s^q (s^{\alpha} + K_{OL})} s^{\alpha_c} \quad (15)$$

With  $K_p$ ,  $K_h$  are respectively the static gains of the transfer functions  $G_p(s)$  and  $H(s)$ , where  $K_{OL} = K_c K_p K_h$  represents the static gain of the open loop transfer function.

The total steady state error is then expressed as:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \left( \frac{C_0 s^{\alpha+1}}{s^{\alpha} + K_{OL}} \right) - \lim_{s \rightarrow 0} \frac{C_q K_p K_h (s^{\alpha_c})}{s^q (s^{\alpha} + K_{OL})} \quad (16)$$

In order to study the effect of load torque changes, the stimulating standard input signals of step, ramp, parabolic and order three polynomial, which are respectively corresponding to the cases of  $q = 0$ ,  $q = 1$ ,  $q = 2$  and  $q = 3$  in (13) are used, where the theoretical values of steady state error of systems having order of astatism 0, 1, 2, and 3 are calculated and summarized in Table.

This theoretical evaluation and assessment of system's accuracy performance regarding the variation and changes of load torque are being simulated using the system at hand.

Obviously, this system which has an order of astatism equals two, cannot respond accurately to the changed load torque.

**Improving system's accuracy by feed-forward compensation.** Theoretically and according to the results of Table above, we notice that the higher the order of astatism of the system, the better is the accuracy of the system response to load torque variation ( $e_{ss}^D = 0$ ). Furthermore, it is possible to improve, for a given load





guaranteed accurate and stable steady state response to load torque variation.

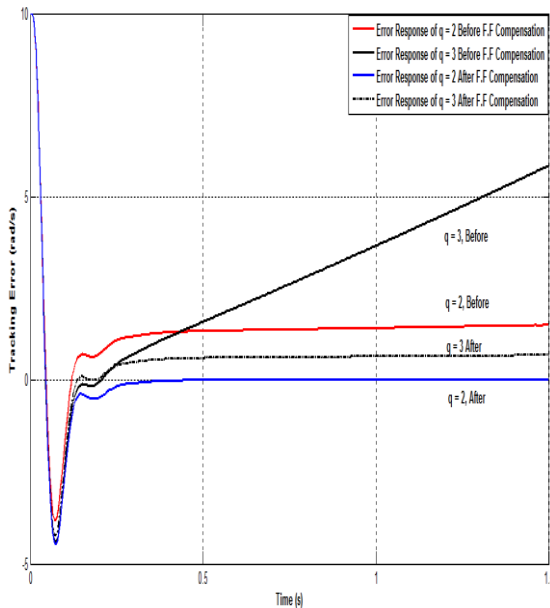


Fig. 5. Achieved improvement of DC drive system Accuracy and order of astaticism under load torque changes using feedforward compensation

**Conclusion.** In this paper, the reduced order state observer is particularly designed to cope with some inherent properties resulted of using DC drive systems in some applications of the industrial sector, such as paper and steel rolling mills, robotics, electric traction and else, where these systems are implemented around the PI speed controller.

The whole system is considered for accuracy performance improvement and optimization regarding sudden change conditions of load torque.

Firstly, a thorough theoretical analysis and assessment of system's accuracy performance under the effect of load torque change is discussed. These theoretical results have then been verified by simulating the system at hand for different load torque profiles tracking capability. The proposed feedforward compensator is applied for the purpose of achieving accuracy tracking and robustness against sudden load torque variation. The simulation results have mentioned the effectiveness of the applied compensator in reducing to zero, particularly the constant steady state error and compensating to a constant level the divergent error value of the steady state response.

These important results reveal the significant improvement of particularly the system's order of astaticism and accordingly its steady state accuracy performance due to load torque sudden changes with guaranteed system stability.

## References

1. Kumar R., and Girdhar V. High performance fuzzy adaptive control for D.C. motor, International Archive of Applied Sciences and Technology (IAAST), Vol. 3, 3, 2012, pp. 01–10.
2. Jaisimha M., Narasimha S. V. Design and implementation of PID controller using genetic algorithm, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 7, 11, November 2018, pp. 104-107.
3. Santhiya S. R., Femi S.V., Shyla Mol S. S., Suresh V. Optimized PID controller for low power applications using particle swarm optimization, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 8, 4, April 2019, pp. 8–11.
4. Muniraj R., Iruthayarajan M. W., Arun R.V., Sivakumar T. S. Parameter optimization of multi objective robust proportional integral derivative controller with filter using multi objective evolutionary algorithms, Rev. Roum. Sci. Techn.–Électrotechn. et Énerg, Bucarest vol. 64, 3, 2019, pp. 259–265.
5. El Tohamy I. A., Adel A. and El Koshairy D. Enhancement of the dynamic performance of a DC motor using fuzzy logic algorithm, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), vol. 8, 10, October 2019, pp. 324–330.
6. Chimezirim O. A., Lazarus O.U., Olubiwe M., Okozi S.O. Design of Fuzzi-PID tracking controller for industrial conveyor system, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), vol. 8, 3, March 2019, pp. 263–270.
7. Yakhelef Y., Boulouh M. Performance improvement of minimax optimized PI controller based DC drive system with actuator saturation, Mechatronic Systems and Control (formerly Control and Intelligent Systems), Actapress, Canada, vol. 42, 4, 2014.
8. Wasim M., Ullah M., Iqbal J. Gain-Scheduled Proportional Integral Derivative Control of Taxi Model of Unmanned Aerial Vehicles, Rev. Roum. Sci. Techn.– Électrotechn. et Énerg. Bucarest, vol. 64, 1, 2019, pp. 75–80.
9. Yakhelef Y., and Boulouh M. Improving accuracy and order of astaticism of rolling mill drives using feedforward compensation, Rev. Roum. Sci. Techn.–Électrotechn. et Énerg., vol. 63, 2, July 2018, pp. 217–222.
10. Akimov L.V., Dolbnia V.T., and Kolotilo V.I. Electric dc drive control systems with state observers, Kharkov State Polytechnic University, KHSPU, Ukraine, 1998.
11. Burns R.S. Advanced Control Engineering, Butterworth-Heinemann, Linacre House, Jordan hill, oxford, 2001.
12. Yakhelef Y., Boulouh M. and Mendaci S., Comparative analysis of single and double PI speed controlled dc drive performance improvement using minimax approach, In Proceedings of the 4th International Conference of Electrical Engineering, ICEE'15, Boumerdes, Algeria, December 13–15, 2015.
13. D'Azzo J. J., Houpis C. H., and Sheldon S. N. Linear control system analysis and design with matlab, 5th ed., Revised and Expanded, Marcel Dekker, Inc., New York, 2003.
14. Chen Q., Reset Control Systems: Stability, Performance and Application. Ph.D. Dissertation, University of Massachusetts Amherst, 2000.



15. Chiew T. H. et al. Analysis of tracking performance in machine tools for disturbance forces compensation using sliding mode control and PID controller, *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*, vol. 12, 6, 2012, pp. 34–40.
16. Koshkouei A. J. and , Burnham K. J. Control of dc motors using proportional integral sliding mode, *Control Theory and Applications Centre*, Coventry University, Coventry CV1 5FB, UK, 2008.
17. Milosavljevic C., Variable structure systems of quasi relay type with proportional-integral action, the *Scientific Journal Facta Universitatis, Series–Mechanics, Automatic, Control and Robotics*, vol. 2, 7, 1997, pp. 301–314.
18. Mechernene A., Loucif M., Zerikat M., Induction motor control based on a fuzzy sliding mode approach, *Rev. Roum. Sci. Techn.– Electrotechn. et Energ.* Bucarest, vol. 64, 1, 2019, pp. 39–44.
19. Schmid C. Adaptive sliding-mode control of nonlinear systems using neural network approach, In *Proceedings of the 17th International Conference on Process Control*, Strbske Pleso, Slovakia, 2009, pp. 346–352.
20. Hadji C., Khodja D. E., Chakroune S. Indirect self tuning adaptive control of double stars induction machine by sliding mode, *Rev. Roum. Sci. Techn.– Electrotechn. et Energ.* Bucarest, vol. 64, 4, 2019, pp. 409–415.
21. Stepanenko Y., Caos Y., and Su CH. Y. Variable structure control of robotic manipulator with PID sliding surfaces, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 8, 1998, pp. 79–90.
22. Krishna K. B. M., and Goud B. V. S. Speed control of DC motor through position and speed tracking system using neural networks, *International Journal of Electronic Engineering Research*, vol. 5, 1, 2013, pp. 87–103.
23. Zerikat M., and Chekroun S. Adaptation learning speed control for high-performance induction motor using neural networks, *International Journal of Signal, System Control and Engineering Application*, vol. 2, 1, 2009, pp. 15–21.
24. Gökbulut M., Dandil B., and Bal C. A hybrid neuro-fuzzy controller for brushless dc motors, *Springer*, 2006, pp. 125 – 132.
25. Zerikat M., and Chekroun S. High performance speed tracking of induction motor using an adaptive fuzzy-neural network control, *International Journal of Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering, Special Issue, CEM*, 2008, pp. 516–531.
26. Sit S., Ozcalik H. R., Kilic E. An efficient speed control method based on neuro-fuzzy modeling for asynchronous motors, *Rev. Roum. Sci. Techn.– Electrotechn. et Energ.* Bucarest, vol. 63, 3, 2018, pp. 326–331.
27. Song Ch. K., and Khim G. Improvement of tracking accuracy of positioning systems with iron core linear dc motors, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 6, 1, 2005, pp. 31–35.
28. Mihajlov M., Nikolić V., and Antić D. Position control of an electro- hydraulic servo system using sliding mode control enhanced by fuzzy PI controller, the *Scientific Journal, Facta Universitatis, series–Mechanical Engineering*, vol. 1, 2002, pp. 1217–1230.
29. Malek M., Makys P., and Stulrajter M. Feedforward control of electrical drives: rules and limits, *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 9, 1, 2011, pp. 35–42.
30. Gurbuz F., and Akpinar E. Stability analysis of a closed-loop control for a pulse width modulated dc motor drive, *Turkish Journal of Electrical Engineering*, vol. 10, 3, 2002, pp. 427–438.

## Determining Power Energy Hub Boundaries at Decentralized Power Grid

**Andrii Ivakhnov**, post-graduate student, Assistant,  
NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine, e-mail: [andrii.ivakhnov@khpi.edu.ua](mailto:andrii.ivakhnov@khpi.edu.ua)  
**Oleksandr Lazurenko**, Ph.D. (technical science), Associate Professor,  
NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine, e-mail: [oleksandr.lazurenko@khpi.edu.ua](mailto:oleksandr.lazurenko@khpi.edu.ua)  
**Stanislav Fedorchuk**, Ph.D. (technical science), Assistant,  
NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine, e-mail: [stanislav.fedorchuk@khpi.edu.ua](mailto:stanislav.fedorchuk@khpi.edu.ua)

**Annotation.** *The work defines the rules and boundaries for the formation of power energy hubs in the development of a decentralized model of the power system, or in the transition of an existing power system with a centralized control model to a decentralized one.*

**Keywords:** *decentralization, consumer, energy hub, generation, energy hub boundaries, power balance.*

**Introduction.** Energy systems of developed countries, especially European countries [1], are moving towards "3D" Power Grid – Decarbonization, Digitalization, and Decentralization. Decarbonization [2] – in order to reduce CO<sub>2</sub> emissions into the environment, a power industry is abandoning hydrocarbon natural resources and gradually moving to cleaner renewable energy sources (RES), such as sun, wind, water, etc. Power plants that run on solar and wind power are highly weather-dependent technologies, which introduce many disturbing influences on the generation of power systems.

For the prompt execution of actions that support the normal operation of a power system, it is necessary to obtain timely data on the processes of generation and consumption, here they solve the problems of *Digitalization* technology [3], which include Smart Grid and other technologies for intellectualization of control and management [4,5]. In addition to digital control of RES, they imply the digital exchange of data between all agents of the power system with their subsequent processing for optimal energy-efficient management of energy resources, power flows, and other processes. The digital online data exchange of the power system agents allows achieving the most accurate maintenance of the power and frequency balance in the power system.

A difficult problem to be solved is the scale of the digital management platform of the unified electric power system, which needs to be created and maintained. Computing devices on this scale would be extremely complex and expensive. A reasonable step to resolve this issue would be the transition from an established centralized model of the power system to a *Decentralized* one, in which the processing of information flows will be carried out starting from the primary local levels, i.e., the "bottom-up" management model. Decentralization [1,6–16] presupposes the division of the unified power system into a local "power energy hub".

**Purpose of the work.** The aim of the work is to determine the rules and boundaries for the formation of power energy hubs in the development of a decentralized model of the power system, or in the

transition of an existing power system with a centralized control model to a decentralized one.

**Agents of the energy system.** Agents are all technical objects of the energy system that generate, transform, transit, and consume electricity. These agents are:

- 1) Basic generation power plants;
- 2) Installations of highly maneuverable generation (thermal power plants, hydroelectric power plants, pumped storage power plants, gas-piston plants);
- 3) Renewable sources;
- 4) Consumer's regulators (those that can be regulated by the power system);
- 5) Household consumers (consumption that has a stochastic consumption trend);
- 6) Energy storage systems (reserve highly maneuverable capacity, stabilization of the renewable energy generation schedule[17]);
- 7) Distribution substations;
- 8) Inter-hub substations.

All these devices are called "agents" because they implement the basic processes of generation, transmission, distribution, and consumption, and are united by a control digital platform [18] (transiting and receiving information about the current state and about the actions to be performed).

**Power energy hubs** *Power energy hub* [9] can be defined as a part (area) of the power system in which various agents of the power system are combined, and in which flows of electricity can be generated, converted, transmitted, distributed, consumed, and accumulated in accordance with the demand in an optimal way.

Types of power units. Since the power unit, in its essence, is a reduced copy of the power system, the basic functional principle of its operation is the same – simultaneous generation and consumption of electrical energy, which is reflected in the balance formula:

$$P_g(t) - P_c(t) = 0 \rightarrow P_g(t) = P_c(t) \quad (1)$$

where

$P_g(t)$  – generation power;

$P_c(t)$  – power consumption.

With equal generation and consumption, the main requirement is satisfied – the balance of capacities, and

such a power energy hub is called *Balance* [7]. If there is a deviation in the direction of generation or consumption, the balance will not be observed and such a power energy hub will be called, respectively, *Excess* or *Deficient* [7].

The largest power energy hub can contain all the agents of the power system at once. Fig. 1 shows a graphical representation of a universal power energy hub.

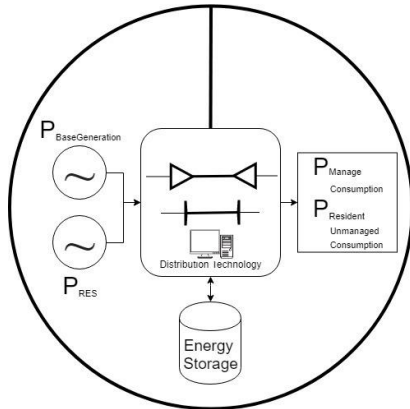


Fig. 1. A universal model of the power energy hub

Mathematically, such an energy unit can be expressed by the formula 2:

$$\forall H_i := \sum_1^i \{A_i\} \geq 1, \text{ при } i = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

where

$H$  – a power energy hub;

$A$  – an agent of a power energy hub.

Formula 2 shows that any power energy hub can consist of at least one agent.

The power system can be split into power energy hub more than once, and conventionally large formed power energy hub can be split into a group of even smaller ones, and so, as desired, the levels of fragmentation based on the conditions of ease of management and maintaining balance. A large power energy hub or power grid can be expressed by formula 3, and depicted in Fig. 2.

$$\{H_i\} = C, \text{ при } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

where

$C$  – a large power center or power grid.

On the basis of a universal model, a power energy hub, we will rewrite the basic balance equation (formula 1). It is expressed as the sum of generation from all possible sources, the sum of consumption from controlled industrial consumers and stochastic household consumption, also taking into account losses in power transmission systems, energy storage systems, which act as a highly maneuverable source of generation and as a

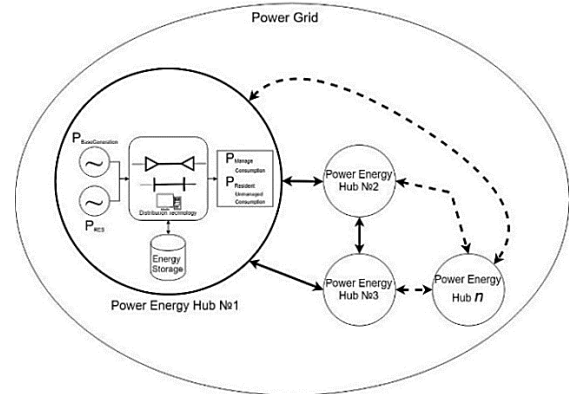


Fig. 2. An example of an enlarged power energy hub or power system

consumer, as well as taking into account the possible necessary influence from external power energy hub, formula 4:

$$\sum P_{G_{base}} + \sum P_{G_{RES}} \pm \sum P_{G_{maneuw}} \pm \sum P_{Cons_{reg}} - \sum P_{Cons_{domestic}} - \sum P_{Losses} \pm \sum P_{ES} \pm \sum P_{PG} = 0, \quad (4)$$

where

$P_{G_{base}}$  – basic generation TPP (bearing base load), NPP;

$P_{G_{RES}}$  – generation from renewable energy sources;

$P_{G_{maneuw}}$  – highly maneuverable generation, for example, gas-piston installations;

$P_{Cons_{reg}}, P_{Cons_{domestic}}$  – respectively controlled load and stochastically varying;

$P_{Losses}$  – power loss;

$P_{ES}$  – energy storage systems;

$P_{PG}$  – power of flows, taking into account transmission losses, communication with the power system.

Analyzing formula 4, it can be seen that the correct definition of the boundaries of the power energy hub during their formation will make it possible to achieve a balance of electricity in the hub, thereby maintaining the quality of electricity for the consumer, as well as to minimize losses for electricity transmission.

A certain difficulty is that there is no possibility to build a new power system from scratch, but it is necessary to modernize the existing one. In this regard, further discussion about the boundaries of a power energy hub will be based on the example of the power system of Ukraine, in the form of its possible transformation.

**Boundaries of a power energy hub.** Transformation (splitting) of the power system into separate power energy hub should proceed from the main condition – achieving balance in the power energy hub, and also take into account the criterion of optimality of losses during power transmission (too large distance between agents will cause economically inexpedient power losses). It is not possible in principle to achieve a balanced state in all hubs, therefore, most of the selected power energy hub will initially be deficient or redundant.

The deficit state of such a power energy hub will be compensated for at the expense of the "base" of the power system.

The base in the power system is nuclear power plants [19] since they operate in the base part of the generation schedule and are built, distributed over the territory of the power system. On the example of the Ukrainian energy system, nuclear power plants (4 operating ones) are distributed along with the entire territory of the country (the unified energy system) from the northwest to the southeast [20], connected to each other and to the rest of the energy system by 750 kV power transmission lines. Large capacity will be a separate redundant energy hub, which can be called the *Base Power Energy Hub*, and which supports the smaller *Main Power Energy Hub*. All other agents of the power system, other than nuclear power plants, are present in the main power energy hub.

The allocation of the main power energy hub should begin with the definition of the characteristics of consumers [21–27] to meet their needs. To do this, it is necessary to take into account the following consumption indicators:

- 1) Schedule of consumption (density of consumption distribution);
- 2) The nature of consumption;
- 3) The intensity of the consumption process.

After that, generating capacities are allocated for the power center:

- 1) Powerful power plants operating in the base in the presence of a consumer of high power (a large city, a powerful industrial enterprise);
- 2) Maneuverable capacities to balance the changing part of the consumption schedule;
- 3) Renewable energy sources located near consumers;
- 4) Networked storage of electricity can act as a balancing power to align the predicted schedule [17] of renewable energy generation, align the consumption schedule.

Having formed the power energy hub, it remains necessary to connect it to the power system. It is proposed to be limited to the minimum possible number of connections with the external power system, depending on the regional characteristics and the composition of the power energy hub itself.

Taking into account the introduction of renewable capacities, it is proposed to introduce renewable energy sources into deficient power energy hub as a priority, if technical and economic indicators allow it.

Figure 3 shows an example of a schematic representation of a possible transformation of the Ukrainian power system. The figure shows that NPPs are basic power energy hubs (basic generation), which are connected through the main 750 kV trunk line with the rest of the smaller power energy hub to maintain their balance.

Subject to the electrification of previously non-electrified areas or areas with destroyed infrastructure,

the creation of a power energy hub in such regions occurs from scratch, but under the same conditions as described above. The required level of power consumption is determined, then generating capacities are installed under it – renewable energy sources with energy storage devices, and gas-piston installations.

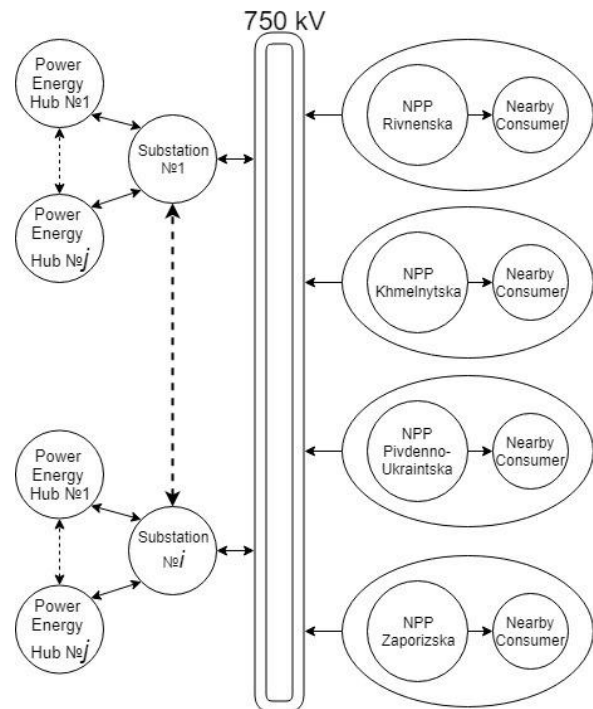


Fig. 3. A schematic version of the transformation of the energy system of Ukraine

**Conclusions.** 1) The modern development of the energy systems of developed countries and their transformation along the path of "3D" makes it necessary to develop the issue of building a power energy hub under various conditions. Therefore, consideration of the issue of methods for determining the boundaries of power energy hub is relevant and necessary.

2) Ideally, during the final transition, the balanced power energy hub should be fully balanced and the crossflows between the nodes will be minimal and occur in case of emergency emergencies. Accordingly, over time, in the ideal case, there will be a rejection of generation technologies based on the combustion of coal and nuclear energy, and a transition to a full-fledged 3D power system will take place.

3) When modernizing the power system, the criterion of efficiency and reliability can be the maximum number of self-sufficient power energy hubs that ensure the balance of electricity within the hub and in the power system as a whole.

## References

1. Shafie-khah M. Blockchain-Based Smart Grids - 1st Edition. 2020.
2. Carnevale P., Sachs J.D. Roadmap to 2050: A Manual for Nations to Decarbonize by Mid-Century. SDSN and FEEM, 2019.
3. De Dutta S., Prasad R. Digitalization of Global Cities and the Smart Grid // Wireless Pers Commun. 2020. Vol. 113, № 3. P. 1385–1395.
4. Стогній Б.С. et al. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні // The evolution of intelligent electrical networks and their prospects in Ukraine. Інститут електродинаміки НАН України, 2012.
5. Кулапін О.В., Махотіло К.В. Підходи до визначення та стан розвитку концепцій інтелектуальних енергосистем і віртуальних електростанцій // Approaches to the definition and development state of smart grid and virtual power plants concepts. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут," 2019.
6. Abe R., Taoka H., Mcquilkin D. Digital Grid: Communicative Electrical Grids of the Future // Smart Grid, IEEE Transactions on. 2011. Vol. 2. P. 399–410.
7. Івахнов А.В., Лазерунко О.П., Жигайлов С.О. Логіко-математична модель децентралізованої енергосистеми з консенсусним управлінням. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. Vol. Ч. II. P. 120.
8. Hartmanns A., Hermanns H., Berrang P. A comparative analysis of decentralized power grid stabilization strategies. 2012. P. 1–13.
9. Walker S. et al. A review study of the current research on energy hub for energy positive neighborhoods // Energy Procedia. 2017. Vol. 122. P. 727–732.
10. Andoni M. et al. Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 100. P. 143–174.
11. Klaer B. et al. Graph-based Model of Smart Grid Architectures // 2020 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST). 2020. P. 1–6.
12. Belkin P.A., Rostovskiy N.S. Infrastructure concept of digital heterogeneous decentralized power grid using blockchain technology and smart contracts // Современные наукоемкие технологии (Modern High Technologies). 2020. Vol. 2. P. 207–213.
13. Wood D. Predicting Stability of a Decentralized Power Grid Linking Electricity Price Formulation to Grid Frequency Applying an Optimized Data-Matching Learning Network to Simulated Data // Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy. 2020. Vol. 5.
14. Jiang K., Singh C. Reliability evaluation of a conceptual all-digital special protection system architecture for the future smart grid // 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA: IEEE, 2011. P. 1–8.
15. Hentea M. Smart Power Grid. 2021. P. 289–324.
16. Andersson G. The Energy Hub – A Powerful Concept for Future Energy Systems. 2007. P. 10.
17. Fedorchuk S. et al. Optimization of Storage Systems According to the Criterion of Minimizing the Cost of Electricity for Balancing Renewable Energy Sources // 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2020. P. 519–525.
18. Фрадков А.Л. Управление синхронизацией в сетевых динамических системах: 4–5 // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Россия, Нижний Новгород: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», 2011. № 4–5. P. 2548.
19. Зорин В.М. Атомные электростанции: учебное пособие. Москва: Издательский дом МЭИ, 2012..
20. Энергоатом | АЭС на карте Украины [Electronic resource] // Энергоатом. URL: [https://www.atom.gov.ua/ru/npp\\_on\\_map](https://www.atom.gov.ua/ru/npp_on_map) (accessed: 30.04.2021).
21. Електроспоживання [Electronic resource] // Your Site NAME Goes HERE. URL: <https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/dyspetcherska-informatsiya/elektrospozhyvannya/> (accessed: 05.05.2021).
22. Гриб О.Г., Довгалюк О.Н., Омеляненко Г.В. Оценка величины экономического ущерба от снижения качества электрической энергии в системах электроснабжения промышленных предприятий. 2012.
23. Обухов С.Г. Повышение эффективности комбинированных автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии: доктор технических наук. Томск, 2013. P. 392.
24. Радкевич В.Н., Козловская В.Б., Колосова И.В. Расчет электрических нагрузок промышленных предприятий. БНТУ, 2013.
25. Режим потребления | Официальный сайт ДТЭК [Electronic resource] // ДТЕК Киевские ЭС. URL: <https://www.dtek-kem.com.ua/ru/consumption-mode> (accessed: 05.05.2021).
26. Структура споживання електричної енергії по Україні - Набори даних - Портал відкритих даних [Electronic resource]. URL: <https://data.gov.ua/dataset/7d78eb81-dfad-4d1a-aa2e-797e93024206> (accessed: 05.05.2021).
27. Український інститут майбутнього [Electronic resource]. URL: <https://strategy.uifuture.org/ukrainacherez-5-rokiv-energenezalezhna-kraina.html> (accessed: 05.05.2021).

## References (transliterated)

1. Shafie-khah M. Blockchain-Based Smart Grids - 1st Edition. 2020.
2. Carnevale P., Sachs J.D. Roadmap to 2050: A Manual for Nations to Decarbonize by Mid-Century. SDSN and FEEM, 2019.
3. De Dutta S., Prasad R. Digitalization of Global Cities and the Smart Grid // Wireless Pers Commun. 2020. Vol. 113, № 3. P. 1385–1395.
4. Stogniy BS et al. Evolution of intelligent electrical networks and their prospects in Ukraine // The evolution of intelligent electrical networks and their prospects in Ukraine. Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2012.
5. Kulapin OV, Makhotilo KV Approaches to the definition and development of smart grid and virtual power plants concepts // Approaches to the definition and development

- of smart grid and virtual power plants concepts. National Technical University, Kharkiv Polytechnic Institute, 2019.
6. Abe R., Taoka H., Mcquilkin D. Digital Grid: Communicative Electrical Grids of the Future // Smart Grid, IEEE Transactions on. 2011. Vol. 2. P. 399–410.
  7. Ivakhnov AV, Lazerunko OP, Zhigaylov SO Logical and mathematical model of decentralized power system with consensus management. Kharkiv: NTU "KhPI", 2020. Vol. Part II. P. 120.8. Hartmanns A., Hermanns H., Berrang P. A comparative analysis of decentralized power grid stabilization strategies. 2012. P. 1–13.
  9. Walker S. et al. A review study of the current research on energy hub for energy positive neighborhoods // Energy Procedia. 2017. Vol. 122. P. 727–732.
  10. Andoni M. et al. Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 100. P. 143–174.
  11. Klaer B. et al. Graph-based Model of Smart Grid Architectures // 2020 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST). 2020. P. 1–6.
  12. Belkin P.A., Rostovskiy N.S. Infrastructure concept of digital heterogeneous decentralized power grid using blockchain technology and smart contracts // Modern High Technologies. 2020. Vol. 2. P. 207–213.
  13. Wood D. Predicting Stability of a Decentralized Power Grid Linking Electricity Price Formulation to Grid Frequency Applying an Optimized Data-Matching Learning Network to Simulated Data // Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy. 2020. Vol. 5.
  14. Jiang K., Singh C. Reliability evaluation of a conceptual all-digital special protection system architecture for the future smart grid // 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA: IEEE, 2011. P. 1–8.
  15. Hentea M. Smart Power Grid. 2021. P. 289–324.
  16. Andersson G. The Energy Hub – A Powerful Concept for Future Energy Systems. 2007. P. 10.
  17. Fedorchuk S. et al. Optimization of Storage Systems According to the Criterion of Minimizing the Cost of Electricity for Balancing Renewable Energy Sources // 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2020. P. 519–525.
  18. Fradkov A.L. Synchronization control in dynamic network systems: 4–5 // Bulletin of the Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky. Russia, Nizhny Novgorod: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research Nizhny Novgorod State University named after N. I. Lobachevsky ", 2011. № 4–5. P. 2548–2550.
  19. Zorin V.M. Nuclear power plants: a tutorial. Moscow: Publishing house MEI, 2012. 672 p.
  20. Energoatom | NPP on the map of Ukraine [Electronic resource] // Energoatom. URL: [https://www.atom.gov.ua/ru/npp\\_on\\_map](https://www.atom.gov.ua/ru/npp_on_map) (accessed: 30.04.2021).
  21. Power consumption [Electronic resource] // Your Site NAME Goes HERE. URL: <https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/dyspetcherska-informatsiya/elektrospozhyvannya/> (accessed: 05.05.2021).
  22. Grib O.G., Dovgalyuk O.N., Omelyanenko G.V. Assessment of the magnitude of economic damage from a decrease in the quality of electrical energy in the power supply systems of industrial enterprises. 2012.
  23. Obukhov S.G. Improving the efficiency of combined autonomous power supply systems with renewable energy sources: Doctor of Technical Sciences. Tomsk, 2013. P. 392.
  24. Radkevich V.N., Kozlovskaya V.B., Kolosova I.V. Calculation of electrical loads of industrial enterprises. BNTU, 2013.
  25. Consumption mode | DTEK's official website [Electronic resource] // DTEK Kievskie ES. URL: <https://www.dtek-kem.com.ua/ru/consumption-mode> (accessed: 05.05.2021).
  26. Structure of electricity consumption in Ukraine - Data sets - Open data portal [Electronic resource]. URL: <https://data.gov.ua/dataset/7d78eb81-dfad-4d1a-aa2e-797e93024206> (accessed: 05.05.2021).
  27. Ukrainian Institute of the Future [Electronic resource]. URL: <https://strategy.uifuture.org/ukraina-cherez-5-rokiv-energonezalezna-kraina.html> (accessed: 05.05.2021).



## Computer simulation of reactive power of induction motor with thyristor voltage converter

**Viktor Kovalov**, PhD, Associate Professor,  
 National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute", Kharkiv, Ukraine,  
 e-mail: [kovalov1952@gmail.com](mailto:kovalov1952@gmail.com)

**Yuliya Kovalova**, PhD, Associate Professor,  
 O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine  
 e-mail: [kovalova.jv@gmail.com](mailto:kovalova.jv@gmail.com)

**Annotation.** The purpose of the article – to obtain a ratio for determining the reactive power of induction motors with thyristor voltage converter. The task is to determine the dependence of reactive power on the control angle of the thyristors. Research method - computer simulation based on Fryze's power theory for non-sinusoidal currents. Result – the obtained expression for the calculation of reactive power, which takes into account the rated non-working current of the motor with sinusoidal power supply and the type of converter due to the introduced special coefficients. Numerical values of it depending on the control angle are obtained on computer models with their subsequent approximation. Scientific novelty – Fryze's power theory was further developed in the direction of decomposition of non-sinusoidal current components using computer models. Practical significance – the obtained expression for determining the reactive power of an induction electric drive with a thyristor voltage converter, on the basis of which the capacity of compensating capacitors is calculated to increase its energy efficiency.

**Keywords:** induction motor, thyristor converter, reactive power

**Introduction.** Induction motors with thyristor voltage converters can be used to regulate the speed of turbomechanisms, such as pumps for pumping water to the upper floors of high-rise buildings. Electrical diagram of induction motor with thyristor voltage converter (TVC) are showed on the fig. 1.

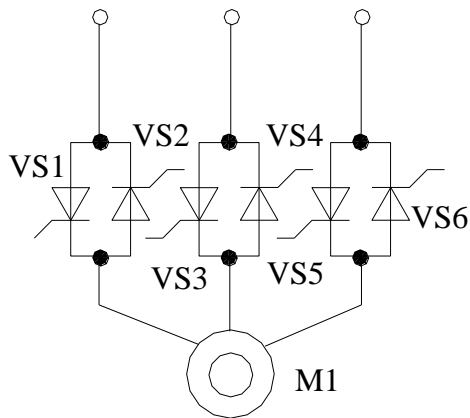


Fig. 1. Diagram of induction motor with thyristor voltage converter

The electrical circuit contains three groups of thyristors, which are connected in antiparallel. The thyristors regulate the voltage by changing the control angle of the thyristors. In the fig. 2 shows the natural characteristic of an induction motor, controlled characteristic at voltage regulation and load characteristics of the pump.

Characteristics analysis shows that when reducing the stator voltage in order to reduce the speed of the motor it is necessary to reduce its mechanical load. Pumps with the so-called fan load characteristic are most suitable for this situation.

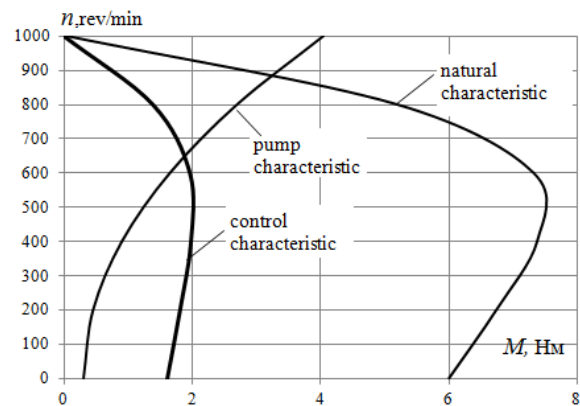


Fig. 2. Characteristic of an induction motor, controlled characteristic at voltage regulation and load characteristics of the pump

Regulation of the speed of the pump at variable consumption of water allows to reduce losses of the electric power to 30 %. The second stage of reducing electricity losses is the compensation of reactive power using capacitors, but for their selection requires a method of calculating the reactive power of the induction motor depending on the control parameter of the semiconductor voltage converter. Therefore, the task of compiling a methodology for determining the reactive power of induction motors with semiconductor voltage converters is relevant.

You can also use frequency converters, but it compared to thyristor voltage converters are 2-2.5 times higher price and significantly more difficult to operate.

**Analysis of resent research and publication.** It is obvious that in the case of non-sinusoidal power supply of an induction motor, the reactive power can be determined only by computer simulation. Before

modeling, it is necessary to determine the theories of reactive power for non-sinusoidal modes.

Budean's power theory is based on the decomposition of non-sinusoidal voltage and current into harmonic components, with reactive power equal to

$$Q = \sum_{k=1}^{13} (U_{sk} I_{sk} \sin \varphi_k) = j \sum_{k=1}^{13} (I_{sk}^2 X_{sk}), \quad (1)$$

where  $U_{sk}$  – the effective value of the k-th harmonic of the stator voltage;  $I_{sk}$  – the effective value of the k-th harmonic of the stator current;  $\varphi_k$  – the angle of displacement between the harmonics of voltage and current;  $X_{sk} = \omega_{sk} L_s$  – inductive resistance of the stator winding for k-th harmonics. Budean's theory was further developed, for example, in [3].

Fryze's power theory is based on the decomposition of non-sinusoidal current into active and reactive components. The effective values of the current components are determined on the basis of the thermal action of the non-sinusoidal current, that is, the heat generated in the power line by the full current is equal to the sum of the heat from its components. So far as, heat is proportional to the square of the current, the square of the effective value of the total current is equal to  $I_t^2 = I_a^2 + I_r^2$ , where  $I_a, I_r$  – effective current values of active and reactive components of non-sinusoidal current. Then the reactive power of the motor, taking into account its replacement circuit is equal to

$$Q_L = (x_0 + x_\sigma) I_r^2, \quad (2)$$

where  $x_0, x_\sigma$  – inductive resistances to magnetization and scattering of the replacement circuit of an induction motor, which are given in reference books or in technical data sheets for motors.

From the analysis of equations (1) and (2) it follows that the calculation of reactive power in terms of time is advisable to carry out on the basis of Frieze's power theory.

Frieze's power theory was further developed in the works [4-10], but without proposing practical methods for use. Moreover, in [8] it is noted that the fundamental disadvantage of Frieze's power theory is the impossibility of decomposition of the instantaneous non-sinusoidal current into active and reactive components.

Thus, to calculate the reactive power using the Frieze's power theory, it is necessary to substantiate the method of isolating the reactive component of non-sinusoidal current and make an expression for its calculation.

**Purpose of the work.** The purpose of the work is to obtain an expression for calculating the reactive power of induction motors depending on the control angle of thyristor voltage converters. The problem is to decompose non-sinusoidal current into active and reactive components by computer simulation.

**Basik research materials.** The goal is solved in two stages: 1) it is necessary to make the computer model of the induction motor with a thyristor voltage converter; 2) it is necessary to research on the computer model the dependence the reactive current from the control angle of the converter.

As a model of an induction motor, it is to use the classic replacement circuit, the parameters of which are determined from reference data, in particular, the active resistance in the magnetization circuit is calculated through the power factor of idle speed. To distinguishing the reactive component from the total current, we make a model (Fig. 3).

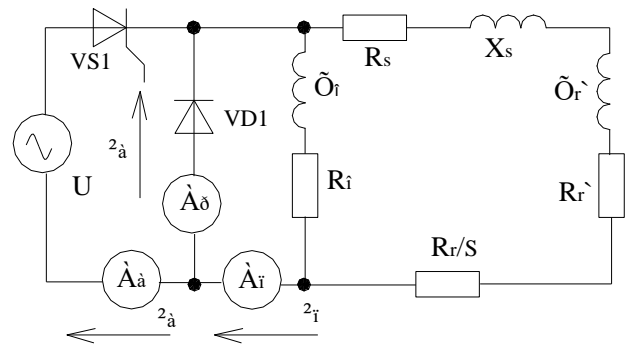


Fig. 3. Model of asynchronous electric drive with decomposition of converter current components

The model contains a voltage source  $U$  with a thyristor  $VS1$ . At the input of the replacement circuit, the reverse diode  $VD1$  distinguish the reactive current component. The model includes ammeters for measuring the instantaneous values of active  $I_a$ , reactive  $I_r$  and total  $I_t$  currents.

The selection of the reactive component of the current is as follows. When the positive half-wave voltage from the converter reaches zero the diode  $VD1$  is switched on, because a positive potential from the electric motive force (EMF) self-induction of the substitution circuit appears on its anode and a current from the magnetic field energy flows through it. Since the current source is the EMF of self-induction and the current does not return to the voltage source, it is a reactive current. Hereinafter, this process will be illustrated in detail by experimental current waveforms.

The method of determining the reactive current consists of two steps: 1) determine the dependence of the total current on the control angle; 2) determine the reactive component of the total current. For practice, these dependencies must be "tied" to the basic parameter of the motor, which is given in the manuals or in the technical data sheets of sinusoidal motors. As a basic parameter, it is advisable to take the nominal value of the non-working current, based on the following considerations.

The non-working current by is reactive (93-97)% relatively total current. As can be seen in the replacement circuit (look fig. 3) the current of the magnetization branch  $R_0-X_0$  depends only on the control angle of the converter. The working current also depends on the resistance  $R_r/S$ , which simulates the mechanical load on the rotor shaft, where  $S$  is the rotor slip. To take into account the reactive scattering current, it is necessary to perform simulations at the nominal slip of the rotor.

Next, you need to take generalizing parameters that do not depend on engine power and combine them in the expression with the basic parameter. As generalizing parameters, we enter: 1) the current transfer coefficient  $K_{TVC}$  of thyristor voltage converter (TVC), as the ratio of the total non-working current  $I_{TVC}$  of the motor when power supply from the TVC to the rated of the total non-working current  $I_{sin}$  of the sinusoidal power supply and 2) reactive current ratio  $K_r$ , as the ratio of the reactive component  $I_r$ , to the total motor current  $I_{TVC}$  when powered by the TVC.

Next, by computer simulation, we determine the dependences of  $K_{TVC}$  and  $K_r$  on the control angle of the TVC, followed by their approximation by the method of least squares. After determining the specified coefficients, the expression for calculating the reactive power for a given average value of the control angle has the form

$$Q_L = (x_0 + x_\sigma) K_{TVC} K_r I_{sin}^2. \quad (4)$$

Thus, expression (4) combines the idle current of the motor with sinusoidal power supply and the coefficients, which depend on the control angle of the thyristor voltage converters.

It is necessary to find expressions for calculation of that coefficients. The equation of electrical equilibrium of the substitution circuit on the conduction interval of the thyristor has the form

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = i R_{sc} + L_{sc} \frac{di}{dt}, \quad (5)$$

where  $\alpha$  – control angle TVC,  $R_{sc}$ ,  $L_{sc}$  – active resistance and inductance of the substitution circuit of the motor.

The instantaneous value of the total current, as the sum of the periodic and aperiodic components of the transient process of switching on the substitution circuit under sinusoidal voltage with a switching phase equal to the control angle

$$i = \frac{U_m}{Z} [\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-(\omega t - \alpha) \text{ctg} \varphi}] \quad (6)$$

where  $Z = \sqrt{R_{sc}^2 + (\omega L_{sc})^2}$  – the impedance module of the substitution circuit;  $\varphi = \text{arctg}(\omega L_{sc} / R_{sc})$  – the angle of displacement of the current graph from the voltage graph at sinusoidal power supply.

In expression (6) the value  $U_m/Z = I_{msin}$  is the amplitude of the nominal value of the total current of the non-working current at sinusoidal power supply. Then the effective value of expression (6) is obtained by integrating on the conduction interval of the thyristor, which can be represented as  $I_{TVC} = K_{TVC} I_{sin}$ , where  $K_{TVC}$  – the current transfer coefficient of TVC, which is equal to the expression in square brackets of the equation (6).

For definition of  $K_{TVC}$  we will construct the schedule of instantaneous full current on expression (6) shown on fig. 4, on which the following values are marked:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\lambda$ , – respectively: control angle, closing angle and conductivity angle of the thyristor,  $i_a$  – aperiodic transient current component,  $i_p$  – periodic transient current component,  $i_t$  – graph of the transient current according to the equation (6).

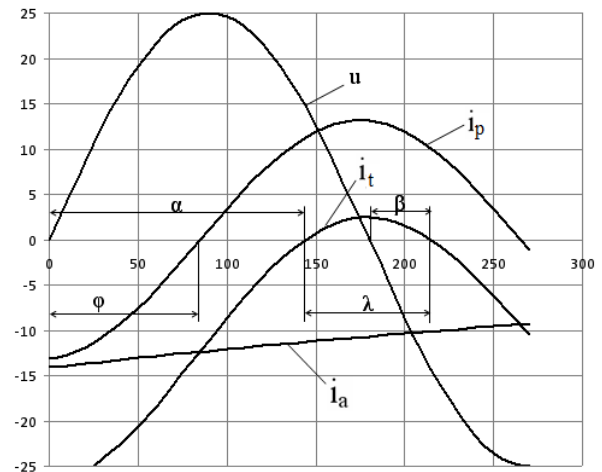


Fig. 4. Graphs of the components of the transient current in the conductivity interval of the thyristor

After performing the corresponding mathematical operations on expression (6) to determine the effective value of the current we obtain the current transfer coefficient of TVC

$$K_{TVC} = \left\{ \frac{1}{2\pi} \left[ \lambda - \frac{\sin 2(\alpha + \lambda - \varphi)}{2} + \frac{\sin 2(\alpha - \varphi)}{2} \right] + \frac{2 \sin(\alpha - \varphi)}{1 + \text{ctg}^2 \varphi} \left\{ e^{-\lambda \text{ctg} \varphi} [\text{ctg} \varphi \sin(\alpha + \lambda - \varphi) + \cos(\alpha + \lambda - \varphi)] - \text{ctg} \varphi \cdot \sin(\alpha - \varphi) - \cos(\alpha - \varphi) \right\} + \frac{\sin^2(\alpha - \varphi)}{2 \text{ctg} \varphi} (1 - e^{-2\lambda \text{ctg} \varphi}) \right\}^{1/2} \quad (7)$$

In expression (7), the conductivity angle according to fig. 4 is equal to  $\lambda = \pi - \alpha + \beta$ , where  $\beta$  – unknown angle of closure of thyristor relative to the trailing edge of the voltage sinusoid, the dependence of which on the control angle is obtained by simulation followed by approximation by the analytical formula.

To determine the closing angle of the thyristor, we make a model of the software package "SimPowerSystem" (Fig. 5), which works as follows.

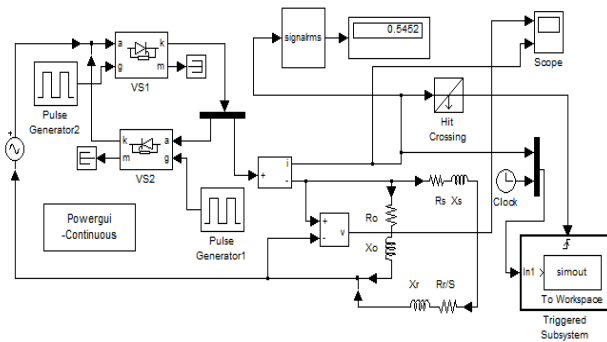


Fig. 4. Model for determining the closing angle of the thyristor

Control pulses for thyristors form blocks "Pulse Generator", thus the size of a control angle is set by duration of Phase Delay of a phase delay of the generator. "Pulse Generator". To control the trailing edge of the current zero value used block "Hit Crossing", which at this time generates a control pulse to run the subroutine of the block "Triggered Subsystem" with the block "Simout" to transfer the current time to the work area "Workspace". The current time counts down the "Clock" block. Measurement of the closing angle of the thyristors occurs when the trailing edge reaches a current of zero value, ie  $\beta = t - 0,01 \text{ sec}$ .

it is necessary to note, that the library of the package "SimPowerSystem" has a block model of an induction motor based on differential equations, but, as subsequent computer experiments have shown, after the transition process voltage and current waveforms are identical models with a substitution circuit. The latter is convenient because it immediately goes into steady state and requires less time for modeling, which is important for a significant number of experiments.

As a result of modeling the dependence is received  $\beta = f(\alpha)$ , which is approximated by the method of least squares and has the form

$$\beta = 0,915 \cdot \pi - 0,916 \cdot \alpha = 2,875 - 0,916 \cdot \alpha, \quad (8)$$

Thus, the value of the current transfer coefficient TVC for a given control angle of the thyristors is determined by the substitution (8) in (7).

We proceed to determine the reactive current coefficient by simulation. The scheme of the model is shown in fig. 5.

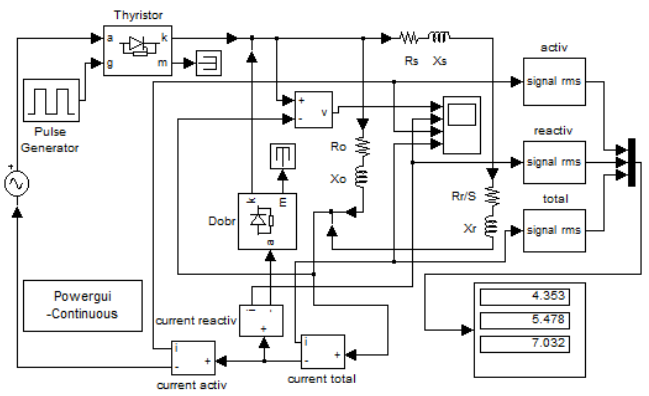


Fig. 5. Model for determining the reactive current of an induction motor with TVC

In fig. 6 shows the voltage waveforms and current components obtained on the model. From the oscillograms of fig. 6b shows that the current through the reverse diode flows in the range of no voltage from the converter, therefore, the current source is the self-induction EMF from the inductance of the substitution circuit, therefore, it is a reactive current.

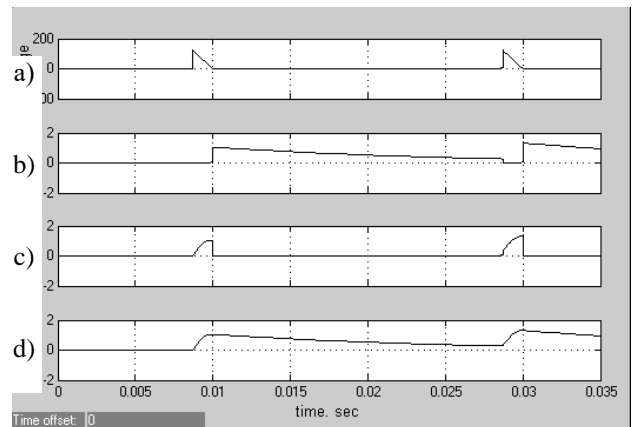


Fig. 6. Voltage waveforms and current components a – stator winding voltage; b – reverse diode current (reactive); c – active current; d – full current

From the oscillogram fig. 6c shows that the current from the converter coincides in phase with the voltage, therefore, it is the active current. Thus, the model can obtain the dependence of the reactive component of the current on the control angle of the thyristors.

To verify the generality of the coefficients  $K_{TVC}$  and  $K_r$  simulation was performed for three motors powers: 3,5 kW; 7,5 kW; 11 kW, which are used in electric drives of water pumps and fans. The results of calculations of the coefficients  $K_{TVC}$  and  $K_r$  showed their practical independence from motor power. As a result of the approximation of the obtained dependence  $K_r = f(\alpha)$  by the method of least squares, the formula for

determining the reactive current coefficient of an induction motor with TVC

$$K_r = 0,675 + 0,1 \cdot \alpha \quad (9)$$

Thus, to calculate the reactive power of an induction motor with TVC values (7) and (9) are substituted into equation (4), which calculates the capacity of the compensating capacitors. The latter can also be calculated through the equality of the effective values of the reactive energies of the stator winding and capacitors, i.e.,

$$W_L = LI_r^2, W_C = CU_{TVC}^2, \quad (10)$$

where  $I_r$  – the effective value of the reactive current is determined by the formula  $I_r = K_{TVC}(0,675 + 0,1\alpha)I_{\sin}$ ;  $U_{TVC}$  – the output voltage of the TVC is determined by the formula

$$U_{TVC} = \frac{U_m}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\lambda - \frac{\sin 2(\alpha + \lambda)}{2} + \frac{\sin 2\alpha}{2}} \quad (11)$$

If the control angle of the TVC changes in a certain range, then all equations should take its average value. The output voltage TVC can also be determined similarly to the reactive current, i.e, through  $K_r$ , because the current is generated by the output voltage.

Similar calculations can be performed for the case of powering induction motors from a transistor voltage converter with pulse-width modulation.

**Conclusions.** Obtained method for determining the reactive power of induction motors with thyristor voltage converters (TVC), which is as follows. The dependences of the total current and its reactive component on the control angle of the TVC with their subsequent approximation by the method of least squares are determined by computer simulation. Reactive power is determined by the product of the square of the reactive current on the sum of the inductive resistances of the magnetization and scattering of the replacement circuit of the induction motor.

The scientific novelty of the results lies in the further development of Fryze's power theory in the direction of decomposition of non-sinusoidal current components in electric circuits with nonlinear loading using computer models and a reverse diode.

## References

1. Топорова Ю.В., Лазуренко А.П. Сравнительная характеристика методов определения реактивной мощности // Вісник НТУ «ХПІ». 2013. № 17(990). С. 100–106.
2. Архиев И.П. Сопоставление методов определения реактивной мощности емкости и индуктивности при периодических несинусоидальных напряжениях. // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова

електроніка та енергоефективність». Частина 2. 2008. с. 11-16.

3. Родькин Д.И. Комментарий к теории энергопроцессов с полигармоническими сигналами. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету.- Вип. 3/2005(32), с.106-114.
4. German Standart (2002). AC Quantities DIN 40110, part 2. Multiconductor circuits. November 2002 (in German).Elissa, "Title of paper if known," unpublished.
5. Fang Z. Peng, Leon M. Tolbert. (2020). Compensation of non-active current in power system. IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 45, no 1, 293-297.
- 6.F.Z. Peng, L.M. Tolbert. (2009). Compensation of Non-Active Current in Power Systems – Definitions from Compensation Standpoint. Manuscript prepared by the Oak Ridge National Laboratory for the U.S. Department of Energy under contract DE-AC05-00OR22725.
7. Гніліцький В.В., Поліщук О.А. Розрахунок компенсації реактивної потужності та симетрування навантаження у трипровідних мережах на основі теорії Фризе. / Восточно-Европейский журнал передовых технологий. // 2012. №1/8(55). С. 38-41.
8. Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Теория мощности Фризе и современные теории мощности //Електротехніка і електромеханіка. 2007. №6. С. 63-65.
9. Кизилов В.У., Светельник А.Д. О понятии реактивная мощность. Энергетика и электрификация. 2005, №2, С. 35 - 38.
10. Владимиров, Ю.В. О концепции компенсации реактивной мощности // Світлотехніка та електроенергетика.Х.: ХНАМГ, 2008 р. № 3. С. 35-41.

## References (transliterated)

1. Toporova Yu. V., Lazurenko A. P. (2013). Comparative characteristics of methods for determining reactive power. Bulletin of NTU "KhPI", № 17(990), 100–106.
2. Arhierev I. P. (2008). Comparison of methods for determining the reactive power of capacitance and inductance at periodic non-sinusoidal voltages. Technical electrodynamics. Thematic issue "Power Electronics and Energy Efficiency", Part 2, 11-16.
3. Rodkin D. I. (2005). Commentary on the theory of energy processes with polyharmonic signals. Bulletin of Kremenchug State Polytechnic University, vol. 3/(32), 106-114.
4. German Standart (2002). AC Quantities DIN 40110, part 2. Multiconductor circuits. November 2002 (in German).Elissa, "Title of paper if known," unpublished.

5. Fang Z. Peng, Leon M. Tolbert. (2020). Compensation of non-active current in power system. IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 45, no 1, 293-297.
6. F.Z. Peng, L.M. Tolbert. (2009). Compensation of Non-Active Current in Power Systems – Definitions from Compensation Standpoint. Manuscript prepared by the Oak Ridge National Laboratory for the U.S. Department of Energy under contract DE-AC05-00OR22725.
7. Gnilitkiy V. V., Polischuk O. A. (2012). Calculation of reactive power compensation and load balancing in three leading networks based on Frieze theory. Eastern European Journal of Advanced Technology. №1/8(55), 38-41.
8. Zhemerov G. G., Ilyina O. V. (2007). Fryze's power theory and modern power theories. Electrical engineering and electromechanics. №6, 63-65.
9. Kizilov V. U., Svetelnik A. D. (2005). About the concept of reactive power. Energy and electrification. №2, 35 - 38.
10. Vladimirov Yu. V. (2008). About the concept of reactive power compensation. Lighting and electricity. O.M. Beketov NUUE, № 3, 35-41.



## Анализ схемотехнического решения блока электронной нагрузки

**Роман Зайцев**, доктор технических наук, доцент,  
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина,  
E-mail: [roman.zaitsev@kphi.edu.ua](mailto:roman.zaitsev@kphi.edu.ua)

**Аннотация.** В статье проведен анализ схемотехнических решений для создания специализированного решения электронной нагрузки с микроконтроллерным управлением. Определены основные критерии и параметры, которые позволяют достичь высокой скорости переходных процессов и низкого общего сопротивления, а также предложена простая схема реализации такого прибора. На основе рассмотренных физических и схемных решений по реализации блока электронной нагрузки была разработана его функциональная электрическая схема.  
**Ключевые слова:** электронная нагрузка, скорость переходных процессов, сопротивление, электрическая схема, автоматизация.

## Analysis of electronic load advanced solution

**Roman Zaitsev**, Doctor of Technical Science, Associate Professor  
National Technical University „Kharkov Polytechnic Institute“, Kharkiv, Ukraine  
e-mail: [roman.zaitsev@kphi.edu.ua](mailto:roman.zaitsev@kphi.edu.ua)

**Annotation:** The article analyzes the circuitry solutions for creating a specialized solution for electronic load with microcontroller control. The main criteria and parameters are determined, which make it possible to achieve a high rate of transient processes and a low total resistance, and a simple scheme for the implementation of such a device is proposed. On the basis of the considered physical and circuit solutions for the implementation of the electronic load unit, its functional electrical circuit was developed.

**Keywords:** electronic load, transient speed, resistance, electrical circuit, automation

**Введение.** Внедрение электронной нагрузки для испытания силовых низковольтных источников (солнечных элементов) требует тщательного рассмотрения не только конструкции схемы, но также тепловой и механической конструкции. Соблюдение принципов, изложенных в этой статье, обеспечит нагрузке возможность работать с большой мощностью, сохраняя при этом хорошие характеристики и надежность.

Электронные нагрузки, которые имеются на рынке, сочетают превосходную точность со сложными интерфейсами управления и, как правило, способны работать с очень высоким током при большой мощности. Обычно доступны различные модели, каждая из которых соответствует разному диапазону напряжения, мощности и тока (например, приборы Chroma, рис. 1) [1]. Из рисунка видно, что самое низкое достижимое сопротивление составляет около 5 мОм, а ток может достигать 80 А.

Однако, несмотря на эти технические характеристики, общая эффективность массива нагрузок принципиально ограничена его электрическим подключением к испытываемому источнику питания [2]. По требованиям для подключения используются медные и алюминиевые проводники поперечным сечением 40 см<sup>2</sup> и более, а длина подключения приводит к значительным резистивным потерям между испытываемым

источником питания и модулями нагрузки. Это дополнительное сопротивление влияет на напряжение нагрузки, а паразитная индуктивность  $L_p$  в проводниках ограничивает максимальную скорость переходных процессов ( $di/dt$ ) [3]:

$$\frac{di}{dt}_{max} \leq \frac{V_d}{L_p} \quad (1)$$

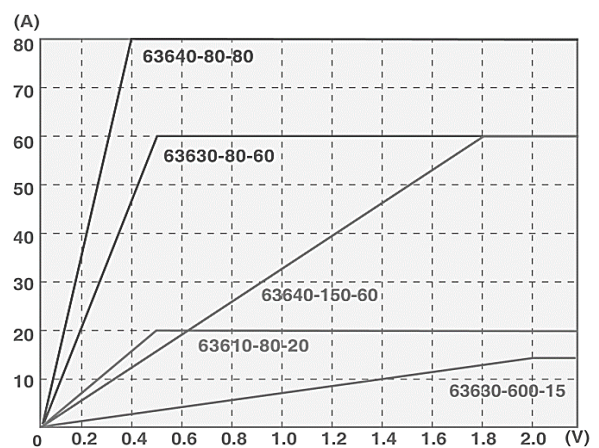


Рис. 1. Характеристики напряжения и тока нагрузок серии Chroma 63600

Также, для тестирования более мощных источников питания, можно сочетать параллельно несколько указанных модулей нагрузки (можно

достичь эффективного сопротивления ниже 2,7 мОм).

**Цель работы.** Наряду с этим, чем больше индивидуальных нагрузок сочетаются параллельно, тем больше становится установка, и, соответственно, больше шин сопротивления и индуктивных потерь на шине соединения. Очевидно, что для достижения высокой скорости переходных процессов и низкого общего сопротивления нужно более специализированное решение электронной нагрузки.

### 1. Схема реализации электронной нагрузки.

Чтобы имитировать поведение питающегося полупроводникового прибора, нужна электронная нагрузка со следующими характеристиками:

- как можно большая скорость нарастания тока нагрузки ( $dI/dt$ ) (в лучшем случае скорость нарастания также регулируется);
- регулируемый ток нагрузки;
- высокая мощность рассеяния, как пиковая, так и непрерывная;

- возможность контролировать ток нагрузки с высокой точностью и широкой полосой пропускания.

Чтобы тестировать источники питания низкого напряжения на очень высоких уровнях тока (например, солнечные модули) [4], электронная нагрузка должна иметь сверхнизкое минимальное сопротивление. Наконец, электронная нагрузка должна быть спроектирована для подключения к испытываемому источнику с минимальным сопротивлением и индуктивностью, иначе общая эффективность будет ограничена самим соединением.

Самым простым вариантом нагрузки, как можно предложить, является силовой резистор. Если его размер и охлаждение правильные, он может удовлетворить требованию к большой рассеиваемой мощности, а ток можно контролировать непосредственно (измеряя напряжение на известном сопротивлении). Последовательное добавление коммутатора позволяет генерировать переходные нагрузки. Однако нагрузка будет либо полностью включена, либо полностью выключена, и сила тока будет зависеть от испытываемого напряжения [5]. Скорость изменения тока не контролируется и не регулируется. Очевидно, что это не гибкое решение, которое нельзя адаптировать к широкому кругу требований к тестированию.

Для обеспечения переменной нагрузки и регулируемой скорости снижения тока (скорости, с которой ток нагрузки возрастает и падает), необходимо построить активную схему на основе операционного усилителя. Топология этой схемы показана на рис. 2. Операционный усилитель приводит в действие затвор силового MOSFET транзистора для установки управляемого

напряжения на сенсорном резисторе. Это приводит к контролируемому току нагрузки, который протекает от стока к истоку MOSFET и через сенсорный резистор к земле. Силовой MOSFET добавляет усиление по току, но не добавляет усиления по напряжению, поскольку он работает как усилитель тока (source-follower).

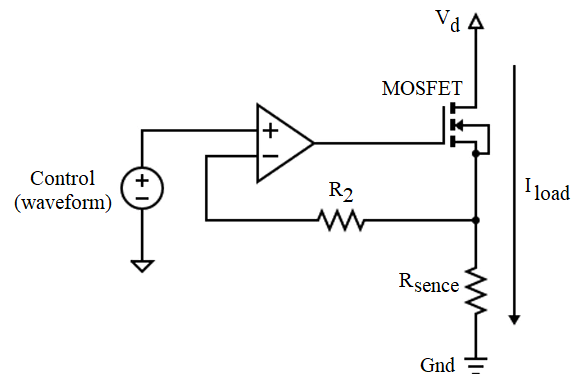


Рис. 2. Базовая схема управляемой электронной нагрузки

Эта схема может быть реализована на n-канальном MOSFET с сенсорным резистором на нижней стороне или p-канальном MOSFET с сенсорным резистором на верхней стороне [6]. В любом случае, сенсорный резистор добавляет отрицательную обратную связь, поскольку он подключен к источнику MOSFET, вычитая напряжение от напряжения затвора при увеличении тока, и наоборот, добавляя напряжение затвора при уменьшении тока, что способствует стабильности работы.

Практическая реализация активной схемы электронной нагрузки с n-канальным MOSFET показана на рис. 3. Эта схема представляет собой сочетание простой нагрузки из рис. 2 и дифференциального усилителя. Эта топология улучшает точность, учитывая динамические и статические разницы в потенциале земли между входным сигналом (SGND) и нижней стороной сенсорного резистора (GND).

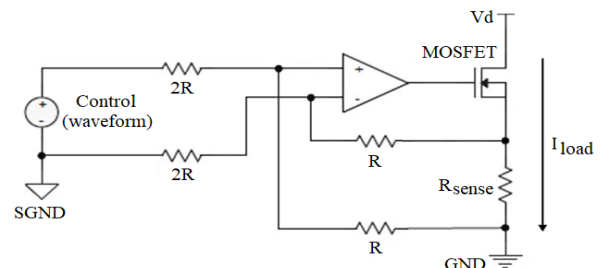


Рис. 3. Детализированная схема электронной нагрузки

Ток нагрузки, по предложенной схеме, пропорционален напряжению и форме

управляющего сигнала, при этом коэффициент усиления устанавливается отношением входных сопротивлений и сопротивлений обратной связи.

Активная схема электронной нагрузки имеет много преимуществ по сравнению с простым коммутируемым сопротивлением. В отличие от простого сопротивления, активное сопротивление может генерировать переменный ток нагрузки от нуля до максимального тока. Кроме того, поскольку ток нагрузки управляется операционным усилителем в замкнутом цикле, ток точно отслеживает сигнал управления. Таким образом, активная электронная нагрузка может позволить контролировать скорость снижения тока. Наконец, поскольку в схеме есть резистивный элемент с фиксированной величиной, точное измерение тока нагрузки высокой полосой пропускания является относительно простым.

На рис. 4 приведен один из вариантов добавления второго усилителя для точного измерения тока нагрузки. В этом случае он сконфигурирован как усилитель проводимости, что позволяет легко суммировать сигналы измерения тока из нескольких схем электронной нагрузки.

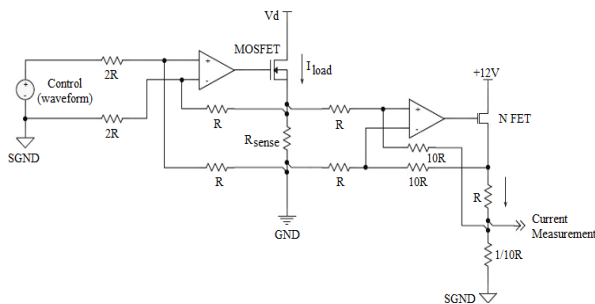


Рис. 4. Измерение тока за счет дополнительного усилителя

**2. Выбор компонентов и их расчет: выбор MOSFET-транзистора.** Силовой транзистор должен быть выбран для обеспечения быстрой реакции, одновременно выдерживая большую мощность рассеяния тепла. Необходимо учитывать несколько электрических и тепловых характеристик.

**Заряд затвора.** Чтобы модулировать ток, протекающий через MOSFET, с высокой стабильностью и высокой пропускной способностью, операционный усилитель должен иметь возможность быстро изменять напряжение от затвора к источнику. MOSFET с высокой емкостью затвор-исток и затвор-сток ( $C_{GS}$  и  $C_{GD}$ , соответственно) потребует большего тока управления для достижения желаемой скорости нарастания. Поэтому важно выбрать транзистор с низким показателем FoM (figure of merit) и, соответственно, низкой паразитарной емкостью [7]. Для многих MOSFET общий заряд  $Q_G$  является хорошей метрикой, и сравнение между MOSFET

может быть осуществлено быстро, используя только этот параметр.

**Напряжение сток-исток.** Напряжение сток-исток ( $V_{DS}$ ) должно быть достаточно высоким, чтобы противостоять напряжению испытываемого источника питания, включая любые переходные прыжки или превышения напряжения. Большинство MOSFET транзисторов рассчитаны на 12В, 25В, 30В или даже выше, поэтому выбор транзистора, пригодного для тестирования источников низкого и среднего напряжения, не представляет труда. В общем, MOSFET следует выбирать с напряжением  $V_{DS}$ , которое составляет не менее 125% измеряемого напряжения. Более высокое  $V_{DS}$  в транзисторе такого же размера негативно повлияет на другие рабочие характеристики, поэтому выбирают устройство с низким допустимым значением  $V_{DS}$ .

**Ток стока.** Номинальный ток сток-исток  $I_D$  должен быть достаточным для передачи необходимого тока нагрузки. Если необходимо оперировать высокими токами, то возможно использование массива параллельных схем нагрузки, что облегчает рассеивание мощности и повышает максимальный  $I_D$ . Другими словами, если используется массив из  $N$  равных нагрузок активного тока, ток через каждый MOSFET-транзистор является суммарным током нагрузки, разделенным на  $N$  [8]. При этом один операционный усилитель может управлять несколькими MOSFET параллельно, при условии, что каждый MOSFET подключен к независимому сенсорному резистору на выходном терминале. Эта схема гарантирует, что общий ток распределяется равномерно между MOSFET-транзисторами через описанную ранее характеристику отрицательной обратной связи усилителя тока.

Во время управления двумя или более MOSFET-транзисторами, как правило, необходимо добавлять небольшие сопротивления последовательно с затворами MOSFET, чтобы предотвратить колебания [9]. Конфигурация операционного усилителя дополнительно расширяется, включая суммирование путем дублирования обратной связи и сопротивлений входного делителя в каждый вход схемы.

**Тепловая мощность.** Важнейшей характеристикой MOSFET, используемого в электронной нагрузке, является его способность рассеивать отработанное тепло. Общая мощность нагрузки ( $P_L$ ), очевидно, является произведением тока нагрузки и испытываемого напряжения:

$$P_L = I_{load} \times V_d$$

Если параллельно работают несколько цепей нагрузки, каждая цепь проводит ток  $I_{load}/N$ , и общая мощность нагрузки распределяется более или менее равномерно между транзисторами.

Часть этой мощности рассеивается на сенсорных резисторах ( $P_R$ ), и эта часть изменяется как квадрат тока нагрузки:

$$P_R = (I_{load}/N)^2 \times R_{sense}$$

Остаток мощности рассеивается в MOSFET-транзисторе ( $P_M$ ):

$$P_L = (P_M + P_R) \times N$$

$$P_M = P_L/N - P_R$$

$$P_M = (I_{load} \times V_d)/N - (I_{load}/N)^2 \times R_{sense}$$

Способность MOSFET рассеивать тепло обобщается двумя ключевыми параметрами: тепловым сопротивлением перехода к корпусу  $\Theta_{JC}$  и стационарным рассеянием мощности  $P_D$ . Из этих двух значений  $\Theta_{JC}$  является наиболее полезным, поскольку оно указывает на наименьшее возможное повышение температуры перехода MOSFET как функцию мощности, исключая все воздействия внешней среды.

Хотя характеристики MOSFET, предоставленные производителем, также приводят значение теплового сопротивления к окружающей среде  $\Theta_{CA}$ , это значение определяется стандартным размером печатной платы и конструкцией. Электронные нагрузки большой мощности обычно проектируются для максимального рассеивания тепла со значительно сниженным тепловым сопротивлением, чем типичные значения теплового сопротивления  $\Theta_{JA}$  в естественных условиях, содержащихся в характеристиках MOSFET, предоставленных производителем. Другими словами, поскольку для электронной нагрузки большой мощности нужен радиатор, который значительно отличается от стандартной тестовой платы  $\Theta_{JA}$ , значение  $\Theta_{JC}$  является наиболее полезным.

В дополнение к характеристикам термического сопротивления корпуса транзистора также следует учитывать максимальную температуру p-n перехода кремния  $T_{Jmax}$ . Большинство мощных транзисторов MOSFET рассчитаны на  $T_{Jmax}$  от 150°C до 175°C. Электронная нагрузка должна быть спроектирована таким образом, чтобы произведение мощности MOSFET  $P_M$  и теплового сопротивления корпуса транзистора в сочетании с максимальной температурой корпуса  $T_{MB}$  не превышало  $T_{Jmax}$  [10]:

$$P_M = (T_{Jmax} - T_{MB})/\Theta_{JC}$$

В зависимости от выбора параметров, это соотношение дает или максимально допустимую стабильную мощность для MOSFET, или максимально допустимую температуру радиатора при желаемой максимальной мощности.

**Безопасный диапазон рабочих параметров MOSFET.** Таблица мощности MOSFET обычно включает график безопасной рабочей зоны (safe-operating-area) (SOA) [11]. Этот график показывает постоянную импульсную мощность MOSFET.

График SOA, например, для PSM2R0 показан на рис. 5.

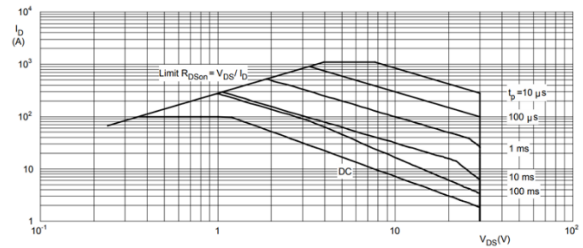


Рис. 5. График безопасной рабочей зоны для MOSFET транзистора PSMN2R0,  $T_C = 25^\circ C$

График SOA формируется для фиксированной температуры, дополнительные кривые показывают рост пиковой мощности для более короткой продолжительности импульсов. Стоит отметить, что кривые на графике SOA, как правило, являются линиями постоянной мощности (постоянное произведение  $I_{DS} \times V_{DS}$ ). Способность MOSFET обрабатывать гораздо большую мощность при коротких импульсах очень полезна для электронной нагрузки, предназначенной для проверки переходных процессов.

Важно разработать электронную нагрузку таким образом, чтобы MOSFET не работал выше своей кривой SOA для любой предполагаемой ширины импульса. Рабочие точки должны быть расположены на участке SOA, чтобы обеспечить безопасную работу конструкции. Некоторые транзисторы MOSFET оптимизированы для работы в линейной области и специально разработаны для того, чтобы иметь большую площадь под кривой SOA, также есть MOSFET, оптимизированные для режимов быстрого включения.

**Переходное сопротивление.** Параметры MOSFET также включают график переходного теплового импеданса, характерный график, например для PSMN2R0, показан на рис.6. Импульсный переходной тепловой импеданс MOSFET значительно ниже, чем стационарный тепловой импеданс из-за теплоемкости корпуса устройства, свинцовой основы и материалов корпуса.

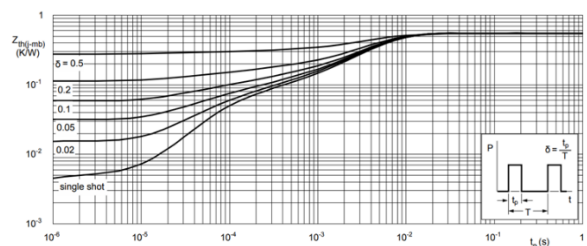


Рис. 6. Диаграмма переходного теплового сопротивления для силового MOSFET PSMN2R0



В отличие от графика SOA, график переходного теплового импеданса не является функцией определенного значения  $T_{MB}$ . Это делает его очень полезным для определения превышения температуры перехода MOSFET выше  $T_{MB}$  для любой заданной ширины импульса тока и рабочего цикла. Когда рабочий цикл приближается к 100%, а ширина импульса приближается к постоянному току, график переходного теплового импеданса совпадает со значением стационарного состояния теплового импеданса перехода к корпусу  $\Theta_{JC}$ . Например, используя рисунок 4, можно видеть, что MOSFET пропустит импульс мощностью 200 Вт, который продолжается не более 100 мкс при длительности рабочего цикла 10% (т.е. импульс 100 мкс, повторяющийся на частоте 1 кГц), эффективный тепловой импеданс при таком переходном процессе составляет лишь  $0,075^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ , по сравнению с устойчивым значением  $\Theta_{JC} = 0,45^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ . Произведение этого переходного теплового импеданса и величины импульса 200 Вт дает прогнозируемый прирост  $T_J$  примерно на  $200 \text{ Вт} \times 0,075^{\circ}\text{C}/\text{Вт} = 15^{\circ}\text{C}$ .

### 3. Выбор компонентов и их расчет: выбор сенсорного резистора.

**Теплоотвод.** Как и силовой MOSFET, сенсорный резистор в активной схеме электронной нагрузки также рассеивает значительную долю общей мощности нагрузки. Важно выбрать чувствительный резистор, который может не только проводить ток нагрузки каждой параллельной ветви, но и быстро передавать отработанное тепло к печатной плате и радиатору.

Такой резистор должен иметь такие механические свойства:

- большая площадь контакта с печатной платой для теплоотвода;
- корпус с низким тепловым сопротивлением, можно совместить с охлаждением (радиатором);
- резистивный элемент и материалы корпуса, которые выдерживают высокие рабочие температуры.

Первая характеристика предпочтительна компонентам для поверхностного монтажа, поскольку выводы резисторов электрически соединяются с печатной платой только на двух сквозных отверстиях. Выводы также имеют значительное резистивное и индуктивное сопротивление для тока нагрузки. Также большое сопротивление корпусов являются сложными для термического соединения с печатной платой и радиатором для эффективного охлаждения. SMD резисторы имеют два ключевых преимущества: они припаяны к широким площадкам на печатной плате и обычно тонкий плоский корпус, что позволяет легко установить эффективную тепловую связь с радиатором.

Материалы корпуса также важны для тепловых характеристик. Резистор, изготовленный из пластика, имеет преимущество в том, что он электрически изолирован от радиатора. Однако инкапсуляция, как правило, имеет более высокое тепловое сопротивление, чем сам элемент, поэтому некапсулированные устройства могут достичь более низкого общего теплового сопротивления.

**Низкая паразитная индуктивность.** Паразитная индуктивность в сенсорном элементе непосредственно ограничивает максимальную скорость нарастания тока, которую можно достичь в электронной нагрузке (1), поскольку ток не может расти быстрее, чем позволяет индуктивность. Кроме того, при больших скоростях роста тока паразитная индуктивность снижает напряжение на сенсорном элементе, что приводит к отклонению от действительного тока нагрузки. При этом переходное напряжение на резисторе является суммой резистивного напряжения и индуктивного напряжения:

$$I_{sense} = (V_{sense}/R_{sense}) \times (1 - e^{-t/\tau})$$

$$V_{sense} = (I_{sense} \times R_{sense}) / (1 - e^{-t/\tau})$$

$$\tau = L_{sense}/R_{sense}$$

Схема усилителя электронной нагрузки не может отличить индуктивную часть сигнала от резистивной части, поэтому фактический ток нагрузки растет медленнее, чем сигнал напряжения на сенсорном резисторе (рис. 7).

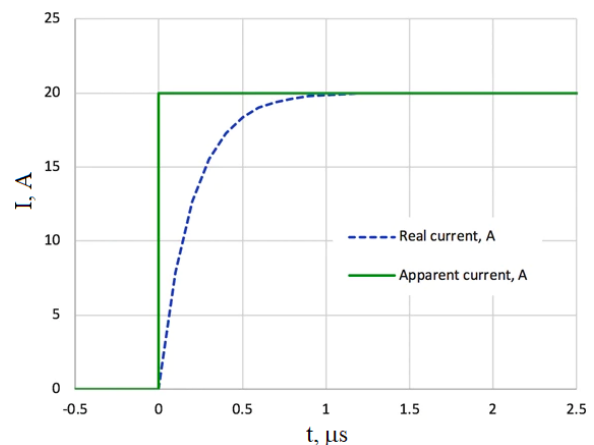


Рис. 7. Переходная характеристика резистора (5 мОм с индуктивностью 1 нГн)

На рис. 7 идеальный ток - это напряжение на сенсорном резисторе, которое регулируется к постоянному значению операционным усилителем в схеме нагрузки, реагируя на шаг входящего управляющего напряжения. Реальный ток отстает от напряжения сенсорного резистора с постоянной времени  $\tau \approx 200 \text{ нс}$ . Фактический ток согласуется с управляющим сигналом только после того, как пройдет примерно  $5 \times \tau = 1 \text{ мкс}$ , что делает схему

неэффективной для генерации быстрых переходных процессов нагрузки.

Это отставание представляет проблему как для электронной нагрузки, так и для цепей измерения тока - обе должны быть компенсированы на величину этой постоянной времени. Индуктивный сигнал можно нивелировать, применив к сигналу однополюсный фильтр низких частот. Фильтр может быть реализован как RC-фильтр на сенсорном резисторе. Фильтр следует выбирать таким образом, чтобы постоянная времени отвечала сенсорному резистору:

$$t = R_{filter} \times C_{filter} = L_{sense}/R_{sense}$$

Если фильтр добавляется через сенсорный резистор, нужно учесть, чтобы коэффициент постоянного тока операционного усилителя не менялся.

Чтобы облегчить проблему до ее возникновения, выбирают чувствительный резистор с низкой индуктивностью. Короткий, широкий и тонкий резистивный элемент будет иметь более низкую индуктивность, чем длинный и тонкий или спиральный.

**Точность сенсорного резистора.** Хотя это не является критическим для испытаний переходных процессов нагрузки, абсолютная точность электронной нагрузки чрезвычайно важна, если измеренный ток будет использоваться для расчета эффективности тестируемого источника питания [12]. Электронная нагрузка никогда не может быть точнее, чем сам сенсорный резистор, поэтому важно выбрать сенсорный резистор с высокой точностью.

Поскольку сенсорный резистор также будет рассеивать мощность, температурный коэффициент сопротивления (TCR) играет значительную роль в точности нагрузки в широком диапазоне мощности [13]. По мере нагревания резистора его сопротивление  $R_T$  также увеличивается, как правило, прямо пропорционально температуре  $T$ :

$$R_T = R_{nom} \times (1 + (T - 25^\circ C) \times TCR)$$

Многие промышленные сенсорные резисторы имеют значение TCR на уровне 50 ppm/°C или ниже. Это эквивалентно изменению сопротивления всего на 0,5% при повышении температуры на 100°C. Если нужна большая точность, к электронной нагрузке можно добавить схему измерения температуры. Затем текущие измерения могут быть скорректированы после сбора данных на основе значения TCR и температуры элемента на момент измерения.

Сенсорный резистор с отдельным специальным подключением питания и сенсора также помогает повысить точность. Разделение соединения на цепь сильного тока и цепь низкого тока позволяет исключить прибавку к току за счет измерительной цепи. Такое соединение обычно называют соединением Кельвина, или четырехзондовым соединением. Многие сенсорные резисторы

изготовлены таким образом, особенно когда резистор рассчитан на высокий ток и низкое сопротивление.

**Максимальный ток.** Максимальная сила тока электронной нагрузки - это простая функция напряжения испытываемого источника питания и комбинированного сопротивления всех MOSFET и сенсорных резисторов, при этом MOSFET полностью открыты. Чтобы предотвратить насыщение усилителя при максимальном токе нагрузки, конструкция должна иметь общее последовательное сопротивление, существенно ниже исследуемого напряжения, разделенного на максимальный ток:

$$R_{load,min} = (R_{DS} + R_{sense})/N$$

$$R_{load,min} = V_{d,min}/I_{load,max}$$

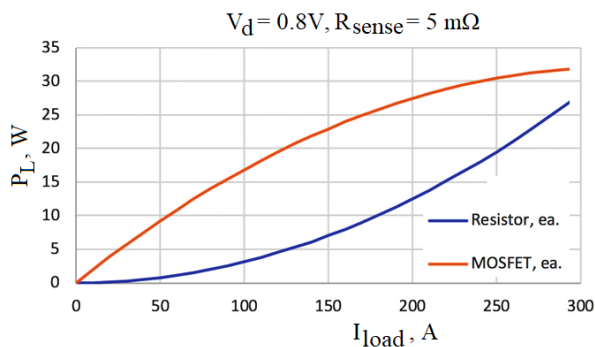
Это позволяет операционному усилителю удерживать MOSFET в линейной области на максимальном управляемом токе. Если ток поднимается выше значения  $I_{load,max}$ , цепь нагрузки входит в насыщение, полностью открывая MOSFET, но больше не может поддерживать контроль тока нагрузки.

**Конструкция корпуса.** Поскольку активная схема управляет током нагрузки, удерживает MOSFET в области насыщения, MOSFET рассеивает большую часть мощности в электронной нагрузке. Сенсорный резистор также рассеивает мощность, пропорциональную квадрату тока нагрузки. Поскольку резистор и MOSFET рассеивают значительную мощность, их следует выбирать тщательно. Тепловая конструкция очень важна, это позволит избежать повреждений, вызванных избыточным нагреванием.

**Равномерное распределение полной мощности.** Если и MOSFET, и сенсорный резистор имеют одинаковую мощность, конструкцию электронного нагрузки можно оптимизировать, распределив мощности между транзистором и сенсорным элементом при максимальном токе. Это достигается установкой значения чувствительного резистора примерно равным  $R_{DS}$  открытого MOSFET [14]. Этот метод также минимизирует пиковую мощность как в сенсорных резисторах, так и в MOSFET, однако обязывает реализовать охлаждение сенсорных резисторов.

График на рисунке 8 показывает, как рассеивается мощность в MOSFET и сенсорных резисторах в зависимости от нагрузки. Если транзисторы или сенсорные резисторы являются ограничительным фактором для общей рассеиваемой мощности, баланс сопротивления  $R_{load,min}$  может быть смещен, чтобы уменьшить мощность в транзисторе или сенсорном резисторе, за счет более высокой пиковой мощности в обратном компоненте.





რის. 8. Мощности, которые выделяются в MOSFET и сенсорном резисторе в зависимости от тока нагрузки

Используя эту схему при уровнях тока ниже максимального, MOSFET всегда рассеивает больше мощности, чем сенсорный резистор, поскольку большая часть падения напряжения происходит на MOSFET. Баланс рассеиваемой мощности также сильно варьируется в зависимости от напряжения испытываемого источника питания.

**3. Выбор компонентов и их расчет: выбор операционного усилителя.** Операционный усилитель должен иметь достаточную выходную мощность, чтобы управлять затвором MOSFET, который представляет собой емкостную нагрузку на операционный усилитель. Сила тока управления и скорость снижения напряжения также являются важными параметрами при выборе операционного усилителя, особенно когда требуется большая скорость снижения тока нагрузки.

**Однополярное питание.** Поскольку электронная нагрузка должна иметь линейную реакцию от нулевого значения до полной нагрузки, достаточно однополярного питания. Двуполярное питание не является необходимым, поскольку MOSFET перестает проводить ток, когда выходное напряжение усилителя меньше, чем пороговое напряжение затвора V<sub>GS</sub>. Однако операционный усилитель и его питание должны быть выбраны таким образом, чтобы напряжение на затворе MOSFET было достаточно высоким для достижения максимально желаемого тока нагрузки. Это означает, что выходное напряжение операционного усилителя должно превышать  $I_{load,max} \times R_{sense} + V_{GS}$ . Этот критерий существенно сужает диапазон операционных усилителей, поскольку многие устройства с однополярным питанием ограничены напряжением +5 В. Доступно значительно меньше операционных усилителей, которые имеют напряжение питания 12В или выше.

**Точность усилителя.** Точный операционный усилитель обеспечивает лучшую точность установки тока нагрузки в зависимости от входного контрольного сигнала. Это делает нагрузку проще в использовании и стабильнее [15]. Низкие входные

напряжения смещения могут уменьшить или устранить смещение тока нагрузки, особенно когда сигнал управления равен 0 В. Низкие входные токи смещения позволяют использовать большее сопротивление входного сигнала и обратной связи в схеме дифференциального усилителя, что, в свою очередь, улучшает входное сопротивление.

**Измерение тока.** В дополнение к обеспечению быстрого и точного значения тока нагрузки, схема также должна включать средства контроля тока нагрузки. Обычно это выходной сигнал, который можно подключить к входу измерительного устройства (рис. 4), чтобы обеспечить графическую индикацию формы тока нагрузки в режиме реального времени. Если для измерения тока нагрузки используется отдельный усилитель, его точность может уменьшить или устранить потребность в калибровке. Это особенно полезно для нагрузок с очень сильным током, в этом случае может быть невозможно найти прецизионный шунт, затрудняя или делая невозможным калибровку по внешнему эталону. Простой схемой контроля тока является суммирующий усилитель, который генерирует выходное напряжение, пропорциональное току нагрузки.

Одним из возможных усовершенствований является преобразование выходного сигнала усилителя в источник тока (рис. 4). Это обеспечивает выходной ток, пропорциональный току нагрузки. Такой подход имеет некоторые преимущества перед сигналом напряжения. Отдельные выходы источника тока можно легко суммировать, подавая их на единый резистор, что позволяет нескольким устройствам нагрузки сообщать об общем токе нагрузки без необходимости дополнительного суммирующего усилителя. Выходы источника тока также менее чувствительны к шуму, вызванному сдвигами потенциала земли между устройством нагрузки и измерительным оборудованием, особенно если суммирующий резистор расположен на измерительном оборудовании.

Схема измерения тока или мониторинга может быть оптимизирована для точности или для скорости и пропускной способности. Первое имеет важное значение, если электронная нагрузка будет использоваться для измерения эффективности, где постоянный ток нагрузки должен быть точно известен. Последнее является важным для анализа переходной реакции, где форма сигнала тока нагрузки является критической для точного представления скорости нарастания тока нагрузки. Во многих случаях можно достичь хорошего компромисса между скоростью и точностью. Усилители с более высокой точностью обычно поддерживают меньшую полосу пропускания, тогда как более быстрые усилители, как правило, имеют

более высокие входные напряжения смещения и токи смещения.

**4. Схмотехническое решение блока электронной нагрузки.** На основе рассмотренных физических и схемных решений по реализации блока электронной нагрузки была разработана электрическая схема, приведенная на рисунке 9. Разработанный блок предложено реализовать на основе четырех параллельных цепей, которые реализованы на основе MOSFET-транзисторов (максимальный ток нагрузки до 80 А каждый). Указанные транзисторы управляются через четыре однополярные операционные усилители, объединенные в микросхеме LM324. Управление блоком электронной нагрузки реализовано за счет управления напряжением на выводах положительной обратной связи, которое дополнительно стабилизировано микросхемой TL431. Питается блок от источника постоянного стабилизированного тока с напряжением 12 В (предусмотрена дополнительная фильтрация от колебаний напряжения).

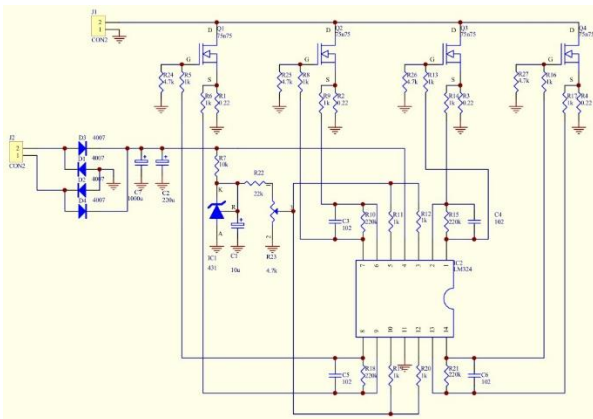


Рис. 9. Электрическая схема блока электронной нагрузки

#### Выводы

Проведен анализ схмотехнических решений для создания специализированного решения электронной нагрузки с микроконтроллерным управлением. Определены основные критерии и параметры, которые позволяют достичь высокой скорости переходных процессов и низкого общего сопротивления, а также предложена простая схема реализации такого прибора. На основе рассмотренных физических и схемных решений по реализации блока электронной нагрузки была разработана его функциональная электрическая схема.

#### References

1. Lecklider T. DC loads extend operating modes / Evaluation Engineering, 2014, Vol. 53, No 8, pp. 10.

2. Lu B., Wu X., Figueroa H., Monti A. A Low-Cost Real-Time Hardware-in-the-Loop Testing Approach of Power Electronics Controls. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, Vol. 54, No. 2, pp. 919-931.

3. Bayerer R. Parasitic inductance hindering utilization of power devices. 9th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, Nov. 2016.

4. Zaitsev R.V., Kirichenko M.V., Khrypunov G.S. Operating Temperature Effect on the Thin Film Solar Cell Efficiency. Journal of nano- and electronic physics, 2019, Vol. 11, No 4, pp. 04029.

5. Grundkötter E., Weßkamp P., Melbert J. Transient Thermo-Voltages on High-Power Shunt Resistors. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, Vol. 67, No. 2, pp. 415-424.

6. Sarvaghad-Moghaddam M., Orouji A.A., Ramezani Z., et. al. Modelling the spice parameters of SOI MOSFET using a combinational algorithm. Cluster Computing, 2018, No. 22, pp. 4683-4692.

7. Shenai K. The Figure of Merit of a Semiconductor Power Electronics Switch. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018, Vol. 65, No. 10, pp. 4216-4224.

8. Qu L., Zhang D. Input voltage sharing control scheme for input series and output series DC/DC converters using paralleled MOSFETs. IET Power Electronics, 2018, Vol. 11, No. 2, pp. 382-390.

9. Mao Y., Miao A., Wang C.-M., Ngo K.D.T. Balancing of Peak Currents Between Paralleled SiC MOSFETs by Drive-Source Resistors and Coupled Power-Source Inductors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, Vol. 64, No. 10, pp. 8334-8343.

10. Niu H., Lorenz R.D. Real-Time Junction Temperature Sensing for Silicon Carbide MOSFET With Different Gate Drive Topologies and Different Operating Conditions. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, Vol. 33, No. 4, pp. 3424-3440.

11. Roy S., Khan F. Dynamic Safe Operating Area (SOA) of Power Semiconductor Devices. 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, June 2020.

12. Alghaythi M.L., Islam N.E. The analysis of modeling small signal and adding a current sensing resistor of 0.1 ohm for a boost converter. 2018 IEEE Electronic Power Grid, Nov. 2018.

13. Youngtaek L., Sang-Won L., Jeong-Rae A. Electrical Properties of Plate Typed Shunt Resistors with Low TCR Property. Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, 2019, Vol. 32, No. 3, pp. 219-222.

14. Zhang M., Wei J., Zhou X., et. al. Simulation Study of a Power MOSFET With Built-in Channel Diode for Enhanced Reverse Recovery Performance. IEEE Electron Device Letters, 2018, Vol. 40, No. 1, pp. 79-82.

15. Konar M., Sahu R., Kundu S., et. al. Improvement of the Gain Accuracy of the Instrumentation Amplifier Using a Very High Gain Operational Amplifier. 2019 Devices for Integrated Circuit, Aug. 2019.

#### References (transliterated)

1. Lecklider T. DC loads extend operating modes / Evaluation Engineering, 2014, Vol. 53, No. 8, pp. 10.
2. Lu B., Wu X., Figueroa H., Monti A. A Low-Cost Real-Time Hardware-in-the-Loop Testing Approach of Power Electronics Controls. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, Vol. 54, No. 2, pp. 919-931.
3. Bayerer R. Parasitic inductance hindering utilization of power devices. 9th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, Nov. 2016.
4. Zaitsev R.V., Kirichenko M.V., Khrypunov G.S. Operating Temperature Effect on the Thin Film Solar Cell Efficiency. Journal of nano- and electronic physics, 2019, Vol. 11, No 4, pp. 04029.
5. Grundkötter E., Weßkamp P., Melbert J. Transient Thermo-Voltages on High-Power Shunt Resistors. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, Vol. 67, No. 2, pp. 415-424.
6. Sarvaghad-Moghaddam M., Orouji A.A., Ramezani Z., et. al. Modelling the spice parameters of SOI MOSFET using a combinational algorithm. Cluster Computing, 2018, No. 22, pp. 4683-4692.
7. Shenai K. The Figure of Merit of a Semiconductor Power Electronics Switch. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018, Vol. 65, No. 10, pp. 4216-4224.
8. Qu L., Zhang D. Input voltage sharing control scheme for input series and output series DC/DC converters using paralleled MOSFETs. IET Power Electronics, 2018, Vol. 11, No. 2, pp. 382-390.

9. Mao Y., Miao A., Wang C.-M., Ngo K.D.T. Balancing of Peak Currents Between Paralleled SiC MOSFETs by Drive-Source Resistors and Coupled Power-Source Inductors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, Vol. 64, No. 10, pp. 8334-8343.

10. Niu H., Lorenz R.D. Real-Time Junction Temperature Sensing for Silicon Carbide MOSFET With Different Gate Drive Topologies and Different Operating Conditions. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, Vol. 33, No. 4, pp. 3424-3440.

11. Roy S., Khan F. Dynamic Safe Operating Area (SOA) of Power Semiconductor Devices. 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, June 2020.

12. Alghaythi M.L., Islam N.E. The analysis of modeling small signal and adding a current sensing resistor of 0.1 ohm for a boost converter. 2018 IEEE Electronic Power Grid, Nov. 2018.

13. Youngtaek L., Sang-Won L., Jeong-Rae A. Electrical Properties of Plate Typed Shunt Resistors with Low TCR Property. Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, 2019, Vol. 32, No. 3, pp. 219-222.

14. Zhang M., Wei J., Zhou X., et. al. Simulation Study of a Power MOSFET With Built-in Channel Diode for Enhanced Reverse Recovery Performance. IEEE Electron Device Letters, 2018, Vol. 40, No. 1, pp. 79-82.

15. Konar M., Sahu R., Kundu S., et. al. Improvement of the Gain Accuracy of the Instrumentation Amplifier Using a Very High Gain Operational Amplifier. 2019 Devices for Integrated Circuit, Aug. 2019.

## Цифровая система управления для кооперативного преобразователя

Владимир Замаруев, к.т.н., профессор

НТУ «Харьковский политехнический институт», Украина, e-mail: [volodymyr.zamaruiev@khpi.edu.ua](mailto:volodymyr.zamaruiev@khpi.edu.ua)

Богдан Стысло, к.т.н. доцент

НТУ «Харьковский политехнический институт», Украина, e-mail: [bohdan.styslo@khpi.edu.ua](mailto:bohdan.styslo@khpi.edu.ua)

**Аннотация.** В работе рассмотрена цифровая система управления (ЦСУ) кооперативным силовым активным фильтром, разработанная на основе микроконтроллера семейства STM32. Проанализированы особенности ее работы. Приведены результаты физического моделирования ЦСУ. Показано, ресурсы микроконтроллера общего назначения достаточны для решения подобной задачи.

**Ключевые слова.** цифровая система управления, система реального времени, кооперативный преобразователь, цифровая обработка сигналов, полосовой гребенчатый фильтр.

## Digital control system for cooperative converter

Volodymyr Zamaruiev, Candidate Degree in Technical Science, Professor,

NTU "KhPI" (Ukraine, Kharkiv), e-mail: [volodymyr.zamaruiev@khpi.edu.ua](mailto:volodymyr.zamaruiev@khpi.edu.ua)

Bohdan Styslo, Candidate Degree in Technical Science, Associate Professor,

NTU "KhPI" (Ukraine, Kharkiv), e-mail: [bohdan.styslo@khpi.edu.ua](mailto:bohdan.styslo@khpi.edu.ua)

**Summary.** The paper considers a digital control system (DCS) of a cooperative active power filter, developed on the basis of a microcontroller of the STM32 family. The features of DCS's work are analyzed. The results of physical modeling of the one are presented. It is shown that the resources of a general-purpose microcontroller are sufficient to solve such a problem.

**Keywords:** digital control system, real time system, cooperative converter, digital signal processing, band-pass comb filter.

**Введение.** Борьба за обеспечение электромагнитной совместимости потребителей электроэнергии, использующих в своем составе полупроводниковые преобразователи, в основном – выпрямители, с сетью питания, привела к широкому распространению разнообразных силовых активных фильтров (САФ) [1, 2]. В основании законов управления этими САФ, как правило, лежит теория Акаги (Akagi) [3] и ее модификации, предполагающие анализ сигналов обратной связи во временной области. Поиск пути минимизации мощности потерь САФ привел к появлению класса кооперативных преобразователей [4, 5], работающих каждый в своем частотном диапазоне, причем эти диапазоны не пересекаются. В рамках  $p-q$  теории управление САФ с такими преобразователями невозможно. Для управления кооперативными преобразователями предложено использовать обработку сигналов обратной связи в частотной области с разделением сигналов управления с выделением конкретных гармоник [6]. Нормирование параметров качества тока так же основано на частотных методах анализа [7, 8], что упрощает разработку системы управления САФ.

Разработка цифровых систем управления (ЦСУ), в основном, основывается на цифровых сигнальных процессорах (DSP) [9]. Однако, в публикациях не раскрывается подробности реализации ЦСУ и программного кода DSP. Такой подход исключает несущественные, по мнению авторов, детали, но

существенно затрудняет появление последователей их исследований. Ориентирование разработчиков ЦСУ на DSP существенно повышает порог вхождения в разработку ЦОС САФ, делая его зачастую непреодолимым для энтузиастов, учебных заведений и молодых лабораторий.

**Целью данной работы** является демонстрация возможности реализации основного узла СУ кооперативными САФ – полосового гребенчатого фильтра на микроконтроллере общего назначения, анализ причин возникновения погрешностей, вносимых данным узлом и путей их устранения.

**Кооперативный САФ.** Функциональная схема типового параллельного САФ без обратной связи (система, работающая по возмущению) приведена на рис. 1. Предполагаем, что САФ работает с широтно-импульсной модуляцией.

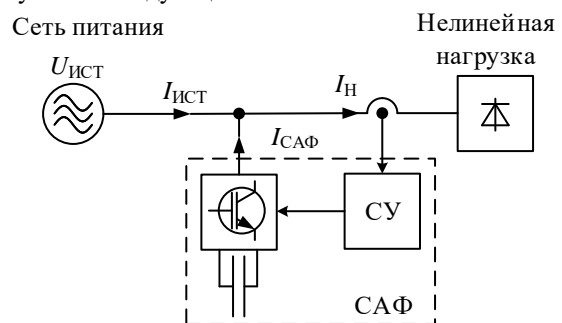


Рис. 1. Типовой параллельный САФ

$$i_{\text{ИСТ}} = i_{\text{Н}} + i_{\text{САФ}} \quad (1)$$

при этом

$$i_{\text{Н}} = i_{\text{Н1}} + i_{\text{Нгарм}}, \quad (2)$$

$$i_{\text{САФ}} = - i_{\text{Нгарм}}, \quad (3)$$

где  $i_{\text{Н1}}$  – основная гармоника тока нагрузки,  $i_{\text{Нгарм}}$  – высшие гармоники тока нагрузки (субгармоническими составляющими тока пренебрегаем).

Функциональная схема ЦСУ САФ приведена на рис. 2. В ее состав входит АЦП, измеряющий уровень входного сигнала с частотой  $f_s$ , блок цифровой обработки сигнала (ЦОС), модулятор (М) и распределитель импульсов управления ключами полупроводникового коммутатора (РИ). Поскольку рассматривается ЦСУ САФ, то на вход модулятора подается дискретный сигнал управления с частотой  $f_y$ . Управление осуществляется с частотой  $f_{\text{PWM}}$ . Если не используется режим передискретизации, то  $f_s = f_y$ . При некрatном соотношении частот управления  $f_y$  и ШИМ  $f_{\text{PWM}}$  в выходном сигнале ЦСУ САФ возникают биения на разностных частотах, при кратно большей частоте управления наблюдается потеря информации управления из-за недостаточной частоты ШИМ, а при кратно большей частоте ШИМ – недостаток информации управления для обновления коэффициента заполнения на каждом интервале ШИМ. При использовании микроконтроллеров невысокого быстродействия

$$f_s = f_y = f_{\text{PWM}}; \quad (4)$$

в режиме передискретизации:

$$f_s = N (f_y = f_{\text{PWM}}), \text{ где } N=2,3,4, \dots \quad (5)$$

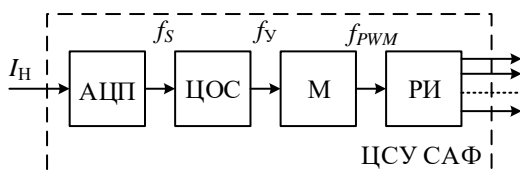


Рис. 2. Типовая ЦСУ САФ

Синхронизация простейших ЦСУ производится от таймера, формирующего сигнал ШИМ – модулятора, однако целесообразно использовать выделенный таймер, формирующий тактовые импульсы синхронизации АЦП  $clk_{\text{ADC}}$  и модулятора  $clk_{\text{PWM}}$  с соответствующими частотами. При равенстве частот, эти импульсы могут иметь фиксированный временной сдвиг ограниченный периодом ШИМ  $0 < t_{\text{сдв}} T_{\text{ШИМ}}$ . Характерные временные интервалы ЦСУ приведены на рис. 3.

Синхронизация АЦП производится импульсами  $clk_{\text{ADC}}$  (Рис. 3,а). От момента синхронизации  $t_1$  до момента захвата сигнала устройством выборки-хранения (УВХ)  $t_2$  проходит интервал времени  $t_1-t_2$ . Этот интервал не оказывает влияния на работу СУ, а лишь формирует временной сдвиг между моментом синхронизации и точкой измерения ( $t_{\text{зад}}$ ). Измерения

АЦП, начавшиеся в момент  $t_2$  заканчиваются в момент времени  $t_3$  ( $t_{\text{АЦП}}$  Рис. 3,в). Значение сигнала на выходе АЦП отличается от текущего на величину  $\Delta_1$  (Рис. 3,е), которая зависит от длительности интервала измерения и скорости изменения сигнала. В момент  $t_3$  начинается цифровая обработка сигнала, заканчивающаяся к моменту времени  $t_4$  ( $t_{\text{ЦОС}}$  Рис. 3,г). В этот момент времени отклонение текущего значения сигнала от исходного достигает  $\Delta_2$  (Рис. 3, е). Общая длительность обработки сигнала  $t_2-t_4$  ( $t_{\text{обр}}$  Рис. 3). Сигнал управления модулятором сформирован в момент времени  $t_4$  (отклонение –  $\Delta_2$ ), но поскольку в микроконтроллерах коэффициент заполнения ШИМ должен быть известен в момент начала периода, то период ШИМ может быть начат в момент  $t_5$  (Рис. 3,д). Отклонение текущего значения сигнала от исходного в этот момент достигает  $\Delta_3$  (Рис. 3,е). Синхронизация ШИМ производится импульсами  $clk_{\text{PWM}}$  (Рис. 3,б), отстоящими от импульсов синхронизации АЦП на интервал  $t_{\text{сдв}}$ . Такой алгоритм работы обеспечивает минимальный и фиксированный интервал сдвига  $t_{\text{сдв}}$ .

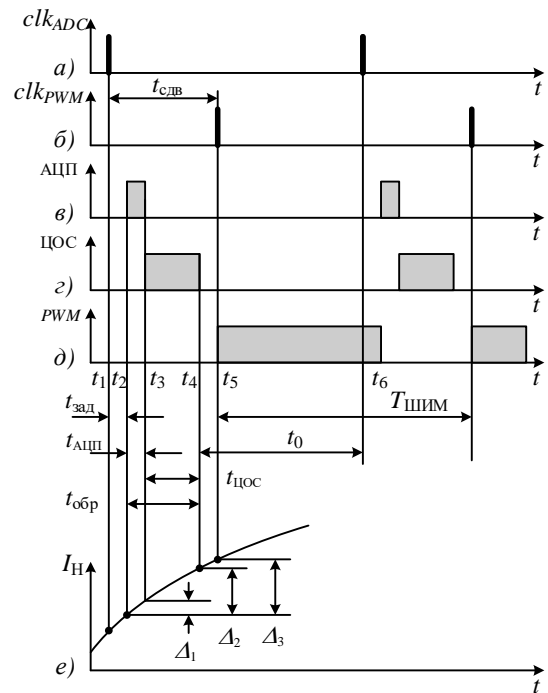


Рис. 3. Временные интервалы ЦСУ

Исходя из диаграмм рис. 3, главной задачей программиста ЦСУ, является уменьшение времени ЦОС и стабилизация длительности интервалов  $t_1-t_2$  и  $t_3-t_4$  (длительность интервала  $t_2-t_3$  определяется аппаратно). Это позволит уменьшить интервал  $t_{\text{сдв}}$  за счет уменьшения интервала  $t_4-t_5$  и, следовательно, уменьшить отклонение  $\Delta_3$ . Сумма времен задержки  $t_{\text{зад}}$  и обработки сигнала  $t_{\text{обр}}$  не может превышать периода ШИМ  $T_{\text{ШИМ}}$ . Интервал времени  $t_0$  может использоваться для дополнительных вычислений ЦСУ.

Высшие гармоники тока нагрузки (2) могут быть представлены в виде низкочастотной  $i_{Нг\text{арм}НЧ}$  и высокочастотной  $i_{Нг\text{арм}ВЧ}$  составляющих

$$i_{Нг\text{арм}} = i_{Нг\text{арм}НЧ} + i_{Нг\text{арм}ВЧ}. \quad (6)$$

Для подавления этих составляющих тока может быть использован кооперативный САФ [5], который отличается от рассмотренного тем, что состоит, не менее чем из двух преобразователей, подавляющих гармоники каждый в своем частотном диапазоне

$$i_{САФнч} = -i_{Нг\text{арм}НЧ}, \quad (7)$$

$$i_{САФвч} = -i_{Нг\text{арм}ВЧ}. \quad (8)$$

Вследствие этого блок ЦОС каждого из преобразователей включает в себя полосовой гребенчатый фильтр [6]. ЦСУ кооперативного САФ приведена на рис. 4. Частоты ШИМ высокочастотного и низкочастотного каналов могут отличаться при удовлетворении требований (4), (5). В простейшем случае, ЦОС сводится к выделению заданных гармоник и формированию сигнала управления  $U_y$  соответствующим модулятором.

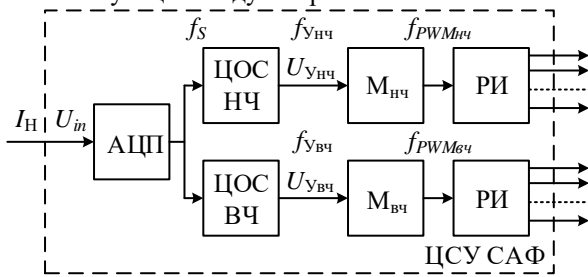


Рис. 4. ЦСУ кооперативного САФ

В данном случае, для оценки ЦСУ достаточно сравнить входной сигнал СУ и сигналы управления модуляторами.

**Тестовый стенд.** Для исследования ЦСУ разработан тестовый стенд, позволяющий смоделировать произвольный входной сигнал ЦСУ и оценить, соответственно, ее отклик. Поскольку рассматривается система на основе микроконтроллера общего назначения, то в состав стенда входят отладочные платы Nucleo-F429ZI и Nucleo-F767ZI [10]. Отличительными особенностями этих плат, повлиявшими на выбор, является наличие АЦП, блока вычислений с плавающей запятой и рабочая частота 180 МГц и 216 МГц. Дополнительное удобство предоставляет двухканальный цифро-аналоговый преобразователь.

Входное напряжение АЦП  $U_{in}$  (Рис. 4) формируется при помощи 12 разрядного ЦАП с дискретностью 5мкс. Форма напряжения задается в аналитическом виде

$$U_{in} = \sin \omega t + \sum_i A_i \sin i\omega t, \quad (9)$$

где  $\omega$  – частота основной гармоники входного сигнала,  $i$  – номера учитываемых гармоник,  $A_i = 1/i$ . Форма входного напряжения, учитывающего гармоники 5, 7, 11 и 13 приведена на рис. 5. Частота первой гармоники

принята 50 Гц. Поскольку форма напряжения задается аналитически, то легко синтезировать форму сигнала, соответствующую любому ансамблю гармоник.

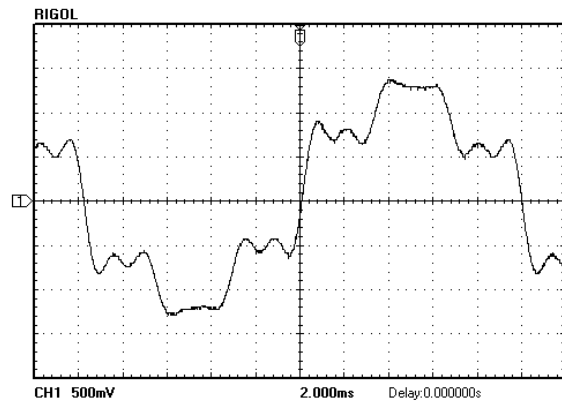


Рис. 5. Форма входного напряжения, учитывающего гармоники 5, 7, 11 и 13

Структурная схема ЦСУ тестового стенда представлена на рис. 6. Она включает в себя АЦП, гребенчатый полосовой фильтр  $N$ -го порядка. Сигнал управления, для удобства визуализации, подается на ЦАП.

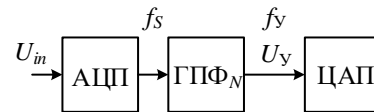


Рис. 6. Структурная схема ЦСУ тестового стенда

Гребенчатый полосовой фильтр реализован путем свертки дискрет текущего сигнала с ядром Дирихле  $N$ -го порядка  $D_N$  [6]. В соответствии с (4) это накладывает ограничения на частоты сигналов ЦСУ – поскольку  $N$ -й порядок ядра подразумевает  $N$  выборок на периоде основной частоты сигнала, то частота ШИМ в  $N$  раз больше частоты первой гармоники.

$$f_{PWM} = N f_1. \quad (10)$$

Обычно частота ШИМ выбирается исходя из коэффициента модуляции по частоте  $p$  [11], который определяет превышение частоты ШИМ над частотой максимальной подавляемой гармоники и принимается в диапазоне (8-12). В этом случае порядок фильтра  $N$  определяется как:

$$N = p * M, \quad (11)$$

где  $p$  – коэффициент модуляции по частоте;  $M$  – номер максимальной подавляемой гармоники.

**Программные решения, использованные в тестовом стенде.** Для моделирования ЦСУ используется Nucleo-F767ZI с тактовой частотой 200 МГц. Рассмотрим критичные времена, которые, согласно графиков рис. 3, влияют на точность ЦСУ. Максимальное быстродействие АЦП конкретного микроконтроллера определяется его аппаратными ресурсами и без уменьшения точности преобразования не может быть уменьшено. В данном



примере используется 12-разрядный АЦП с временем преобразования 15 тактов – 0,6 мкс. Следовательно, основное внимание необходимо уделить реализации операции свертки.

В дискретном случае свёртка входной функции  $f$  с ядром преобразования  $D$  соответствует сумме произведений

$$(*D)(x)=f(1)D_{N-1}+f(2)D_{N-2}+f(3)D_{N-3}+\dots+f(N)D_1. \quad (12)$$

Используем значения ядра Дирихле типа *float* одинарной точности и целочисленные значения результатов измерения АЦП. Программа создается на основе проекта STM32CubeMX в Arm Keil MDK с использованием HAL библиотек. Компиляция проводится в режиме оптимизации по времени с использованием блока вычислений с плавающей запятой. Время вычисления свертки фильтра 200 порядка составляет 15 мкс. Процесс обновления массива входных данных целесообразно выполнять с помощью DMA микроконтроллера. В противном случае, обновление массива будет происходить в интервале времени  $t_0$  (Рис. 3), что существенно ограничит частотные свойства ЦСУ. Обновление массива данных при помощи DMA занимает 8 мкс. При условии соизмеримости длительности интервала  $t_0$  и времени обновления массива, обойти проблему нехватки времени можно при использовании двух массивов входных данных, которые заполняются параллельно двумя потоками DMA и используются в чередующиеся периоды ШИМ.

С учетом линейной зависимости длительности свертки от порядка фильтра, можно оценить потенциальные возможности рассматриваемой ЦОС. На рис. 7 приведен график зависимости времени обработки сигнала и параметров ШИМ от порядка фильтра. Приведен интервал времени  $t_2-t_5$ , определяющий отклонение  $\Delta_3$  (Рис. 3). Из анализа графиков видно, что максимальный порядок фильтра, который может быть реализован, равен 450 при частоте ШИМ 22,5 кГц, при этом должно выполняться условие

$$t_2-t_5 < T_{\text{ШИМ}}. \quad (13)$$

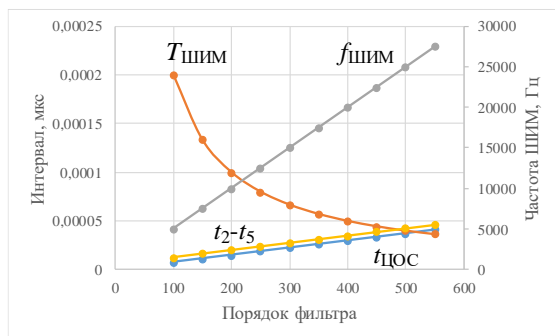


Рис. 7. Зависимость времени обработки сигнала и параметров ШИМ от порядка фильтра

При такой частоте ШИМ теоретически можно подавить гармонику с частотой 7500 Гц (150-я

гармоника) [12], при этом коэффициент модуляции будет равен 3. 23-я, 35-я и 50-я гармоники (гармоники границ диапазонов в соответствии с [7]) имеют, соответственно, коэффициент модуляции 19, 12 и 9, что позволяет считать частоту ШИМ достаточной для их подавления.

Результаты работы гребенчатого полосового фильтра низкочастотного и высокочастотного каналов приведены соответственно на рис. 8 и рис. 9. Верхняя осциллограмма соответствует ансамблю 5й и 7й гармоник (Рис. 8) и 11й и 13й гармоник (Рис. 9), на входе соответствующих ЦСУ. Нижняя осциллограмма – сигнал на выходе гребенчатого полосового фильтра (сигнал управления модулятором).

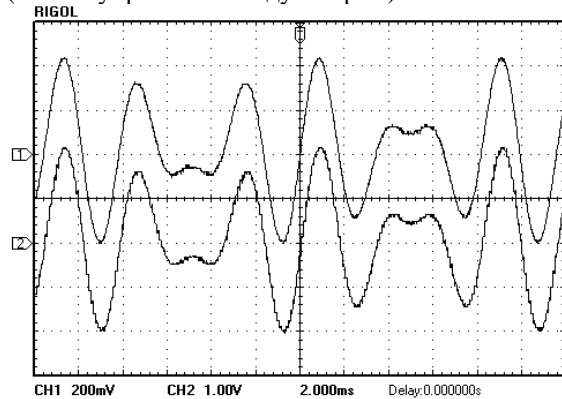


Рис. 8. Результаты работы гребенчатого полосового фильтра низкочастотного канала ЦСУ

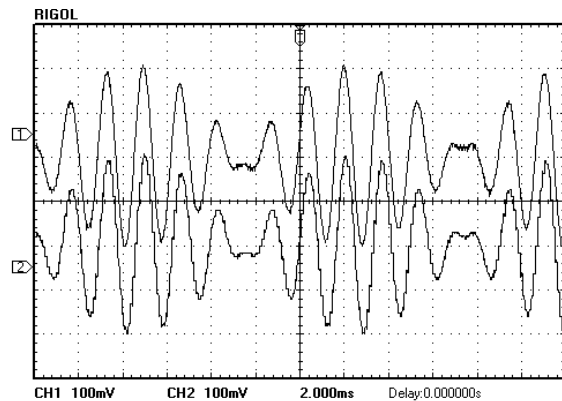


Рис. 9. Результаты работы гребенчатого полосового фильтра высокочастотного канала ЦСУ

Как видно из осциллограмм, сигналы управления модулятором соответствуют ансамблям выделяемых гармоник с точностью до временного сдвига. Оценить временные соотношения входного и выходного ансамбля гармоник можно по осциллограмме рис. 10.

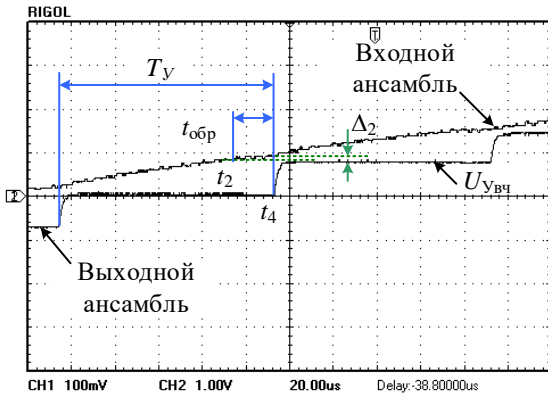


Рис. 10. Входной и выходной ансамбль гармоник

Нумерация интервалов времени на рис. 10 соответствуют рис. 3. В момент времени  $t_2$  происходит захват входного сигнала УВХ АЦП, в момент времени  $t_4$  сигнал управления записывается в ЦАП. Период обновления сигнала управления обозначен  $T_y$ . В соответствии с порядком фильтра  $N=200$ ,  $T_y = 100$  мкс. Реальное время обработки сигнала  $t_{обр}$  составляет 18 мкс, что превосходит теоретически ожидаемое значение на 2,4 мкс. Увеличение времени обработки связано с выполнением служебных операторов, не относящихся непосредственно к свертке сигналов.

Отклонение  $\Delta_2$  сигнала управления в момент времени  $t_4$  от измеренного в момент  $t_2$  может стать ограничивающим фактором увеличения порядка фильтра наряду с выполнением условия (13). На рис. 11 приведена зависимость относительного отклонения  $\Delta_2^*$  сигнала управления (нормирующий фактор – амплитуда гармоники) от номера гармоники для фильтра 200-го порядка. При подавлении гармоник при помощи САФ (рис. 1) точность подавления гармоник равна (при игнорировании остальных факторов) относительному отклонению  $\Delta_2^*$  ( $\Delta_3^*$ ). Из графика видно, что ошибка, определяемая ЦСУ САФ при подавлении 5-й гармоники, составляет 2,4%, а 23-й – уже 10,8%.

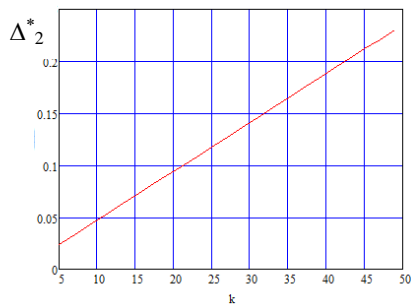


Рис. 11. Относительное отклонение  $\Delta_2^*$  сигнала управления

Ошибка возрастает как с ростом номера гармоники, так и порядка фильтра. График значений относительного отклонения  $\Delta_2^*$  во всем диапазоне подавляемых гармоник и используемых порядков фильтров приведен на рис. 12.

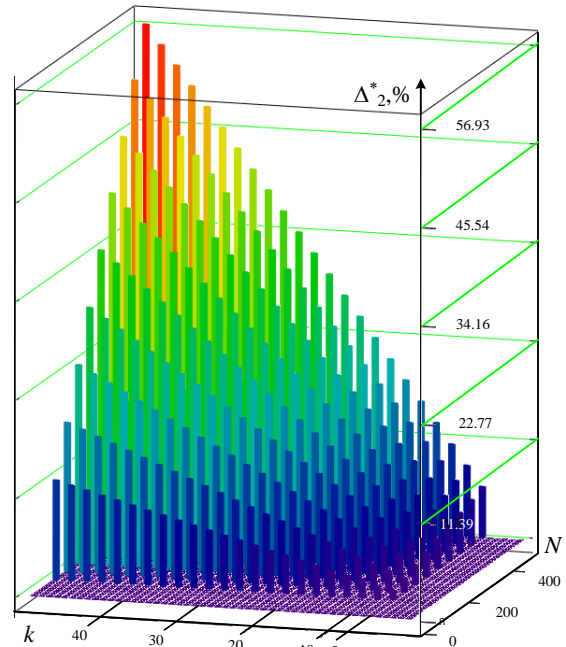


Рис. 12. Относительное отклонение  $\Delta_2^*$  сигнала управления в зависимости от порядка фильтра и номера гармоники

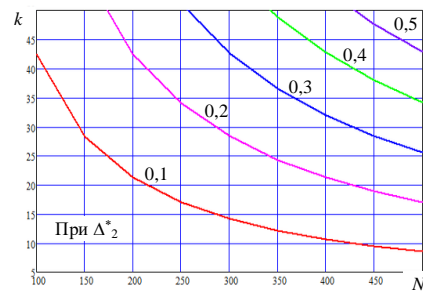


Рис. 13. Зависимость номеров гармоник, имеющих заданное относительное отклонение  $\Delta_2^*$  от порядка фильтра

Из анализа диаграмм рис. 11 и рис. 12 можно сделать вывод о том, что влияние ошибки, вызванной временным сдвигом между измерением сигнала и применением обработанной информации для управления модулятором необходимо учитывать при разработке ЦСУ САФ.

На основе данных рис. 12, на рис. 13 приведена зависимость номеров гармоник, имеющих заданное относительное отклонение  $\Delta_2^*$  от порядка фильтра.

**Применение полученных зависимостей** при выборе порядка фильтра ЦСУ САФ. В соответствии с рис. 7 выбран фильтр 450-го порядка, что является максимальным порядком фильтра. По графикам

рис. 13 можно определить, что граничные гармоники ( $k=47, 49$ ) подавляются с ошибкой более 50%. Предположим, что на основании анализа гармонического состава сигнала, который должен быть подавлен, сделан вывод о необходимости подавления гармоник на 70%, что соответствует ошибке ЦСУ 30% и фильтру с  $N=250$ . Частота ШИМ в этом случае составляет  $f_{PWM}=12500$  Гц. Количество выборок на периоде и коэффициент модуляции для высших гармоник ( $k=47, 49$ ) равно 3, что является граничным значением как для идентификации, так и для синтеза гармонического сигнала. 250-й порядок фильтра является граничным для ЦСУ с текущим быстродействием. САФ может обеспечить подавление 49-й гармоники с ошибкой 30% при наличии фильтра 250-го порядка и пассивного фильтра, способного выделить эту гармонику с заданной точностью при коэффициенте модуляции 3. В общем случае, ЦСУ САФ может использовать фильтры с порядком, лежащим в диапазоне от критического до максимального. Выбор порядка фильтра определяется как требуемой частотой ШИМ, так и допустимой ошибкой подавления гармоник.

**Выводы.** Цифровое управление кооперативным силовым активным фильтром может быть реализовано на основе микроконтроллера общего назначения, например, STM32F767.

Реализация полосового гребенчатого фильтра с использованием ядра Дирихле позволяет выделить заданные гармоники сигнала. При порядке фильтра равном 200, реальное время обработки сигнала составляет 18 мкс.

Выбранная элементная база цифровой системы управления позволяет реализовать полосовой гребенчатый фильтр до 450-го порядка, что соответствует частоте ШИМ 22,5 кГц. Данный порядок является максимальным. При такой частоте ШИМ, подавление 50-й гармоники производится с коэффициентом модуляции 9, что является приемлемым. Порядок фильтра, соответствующий минимальной частоте ШИМ по условиям идентификации и восстановления гармоники, является критическим.

Временной сдвиг между моментами измерения сигнала и применения обработанной информации для управления модулятором вызывает ошибку системы управления, которая возрастает как с ростом номера гармоники, так и порядка фильтра.

Выбор разработчиком САФ порядка фильтра, а, следовательно, и частоты ШИМ и времени обработки сигнала, является оптимизационной задачей, в которой критериями оптимальности являются: мощность потерь, частотный диапазон подавляемых гармоник, коэффициент модуляции и величина ошибки подавления гармоник.

## Литература

1. Akagi H. "Trends in active power line conditioners," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 9, no. 3, pp. 263-268, May 1994.
2. Revuelta P., Litrán S., Thomas J. Active Power Line Conditioners: Design, Simulation and Implementation for Improving Power Quality. Academic Press, 2015.
3. Akagi, H., Kanazawa, Y. and Nabae, A. (1984) "Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-20, no. 3, pp. 625-630.
4. Romero-Cadaval E. and Milanés-Montero M.I. "Cooperative converters in power electronic systems," 2010 12th Biennial Baltic Electronics Conference, Tallinn, 2010, pp. 51-60.
5. Сокол Е., Замаруев В., Ивахно В., Кривошеев С., Стысло Б. "Использование мультikonверторных систем для повышения эффективности преобразователей электрической энергии," Energy. Ser.: "Modern problems of power engineering and ways of solving them." – 2020. – № 4 (96), Part 1. – P. 88-93.
6. Zamaruiev V. V. "The use of the dirichlet kernel in the control systems of active filters for industrial power line," 2013 IEEE XXXIII International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kiev, 2013, pp. 363-366.
7. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," in IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), 2014.
8. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," in IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000), 2010.
9. Sozanski K., Strzelecki R. and Kempski A. "Digital control circuit for active power filter with modified instantaneous reactive power control algorithm," 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat. No.02CH37289), 2002, pp. 1031-1036 vol.2.
10. <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32-nucleo-boards.html>
11. Rashid M.H. "Power Electronics Handbook", 3<sup>rd</sup> ed., Academic press, 2011
12. Замаруев В.В. Ограничения теоремы Котельникова - Шеннона о выборках и ее применение при разработке цифровых систем управления силовыми преобразователями электроэнергии// Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Харьков, 2017. Вып. 27(1249): Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Силовая электроника и энергоэффективность: темат. вып. С. 313-317.

## References

1. Akagi H. "Trends in active power line conditioners," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 9, no. 3, pp. 263-268, May 1994.
2. Revuelta P. , Litrán S., Thomas J. Active Power Line Conditioners: Design, Simulation and Implementation for Improving Power Quality. Academic Press, 2015.
3. Akagi, H., Kanazawa, Y. and Nabae, A. (1984) "Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-20, no. 3, pp. 625-630.
4. Romero-Cadaval E. and Milanés-Montero M.I. "Cooperative converters in power electronic systems," 2010 12th Biennial Baltic Electronics Conference, Tallinn, 2010, pp. 51-60.
5. Sokol Y., Zamaruiev V., Ivakhno V., Kryvosheiev S., Styslo B. "Use of multiconverter system to improve the efficiency of electrical energy converters.," Energy. Ser.: "Modern problems of power engineering and ways of solving them." 2020. № 4 (96), Part 1. P. 88-93.
6. Zamaruiev V. V. "The use of the dirichlet kernel in the control systems of active filters for industrial power line," 2013 IEEE XXXIII International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kiev, 2013, pp. 363-366.
7. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," in IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), 2014.
8. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," in IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000), 2010.
9. Sozanski K., Strzelecki R. and Kempski A. "Digital control circuit for active power filter with modified instantaneous reactive power control algorithm," 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat. No.02CH37289), 2002, pp. 1031-1036 vol.2.
10. <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32-nucleo-boards.html>
11. Rashid M.H. "Power Electronics Handbook", 3rd ed., Academic press, 2011
12. Zamaruiev V.V. "The use of Kotelnikov-Nyquist-Shannon sampling theorem for designing of digital control system for a power converter," 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2017, pp. 522-52

ინფორმაციული და ციფრული ტექნოლოგიები ენერგეტიკაში  
Information and digital technologies in Energy Engineering

Вопросы обнаружения метана и моно оксида углерода одним полупроводниковым сенсором

Юрий Коваль,

компания СЭА Электротехника, г. Киев, Украина; E-mail: [yurikov@sea.com.ua](mailto:yurikov@sea.com.ua)

Юрий Хуташвили,

Грузинский Технический Университет, центр Автоматизации, г. Тбилиси, Грузия,

e-mail: [khutashvili@yandex.com](mailto:khutashvili@yandex.com)

Нугзар Иашвили,

Грузинский Технический Университет, центр Автоматизации, г. Тбилиси, Грузия,

E-mail: [n.iashvili@gtu.ge](mailto:n.iashvili@gtu.ge)

**Аннотация.** Обнаружение полупроводниковым сенсором в воздухе метана ( $CH_4$ ) традиционно производится при нагреве его чувствительного элемента, а моно оксида углерода ( $CO$ ) при последующем после нагрева его охлаждении. В представленной работе впервые исследована и экспериментально подтверждена возможность обнаружения и идентификации в воздухе обоих газов одним полупроводниковым сенсором при нагреве его чувствительного элемента на примере сенсора компании Фигаро TGS2611. Для этого были введены и измерены новые параметры поведения сопротивления сенсора в процессе его нагрева и охлаждения. Также в процессе охлаждения сенсора было исследовано воздействие на параметр, характеризующий скорость изменения (роста) сопротивления его чувствительного элемента, различных концентраций метана и моно оксида углерода в воздухе.

**Ключевые слова:** Нагрев и охлаждение сенсора, новые параметры полупроводникового сенсора, линейный преобразователь сопротивления, испытательная камера.

Methane and carbon monoxide detection issues with one semiconductor sensor

Iuri Koval,

SEA Electronics, Kiev, Ukraine, e-mail: [yurikov@sea.com.ua](mailto:yurikov@sea.com.ua)

Iuri Khutashvili,

Georgian Technical University, Center of Automatization, Tbilisi, Georgia, E-mail: [khutashvili@yandex.com](mailto:khutashvili@yandex.com)

Nugzar Iashvili,

Georgian Technical University, Center of Automatization, Tbilisi, Georgia, E-mail: [n.iashvili@gtu.ge](mailto:n.iashvili@gtu.ge)

**Annotation.** The detection of methane ( $CH_4$ ) by a semiconductor sensor in air is traditionally performed when its sensitive element is heated, and carbon monoxide ( $CO$ ) is detected when it is cooled down after heating.

In the presented work, for the first time, the possibility of detecting and identifying both gases in air with one semiconductor sensor when heating its sensitive element is studied and experimentally confirmed by the example of the Figaro TGS2611 sensor. For this, new parameters of the behavior of the resistance of the sensor in the process of heating and cooling were introduced and measured. Also, in the process of cooling the sensor, we studied the effect on the parameter characterizing the rate of change (growth) of the resistance of its sensitive element, various concentrations of methane and carbon monoxide in the air.

**Keywords:** Heating and cooling of the sensor, new parameters of the semiconductor sensor, linear resistance transducer, test chamber.

**Введение.** Для полупроводниковых сенсоров обнаружения метана в воздухе жилого помещения, например, как TGS2611, в справочной информации [1] приведены поведение сопротивления полупроводника сенсора для различных компонентов загазованности воздуха при постоянном режиме нагрева полупроводника чувствительного элемента. Известно, что при установившейся температуре свыше  $400^{\circ}C$

чувствительность сенсора к метану высокая, а к моно оксиду углерода – низкая [4].

Для обнаружения метана и монооксида углерода одним полупроводниковым сенсором, например, TGS3780, в справочной информации [2] предложен периодически повторяющийся импульсный режим нагрева. В конце импульса нагрева измеряют сопротивление полупроводника сенсора, по значению которого определяют степень

загазованности воздуха метаном. В конце паузы между импульсами нагрева производят измерение сопротивления полупроводника сенсора, повышенного вследствие его охлаждения, по значению которого судят о степени загазованности воздуха монооксидом углерода.

Во всех известных методах обнаружения  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}$ , в том числе для TGS3870, метан измеряют при высокой температуре в пределах  $400^\circ\text{C}$  -  $500^\circ\text{C}$ , а моно оксид углерода – при низкой температуре в пределах  $180^\circ\text{C}$  -  $90^\circ\text{C}$ . В этих пределах находится точка максимальной чувствительности полупроводника к соответствующему газу. Непосредственный контроль температурного состояния полупроводника в детекторах утечки газа не представляется возможным. Поэтому максимальную точку чувствительности полагают по истечении установленных временных интервалов после начала импульса нагрева и после начала паузы.

Известно что теоретические основы процессов физической адсорбции молекул газа на твердой поверхности были заложены еще в 30-тые годы двадцатого века в положениях теории Ленгмюра и БЕТ. Естественно, что в процессе работы мы опирались на работы других ученых и специалистов которые были доступны нам. Это и научные статьи, и диссертационные работы и доклады на научных конференциях, а также мнения высказанных при обсуждении наших тем в интернете.

**Основная часть.** Основной проблемой достижения точности сигнализации является зависимость дрейфа точки минимального сопротивления сенсора от температуры и влажности, а также от временной деградации нагревательного элемента и полупроводника чувствительного элемента, в том числе как в конце импульса нагрева, так и в конце паузы, что характерно для метода измерения, предлагаемого для TGS3870. Одним из вариантов решения этой проблемы предложен в патенте [3], в котором концентрацию  $\text{CO}$  оценивают по отношению измеренных значений сопротивлений полупроводника сенсора в конце и в начале периода его охлаждения, определяя таким образом скорость изменения сопротивления полупроводника чувствительного элемента сенсора.

Более глубокое изучение режима нагрева-охлаждения полупроводника сенсора, т.е. импульсного режима нагрева сенсора, было предпринято в Грузинском Техническом Университете (ГТУ), в котором предполагалась повышение точности измерения сопротивления полупроводника сенсора с использованием разработанного двух диапазонного линейного преобразователя его сопротивления.

В импульсном режиме нагрева сенсора температура его полупроводника изменяется от

минимума до максимума, а при паузе – охлаждается до минимального значения. Исходя из источников [5,6], предположили, что сорбированный в период паузы между импульсами нагрева в многослойную структуру пористого полупроводника сенсора моно оксид углерода  $\text{CO}$  тестируемого воздуха при высокой температуре (свыше  $100^\circ\text{C}$ ) вступает в реакцию с молекулами  $\text{H}_2\text{O}$  пара сопутствующей влажности. В результате образуются  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$  [5,6], сопровождаемые падением сопротивления полупроводника сенсора. Одновременно под воздействием нарастающей температуры по мере продвижения фронта максимальной температуры ( $400^\circ\text{C}$  и выше) от поверхности нагревателя к периферийным слоям полупроводник теряет влажность и интенсивность образования  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$  падает. Поэтому сопротивление полупроводника сенсора сначала достигает минимального значения  $R_{\text{Min}}$  под воздействием максимальной температуры и влажности, а затем по мере высушивания его слоёв сопротивление повышается до значения  $R_{\text{Stab}}$  (Рис.1).

Необходимо отметить, что от величины паузы зависит глубина сорбции тестируемого воздуха, а от мощности и длительности импульса нагрева чувствительность и скорость протекания процессов в пористой структуре полупроводника сенсора. Наиболее «растянуты» во времени эти процессы в многослойных полупроводниковых сенсорах, имеющих сравнительно большие объёмы чувствительных элементов. Их можно отличить по высоким справочным значениям потребляемой мощности нагревательного элемента. Оптимальным решением при выборе полупроводникового сенсора оказался TGS2611-C00, характеризующийся приемлемой скоростью реакции, простотой схемы управления мощностью нагрева, удобством включения его в схему линейного преобразователя. Это позволяет без проблем осуществлять измерения сопротивления полупроводника сенсора и дифференциалы его изменения в течении всего процесса нагрева-охлаждения.

В сенсоре TGS3870 и более современных TGS8100 и TGS8410 процессы при нагреве-охлаждении происходят значительно быстрее. Это связано с малыми размерами чувствительного элемента сенсора, которые диктуют существенные ограничения не только к мощности и длительности времени нагрева, но и к прилажаемому измерительному напряжению и длительности измерения. Поэтому с имеющим справочным материалом на эти сенсоры не представляется возможным непосредственно приступить к проверке нашей гипотезы без решения дополнительных проблем, связанных с проведением дополнительных исследований и опытно-конструкторских разработок схем управления нагревательным элементом сенсора и его



измерительной схемы. В результате должны быть решены следующие вопросы:

- Подбор мощности нагрева, обеспечивающей приемлемое время продвижения фронта высокой температуры от слоёв полупроводника, непосредственно примыкающих к нагревательному элементу, к его периферийным слоям с целью получения приемлемой точности измерения сопротивлений полупроводника и их производных по времени.

- Создание измерительной схемы сопротивления (проводимости) полупроводника сенсора с возможностью многократного его измерения на протяжении всего процесса нагрева-охлаждения.

На рис.1 представлена осциллограмма сигнала напряжения на выходе линейного преобразователя сопротивления сенсора TGS2611-C00 при импульсном режиме нагрева мощностью 272mW в загазованном 80ppm CO воздухе при температуре 22,2°C и влажности 34%.

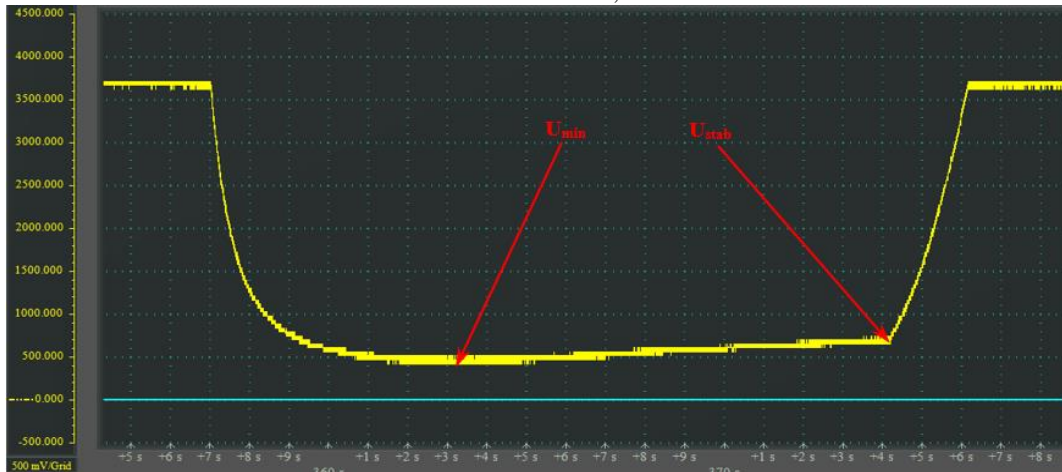
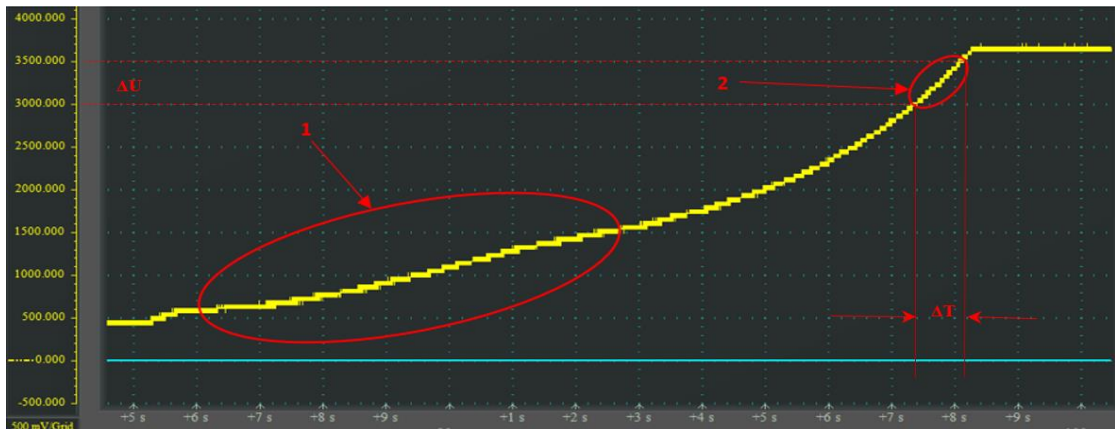


Рис. 1. Характеристика сигнала на выходе линейного преобразователя сопротивления сенсора TGS2611-C00 при импульсном режиме нагрева (мощность нагрева 272mW)

На рис. 2 представлен фрагмент осциллограммы участка охлаждения зависимости напряжения сигнала от времени на выходе линейного преобразователя сопротивления сенсора TGS2611 в период охлаждения при тестировании загазованного воздуха 300ppm CO при температуре 22,9°C и влажности 99%, где на участке 1 наиболее отчетливо проявляется наличие в структуре полупроводника накопленного водорода, вступающего в реакцию с кислородом воздуха. В результате экзотермической реакции замедляется охлаждение полупроводника и рост его сопротивления, что подтверждает правильность предположения протекающих в структуре полупроводника сенсора реакций, известных из

источников [5,6]. Вместе с этим, на участке 2 фрагмента осциллограммы на рис.2 наблюдался рост времени охлаждения  $\Delta T$  в зоне низкой температуры полупроводника сенсора при наличии CO в тестируемом воздухе вследствие реакции с кислородом воздуха.

Проведенные исследования в ГТУ также были направлены на поиск решения проблемы компенсации дрейфа сопротивления полупроводника сенсора при изменении температуры, влажности, атмосферного давления и временной чувствительности сенсора.



რის. 2. Фрагмент осциллограммы участка охлаждения зависимости напряжения сигнала от времени на выходе линейного преобразователя сопротивления сенсора TGS2611 в режиме нагрева-охлаждения

Исходя из выше изложенного цель исследования заключалась в поиске наиболее приемлемых параметров измерения и идентификации метана и монооксида углерода одним полупроводниковым сенсором в режиме нагрева-охлаждения.

Для достижения поставленной цели предметом исследования были обозначены следующие параметры:

- $U_{Min}$ - напряжение на выходе линейного преобразователя сопротивления сенсора при минимальном сопротивлении полупроводника сенсора  $R_{Min}$  в процессе его нагрева.

- $U_{Stab}$ - напряжение на выходе линейного преобразователя сопротивления сенсора при сопротивлении полупроводника сенсора  $R_{Stab}$ , измеренное в конце импульса нагрева.

- $\Delta U$  – разность сигналов  $U_{Stab}-U_{Min}$ , характеризующая рост сопротивления полупроводника сенсора при импульсе нагрева относительно его минимального сопротивления.

- $\beta$  – отношение сигналов  $U_{Min}/U_{MinAir}$ , пропорциональное градиенту сопротивлений полупроводника сенсора в загазованном воздухе относительно его сопротивления в «чистом воздухе» (взято из источника [1,2,7,8], только в сравнении с сопротивлением полупроводника в чистом воздухе).

- $\Delta T$  – скорость охлаждения полупроводника сенсора в загазованном воздухе.

- $\gamma$  – коэффициент замедления скорости охлаждения полупроводника сенсора в загазованном воздухе в сравнении с скоростью охлаждения в чистом воздухе, равно  $\Delta T/\Delta T_{Air}$ .

Параметры  $R_{Min}$  и  $\Delta R=R_{Stab}-R_{Min}$  тождественны параметрам  $U_{Min}$  и  $\Delta U$ , так как последние измерены линейным преобразователем.

Также, необходимо пояснить, что после импульса нагрева происходит охлаждение сенсора.

При этом длительность и темп охлаждения полупроводника сенсора зависит от текущего значения сопротивления его полупроводника. Если измерять  $\Delta T$  в промежутке изменения сопротивления полупроводника от **140 ком** до **165 ком**, то его значение характеризует скорость изменения времени охлаждения полупроводника сенсора, что тождественно дифференциалу функции времени охлаждения  $\Delta T$  от аргумента  $\Delta U$  (см. участок 2 на рис.2). Во избежание дальнейшей путаницы с выше приведённым исследуемым одноимённым параметром  $\Delta U$  и в связи с тем, что при конкретной реализации определения дифференциала задавались фиксированным шагом аргумента  $\Delta U$  (см. участок 2 на рис.2), за скорость охлаждения полупроводника сенсора удобнее применять параметр  $\Delta T$ .

В большинстве детекторов газа с применением полупроводникового сенсора для компенсации дрейфа его сопротивления по температуре применяют схему с терморезистором для каждого уровня сигнализации. Согласно EN50194-1 [9] возникает необходимость контроля предварительной и аварийной сигнализация загазованности метаном, а согласно требованиям европейского стандарта EN50291-1 [10] необходимо осуществлять многоуровневый контроль загазованности (уровни загазованности монооксидом углерода 30ppm, 50ppm, 100ppm и 300ppm). Это существенно усложняет схему измерения.

**Экспериментальная база и процедура.**  
 Экспериментальные исследования проводились в ГТУ с использованием испытательной камеры (ёмкости), (рис.3) с помещённой в неё измерительной схемой с полупроводниковым сенсором. Выход линейного преобразователя сопротивления полупроводника сенсора измерительной схемы выводился измерительным кабелем, к которому с наружи подключался

цифровой осциллограф. В испытательную ёмкость соответствующими шприцами вводились поверочные газовые смеси (ПГС) метана и монооксида углерода как отдельно, так и совместно. Для создания определённой концентрации вводимого газа руководствовались рекомендациями ISO6144:2003.

Объём (5100мл) ёмкости 1, выполненной из стекла, был измерен методом её заполнения водой (удельный вес при температуре 20°C равен **0,99823**)

мерной колбой в 1000мл±0,8 мл, а доза меньше 1000 мл была измерена с помощью весов. Для определения объёма воздуха из величины 5100 мл вычли объёмы вентилятора (28 мл), измерительной схемы (21 мл), комбинированного термометра с психрометром (7 мл), суммарный объём проводов и трубок (14 мл) и добавлен объём под крышечного пространства (4мл). В итоге объём воздуха для смешивания с ПГС составит 5034мл.

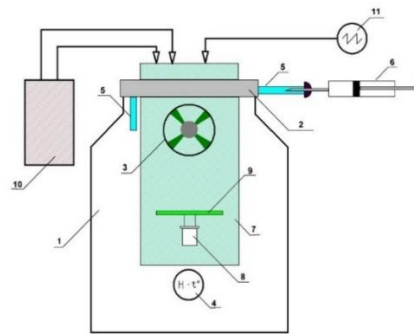


Рис. 3. Испытательная камера (ёмкость), разработки ГГУ

1 - ёмкость; 2 – крышка ёмкости; 3 – вентилятор; 4 – комбинированный термометр с психрометром; 5 – трубка подачи ПГС; 6 – шприц; 7 – измерительная схема; 8 – сенсор; 9 – линейный преобразователь сопротивления сенсор; 10 – блок питания; 11 – цифровой осциллограф

В процессе работы были изготовлены несколько опытных образцов детектора с целью проведения испытаний в специализированных метрологических организации имеющих право проведения работ по определению соответствия параметров прибора международным стандартам.

**Оборудование, приборы и материалы.** В эксперименте использовали следующие оборудование, приборы и материалы: 1) Испытательная ёмкость, разработки ГГУ; 2) Линейный двух диапазонный преобразователь сопротивления полупроводника сенсора разработки ГГУ; 3) Сенсоры TGS2611-C00 – 12 шт.; 4) Баллон ПГС содержания 95,5% метана; 5) Баллон ПГС содержания 98% моно оксида углерода; 6) Шприц 1мл с ценой деления 0,02мл.; 7) Шприц 5мл с ценой деления 0,25мл.; 8) Шприц 10мл с ценой деления 0,5мл.; 9) Цифровой осциллограф INSTRUSTAR- ISDS205A; 10) Компьютер.

Калибровку осциллографа INSTRUSTAR-ISDS205A осуществляли с применением оборудования LabVIEW компании National Instruments.

**Содержание и процедура эксперимента.** В процессе экспериментальных исследований были рассмотрены следующие задачи:

- Установление оптимальных длительностей импульса нагрева и паузы между ними.

- Исследование воздействия монооксида углерода и метана на TGS2611-C00 при пониженной мощности импульса нагрева – 220 МВт ±2%.
- Исследование воздействия монооксида углерода и метана на TGS2611-C00 при минимальной заявленной мощности импульса нагрева – 260 МВт ±2%.
- Исследование воздействия монооксида углерода и метана на TGS2611-C00 при максимальной заявленной мощности импульса нагрева – 305 МВт ±2%.
- Исследование совместного воздействия монооксида углерода и метана на TGS2611-C00.

Процедура эксперимента соответствовала рекомендациям [11] и состояла из следующих действий.

Баллон ПГС содержания 95,5% метана и баллон ПГС содержания 98% монооксида углерода выдерживали при комнатной температуре более двух часов. Для ввода ПГС с СО в испытательную ёмкость использовали 1 мл шприцы, а для ПГС с метаном – 5 мл и 10 мл. Заполнение шприцов производили под давлением, превышающим атмосферное через резиновую трубку с внутренним диаметром 2,7 мм, герметично соединённую с иглой шприца.

Ввод ПГС в испытательную ёмкость 1 осуществляли через резиновую трубку. Во избежание влияния «мёртвых пространств» шприца

на концентрацию ПГС, перед его наполнением осуществляли 2-3 предварительных наполнения–опорожнения. Заполнение шприца б производили до упора хода его поршня. Быстро отсоединяли шприц и втыкали в резиновую пробку, а затем, не доводя до максимальной метки, сжимали ПГС движением поршня. Содержание шприца выдерживали при комнатной температуре рядом с испытательной ёмкостью. Для сокращения времени гомогенизации, трубка 5 подачи ПГС продувалась возвратно-поступательными движениями поршня другого - продувочного шприца б, герметично соединённого с этой трубкой.

Воздух внутри ёмкости при необходимости увлажняли нанесением тампоном влаги на стенки испытательной ёмкости с внутренней стороны. Ёмкость герметизировали и включали вентилятор, значение влажности наблюдали на дисплее комбинированного термометра с психрометром. При превышении значения влажности над ожидаемым, кратковременным разгерметизацией ёмкости снижали её значение. Выдерживали время для стабилизации температуры и влажности чистого воздуха внутри ёмкости. Одновременно включали измерительную схему для её прогрева. Запись и измерение сигналов с выхода линейного преобразователя сопротивления полупроводника сенсора осуществляли посредством программ Data Recorder и Oscilloscope/Spectrum Analyzer (Professional)+DDS цифрового осциллографа INSTRUSTAR- ISDS205A, подключенного к компьютеру (ноутбуку). Первую запись и измерение производили для чистого воздуха.

Ввод исследуемых газов осуществлялся отдельно, последовательно начиная с малой концентрации до высокой. Значение концентрации полученной смеси фиксировалась в единицах **ppm** ( $10^{-6}$  объёмной концентрации). После каждого ввода вводная трубка продувалась продувочным шприцем. Запись и измерение цифровым осциллографом осуществляли в процессе каждого нового ввода ПГС. Значения для таблиц фиксировали не ранее семи циклов периодического нагрева-охлаждения. Обычно результат снимали после девятого цикла. Полученные результаты оформлены в табличной форме.

Ввиду того, что ПГС вводилась шприцом вручную согласно его делениям, то достижение высокой точности ввода не представлялось возможным. Вычисление объёмной концентрации производилось по упрощённой формуле  $V_{CO} / V_{Air}$ , вместо  $k_{CO} * V_{CO} / (V_{Air} + V_{CO})$ . При этом значение  $V_{Air}$  брали 5000мл вместо 5034мл.

**Результаты проведённых экспериментов.**

Результаты проведенных многочисленных, более 180 экспериментальных измерениях были зафиксированы в табличной форме. Исследования проводились с новыми сенсорами с малым и длительным (более 2-х лет) временем хранения или незначительным временем работы, а также с сенсорами после четырёхлетнего периода эксплуатации. результатов экспериментов. Как примеры приведены только две таблицы при пониженной мощности импульса нагрева 220 МВт+2 % от заявленной номинальной мощности (280 +25 МВт) отдельно для СР4 и СО.

**Таблица 1. P<sub>н</sub> = 220 mWt**

| CO, ppm                              | 0    | 20    | 40    | 60    |  | 100   | 300   |
|--------------------------------------|------|-------|-------|-------|--|-------|-------|
| U <sub>Min</sub> , mV                | 590  | 310   | 215   | 164   |  | 127   | 71    |
| U <sub>Stab</sub> , mV               | 590  | 399   | 308   | 268   |  | 227   | 252   |
| $\beta = U_{Min}/U_{MinAir}$         | 1    | 0,525 | 0,364 | 0,278 |  | 0,215 | 0,120 |
| $\Delta U = U_{Stab} - U_{Min}$ , mV | 0    | 89    | 93    | 104   |  | 100   | 181   |
| $\Delta U/U_{Min}$                   | 0    | 0,287 | 0,432 | 0,634 |  | 0,788 | 2,549 |
| °C                                   | 19,5 | 19,5  | 19,5  | 19,4  |  | 19,3  | 19,5  |
| %                                    | 95   | 96    | 97    | 97    |  | 98    | 99    |
| $\Delta T$ , ms                      | 146  | 187   | 243   | 287   |  | 344   | 560   |
| $\gamma = \Delta T/\Delta T_{Air}$   | 1    | 1,281 | 1,664 | 1,966 |  | 2,356 | 3,836 |

**Таблица 2. P<sub>н</sub> = 220 mWt.**

| CH4, ppm                             | 0    | 20    | 100   | 200   | 1200  | 2200  |
|--------------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| U <sub>Min</sub> , mV                | 690  | 597   | 452   | 407   | 112   | 77    |
| U <sub>Stab</sub> , mV               | 690  | 597   | 464   | 412   | 127   | 86    |
| $\beta = U_{Min}/U_{MinAir}$         | 1    | 0,865 | 0,672 | 0,597 | 0,184 | 0,125 |
| $\Delta U = U_{Stab} - U_{Min}$ , mV | 0    | 0     | 12    | 5     | 15    | 9     |
| $\Delta U/U_{Min}$                   | 0    | 0     | 0,026 | 0,012 | 0,134 | 0,117 |
| °C                                   | 20,0 | 20,0  | 20,1  | 20,2  | 20,3  | 20,3  |
| %                                    | 99   | 99    | 99    | 99    | 99    | 99    |
| $\Delta T$ , ms                      | 150  | 153   | 155   | 163   | 189   | 212   |
| $\gamma = \Delta T/\Delta T_{air}$   | 1    | 0,980 | 1,033 | 1,087 | 1,260 | 1,413 |

**Анализ результатов.** Нами были получены результаты экспериментальных исследований при разных условиях :

- Под воздействием 100 ppm и 20 ppm монооксида углерода и 100 ppm и 20 ppm метана на TGS2611-C00 при пониженной мощности импульса нагрева – 220 мВт  $\pm 2\%$
- Под воздействием 100 ppm и 20 ppm монооксида углерода и 100 ppm и 20 ppm метана на TGS2611-C00 при минимальной заявленной мощности импульса нагрева – 260 мВт  $\pm 2\%$
- Под воздействием 100 ppm и 20 ppm монооксида углерода и 100 ppm и 20 ppm метана на TGS2611-C00 при максимальной заявленной мощности импульса нагрева – 305 мВт  $\pm 2\%$ .

Из результатов экспериментов сделали вывод, что под воздействием **СО** наблюдается рост параметра  $\Delta U$  при повышении мощности нагрева от 220 МВт до 260 Вт. Дальнейшее увеличение мощности нагрева сенсора от 260 МВт до 300 МВт приводит к уменьшению значения этого параметра. При этом под воздействием метана параметр  $\Delta U$  на порядок меньше и при росте концентрации его значение не увеличивается в отличие от **СО**, при котором этот параметр значительно растёт.

Параметр  $\beta$  по **СО** в разы превышает этот параметр по метану при мощности нагрева 220 МВт. Это означает существенно большую чувствительность полупроводника сенсора к **СО** по сравнению с его чувствительностью к метану, проявляемую им в процессе нагрева. При мощности нагрева сенсора 260 МВт это преимущество  $\beta$  по **СО** уменьшается до минимума. При дальнейшем увеличении мощности нагрева  $\beta$  по **СО** увеличивается при очевидном уменьшении параметра  $\beta$  по метану согласно источнику [4]. Параметр  $\gamma$  по **СО**, характеризующий скорость изменения времени охлаждения полупроводника сенсора, также испытывает существенный рост по сравнению с воздействием по метану при повышении мощности нагрева от 220 МВт до 260 МВт.

Однако было установлено, что более стабильный от влияния окружающей среды, как видно из таблиц 22-29, является параметр  $\beta$  при мощности нагрева 260 МВт. Это можно объяснить тем, что при снижении мощности нагрева на полупроводник сенсора растёт влияние других загрязняющих воздух компонентов, в том числе и алкоголя. Если учесть то, что при проведении экспериментов отбор «чистого воздуха» осуществлялся на первом этаже рядом с проезжей частью улицы, то можно объяснить большие отклонения  $\beta$  от среднего значения при пониженной мощности нагрева сенсора.

Полученные впервые оригинальные результаты в процессе нагрева полупроводника сенсора требуют объяснений.

Снижение мощности нагрева сенсора и низкая температура тестируемого воздуха, а также низкая влажность способствует росту  $\Delta U$ . Низкая мощность нагрева сенсора снижает интенсивность вытеснения влаги из структуры многослойного полупроводника, что способствует при достижении  $U_{\min}$  сохранению в структуре полупроводника большего содержания влаги, а в конце нагрева получить большую разницу.

При повышении мощности нагрева сенсора и связанного с этим роста температуры согласно принципу Ле-Шателье [4] интенсивность реакции монооксида углерода **СО** при высокой температуре с молекулами  $H_2O$  сопутствующей влажности снижается. Вместе с этим, одновременно растёт чувствительность полупроводника сенсора. Поэтому оптимальная мощность нагрева сенсора находится в области 250 -260 МВт.

Напротив, чрезмерно высокая мощность нагрева сенсора интенсивно осушает прилегающую к нагревателю структуру полупроводника уже до достижения  $U_{\min}$ , в следствие чего имеет место уменьшение разности между концентрациями влажности в момент достижения  $U_{\min}$  и  $U_{\text{stab}}$ . Основное снижение сопротивления полупроводника сенсора происходит за счет повышения его температуры. Уменьшение  $U_{\text{stab}}$  и связанное с этим снижение роста  $\Delta U$  можно объяснить в следствие воздействия повышенной влажности на периферийные слои полупроводника сенсора.

**Выводы.** Величину значения параметра  $\Delta U = U_{\text{stab}} - U_{\min}$  в основном характеризует наличие в тестируемом воздухе монооксида углерода и влажности, сорбированные в полупроводник сенсора. Поэтому при загазованности воздуха метаном этот параметр значительно меньше. Параметр  $U_{\text{stab}}$  незначительно отличается от  $U_{\min}$ .

Высокое значение  $\Delta U$  является отличительной особенностью между **СО** и углеводородными молекулами при их идентификации.

Обнаруженная высокая чувствительность полупроводникового сенсора к монооксиду углерода должна позволить решить проблему измерения загазованности воздуха моно оксидом углерода аналогично методам измерения загазованности воздуха метаном. При этом это впервые будет осуществимо в режиме импульса нагрева.

Также впервые станет возможным идентифицировать монооксид углерода по характеризующим только его высокому значению  $\Delta U = U_{\text{stab}} - U_{\min}$ .

Применение параметра  $\beta = U_{\text{Min}}/U_{\text{MinAir}}$  в условиях изменяющейся температуры и влажности при систематическом обновлении  $U_{\text{MinAir}}$  позволит успешно преодолеть зависимость сопротивления полупроводника сенсора от влияния климатических условий.

В связи с этим возникает проблема идентификации «чистого воздуха», решение которой предполагается при анализе выше перечисленных исследуемых параметров.

В разработанном детекторе газа сигнализацию уровней загазованности осуществляют сравнением параметра  $\beta = U_{\text{Min}}/U_{\text{MinAir}}$  с задаваемыми уровнями  $\beta_{LN}$  для каждого уровня сигнализации загазованности. При этом для устранения влияния температуры, влажности, атмосферного давления и временной чувствительности сенсора периодически обновляют значение сигнала сопротивления полупроводника сенсора в чистом воздухе  $U_{\text{MinAir}}$ .

Установления зависимости мощности нагрева сенсора от температуры тестируемого воздуха создаст возможность управляемого нагрева сенсора с целью стабилизации температурного режима его полупроводника.

#### Литერатура

1. TGS2611. Technical Information for Methane Gas Sensors. 02/2005.
2. TGS3870. Technical Information for Combination Methane and Carbon Monoxide Sensors. 12/2005.
3. Патент JP2004309343A. Method for driving semiconductor gas sensor. 2004г.
5. TGS8100. Technical Information for Air Quality Control Sensors. 02/16.
6. TGS8410. Technical Information for Air Quality Control Sensors. 08/2013.
7. Стандарт EN50194-1. Alarm-only apparatus for the detection of combustible gases in domestic premises. Part 1. Test methods and performance requirements
8. Стандарт EN50291-1. Gas detectors - Electrical apparatus for the detection of carbon monoxide in domestic premises. Part 1: Test methods and performance requirements.
9. ISO6144:2003. Gas analysis – Preparation of calibration gas mixtures – Static volumetric method.
10. Справочник химика//Под ред. Б.П.Никольского. Л.: Химия. 1966.



## Современные электрохимические сенсоры сигнализаторов утечки газа

**Владимир Козубовский**, доктор технических наук, профессор  
Ужгородский Национальный Университет, г. Ужгород, Украина, E-mail: [kozubvr@gmail.com](mailto:kozubvr@gmail.com)

**Аннотация.** Химические сенсоры давно используются для анализа окружающей среды. Они реагируют на раздражители, вызванные различными химическими веществами или химическими реакциями. Поскольку химические сенсоры предназначены для идентификации и количественного определения химических веществ (включая жидкую и газообразную фазы), они должны быть как селективными, так и чувствительными к желаемым целевым видам в смеси химических веществ. Прямые химические датчики, влияющие на электрические характеристики чувствительного элемента, можно разделить на категории по характеристикам, на которые они влияют. Эти устройства и вспомогательная электроника часто имеют простую конструкцию, и получаемые в результате продукты могут часто использоваться в суровых условиях. Датчики этого класса включают металл оксидные полупроводники, электрохимические.

**Ключевые слова:** утечка газа, опасные газы, электрохимические сенсоры, сигнализаторы газа.

## Modern electrochemical gas leak detectors

**Vladimir Kozubovsky**, Doctor of science, Professor  
Uzhgorod National University, Uzhgorod, Ukraine, e-mail: [kozubvr@gmail.com](mailto:kozubvr@gmail.com)

**Annotation.** Chemical sensors are used to analyze the environment for a long time. They respond to stimuli produced by various chemicals or chemical reactions. Since chemical sensors are intended for the identification and quantification of chemical species (including both liquid and gaseous phases), they need to be both selective and sensitive to a desired target species in a mixture of chemical species. Direct chemical sensors that affect the electrical characteristics of a sensing element can be separated into categories by the characteristic that they affect. These devices and supporting electronics are often simple in design and resulting products can often be used in harsh applications. Sensors in this class include metal oxide semiconductors, electrochemical.

**Keywords:** gas leakage, hazardous gases, electrochemical sensors, gas detectors.

Цель этой статьи - ознакомить читателя с последними достижениями в области разработки и применении электрохимических датчиков для контроля окружающей нас среды. Учитывая то, что эти датчики являются относительно дешевыми по сравнению с другими типами датчиков и имеют хорошие метрологические параметры в последние годы они все больше вытесняют с рынка другие типы датчиков. Поэтому статья может заинтересовать производителей аналитических приборов.

Химические датчики используются для анализа окружающей среды очень давно. Они базируются на стандартных химических реакциях, в результате которых изменяется цвет раствора, его прозрачность, выделяется тепло и т.д. Однако с развитием науки чисто химические датчики заменяются датчиками, которые работают на физико-химических, биохимических, оптико-химических методах анализа. Эти современные датчики на выходе выдают электрический сигнал, который легко обрабатывается с помощью современной электроники. Современные датчики находят широкое применение для более эффективной работы автомобилей, для розыска преступников, контроля окружающей среды и

здоровья людей, нашей безопасности. Примером того, как они используются, является мониторинг кислорода, CO, CO<sub>2</sub> в отработанных газах автомобилей, уровня глюкозы в образцах крови больных сахарным диабетом, определение уровня двуокси углерода в воздухе, выдыхаемом человеком, CO в жилых помещениях, взрывоопасные концентрации топливных газов и т.п. Химические датчики реагируют на воздействия, вызванные различными химическими веществами или химическими реакциями. Эти датчики предназначены для идентификации и количественного определения химических веществ (в том числе в жидкой и в газообразной фазе).

В промышленности они используются для экологического мониторинга рабочих мест, контроля опасного воздействия токсических веществ и ограничения их влияния на здоровье и безопасность жизнедеятельности. В медицине химические датчики используются для определения здоровья пациентов путем мониторинга содержания кислорода и других газов в легких и в образцах крови. Эти датчики часто используются для тестирования уровней содержания алкоголя в крови и в качестве индикаторов проблем пищеварения у пациентов. В военной технике химические датчики

используются для обнаружения складов горючего и предупреждения солдат о наличии в воздухе ядовитых веществ. Не существует общепринятого метода классификации всех химических датчиков. Для этого мы разделили их на две основные группы: одна группа - датчики, измеряющие электрические или электрохимические свойства, вторая - те, которые измеряют изменение физических свойств.

Датчики, которые непосредственно измеряют электрические свойства какого-либо вещества или влияние анализируемого вещества на электрические свойства другого вещества часто являются недорогими коммерчески доступными детекторами. В этих датчиках обнаружения может быть обратимым или необратимым процессом, что приводит к разложению анализируемого вещества, в первом случае временного. Эти датчики и вспомогательная электроника, как правило, просты по конструкции и в результате приборы на их основе вероятно могут быть использованы в жестких условиях.

Датчики этого класса включают металл-оксидные полупроводники, электрохимические датчики, потенциометрические датчики, кондуктометрические и амперометрические датчики, эластомерные хемо резисторы, хемо конденсаторы, химические полевые транзисторы.

#### **Металл-оксидные полупроводниковые устройства.**

В наиболее распространенных типах датчиков на металл-оксидных полупроводниках (МОН) происходит превращение изменения концентрации активных частиц в изменение сопротивления. Разработка этих датчиков началась более 50 лет назад, когда ученые обнаружили, что удельное сопротивление полупроводника изменяется с изменением окружающей химической среды [1]. Сегодня металл-оксидные датчики являются коммерчески доступными, недорогими, надежными и используются в различных прикладных задачах. Датчик на основе металл-оксида, как правило, состоит из полупроводникового чувствительного слоя, электрических контактов для измерения сопротивления этого слоя, и нагревателя для регулирования температуры датчика [1]. После хемосорбции химически активных молекул на поверхности оксида металла, происходит перенос заряда. Когда металл-оксидные кристаллы, такие как  $\text{SnO}_2$ , нагревают на воздухе до определенной, достаточно высокой температуры, кислород адсорбируется на поверхности кристалла, и формируется поверхностный потенциал, который препятствует потоку электронов. Когда поверхность подвергается воздействию газов, окисляются, таких как водород, метан и окись углерода, поверхностный потенциал уменьшается, и проводимость заметно увеличивается [2]. По мере

увеличения концентрации анализируемого компонента, изменяется величина сопротивления.

Соотношение между электрическим сопротивлением пленки и заданной концентрацией газа описывается следующим уравнением:

$$R_s = AC^{-\alpha} \quad (1)$$

где  $R_s$  - является электрическим сопротивлением датчика  $A$  и специфической постоянной для данного состава пленки;  $C$  - концентрация газа; и  $\alpha$  - есть характеристическим наклоном кривой  $R_s$  для этого материала и анализируемого газа.

Металл-оксидные устройства меняют свое сопротивление в зависимости от присутствия газа, окисляет и как таковые, требуют дополнительной электронной схемы для своей работы. Типичная схема заключается во включении датчика в одно из плеч мостовой схемы Уитстона, так что изменение сопротивления может быть измерено как разность потенциалов в диагонали мостовой схемы. Для настройки точки равновесия моста в зависимости от температуры датчика необходим NTC терморезистор  $T^\circ$  с линеаризующим параллельным резистором. Поскольку датчик ведет себя как переменный резистор, сопротивление которого изменяется в зависимости от вида и концентрации газа, падение напряжения на нем пропорционально его сопротивлению. Таким образом регистрируется падение напряжения в мостовой схеме в зависимости от концентрации газа. Сигнал отклика от датчиков линейный, когда он дается в логарифмическом масштабе. Наклоны и смещение рабочих кривых, вызванные воздействием различных окисляемых газов, позволяют отличать их друг от друга и определять их количество в определенных диапазонах концентраций, где кривые не пересекаются. Величина влияния зависит от температуры газа и его влажности. Такое поведение сопротивления сенсора от содержания влаги в газовой смеси может быть вызвано, например, различным поведением элементов сенсора (подложки, проводов, нагревателя, чувствительного слоя, газового фильтра) под воздействием влаги. На такое поведение сенсора также может влиять изменение работы выхода в сухом и влажном воздухе под влиянием конкурирующей взаимодействия гидроксильной группы  $\text{OH}$  и кислорода (см. рис.1) (<http://www.fgaro.co.jp/en/img/development/handouta/shikumi.gif>).

Дополнительно можно использовать скорость изменения проводимости для различения газов и концентраций. Объемная проводимость может дрейфовать для этих устройств, но скорость изменения проводимости, когда она управляется входными импульсами, является более стабильной и воспроизводимой. Для этого используют импульсную подачу сигнала считывания в конце

каждого цикла измерения. Это значительно повышает стабильность выходного сигнала датчика.

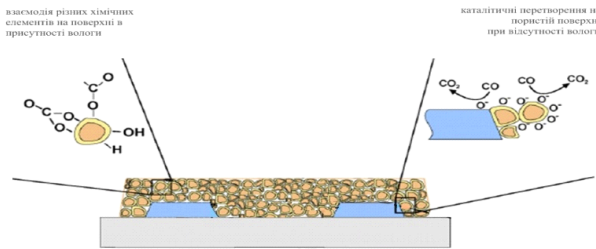


Рис. 1. Взаимодействие и преобразование химических элементов на поверхности сенсора

Кроме того, для повышения селективности анализа используется импульсный режим работы нагревателя сенсора. При изменении температуры чувствительного слоя до 450°C он становится чувствительным к метану, а при охлаждении чувствительного слоя до 100°C и ниже он становится чувствительным к CO. На рис. 2 показана это изменение чувствительности к метану и CO в периоды охлаждения и нагрева (https://www.figaro.co.jp/en/product/entry/tgs3870.html). Из рисунка видно, что за счет этого может быть достигнута хорошая селективность анализа.

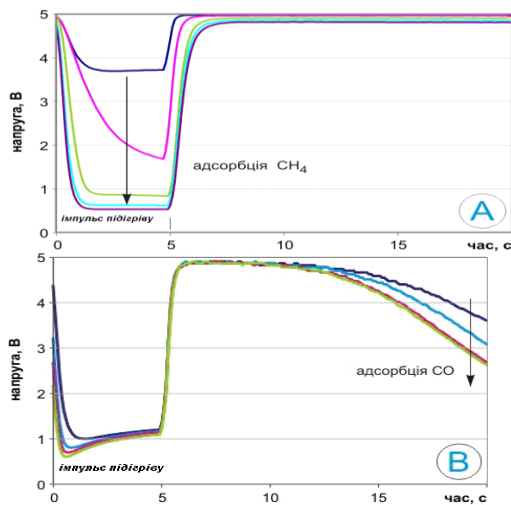


Рис. 2. Поочередное наложение циклов выходного сигнала сенсора TGS 3870 в процессе адсорбции метана (А) и адсорбции CO (В); Стрелкой показано направление увеличения концентрации анализируемого газа

Металл-оксидные твердотельные датчики имеют то преимущество, что они небольшие, имеют низкую потребляемую мощность, низкую стоимость и могут быть легко изготовлены методом групповой технологии. Схема контроля и измерения может быть реализована на кремниевой микросхеме, также, обеспечивает возможности для создания модульных датчиков, которые содержат монолитно

интегрированную матрицу чувствительных элементов вместе с системой сбора данных и управлением, расположенной на том же кристалле. Появились несколько ссылок на тонко и толсто пленочные датчики на кремниевой подложке на основе различных материалов для измерения различных газов. Оксид олова является наиболее изученным и распространенным беспримесным пленочным материалом. Кроме того, пленки оксида олова легированные Pt и Pd были использованы для измерения окиси углерода, водорода, углеводородов. Титан, в разных формах и средах, был использован для измерения кислорода. Родий легированный TiO<sub>2</sub> используется для определения водорода. Оксид цинка был использован для детектирования водорода, угарного газа и углеводородов [3]. Электрические свойства этих материалов изменяются с адсорбцией, абсорбцией, десорбцией, перегруппировкой и реакциями газов на поверхности или в объеме. Многие из этих материалов имеют каталитические свойства, и также адсорбция и/или поверхностные реакции газов способствуют изменению электрической проводимости.

#### Электрохимические датчики.

Электрохимические датчики являются коммерчески доступными и универсальными. В зависимости от режима работы, они делятся на датчики, которые генерируют напряжение (потенциметрические), те, которые меняют свой электрический ток (амперметричные) и те, что основаны на измерении проводимости или сопротивления (кондуктометрические). Во всех этих методах используются специальные электроды, где либо происходит химическая реакция, либо перенос заряда модулируется реакцией.

Фундаментальное правило электрохимического датчика является то, что он всегда требует замкнутого контура, то есть электрический ток (постоянный или переменный) должен иметь возможность протекать для проведения измерений. Поскольку для протекания электрического тока необходим замкнутый контур, датчику необходимо иметь, по меньшей мере, два электрода, один из которых называется возобновляемым электродом.

Следует отметить, однако, что даже если в потенциометрическом датчике не нужно протекание тока, цепь все же должна быть замкнутой при измерении напряжения.

Электроды в этих сенсорных системах часто изготавливаются из каталитических металлов, таких как платина или палладий, или они могут быть металлом покрытым углеродом. Электроды сконструированы таким образом, чтобы иметь большую площадь поверхности, для того, чтобы реагировать с таким количеством анализируемого вещества, с которой только возможно, производя

достаточную величину измеряемого сигнала. Электроды можно видоизменять, чтобы улучшить скорость реакции и продлить их продолжительность жизни. Целевые химические реакции происходят на рабочем (индикаторной) электроде (WE) (Рис.3). Электрический сигнал измеряется по отношению к измерительному или вспомогательному (счетному) электроду (AE), который не является каталитическим, а в случае трех электродных систем, третий электрод сравнения (RE) используется для измерения и коррекции электрохимических потенциалов, генерируемых каждым электродом и электролитом. Третий электрод улучшает функционирование путем коррекции ошибок, вносимых поляризацией рабочего электрода. Новые электрохимические датчики используют толстопленочную трафаретную печать набора электродов, чтобы сделать производство более простым и надежным.

Электролит является средой, которая переносит заряд с использованием ионов вместо электронов. Это непосредственно ограничивает реакции, которые могут иметь место, и является первым этапом повышения селективности электрохимического датчика. Датчик, образованный этим набором электродов и электролитов называется электрохимической ячейкой и может работать в зависимости от его электрических параметров (изменения его сопротивления, потенциала, тока, емкости и т.д.). Более достоверные результаты измерений могут быть получены с помощью различных типов вольтамперметров, которые мы обсудим далее.

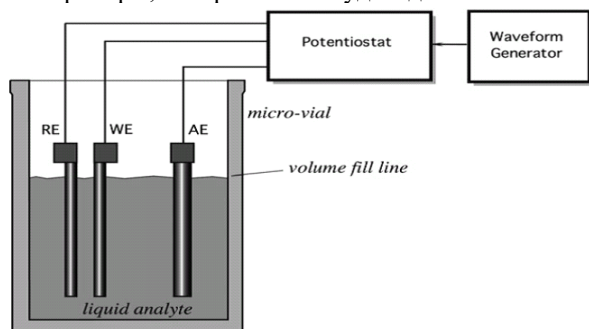
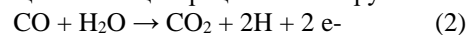


Рис. 3. Комплект электродов электрохимического датчика

Простой жидкостный электрохимический сенсор использует два электрода, погруженные в раствор электролита. Рассматриваемые газы, такие как CO, реагируют на рабочем электроде и производят CO<sub>2</sub> и свободные электроны. Заряды и заряженные частицы мигрируют на другой (счетный) электрод, где выделяется вода, если присутствует кислород. Эта реакция превращает CO в CO<sub>2</sub>. Если электроды соединены последовательно с резистором и измеряется падение потенциала на

резисторе, то оно будет пропорционально току, протекающего и концентрации анализируемого газ



#### Современные электрохимические датчики

На рис. 4 приведена конструкция газового сенсора окиси углерода NAP-508 фирмы Nemoto, Япония ([www.nemoto.eu](http://www.nemoto.eu)).

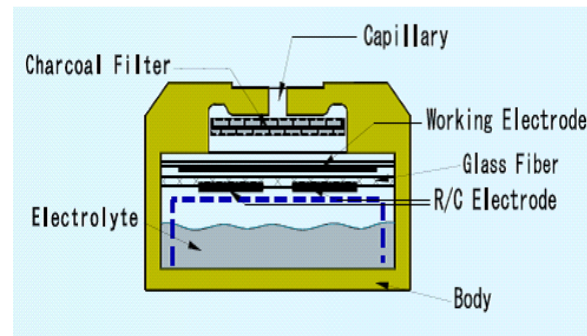
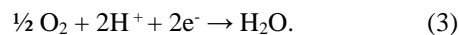


Рис. 4. Принцип работы электрохимического газового сенсора окиси углерода NAP-508

NAP - 508 состоит из 3-х пористых электродов с использованием благородных металлов, разделенных кислым водным электролитом, который находится в пределах пластикового корпуса. Газ поступает в электролитическую ячейку через газо-фазовый диффузный барьер (капилляр) и угольный фильтр, который удаляет нежелательные газы, которые могут мешать работе датчиков или приводить к выдаче ложного сигнала. Резервуар с электролитом обеспечивает избыток электролита, доступен в любое время, и датчик вентилируют, чтобы обеспечить равновесие внутреннего и внешнего давления датчика.

В процессе работы газ проникает в ячейку через капилляр и фильтр, и вступает в контакт с "рабочим" электродом. Присутствует окись углерода несет следующей реакции (окисление):  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ . CO<sub>2</sub>, которая генерируется, отводится наружу от ячейки через капилляр, в то время как ионы водорода (H<sup>+</sup>) мигрируют в электролит внутри ячейки. Электроны (e<sup>-</sup>), генерируемые на рабочем электроде, поступают во внешнюю цепь через металлическую контактную полосу в виде небольшого (nA) электрического тока.

Реакция на рабочем электроде уравнивается взаимной (восстановительной) реакцией на противеэлектроде (измерительном электроде), с помощью кислорода из окружающей атмосферы:



Электроны, используемых в этой реакции, подаются по внешней цепи через металлическую контактную полосу счетного электрода.





## Газосигнализаторы ВАРТА – современный уровень надежности и качества

**Сергей Орлов**

компания ТЕМИО, г. Киев, Украина, E-mail: [zam\\_temio@ukr.net](mailto:zam_temio@ukr.net)

**Сергей Гетманец**

компания ТЕМИО, г. Киев, Украина

**Аннотация.** Компания «ТЕМИО» - разработчик и производитель широко известных в Украине и в странах ближнего зарубежья газосигнализаторов ВАРТА, предназначенных для автоматического контроля содержания опасных и/или токсичных газов в воздушной среде.

При возникновении в воздухе опасной для жизни и здоровья человека концентрации этих газов прибор автоматически включает светозвуковую сигнализацию, отключает подачу газа и/или включает принудительную вентиляцию.

**Ключевые слова:** Опасные газы, концентрация газа, отключения газа, принудительная вентиляция.

## “VARTA” Gas Detectors – Modern level of Reliability and Quality

**Sergei Orlov**

LTD TEMIO, Kiev, Ukraine, e-mail: [zam\\_temio@ukr.net](mailto:zam_temio@ukr.net)

**Sergei Getmanets**

LTD TEMIO, Kiev, Ukraine

**Annotation.** The TEMIO company is a developer and manufacturer of “BARTA” gas detectors, widely known in Ukraine and in neighboring countries, designed for automatic control of the content of hazardous and/or toxic gases in the air. When a concentration of these gases, dangerous to human life and health, appears in the air, the device automatically turns on the light and sound alarm, turns off the gas supply and/or turns on forced ventilation.

**Keywords:** Hazardous gases, gas concentration, gas cutoffs, forced ventilation.

Компания «ТЕМИО» уже более 20 лет является одним из основных разработчиков и производителей в Украине приборов контроля загазованности воздушной среды горючими, взрывоопасными и токсичными газами. Компания выполняет их монтаж, пусконаладку, техническое сопровождение в процессе эксплуатации (обслуживание и ремонт приборов и систем в целом) а также и подготовку специалистов,

Высокое качество газосигнализаторов ВАРТА обеспечивается, в том числе и системой управления качеством предприятия, сертифицированной в соответствии с требованиями международных стандартов ISO 9001:2015.

Газосигнализаторы ВАРТА - это приборы, предназначенные для автоматического и непрерывного контроля содержания взрывоопасных и/или токсичных газов в воздушной среде. **При возникновении** в атмосфере контролируемой зоны опасной для жизни и здоровья человека концентрации этих газов приборы автоматически включают светозвуковую сигнализацию, отключают подачу газа и/или включают принудительную вентиляцию, другие средства защиты и передают информацию на системы контроля высшего уровня.

Линейка газосигнализаторов ВАРТА включает в себя приборы ВАРТА 2 и ВАРТА 1 бытового и промышленного назначения соответственно,

течescкатели-газосигнализаторы ВАРТА 5 а также многоканальные системы контроля загазованности воздушной среды взрывоопасными и токсичными газами - газосигнализаторы ВАРТА-Диспетчер.

**Газосигнализаторы ВАРТА 2 (рис. 1) предназначены для установки в коммунально-бытовых, социальных, производственных объектах, в которых при нормальных условиях эксплуатации возникновение взрывоопасной или токсичной среды невозможно. Приборы ВАРТА 2 изготовлены в не взрывозащищенном исполнении.**



Рис. 1. Общий вид газосигнализатора ВАРТА 2

**В зависимости от** модификации прибора предназначены для контроля концентрации метана или пропана (ВАРТА 2-01), угарного газа (ВАРТА 2-02) и одновременного контроля концентрации метана и угарного газа (ВАРТА 2-03) в воздухе.



В газосигнализаторе ВАРТА 2 предусмотрена микропроцессорная система обработки результатов измерений загазованности и самодиагностики, предупредительная и тревожная светозвуковая сигнализация, которая срабатывает при превышении допустимых концентраций контролируемых газов и при возникновении неисправности прибора.

При превышении концентраций опасных и токсичных газов допустимых пределов прибор обеспечивает также подачу электрических сигналов на внешние исполнительные устройства - отсечные клапаны, светозвуковые оповещатели, принудительную вентиляцию и другие защитные устройства.

Бытовые газосигнализаторы ВАРТА 2 отвечают требованиям Технического регламента законодательно регулируемых средств измерительной техники Украины, который гармонизирован с соответствующими регламентами Евросоюза.

Номинальный тревожный порог срабатывания по метану или пропану – 20% НКПП\*, по угарному газу – 50 ppm\*\*.

По требованию заказчика возможна настройка прибора на другие значения порогов срабатывания, в том числе и по значениям, указанным в стандартах серии EN, при условии, что требования заказчика не выходят за рамки требований национального законодательства.

Газосигнализатор ВАРТА 2 имеет более чем 14 модификаций, исполнения с резервным источником питания и с Wi-Fi модулем, который обеспечивает передачу информации о состоянии контролируемой среды на «облачный» сервер.

Промышленные газосигнализаторы ВАРТА 1 изготавливаются во взрывозащищенном исполнении и предназначены для автоматического и непрерывного контроля в воздушной среде до взрывоопасных концентраций горючих и/или безопасной для человека концентрации токсических газов, и/или температуры воздуха. Газосигнализаторы ВАРТА 1 применяются для контроля среды в помещениях, где в процессе производственной деятельности с высокой вероятностью могут образоваться взрывоопасные и токсические среды.

При превышении допустимых концентраций контролируемых газов в воздухе прибор ВАРТА 1 обеспечивает выдачу светозвуковой сигнализации, подачу электрических сигналов на внешние исполнительные устройства – отсечные клапаны, светозвуковые оповещатели, аварийные сирены, принудительную вентиляцию и другие средства защиты, а также передает информацию на системы контроля высшего уровня или в «облако» с использованием интерфейса RS-485 или по Wi-Fi.

Промышленный газосигнализатор ВАРТА 1 состоит из блока управления (рис.2), устанавливаемого во вне взрывоопасных зон или помещений и подключаемые к блоку взрывозащищенных выносных датчиков (рис.3), которые устанавливаются в местах или помещениях потенциально возможного возникновения загазованности воздушной среды взрывоопасными или токсичными газами.



Рис. 2. Общий вид блока управления газосигнализатора ВАРТА 1-03.24



Рис. 3. Общий вид датчика газосигнализатора ВАРТА 1-03.24

В зависимости от максимального количества подключаемых к блоку управления в любом сочетании по типам датчиков газосигнализатор ВАРТА 1 имеет следующие модификации:

- ВАРТА 1-03 - от 1-го до 4-х аналоговых датчиков метана, пропана, угарного газа и температуры;

- ВАРТА 1-03.14 и ВАРТА 1-03.24 - от 1-го до 14-и и до 24-х соответственно цифровых датчиков метана, пропана, угарного газа, аммиака, горючих газов и температуры.

Датчик горючих газов может настраиваться на метан, пропан, водород, гексан (пары бензина и дизтоплива), пары этилового спирта, бензол, этилен; ацетон, ацетилен, диметилэфир и другие углеводороды.

Датчики газосигнализаторов 2-х функциональные – датчики измеряют как концентрацию контролируемых газов, так и температуру окружающей среды, предупреждая о возникновении пожарной опасности.

Датчики газосигнализаторов ВАРТА 1 отвечают всем требованиям принятого в Украине и гармонизированного с европейским Техническим регламентом оборудования и защитных систем, предназначенных для использования в потенциально взрывоопасных воздушных средах.

Датчики газа и температуры изготавливаются во взрывозащищенном исполнении. Маркировка датчиков контролируемого газа - II 2G Ex db IIB T4/H<sub>2</sub> Gb, датчиков температуры воздушной среды - II 2G Ex db[ib] IIB T4/H<sub>2</sub> Gb.

Переносные высокоточные приборы промышленного назначения – течеискатели-газосигнализаторы ВАРТА 5 (рис. 4) изготавливаются во взрывозащищенном исполнении и предназначены определения в воздухе концентрации метана, пропана, бутана, гексана, сероводорода, кислорода, угарного газа. В разных моделях приборов используются разные сочетания и количество контролируемых газов.



Рис. 4. Общий вид течеискателя газосигнализатора ВАРТА 5-03

Приборы ВАРТА 5 используются для оперативного контроля загазованности опасными и токсичными газами воздушной среды промышленных зданий и сооружений, объектов топливно-энергетического комплекса, бензо- и газозаправочных станций, выявления мест утечек газа в подземных и наземных газопроводах, проверки газового оборудования, контроля наличия загазованности воздуха в приемках, котлованах, траншеях, колодцах, в подземных коммуникациях и других местах.

Течеискатели ВАРТА 5 имеют жидкокристаллический дисплей для отображения концентрации контролируемого газа, а также другой необходимой информации.

При превышении концентрации контролируемых газов в воздухе нижнего порога чувствительности течеискатель обеспечивает выдачу адаптивной (щелчками) сигнализации, а при превышении допустимых значений объемной доли этих газов в воздушной среде – выдачу тревожной звуковой сигнализации.

Течеискатели - газосигнализаторы ВАРТА 5 имеют следующие модификации:

- ВАРТА 5-02С – течеискатель на угарный газ, прибор индивидуальной защиты;

- ВАРТА 5-03, ВАРТА 5-03М – течеискатели на метан, порог чувствительности 0,005% об. и 0,001% об. Соответственно;

- ВАРТА 5-03М.18 – течеискатель на метан и пропан с порогом чувствительности 0,001% об. нового поколения, имеющий более информативный интерфейс по сравнению с течеискателями других модификаций;

- ВАРТА 5-03МГ – течеискатель на метан и пропан, имеющий встроенный GPS-треккер, с порогом чувствительности 0,001% об. Подключение течеискателя к компьютеру, на который устанавливается специальное программное приложение, позволяет отображать на карте объекта или местности точки проведения измерений и их результаты, создавать базы данных измерений, объективно контролировать действия оператора на маршруте обхода;

- ВАРТА 5-04 – течеискатель на метан, пропан, бутан и гексан;

ВАРТА 5-05 и ВАРТА 5-05L – это компактные приборы индивидуальной защиты на метан, сероводород, кислород и угарный газ. Течеискатели в основном предназначены для обнаружения загазованности воздушной среды опасными и токсичными газами в смотровых колодцах водопроводных, канализационных, теплофикационных, телефонных и других инженерных сетей, приемках, тоннелях и проч., паттернах и в камерах с взрывоопасной или токсичной средой;

Течеискатель ВАРТА 5-05 (рис.5) снабжен светодиодной индикацией наличия в воздушной среде контролируемого газа и предназначен для обеспечения защиты персонала рабочих специальностей.

Течеискатель ВАРТА 5-05L имеет ЖК-дисплей для одновременного цифрового отображения концентрация всех контролируемых газов в воздушной среде места работ.

Прибор ВАРТА 5-05L предназначен для мастеров и руководителей работ в замкнутых пространствах.

ВАРТА 5-07 – течеискатель на метан с функцией распознавания “болотного газа” (метана природного происхождения). Прибор предназначен специально для поиска течи газа в подземных газопроводах. Метод отбора проб – принудительный с помощью встроенного компрессора. Диапазон измерений концентрации контролируемого газа от 0 до 100% об.



Рис. 5. Общий вид течеискателя ВАРТА 5-05

Течеискатели- газосигнализаторы ВАРТА 5 (кроме течеискателя ВАРТА 5-02С) имеют следующие исполнения:

- с гибким зондом длиной 0,43 м, в головке которого размещается сенсор газа;

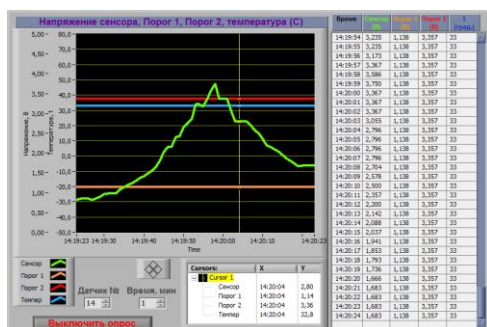


Рис. 6 Интерфейс «Детальное состояние датчика» газосигнализатора ВАРТА Диспетчер

- со стандартным зондом длиной 0,78 м, на конце которого размещается сенсор газа, соединяемый с блоком управления кабелем длиной 1,7 м;

- с телескопическим держателем зонда с сенсором газа, который соединен с блоком управления БУ кабелем длиной 2,5 м.

Все модификации приборов ВАРТА 5 снабжены антистатическим чехлом и зарядным устройством. Для работы в условиях недостаточной освещенности течеискатели имеют подсветку ЖК-дисплея.

Течеискатели ВАРТА 5 отвечают требованиям Технического регламента законодательно регулируемых средств измерительной техники Украины и Технического регламента оборудования и защитных систем, предназначенных для использования в потенциально взрывоопасных средах. Приборы изготавливаются в взрывобезопасном исполнении и имеют маркировку

II 2G Ex ib IIB T4 Gb (кроме течеискателя ВАРТА 5-02С).

Многоканальные газосигнализаторы ВАРТА Диспетчер имеют такое же назначение и технические характеристики, что и газосигнализаторы ВАРТА 1-03.24.

Принципиальным отличием приборов ВАРТА Диспетчер является значительное расширение функциональных возможностей газосигнализаторов ВАРТА 1-03.14.

Функции блока управления работы в газосигнализаторах «ВАРТА Диспетчер» выполняет персональный компьютер или контролеры типа EX9188, ICP – 8000; NuDAM – 6000; ADAM – 5000. Для обеспечения управления газосигнализатора разработан пакет программ «ВАРТА Диспетчер».

Использование интерфейса RS-485 для получения информации о загазованности и температуре воздуха позволяет подключать к компьютеру до 216 цифровых датчиков газа и температуры, что увеличивает площадь мониторинга загазованности и температуры воздушной среды объекта, площадь которого может составлять до 50 000 м<sup>2</sup>.

Газосигнализаторы ВАРТА Диспетчер дают возможность оператору получать в доступном и интуитивно понятном виде (рис.6) всю необходимую информацию по загазованности и температуре воздуха в различных точках объекта, что позволяет непрерывно контролировать и управлять ситуацией, а при возникновении аварийной ситуации своевременно принимать меры по предотвращению ее развития.

Особенностью монтажа датчиков газа и температуры на промышленных объектах, особенно действующих, является высокая стоимость и сложность прокладки кабелей для соединения датчиков с блоком управления прибора, находящегося на большом удалении.

Для снижения стоимости и времени обустройства системы контроля загазованности промышленными газосигнализаторами разрабатываются варианты создания беспроводной локальной сети WLAN, включающей в себя расположенные в разных точках объекта датчики газа и/или температуры и блок управления газосигнализатора. Беспроводная локальная WLAN сеть может быть транслирована по всей площади как относительно небольших, так и крупных объектов промышленного назначения.

Для построения беспроводных локальных сетей наиболее распространена сетевая технология Wi-Fi. Эта технология обеспечивает необходимое для стабильной и надежной работы газосигнализаторов покрытие помещений и возможность добавления в сеть дополнительных точек доступа.

Одним из условий успешного продвижения газоанализаторов ВАРТА на рынок и роста объема продаж является наиболее полное удовлетворение запросов и пожеланий потребителей. Для их анализа применяются так называемые облачные технологии (cloud computing), дающие возможность обработки данных о пользователях, соблюдении правил эксплуатации, отказах в работе газосигнализаторов, в которых компьютерные ресурсы предоставляются производителю – компании «ТЕМИО» как интернет-сервис.

Промышленные, бытовые и переносные газосигнализаторы ВАРТА не уступают по своим техническим характеристикам лучшим мировым аналогам. Более чем 20-летняя практика эксплуатации газосигнализаторов ВАРТА подтвердила их высокое качество и надежность, обеспечиваемые сертифицированной системой управления качеством. Приборы ВАРТА внесены в Государственные реестры средств измерения Украины, России, Молдовы, имеют разрешения на применение и гарантийный срок эксплуатации 3 года.

#### Литература

1. Сигнализатор ВАРТА. Технические условия-ТУ У23 161 579.002-2001.
2. Сигнализатор ВАРТА . Руководство по эксплуатации-ИТЕМ 41712. 002.РЭ.
3. Сигнализаторы ВАРТА 2. Инструкция по монтажу-ИТЕМ 411712. 002. ИМ

Газосигнализаторы «ВАРТА» позволяют предупредить развитие аварийных ситуаций путем решения следующих задач:

- Автоматический непрерывный мониторинг концентраций взрывоопасных и/или токсичных газов в воздушной среде.
- Световая и звуковая сигнализация о загазованности, включение средств защиты и передача информации на системы контроля высшего уровня.
- Возможность оперативного отслеживания динамики изменений загазованности воздуха в реальном масштабе времени.
- Своевременное выявление причин и места возможного возникновения аварийных ситуаций, вызванных загазованностью воздушной среды, и предупреждение их развития.
- Минимизация затрат на обустройство системы контроля загазованности воздушной среды объектов и ее эксплуатацию.



## გიორგი ნიკოლაძის არითმომეტრის აღდგენა საკითხისათვის

**ლევან იმნაიშვილი**, ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი,

კომპიუტერული ინჟინერიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, e-mail: [Limnaishvili@gtu.ge](mailto:Limnaishvili@gtu.ge).

**გელა გოდერძიშვილი**, ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატი, პროფესორი, საინჟინრო ფიზიკის დეპარტამენტი, ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების სასწავლო-სამეცნიერო და საექსპერტო ლაბორატორიის ხელმძღვანელი,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, [gelag49@mail.ru](mailto:gelag49@mail.ru).

**მაგული ბედინეიშვილი**, ინფორმატიკის აკადემიური დოქტორი, ასოცირებული პროფესორი, კომპიუტერული ინჟინერიის დეპარტამენტი,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, e-mail: [m.bedineishvili@gtu.ge](mailto:m.bedineishvili@gtu.ge).

**ნუგზარ იაშვილი**, ავტომატიზაციის ცენტრის დირექტორი,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, [n.iashvili@gtu.ge](mailto:n.iashvili@gtu.ge).

**თეონა ჭიღლაძე**, ინფორმატიკის აკადემიური დოქტორი, ასისტენტ პროფესორი,

ინტერდისციპლინური ინფორმატიკის დეპარტამენტი,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, e-mail: [t.chigladze@gtu.ge](mailto:t.chigladze@gtu.ge).

**ანოტაცია.** ნაშრომში განხილულია გიორგი ნიკოლაძის მიერ 1928 წელს დაპატენტებული პირდაპირი გამრავლება/გაყოფის მოწყობილობის არსი. ნაჩვენებია ამ მოწყობილობის პროგრესულობა იმ პერიოდისათვის. შემოთავაზებულია გიორგი ნიკოლაძის მოწყობილობის აღდგენის კონცეფცია.

**საკვანძო სიტყვები.** გიორგი ნიკოლაძე, პირდაპირი გამრავლების მოწყობილობა.

## For the issue of recreating of Giorgi Nikoladze's Arithmometer

**Levan Imnaishvili**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Computer Engineering Department, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [Limnaishvili@gtu.ge](mailto:Limnaishvili@gtu.ge).

**Gela Goderdzishvili**, Candidate of technical science, Professor, Department of Engineering Physics, Head of Training-Scientific and Expertise Laboratory of Informatics and Management Systems, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, [gelag49@mail.ru](mailto:gelag49@mail.ru).

**Maguli Bedineishvili**, Academic Doctor of Informatics, Associate Professor, Department of Computer Engineering, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [m.bedineishvili@gtu.ge](mailto:m.bedineishvili@gtu.ge).

**Nugzar Iashvili**, Director of the Automation Center, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, [n.iashvili@gtu.ge](mailto:n.iashvili@gtu.ge).

**Teona Chigladze**, Academic Doctor of Informatics, Assistant professor, Department of Interdisciplinary informatics, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [t.chigladze@gtu.ge](mailto:t.chigladze@gtu.ge)

**Annotation.** The work discusses the essence of direct multiplication/division device, patented in 1928 by Giorgi Nikoladze. It is shown that this device is progressive for that time. The concept of recreating of Giorgi Nikoladze's device is proposed. **Keywords.** Giorgi Nikoladze, direct multiplication device.

**Keywords:** Giorgi Nikoladze, direct multiplication device.

### შესავალი

დღეისთვის მიღებული მოსაზრებაა, რომ გიორგი ნიკოლაძეს დიდი დამსახურება მიუძღვის:

- მეტალურგიაში;
- მათემატიკაში (მხაზველობითი გეომეტრია);
- სპორტში (მთამსვლელობა, ტანვარჯიში).

ნაკლებად ცნობილია მისი წვლილი კომპიუტერულ ტექნოლოგიებში. ეს შეიძლება გამოწვეული იყოს რამდენიმე მიზეზით:

- გიორგი ნიკოლაძის შედეგები კომპიუტერულ ტექნოლოგიებში ერთგვარი „შემოქმედებითი გაღვება“ ელექტრონული კომპიუტერული ტექნიკის განვითარების საწყის ეტაპზე. შეიძლება ითქვას, რომ მის მიერ შემოთავაზებული ტექნოლოგია ერთ-ერთი

საინტერესო (21-ე საკუნის გადასახედიდან) მიმდინარეობა შეიძლება ყოფილიყო მრავალსხვას შორის (მექანიკური, ელექტრომექანიკური, ათობითი და სხვა).

• გიორგი ნიკოლაძის სამეცნიერო და საინჟინრო მოღვაწეობას ძირითადად საბჭოთა პერიოდის მეცნიერები იკვლევდნენ. გასული საუკუნის 60-იან წლებამდე ჯერ კიდევ ჩანდა ორიგინალური საბჭოთა გამოთვლითი ტექნიკის განვითარების კონტურები, რომელიც ცხადია, ეყრდნობოდა ათვლის ორობით სისტემას. კომპიუტერული ტექნოლოგიების განვითარების ტემპი მსოფლიოში იმდენად მაღალი იყო, რომ არავის ეცალა არაორბითი ათვლის სისტემისათვის. გასაოცარია, მაგრამ დღესაც ასეა. იმდენად სწრაფია ინფორმატიკის განვითარების ტემპები, მკლევარები დაკავებულები არიან ინფორმატიკის გამოყენებითი ამოცანებით და არავინ ფიქრობს, ათვლის ორობითი სისტემა ოპტიმალურია თუ არა, თუნდაც ახალ ტექნოლოგიებთან მიმართებაში.

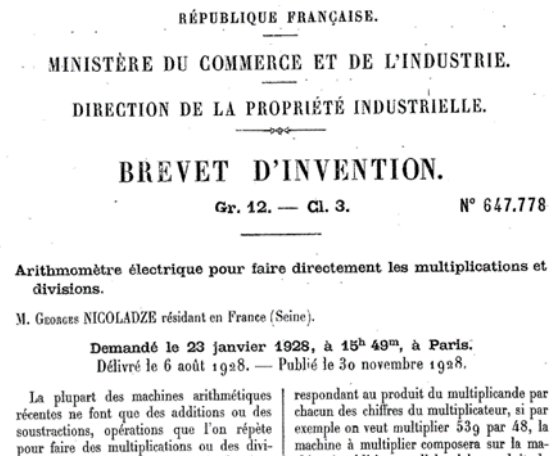
• არ მომხდარა გიორგი ნიკოლაძის არითმომეტრის მოქმედების პრინციპების შეფასება შესაბამისი დარგის სპეციალისტების მიერ. გიორგი ნიკოლაძის არითმომეტრის მოქმედების პრინციპი განსხვავებულია იმ დროისათვის გავრცელებული არითმომეტრიული მოწყობილობების მოქმედების პრინციპებისგან. გიორგი ნიკოლაძემ შეძლო თავი დაეღწია არსებული საგამომგონებლო ამოცანების გადაწყვეტის გზების კალკებისაგან და წასულიყო სრულიად ორიგინალური გზით. ეს კი ხელეწიფებათ მხოლოდ გენიოსებს!

გიორგი ნიკოლაძემ 1928 წელს საფრანგეთში დააპატენტა „პირდაპირი გამრავლების და გაყოფის ელექტრონული არითმომეტრი“ (ნახ.1) [1], რომელიც ფუნქციონირებდა იმ დროისათვის ახალი პრინციპებით. შემდგომში (უკვე საქართველოში, სავარაუდოდ 30-იან წლებში) მან შეძლო (ამის ცნობები არსებობს)

არითმომეტრის მაკეტის აგება, რომელიც გამოფენილი იყო მოსკოვის ტექნიკის მუზეუმში და ფუნქციონირებდა. ამ არითმომეტრის კვალი 1936 წლიდან იკარგება და დღემდე არ არის ნაპოვნი [2].

ისმის კითხვა, ნიკოლაძის გამომთვლელი მოწყობილობა ჩამორჩებოდა იმ დროის გამოწვევებს გამოთვლით ტექნიკაში? თუ ეს ასე არ არის, მაშინ რატომ არ მოხდა მისი შემდგომი განვითარება?

ნიკოლაძის არითმომეტრის რეალიზება მოხდა საქართველოში საბჭოთა ხელისუფლების პირობებში. ინდუსტრიალიზაციის ამოცანების პირობებში საბჭოთა ხელისუფლებას აინტერესებდა მეტალურგია, მათემატიკა, სპორტი. გამომთვლელი საშუალებები კი ინდუსტრიალიზაციისთვის არ იყო საინტერესო, თუნდაც იმიტომ, რომ მისი რეალიზება მოითხოვდა მატერიალურ დანახარჯებს.



ნახ. 1. გიორგი ნიკოლაძის სახელზე გაცემული პატენტის თავფურცელი

**გიორგი ნიკოლაძის გამოგონების არსი.** ჯერ გავვრკვეთ რა დააპატენტა ნიკოლაძემ და რისი რეალიზაცია მოახდინა. ნიკოლაძის მიერ დაპატენტებული მოწყობილობა თანამედროვე გაგებით არ არის არითმომეტრი, ეს არის პირდაპირი გამრავლების და გაყოფის მოწყობილობა, თუმცა პატენტში მითითებულია, რომ მოწყობილობამ უნდა იმუშაოს შეკრება/გამოკლების მოწყობილობასთან ერთად.

გასული საუკუნის 20-იანი წლებისათვის პირდაპირი გამრავლების მოწყობილობა არ არსებობდა, გამრავლებას ასრულებდნენ თანმიმდევრული შეკრების გზით. ასე რომ, გამრავლების დაჩქარების პრობლემა არსებობდა. პატენტში [1] აღწერილია ერთთანრიგა მამრავლის მრავალთანრიგა სამრავლზე გამრავლების პრინციპები. ავტორი თვლის, რომ მიღებული კერძო ნამრავლების შეკრება პრობლემა არ არის. ჩვენ არ ვიცით რეალიზებული მოწყობილობა იყო მხოლოდ გამრავლების მოწყობილობა, თუ იგი ტანდემში მოიაზრებდა ასევე შემკრებ/გამომკლებ მოწყობილობასაც, რამდენადაც არ არის

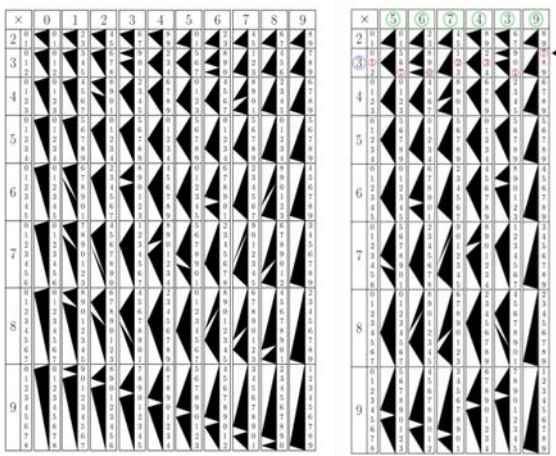


შემორჩენილი არც აღწერილობა და არც ნახაზები.

მაშასადამე, ნიკოლაძემ დააპატენტა ერთთანრიგა მამრავლის მრავალთანრიგა სამრავლზე პირდაპირი გამრავლების მოწყობილობა. მოწყობილობა არის არა მექანიკური, არამედ ელექტრომექანიკური. აქ უნდა დავკონკრეტდეთ: სამრავლის და მამრავლის თანრიგების დაყენება არის მექანიკური და ახორციელებს ადამიანი, ხოლო უშუალოდ გამრავლება ხდება ელექტრონული სიგნალების გატარებით გამტარებში.

იმ მომენტისათვის არ არსებობდა პირდაპირი გამრავლების მოწყობილობა. არსებული არითმომეტრები იყო მხოლოდ შეკრება-გამოკლებისათვის ათვლის ათობით სისტემაში და მხოლოდ მექანიკური. ცხადია, იმ დროისთვის გამომთვლელ მოწყობილობებში ჯერ კიდევ არ გამოიყენებოდა ათვლის ორობითი სისტემა.

ნიკოლაძის გამამრავლებელი/გამყოფი მანქანა არ ფუნქციონირებს ათვლის არც ათობით და არც ორობითი სისტემაში.



ნახ. 2. ჟენალიეს ჩხირებით კერძო ნამრავლის მიღება

ნიკოლაძის გამომთვლელ მოწყობილობას საფუძვლად უდევს ფრანგი ინჟინრის ჟენალიეს სათვლელი ჩხირების პრინციპი ნახ. 2 [3]. ჟენალიეს გამრავლების პრინციპი არის ერთგვარი გამრავლების „ტაბულა“, რომელიც მრავალთანრიგა სამრავლისათვის ჩხირების გარკვეული პრინციპით დალაგების და მამრავლის (ერთი თანრიგი) არჩევით საშუალებას იძლევა სწრაფად ვიპოვოთ ნამრავლის პასუხი. სამრავლის ჩხირების დალაგება ხდება ათობითი პოზიციური

სისტემის შესაბამისად, ანუ მარჯვნიდან მარცხნივ. ნამრავლის პასუხის გასაგებად უნდა ავიღოთ ის ჰორიზონტალი, რომელიც შეესაბამება მამრავლის ციფრს. ნამრავლის პასუხის წაკითხვა ხდება მარჯვნიდან მარცხნივ. ნახ. 2-ზე ნაჩვენებია სამრავლი – 567 439, რომელიც მრავლდება ციფრზე 3 და მიიღება პასუხი 1 702 317. თუ მამრავლი არის მრავალთანრიგა, ჟენალიეს ჩხირებით უნდა ვიპოვოთ კერძო ნამრავლები მამრავლის თითოეული თანრიგისათვის და შემდგომ დაძრული სახით შევკრიბოთ. ანუ კერძო ნამრავლების დაძვრას და შეკრებას ჟენალიეს ჩხირები ვერ აკეთებს.

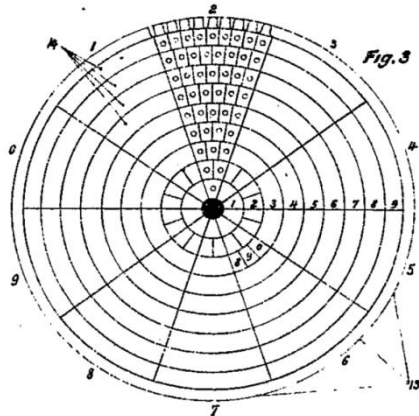
პატენტში [1] გიორგი ნიკოლაძე აღწერს მხოლოდ კერძო ნამრავლების მიღების მოწყობილობას. ნამრავლის მისაღებად მიუთითებებს შემკრები მოწყობილობის აუცილებლობაზე. რაც შეეხება გაყოფის ოპერაციას, რომლის შესრულების შესაძლებლობაზე მიუთითებს პატენტის დასახელებაც, პატენტის ავტორი თვლის, რომ გაყოფის ოპერაცია უნდა შესრულდეს გამრავლების ოპერაციის შესრულების გზით. მოტანილია ამ ოპერაციის შესრულების კონკრეტული გზა.

გიორგი ნიკოლაძემ შეძლო ეპოვა ჟენალიეს ჩხირების „დალაგების“ მარტივი და უნივერსალური ხერხი. როგორც ზემოთ ვნახეთ, ერთი ციფრის შესაბამისი ჟენალიეს ჩხირი ვერტიკალში მოიცავს 10 ველს. გასაგები მიზეზების გამო ნახ. 2-ზე ნაჩვენებ ჩხირებში არის 8 ველი. ამასთანავე, ჟენალიეს ჩხირებით კერძო ნამრავლის მიღებისათვის თავდაპირველად საჭიროა სამრავლის ციფრების ჩხირების შესაბამის თანრიგებში ერთმანეთის გასწრივ დალაგება.

ამ პროცესის განხორციელებისათვის, გიორგი ნიკოლაძემ წრე დაყო ათ სეგმენტად და თითოეულ სეგმენტში „გადაიტანა“ ჟენალიეს თითო ჩხირი 0-დან 9-მდე (ნახ.3) [1].

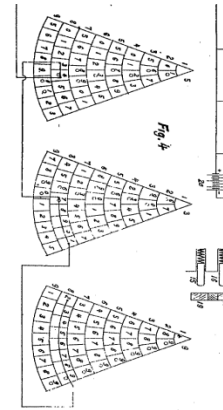
ერთი წრე (დისკო) არის სამრავლის ერთი თანრიგი ათი სეგმენტით. რამდენ დისკოსაც დავალაგებთ ერთმანეთის გვერდით, გვექნება იმდენთანრიგა სამრავლი. მამრავლი ყველა შემთხვევაში არის ერთთანრიგა. ახლა საკმარისია დისკოები შემოვატრიალოთ ისე, რომ ერთმანეთის გასწრივ აღმოჩნდნენ სამრავლის თანრიგების შესაბამისი სეგმენტები, ანუ ავაწყოთ სამრავლი.

ნიკოლაძემ შექმნა ეპოვანა ჟენალიეს ჩხირების ველის წრის სეგმენტში „გადატანის“ მეთოდი. წრის თითოეული სეგმენტი მოიცავს ჩხირის ათივე ველს. ჟენალიეს ყოველ ჩხირში ერთ ველს, ანუ მამრავლის ერთ თანრიგს შეესაბამება შავი სამკუთხედის (-ების) გარკვეული კონფიგურაცია (ნახ.2). ჟენალიეს ჩხირებით სამრავლის დალაგების დროს მამრავლის კონკრეტული ციფრისათვის თითოეულ ჩხირში გვაქვს წესი-წინა თანრიგის ჩხირის სამკუთხედის წვერი აჩვენებს კერძო ნამრავლის მომდევნო თანრიგს. გამონაკლისია უმცროსი თანრიგი, როცა კერძო ნამრავლის უმცროსი თანრიგი არის სამკუთხედი ფუძის ზედა უკიდურესი ციფრი.



ნახ. 3. ჟენალიეს ათი ჩხირის გადატანა წრის ათ სეგმენტში

ვინაიდან სამრავლის ცალკეულ თანრიგებს შეესაბამება ცალკეული დისკო, ამიტომ ეს კონფიგურაციები ერთმანეთის გასწვრივ უნდა მოხდნენ დისკოებზე სამრავლის აკრეფის დროს. დღევანდელი ტერმინოლოგიით დისკოს სეგმენტებში განსაზღვრულია დენის შესვლის და გასვლის წერტილები, ანუ წრეების დალაგების შემდეგ მიიღება დენის გატარების ტრასა. დისკოებზე დენის შესვლის წერტილები, ასევე შეერთებულია მომჭერებთან, რომლებიც განლაგებულია მატრიცულად (ათი მომჭერი ერთ თანრიგზე). მამრავლის აკრეფა ხდება ათიდან ერთ ლილაკზე დაჭერით. დენი გაივლის წრედში და გარკვეულ მომჭერებზე მიიღება ძაბვა, რომელიც უნდა მიეწოდოს შეკრება/გამოკლების მოწყობილობას.



ნახ. 4. თითოეულ სეგმენტში ჟენალიეს ჩხირის ველების გადატანა

ამდენად, ნიკოლაძემ გადაწყვიტა იმ პერიოდისათვის რამდენიმე რთული ამოცანა:

- პირველად შექმნა პირდაპირი გამრავლების მოწყობილობის შექმნა.
- პირველად შექმნა გამოსულიყო ათვლის ათობითი სისტემის „ტყვეობიდან“ და აირჩია ნამრავლის მიღების სხვა პრინციპი.
- პირველად შექმნა არითმეტიკული მოქმედების პასუხის მყისიერად მიღება.
- გადაწყვიტა ელექტრული წრედების შეკვრის და დენის გატარების ორიგინალური კონსტრუქციები.

**გიორგი ნიკოლაძის გენიალობა:**

- გამრავლების, როგორც კერძო ნამრავლების თანმიმდევრული შეკრების (გამრავლება იმ დროისათვის არითმომეტრებში და დღესაც ასე სრულდება კომპიუტერში) პრობლემის აღქმა (საჭიროა სამრავლის იმდენჯერ შეკრება, რამდენიცაა მამრავლის რიცხვი. გამრავლების მექანიზაციისათვის იმ დროისათვის საჭირო იყო კბილანების სისტემა, რომელიც იყო არასაიმედო და ძვირი);
- მახვილგონივრულად დანახული ჟენალიეს გამრავლების პრინციპის გადატანა იმ დროისათვის არატრადიციულ (რაც გამოიყენებოდა არითმომეტრებში) ელექტრომექანიკაში;
- იმ დროისათვის ეს იყო მნიშვნელოვანი წინსვლა.

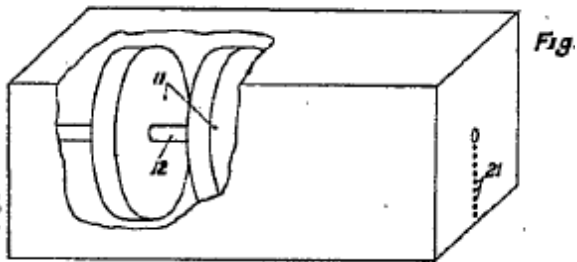
**გიორგი ნიკოლაძის „პირდაპირი გამრავლების და გაყოფის ელექტრონული არითმომეტრის“ აღდგენის კონცეფცია**

როგორც ზემოთ გავარკვიეთ, გიორგი ნიკოლაძის პატენტი „პირდაპირი გამრავლების და გაყოფის ელექტრონული არითმომეტრი“ აღწერს მხოლოდ კერძო ნამრავლის და კერძო განაყოფების მიღების ავტომატიზაციის ხერხს და მოწყობილობას. იმავე პატენტში მითითებულია, რომ ამ მოწყობილობამ უნდა იმუშაოს შემკრებ/გამომკვლევ მოწყობილობასთან ტანდემში, რომელიც არ ვიცით როგორ იყო აგებული.

ამდენად, შემოთავაზებულ სამუშაოში ჩავთვალეთ, რომ პატენტზე დაყრდნობით ავტენტურთან მიახლოებული სახით შეიძლება მხოლოდ „პირდაპირი გამრავლების და გაყოფის ელექტრონული არითმომეტრის“ აღდგენა ასევე ჩავთვალეთ, რომ 21-ე საუკუნის მნახველისათვის ასეთი სახით მისი მიწოდება საინტერესო და სახალისო არ იქნება.

ამდენად, შემოთავაზებულია შემდეგი მიდგომა:

- ავტენტური სახით ხდება „პირდაპირი გამრავლების და გაყოფის ელექტრონული არითმომეტრის“ აღდგენა;
- ამასთან ტანდემში მუშაობს პერსონალური კომპიუტერი, რომელსაც დაკისრებული აქვს კერძო ნამრავლების/განაყოფების შეკრება/გამოკვლების ფუნქციის შესრულება და ნამრავლის/განაყოფის მიღება;
- აკომპიუტერში მნახველმა უნდა შეძლოს იგივე ოპერაციის მოდელირება ქენალიეს ჩხირების გამოყენებით.



ნახ. 5. პირდაპირი გამრავლების მოწყობილობის გარეგნული სახე

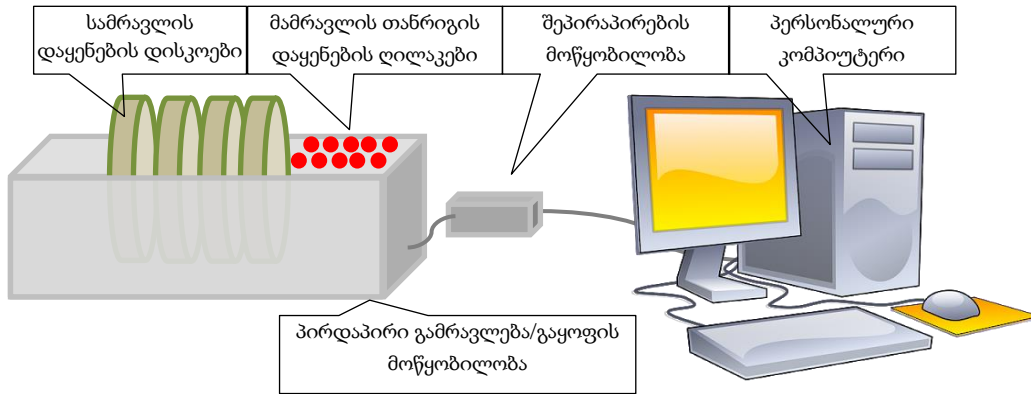
პატენტის მიხედვით ქენალიეს ჩხირების გამრავლების მექანიზმი გადატანილი უნდა იქნას სპეციალური კონსტრუქციის დისკოებზე. დისკოების მობრუნებით ხდება ასევე სამრავლის რიცხვის აკრეფა. ქენალიეს ჩხირების გამრავლების მექანიზმიდან გამომდინარე უნდა დამუშავდეს მექანიკა, რომელიც საშუალებას იძლევა დენი მიწოდებული იქნას დისკოს გარკვეულ ადგილას და გამოტანილი იქნას ასევე გარკვეულ ადგილას. დისკოში დენის მიწოდების ადგილი შესაბამემა კერძო ნამრავლის შესაბამის ციფრს.

პატენტის გაცემიდან დღემდე გასულია თითქმის 100 წელი. გასაგებია, რომ შეიცვალა საკითხისადმი მიდგომა, მასალები და ა.შ.

ავტენტურობის უზრუნველყოფის მიზნით შემოთავაზებულია სპეციალური დისკოების, დისკოებით სამრავლის აკრეფის ხერხის შენარჩუნება. ცხადია, რომ ნიკოლაძის მანქანაში დენგამტარი კონტაქტების სახით გამოყენებული იქნებოდა სპილენძის მასალა, მაგრამ არ ვიცით რა მასალა იყო გამოყენებული დისკოების დასამზადებლად. ამიტომ დისკოების დასამზადებლად საჭირო გახდება თანამედროვე ტექნოლოგიების და მასალების გამოყენება.

დისკოები და დენგამტარი წრედები განთავსებული იქნება დამოუკიდებელ მართკუთხა (ასე წარმოედგინა პატენტის ავტორს) კორპუსში (ნახ. 5) ისე, რომ შეიძლებოდეს დისკოების მოტრიალება კორპუსის გარედან. კორპუსს ასევე გააჩნია კვების მიწოდების მომჭერები (ვიცით, რომ გამოყენებული იყო მუდმივი დენის წყარო, მაგრამ არ ვიცით მისი განთავსების ადგილი) და კერძო ნამრავლის თანრიგების გამოტანისათვის საკონტაქტო სისტემა.

სისტემის არქიტექტურა აღდგენილი მოწყობილობით ნაჩვენებია ნახ. 6-ზე.



ნახ. 6. სისტემის არქიტექტურა აღდგენილი მოწყობილობით

**დასკვნები.**

- სადავო არ უნდა იყოს გიორგი ნიკოლადის დამსახურება კომპიუტერული ტექნოლოგიების განვითარებაში. საჭიროა ამის სათანადოთ წარმოჩენა.
- თამამად შეგვიძლია კომპიუტერული ტექნოლოგიების ისტორიის დასაწყისად საქართველოში მივიჩნიოთ 1928 წელი.
- ნიკოლადის პატენტზე დაყრდნობით შესაძლებელია მეტ-ნაკლებად ავთენტური, მოქმედი და რეალური პირდაპირი გამრავლების მოწყობილობის აღდგენა.
- გიორგი ნიკოლაძე დასთან ერთად 20-იან წლებში სკოლაში ასწავლიდა ბავშვებს გამრავლებას ჟენალიეს ჩხირებით. საინტერესო იქნება ამ ჩხირების დაბრუნება დაწყებით კლასებში არაფორმალური განათლების ფარგლებში.

**ლიტერატურა**

1. Georges Nicoladze. Arithmomètre électrique pour faire directement les multiplications et divisions (French patent 647.778), 1928.
2. Боголюбов А.Н. Георгий Николаевич Николадзе. 1973.
3. Denis Roegel, Napier's bones and Genaille-Lucas's rods, 2015.

**References (transliterated)**

1. George Nicoladze. Electric arithmometer for direct multiplication and division (French patent 647.778), 1928.
2. Bogoliubov A.N. George Nicoladze. 1973.
3. Denis Roegel, Napier's bones and Genaille-Lucas's rods, 2015.

## SCADA თუ IoT?

**ლევან იმნაიშვილი**, ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი,

კომპიუტერული ინჟინერიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, e-mail: [limn54@gmail.com](mailto:limn54@gmail.com).

**მაგული ზედინიშვილი**, ინფორმატიკის აკადემიური დოქტორი, ასოცირებული პროფესორი, კომპიუტერული ინჟინერიის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, e-mail: [m.bedineishvili@gtu.ge](mailto:m.bedineishvili@gtu.ge)

**თეა თოდუა**, ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატი, ასოცირებული პროფესორი, კომპიუტერული ინჟინერიის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, e-mail: [tea\\_todua@gtu.ge](mailto:tea_todua@gtu.ge)

**თეონა ჭიგლაძე**, ინფორმატიკის აკადემიური დოქტორი, ასისტენტ პროფესორი, ინტერდისციპლინური ინფორმატიკის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, e-mail: [t.chigladze@gtu.ge](mailto:t.chigladze@gtu.ge).

**ანოტაცია.** *სამუშაოში შემოთავაზებულია SCADA და IoT ტექნოლოგიების შედარებითი ანალიზის მეთოდოლოგია. წარმოდგენილია დასკვნა, რომ ინდუსტრია 4-ის დანერგვაში ორივე ტექნოლოგიას ექნება საკუთარი როლი: რთული კომპლექსური ტექნოლოგიური ამოცანის გადაწყვეტაში ისინი არაა გამორიცხავენ, არამედ ავსებენ ერთმანეთს.*

**საკვანძო სიტყვები:** SCADA, IoT, SCADA და IoT-ის შედარებითი ანალიზი.

## SCADA or IoT?

**Levan Imnaishvili**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Computer Engineering Department, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [limn54@gmail.com](mailto:limn54@gmail.com)

**Maguli Bedineishvili**, Academic Doctor of Informatics, Associate Professor, Department of Computer Engineering, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [m.bedineishvili@gtu.ge](mailto:m.bedineishvili@gtu.ge).

**Tea Todua**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computer Engineering, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [tea\\_todua@gtu.ge](mailto:tea_todua@gtu.ge)

**Teona Chigladze**, Academic Doctor of Informatics, Assistant professor, Department of Interdisciplinary informatics, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [t.chigladze@gtu.ge](mailto:t.chigladze@gtu.ge)

**Annotation.** *The methodology of comparative analysis of SCADA and IoT technologies is proposed in the work. It is concluded that both technologies will have their own role to play in the implementation process of Industry 4: they not exclude but complement each other in solving a complex technological task.*

**Keywords:** SCADA, IoT, SCADA and IoT comparative analysis.

**შესავალი.** IoT-ის [1] განვითარებასთან ერთად სულ უფრო აქტუალური ხდება კითხვა: ცვლის თუ არა ნივთების ინტერნეტი SCADA-ს [2]? IoT-ის და ინდუსტრია 4-ის დანერგვასთან ერთად, „ცხოვრებაში“ კარგად დამკვიდრებულ SCADA-სთან ურთიერთობისას, სულ უფრო და უფრო ისმის გაურკვევლობის ეს კითხვები.

თითქმის 50 წლის მანძილზე SCADA ეხმარება წარმოების სხვადასხვა დარგს ტექნოლოგიური პროცესების მართვაში, ოპერაციათა ეფექტურობის ამაღლებასა და დანახარჯების შემცირებაში. ტექნოლოგიური

მიღწევების დამსახურებაა, რომ ხდება მონიტორინგისათვის წვდომადი სისტემების გაფართოება. მიუხედავად ამისა, რამდენადაც მსოფლიოს აღარ შეუძლია ცხოვრება გლობალური კომუნიკაციების გარეშე, სპეციალისტების ნაწილი ფიქრობს, რომ SCADA-ს ეპოქა დამთავრდა.

იქნებ საქმე სხვაგვარადაა, იქნებ IoT-მა SCADA სისტემები აიყვანოს ახალ დონეზე და პაექრობის მაგივრად გაერთიანდნენ, რაც ორივეს ეფექტურობას გაზრდის.



**სამუშაოს მიზანი.** ზოგადად, თუ რა არის SCADA ან IoT სხვადასხვა წყაროს მიხედვით სხვადასხვანაირად აღიქმება. თავდაპირველად უნდა ვთქვათ, რომ სპეციალისტებში SCADA-ს მიმართ გაურკვეველობა ნაკლებად არის (შეიძლება იმის გამო, რომ იგი უკვე ტრადიციულია), SCADA ტექნოლოგიური პროცესის დისპეტჩერული მართვის სისტემას წარმოადგენს, კარგად არის ადაპტირებული საწარმოო პირობებზე, მაგრამ თავისუფლად გამოყენებადია არასაწარმოო პირობებშიც, მაგალითად „ჭკვიან სახლში“.

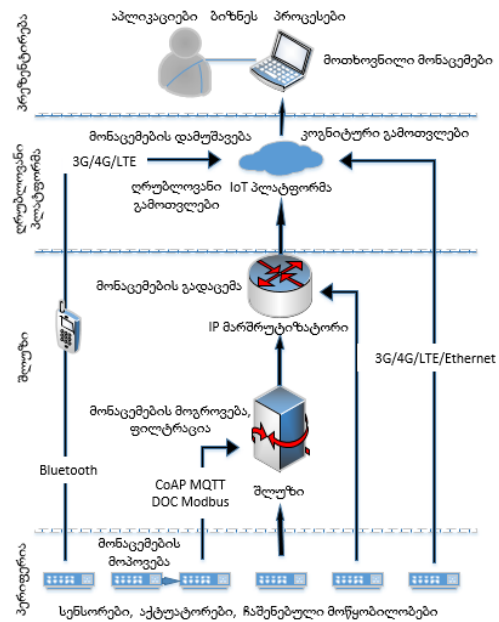
ზოგადად რომ ვთქვათ, IoT დამყარებულია სხვადასხვა დანიშნულების დიდი რაოდენობის პერიფერიული მოწყობილობების ერთმანეთთან შეერთებაზე და მოგროვილი ინფორმაციის ყველა სახის ციფრულ მომსახურებაში გამოყენების პარადიგმაზე. IoT-ის ძირითადი იდეა მდგომარეობს იმაში, რომ გაფართოებული იქნას ყოველდღიური და ჩვეულებრივი ნივთების შესაძლებლობები გამოთვლითი სიმძლავრეების დახმარებით, მათი ინტერნეტთან მიერთებით და ახალი შესაძლებლობების მიცემით - აღიქვან, გამოთვალონ, ურთიერთობა დაამყარონ და მართონ გარე სამყარო. IoT იძლევა თვალთახედვის სხვა რაკურსს იმაზე, თუ რა მონაცემები უნდა მოვაგროვოთ, საიდან უნდა მოვაგროვოთ, რამდენად ხშირად უნდა მოვაგროვოთ ეს მონაცემები იმისთვის, რომ ინფორმაცია, რომელიც მანამდე ხილული არ იყო, გავხადოთ ხილული გადაწყვეტილების მისაღებად.

SCADA-ს უფრო „მოკრძალებული“ ამოცანა აქვს - დისპეტჩერის დახმარებით კორექტულად წარმართოს ტექნოლოგიური პროცესი, თუმცა უარს არ ამბობს მონაცემთა განზოგადებაზე და გადაწყვეტილების მიღების მხარდამჭერი ქვესისტემების გამოყენებაზე.

მოცემული სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს გამოვკვეთოთ ორივე ტექნოლოგიის ღირსებები, რათა საშუალება მივცეთ დეველოპერებს კორექტულად შეარჩიონ შესაბამისი ტექნოლოგია ამოცანის სისტემური ანალიზის დონეზე.

**SCADA-ს და IoT-ის შედარებითი ანალიზი.** როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, IoT-ის ამოცანათა სპექტრი უფრო ფართოა, ვიდრე SCADA-სი. არის მცდელობები, რომ IoT გამოყენებული იქნას ტექნოლოგიური პროცესის მართვისათვის [3].

შედარების კორექტულობისათვის ვისაუბროთ IoT-ზე, რომელიც ემსახურება საწარმოო ტექნოლოგიური პროცესების მართვას. ამდენად, ორივე ტექნოლოგიას შეუძლია „ერთი საქმის კეთება“- საწარმოო ტექნოლოგიური პროცესების მართვა. რჩება კითხვა, რომელი უფრო უკეთესად აკეთებს ამას? სწორედ ამ კითხვაზე არ გვაქვს ერთმნიშვნელოვანი პასუხი. წარმოდგენილი ნაშრომი ამ კითხვაზე პასუხის გაცემის მცდელობაა.



ნახ. 1. IoT-ის განზოგადებული არქიტექტურა

ნახ.1-ზე ნაჩვენებია IoT-ის განზოგადებული არქიტექტურა [4]. IoT-ის არქიტექტურაში ოთხი დონე იკვეთება:

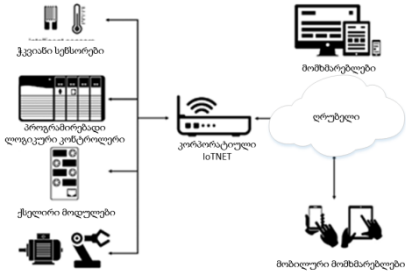
- პერიფერია, რომელიც მოიცავს IoT-ის მოწყობილობებს;
- შლუზი, რომელიც იღებს პირველად ინფორმაციას, ფილტრავს და დანიშნულებისამებრ აგზავნის;
- ღრუბლოვანი პლატფორმა. ამ დონეზე ხდება მონაცემთა შეჯერება და ანალიტიკის ინსტრუმენტებით დამუშავება;
- ბოლო დონეზე ხდება ბიზნეს-მომსახურების მიწოდება წინა დონეზე მიღებული გადაწყვეტილების შესაბამისად.

ნახ. 2-ზე ნაჩვენებია ინდუსტრიული IoT-ის განზოგადებული სქემა [3]. ინდუსტრიული IoT-ის პირდაპირი დანიშნულებაა ტექნოლოგიური პროცესის მართვა ისე, რომ შეძლოს ბიზნეს-



მომსახურების მიწოდება. როგორც ნახ.1 და ნახ. 2-დან ჩანს, ინდუსტრიული IoT ვერ ახერხებს დისპეტჩერული მართვის განხორციელებას, ამიტომ მის ფარგლებში ტექნოლოგიური პროცესის მართვას შედარებით ლოკალური ხასიათი აქვს.

ცხრ. 1-ში წარმოდგენილია SCADA და IoT სისტემების შედარებითი ანალიზი. შევეცადეთ ცხრილში წარმოგვედგინა ტექნოლოგიური პროცესების მართვის სისტემის მიმართ წაყენებული ის მოთხოვნები, რომელიც იკვეთება ინდუსტრია 4-ის კრილიში.



ნახ. 2. ინდუსტრიული IoT-ის განზოგადებული არქიტექტურა

**SCADA და IoT სისტემების შედარებითი ანალიზი**

ცხრილი 1

| ფუნქცია                      | SCADA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | ინდუსტრიული IoT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| მასშტაბუნარიანობა            | SCADA სისტემაში დაშორებული ტერმინალების რაოდენობის ზრდასთან ერთად მისი წარმადობაც ეცემა, რაც, მის მოდიფიცირებას ითხოვს. სენსორებისა და შემსრულებელი მექანიზმების დამატება ან გამოკლება ძვირადღირებული პროცესია და შეიძლება ითხოვდეს სისტემის ახლიდან დაპროექტებას და განხორციელებას. ტერიტორიულად დაშორებულად განთავსებული ქვედანაყოფების ანგარიშების შეჯერება რთული საქმეა და მოითხოვს ადამიანის ჩარევას. | IoT-ს მეტად შესწევს უნარი სენსორებიდან მიიღოს და დაამუშაოს დიდი მოცულობის ინფორმაცია, საშუალებას იძლევა ქსელში ჩართოს პროცესთან დაკავშირებული ყველა სენსორი და აქტუატორი, IoT-ის მასშტაბუნარიანობის მოქნილობა განპირობებულია უსერვერო არქიტექტურის და ინტერნეტ პროტოკოლების გამოყენებით. აქედან გამომდინარე, სენსორებისა და შემსრულებელი მექანიზმების დამატება ან გამოკლება ძვირადღირებული პროცესი არ არის. |
| მონაცემთა ანალიზი            | SCADA ძირითადად საწარმოს ყოველდღიური საქმიანობისთვის გამოიყენება, შეუძლია მოიპოვოს და დაამუშაოს მონაცემთა შეზღუდული რაოდენობა, რაც არ იძლევა ღრმა ანალიზის ჩატარების საშუალებას.                                                                                                                                                                                                                           | IoT საშუალებას იძლევა დიდი ხნით იქნას შენახული დიდი მოცულობის ინფორმაცია პროგნოზირებისთვის, მატერიალური რესურსების ოპტიმალურად გამოყენებისთვის, დანახარჯების შემცირებისთვის და ა.შ. ანალიზის დროს შეიძლება გამოყენებულ იქნას მანქანური სწავლების მეთოდებიც.                                                                                                                                                 |
| სტანდარტიზება                | SCADA მონაცემთა შეგროვებისთვის იყენებს OPC სტანდარტს რომელმაც კარგად გამოავლინა თავი წლების მანძილზე. OPC-ს ნაკლია DCOM ტექნოლოგიაზე დაყრდნობა, ის საშუალებას არ იძლევა, მოწყობილობებმა მოაგროვონ ან გაცვალონ მონაცემები ერთმანეთთან წინასწარ განსაზღვრული სქემის გარეშე.                                                                                                                                  | ინდუსტრიული IoT-ის ძირითადი მიზანია მონაცემთა შეგროვება და აგრეგირება. IoT სტანდარტები, როგორცაა OPC UA რეალურ დროში დაცული კავშირების განხორციელებისთვის გამოიყენება. ინფორმაციული უსაფრთხოება უზრუნველყოფილია ისეთი პროტოკოლების მხარდაჭერით, როგორცაა MQTT, HTTPS, RAML და სხვ.                                                                                                                          |
| თავსებადობა                  | სხვადასხვა მწარმოებლის მკომპლექტებლები რთულად ინტეგრირებადია.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | სხვადასხვა მწარმოებლის მკომპლექტებლები მარტივად ინტეგრირებადია.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| სენსორი, აქტუატორი           | PLC-თან და კონტროლერთან საკაბელო კავშირი                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | ინტერნეტით მონაცემთა ბაზასთან უკაბელო კავშირი                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| მონაცემთა შეგროვება, შენახვა | ლოკალურად                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | ღრუბლოვან გარემოში                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| სისტემის ტიპი                | კონტროლერებზე, სენსორებზე და აქტუატორებზე დამყარებული კომპანის საკუთარი სისტემა.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ღია სტანდარტების სისტემა, აგროვებს მონაცემებს მრავალი წყაროდან, ამუშავებს დაინახავს ღრუბლოვან გარემოში.                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| ინფორმაციული უსაფრთხოება     | SCADA ლოკალური სისტემაა, შეიძლება საერთოდ არ ქონდეს გლობალურ ქსელში გასვლა.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | IoT ფუნქციონირებს მხოლოდ გლობალურ სისტემაში, ყოველთვის შეიძლება გახდეს ჰაკერული თავდასხმის სამიზნე. ამდენად, მოითხოვება ინფორმაციული უსაფრთხოების ზომების მეტად დაცვა.                                                                                                                                                                                                                                      |

სისტემის ფუნქციების შესრულების ხარისხობრივი დონეების ექსპერტული შეფასება ხუთბალიანი სისტემით მოტანილია ცხრ. 2-ში.

ცხრილი 2

ფუნქციის შესრულების ხარისხობრივი დონე

| სისტემის პარამეტრი                | SCADA | ინდუსტრიული IoT |
|-----------------------------------|-------|-----------------|
| მონაცემთა მოგროვების სწრაფქმედება | 5     | 4               |
| პროცესის მართვის სწრაფქმედება     | 5     | 3               |
| დიდი მონაცემების დამუშავება       | 1     | 5               |
| IT ანალიზი                        | 1     | 5               |
| ინტეგრირება                       | 3     | 5               |
| თავსებადობა                       | 3     | 5               |
| მასშტაბირება                      | 2     | 5               |
| ინფორმაციული უსაფრთხოება          | 5     | 1               |

მოტანილ ცხრილში შეგნებულად არ შევიტანეთ ტექნოლოგიური პროცესის დისპეტჩერული მართვის ფუნქცია, რამდენადაც IoT ტექნოლოგიას არ აქვს შესაძლებლობა განახორციელოს დისპეტჩერული მართვა. ასევე ხასგასმით შეგვიძლია აღვნიშნოთ, რომ SCADA ტექნოლოგიაში შესაძლებელია IoT ტექნოლოგიის ყველა ფუნქციის განხორციელება, მაგრამ ზოგი მათგანი არაეფექტური იქნება.

მოცემული ცხრილებიდან ირკვევა, რომ როგორც SCADA-ს, ასევე IoT-ს აქვს თავისი ღირსებები და ნაკლი, რომელთა გათვალისწინება აუცილებელია სისტემის პროექტირების სისტემური ანალიზის ეტაპზე.

სადავო არ არის, რომ ძირითადი ხიბლი, რაც დამახასიათებელია SCADA სისტემებისათვის, არის დისპეტჩერული მართვის განხორციელება. როგორც ცხრილი 1 და 2-ჩანს, რიგ პარამეტრებში IoT-საც აქვს მომხიბვლელიობა. ამიტომ, სპეციალისტები შეეცადნენ მათი დადებითი თვისებების გაერთიანებას, შედეგად მივიღეთ IoT-ზე დაფუძნებული SCADA სისტემა, რომლის განზოგადებული არქიტექტურა მოცემულია ნახ. 3-ზე [5].

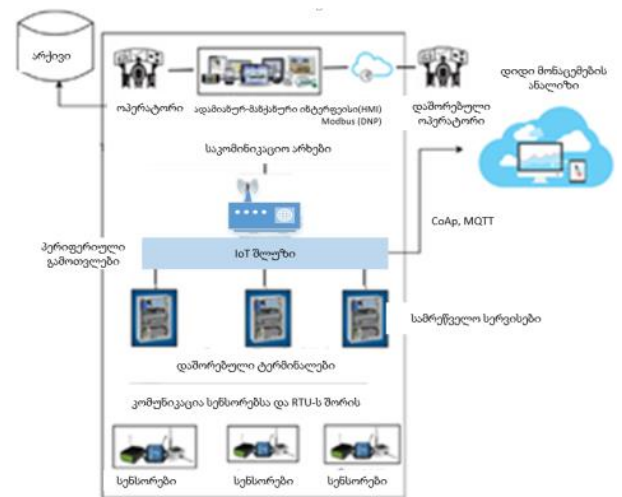
ჰიბრიდული სისტემა წარმოდგენილია რამდენიმე დონიანი სისტემის სახით:

- პირველ დონეზე წარმოდგენილია SCADA სისტემის დამორებული ტერმინალები, სენსორები და აქტუატორები, რომლებსაც გააჩნიათ IoT-ის პერიფერიისათვის

დამახასიათებელი თვისებები: Wi-Fi სივრცეში განთავსების და ფუნქციონირების უნარები;

- მეორე დონეზე განთავსებულია IoT-სათვის დამახასიათებელი შლუზი, რომლის მოვალეობაში შედის ინფორმაციის ფილტრაცია და გადამისამართება ღრუბლოვანი გარემოში შემდგომი დამუშავებისათვის და SCADA სისტემის მთავარი ტერმინალებისაკენ, შემდგომი რეაგირებისათვის;

- მესამე დონეზე პარალელურად განთავსებულია ღრუბლოვანი დამუშავების და SCADA სისტემის დისპეტჩერული მართვის ინსტრუმენტები.



ნახ.3. IoT-ზე დაფუძნებული SCADA სისტემის განზოგადებული არქიტექტურა

ამდენად, წარმოდგენილ არქიტექტურას შენარჩუნებული აქვს დისპეტჩერული მართვის პრინციპები და ამავე დროს, IoT-თვის დამახასიათებელი უნარები: დიდი მონაცემების დამუშავების, IT ანალიზის, მარტივი ინტეგრირების, პროგრამული და აპარატურული საშუალებების მრავალ მწარმოებელთან თავსებადობის, მასშტაბირების და სხვა.

### დასკვნები

1. უკვე დამდგარი ინდუსტრია-4 ტექნოლოგიისათვის ერთნაირად საჭიროა SCADA და IoT ტექნოლოგიები პროცესის მოქნილობისა და ეფექტურობისათვის, ინფორმაციული უსაფრთხოების უზრუნველყოფისათვის;

2. IoT ტექნოლოგია მიზანშეწონილია უფრო გამოყენებული იქნას ტექნოლოგიური პროცესების მონიტორინგისა და დიდი მოცულობის ინფორმაციის დამუშავებისათვის;

3. SCADA ტექნოლოგია ტრადიულად ეფექტურია ტექნოლოგიური პროცესების დისპეტჩერული მართვისათვის;

4. შესაძლებელია დიდი პოტენციალი იყოს IoT და SCADA ტექნოლოგიების ჰიბრიდულად გამოყენებაში, რაც შემდგომ კვლევებთანაა დაკავშირებული.

#### ლიტერატურა

1. Jan Höller, Vlasios Tsiatsis, Catherine Mulligan, Stamatis Karnouskos, StefanAvesand, David Boyle. Chapter 4 - M2M to IoT – An Architectural Overview. From Machine-To-Machine to the Internet of Things. Introduction to a New Age of Intelligence. 2014, Pages 61-77.
2. Boyer, Stuart A. SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition. Iliad Development Inc. ISA-International Society of Automation, 255 pp. CD-4421.
3. Jozef Mocnej, Adrian Pekar, Winston K.G. Seah, Peter Papcuna, Erik Kajatia, Dominika Cupkovaa, Jiri Koziorekd, Iveta Zolotova. Quality-enabled decentralized IoT architecture with efficient resources utilization. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. Volume 67, February 2021.
4. Radu BONCEA, Ioan BACIVAROV. A System Architecture for Monitoring the Reliability of IoT. Proceedings of the 15th International Conference on Quality and Dependability. Sinaia, Romania, September 14th-16th, 2016 ISSN 1842-3566 Pages 143-149.
5. Geeta Yadava, Kolin Paul. Architecture and security of SCADA systems: A review. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 34 (2021).

#### References (transliterated)

1. Jan Höller, Vlasios Tsiatsis, Catherine Mulligan, Stamatis Karnouskos, StefanAvesand, David Boyle. Chapter 4 - M2M to IoT – An Architectural Overview. From Machine-To-Machine to the Internet of Things. Introduction to a New Age of Intelligence. 2014, Pages 61-77.
2. Boyer, Stuart A. SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition. Iliad Development Inc. ISA-International Society of Automation, 255 pp. CD-4421.
3. Jozef Mocnej, Adrian Pekar, Winston K.G. Seah, Peter Papcuna, Erik Kajatia, Dominika Cupkovaa, Jiri Koziorekd, Iveta Zolotova. Quality-enabled decentralized IoT architecture with efficient resources utilization. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. Volume 67, February 2021.
4. Radu BONCEA, Ioan BACIVAROV. A System Architecture for Monitoring the Reliability of IoT. Proceedings of the 15th International Conference on Quality and Dependability. Sinaia, Romania, September 14th-16th, 2016 ISSN 1842-3566 Pages 143-149.
5. Geeta Yadava, Kolin Paul. Architecture and security of SCADA systems: A review. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 34 (2021).

ენერგოეფექტურობა და განახლებადი ენერჯის წყაროები. ენერგორესურსების დამზოგავი ტექნოლოგიები ენერგეტიკაში  
Energy efficiency and renewable energy sources. Energy Saving technologies in Power Engineering

Smart-Grid technologies in small energy

**Pylyp Hovorov**, Doctor of Technical Science, Professor,  
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine,  
e-mail: [philip.govorov@gmail.com](mailto:philip.govorov@gmail.com)

**Vladlen Hovorov**, PhD,  
Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkiv, Ukraine,  
e-mail: [govorovvladlen@gmail.com](mailto:govorovvladlen@gmail.com)

**Anastasiia Kindinova**, master student,  
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine,  
e-mail: [kindinova.anstasiia@gmail.com](mailto:kindinova.anstasiia@gmail.com)

**Annotation.** *Modern power supply and lighting systems in cities are characterized by low operating efficiency. It is largely due to the low quality of electrical energy and insufficient compensation of reactive power in them. Unfortunately, the existing methods and technical means based on them cannot fully solve this problem. The studies carried out made it possible to clarify the nature of the processes in power supply systems and determine the methods and technical means based on the Smart-Grid concept. They are based on the use of phase-shifting booster transformers with an electronic control system. Their use made it possible to provide the possibility of complex control of the voltage modes of active and reactive power with the possibility of installation at any point in the network and centralized control from a single center. The calculations show that the use of the developed methods and technical means provides an opportunity to reduce power losses in networks by 10-15% and energy losses among consumers by 50-75%.*

**Keywords:** *smart-grid technology, electricity transmission, power supply, efficiency, electrical energy.*

**Introduction.** Modern power supply systems are complex geographically distributed systems, which, in turn, are part of higher-level systems - electric power systems or their various subsystem levels. They have common elements with them (supply and distribution networks of high and medium voltage), as well as power supplies and means of regulation and control. This makes them mutually influencing and interdependent, requires the use of methods and technical means of control, adapted to the parameters and modes of urban energy systems. To control the modes of electrical networks, mainly methods and technical means based on discrete, mainly manual control are used. However, more and more human-machine automated systems are being used. They have a more flexible structure and advanced functions, moreover, in recent years there has been a rethinking of the problem of automation and instead of optimizing individual functions and processes, I increasingly consider the processes in a complex, with a systematic approach to solving the problem as a whole.

**Analysis of the state of the matter.** Therefore, a further increase in the requirements for the efficiency of energy production dictates the need for comprehensive automation of technological processes in power supply systems due to the automation of processes at the level of transformation of parameters and the type of electricity. At the same time, the spatial and hourly

distribution of processes in power supply systems in combination with discrete manual control makes the solution of this problem quite difficult. In these conditions, a systematic approach opens up wide opportunities, which allows the power supply systems to be divided into separate interconnected elements that interact to achieve the set global goal. Its application makes it possible to combine electrical networks into a single flexible geoinformation control system of an intelligent type, optimization of modes which opens up opportunities for using huge reserves, for the rational use of material and energy resources.

**Research methods.** As the basis for the construction of such systems, multilevel hierarchical distributed structures are considered, the effectiveness of which has been confirmed by practice. In such structures, the functions of higher coordination and organizational management, in general, are performed by the upper level of the hierarchy. In the power supply systems of the power association control system.

As an element of the power system, the power supply system, together with other consumers connected to the power center, form it and the resulting load schedule, as well as the laws of voltage regulation and reactive power compensation. Optimization of the complex operation requires coordinated management of the operating modes of all consumers using a set of local and global criteria. On the basis of local criteria, optimal conditions

for the operation of individual local objects are provided, and through global criteria, the conditions for the operation of the system as a whole. At the same time, in the event of a conflict situation, priority is given to the global criterion. The presence of these features necessitates the use of system control of modes in power supply systems of multilevel multicriteria control systems built on a multi-loop hierarchical principle. Decision-making processes in such systems have a wide range - from very short management actions to planning processes for a long period. For these reasons, in the systems under consideration, there are differences in the duration of cycles, criteria and control parameters at different territorial and hourly levels.

Analysis of the functional tasks of power supply systems indicates the possibility of integrating their control systems into the systems of energy complexes. However, as evidenced by the results of the analysis, a simple transfer of the ideology of constructing control means for energy systems at higher levels cannot be applied to power supply systems due to the operational, technological and socio-economic characteristics of power supply systems.

The problems of controlling the modes of power supply systems include the lack of a sufficient number of control channels. This is a small number of telephone channels of communication with individual distribution substations or transformer substations, focused on performing simple functions of discrete control. In some cases, VHF or GSM communication channels are used in a limited frequency range. It should also be noted that there are no continuous control systems for 0.4-10 kV facilities.

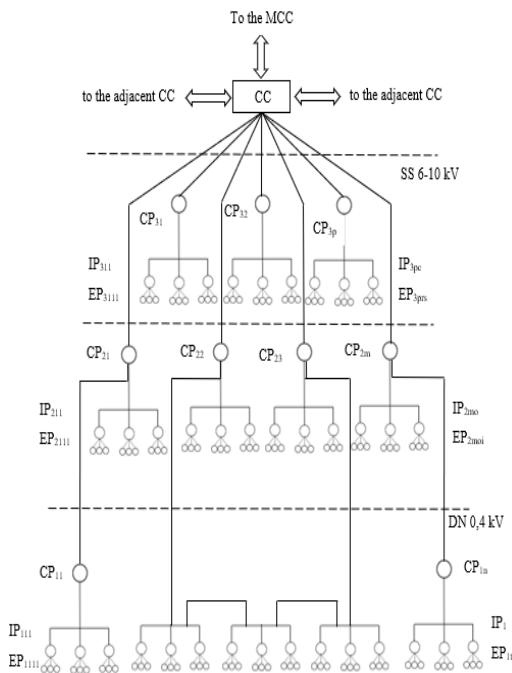


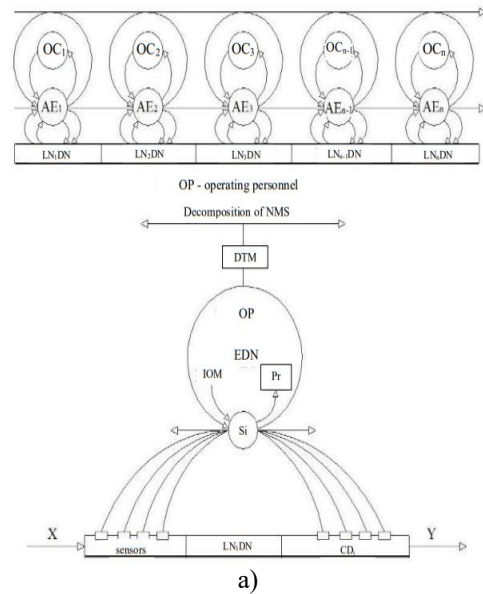
Fig. 1. Topology of the control system

The use of the considered basic approaches in combination with the standardization of the elements of the control system makes it possible to use the hierarchical integrated principle of constructing a control system, which provides the possibility of unifying the elements and modifying its software. At the same time, the use of microprocessor tools and computer technology makes it possible to automate not only technological processes, but also the processes of processing and storing information.

To build such systems, it is necessary to solve three main problems:

- selection of a rational structure of a flexible system that ensures the performance of the necessary functions with specified quality indicators;
- selection of the structure of the control system, which ensures the optimization of the number of connections and the number of control points;
- development of an algorithm for the functioning of the control system, which ensures the achievement of the specified numerical characteristics.

The developed concept of control over the modes of power supply systems is based on a hierarchical multilevel aggregated structure. At the lower levels, the control system is represented by a large number of local systems, which are characterized by relative independence of functioning, adapted for use in the nodes of network loads. For them, the most effective is the stabilization of the parameters of the technological process. The structure of such control systems has a distributed character. Figure 2. Its active elements, which carry out the correction of the mode parameters, as close as possible to the control objects. ideally, they are installed directly at the load nodes of the networks.





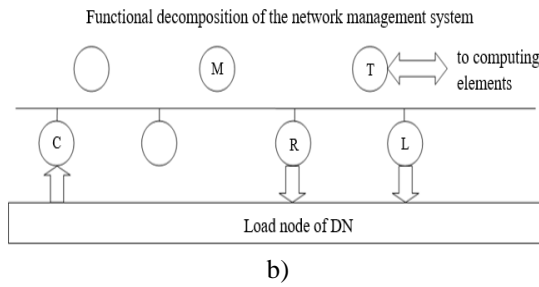


Fig. 2. Decomposition of the network management system: a) structural; b) functional

Decomposition of the network management system: a) structural; b) functional; C - collection and processing of information; R - regulation; L - logical control; M - manual input and display of information; T - transmission of information; Pr-processor; IOM - input-output module; OC - object controller; DTM - data transmission multiplexer.

**Results.** In the considered control system, a number of sequential decision-making levels are distinguished, at each of which the information is processed, which comes from the elements of the lower level. Their goal is to develop coordinating actions for the elements of this level. The point of allocation of decision-making levels is made in accordance with the vertical decomposition of the control system. Based on the results of modeling the modes and in accordance with [7], the following control levels have been identified in power supply systems: control point, transforming substation, distribution substation, 35-110 kV substation and power supply systems in general. Each of them has its own duration, criteria and control parameters. The allocation of functional tasks, the solution of which is not related to other tasks of this level, corresponds to the horizontal decomposition of the control system. The horizontal decomposition of the lower levels of the control system corresponds to the allocation of local control systems, which can be controlled in an autonomous mode. The number of local control systems is determined by the structure of the networks, the technical content and the territorial location of its elements. The functioning of local systems is determined by the control algorithm, which characterizes the sequence of operations and the transformation of an input signal into an output signal. At the same time, information transformation operations that are established can be considered as algorithmic functions, which are a kind of modules from which a control algorithm can be added. First of all, this applies to typical elements. Those that perform certain algorithmic functions. The signs of the typification of the control system of its elements can be their orientation, information power, target orientation, and so on. In the work, for the typification of control systems and its elements, an objectively oriented feature was adopted, which provides the possibility of static analysis

and forecasting of the development of the distribution network control system, the management of individual objects, as well as the most accurate state of the list of necessary algorithmic functions, to assess the composition of the control system parameters, to formulate the basic requirements to technical means. In these conditions, the concept of a typical control system is reduced to a typical functional structure of a control system, which can be represented by a display:

$$F: X \times \bar{f} \rightarrow Y, \quad (1)$$

where F is a set of algorithmic functions.

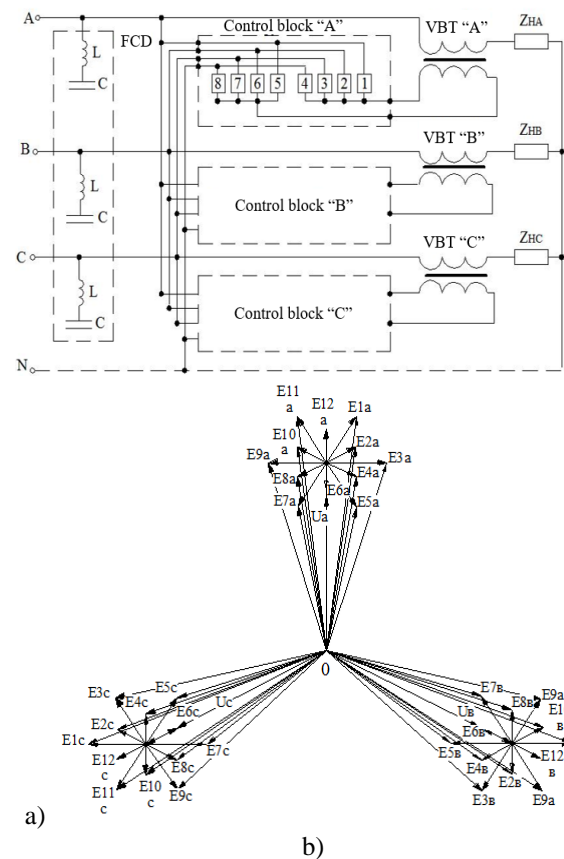


Fig. 3. An active element based on a phase-switched booster transformer: a) connection diagram, b) vector diagram

The considered general regularities of the functioning of control systems determine the basic requirements for the algorithms for the functioning of local control systems. Further detailing of the algorithm for the functioning of the control system can be performed using their contour decomposition, which is based on the presence in the local control system of several nodes for collecting and processing information, connected in a certain way by active elements. At the same time, decision-making in the developed control system is based on a multilayer principle, according to which a complex control problem is divided into a family of sequentially related more substantive problems. The decision making in each previous layer forms the basis for the decision in



the subsequent layer. Solving a problem, in general, is a consistent solution to its constituent problems. This corresponds to the temporal distribution of the operation to control the parameters of the network mode. In this case, the information nodes carry out a cyclical exchange of information between the load nodes and active elements. Each cycle uses additional information that is obtained over longer time intervals. As such, signals from active elements, all sorts of static data, and so on are used.

**Conclusion.** In general, the proposed concept of controlling the modes of power supply systems makes it possible to take into account their features associated with taking into account adjacent power supply systems. In such conditions, taking into account the noted features makes it necessary to separate the power supply systems into an independent smart-grid city life support system. It includes an electric power system, power supply systems, representing a set of power plants with a control system, built on the basis of the smart-grid concept, as an integral part of the city's life support system.

The application of the considered basic provisions allows us to return to the main goal of creating technical systems - to meet the human demand for a comfortable living environment as a means of human life support.

#### References

1. Назаров В.В. Концепция Smart Grid и реальная энергетика/В.Назаров//Энергетика и электрификация. 2013. №6. Стр. 12-15.
2. Шидловский А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. М.: Наука думка, 1985. 268 с.
3. Голуб И.В., Зайцев Д.А., Тыршу М.С. Режимы источника реактивной мощности, управляемого фазосдвигающим трансформатором. "Проблемы региональной энергетики. 2018. №2. С. 62-69
4. Ясутис А.В. Анализ работы вольтодобавочного трансформатора с тиристорным управлением. Сб. работ Всесоюзного. заочн. политехнич. ин-та. М. 1973, вып. 84. С. 146-156
5. Говоров Ф.П. Режимы работы и особенности электромагнитных процессов повышающего трансформатора с тиристорным управлением: Дис. Кандидат технических наук: 05.09.01 Л, 1983. 229 с.
6. Говоров Ф.П., Говорова Е.В., Дюмин Э.С. Интеллектуальные гибкие системы управления режимами работы городских электрических сетей. Управляемые электропередачи, вопросы энергетической безопасности, экономики энергетики, экологии, ВИЭ, развития энергосистем. Академия Наук Модовы. 2017. Вып. №9 – юбилейный. С. 163-191.

7. Говоров Ф.П., Говоров В.Ф., Романова Т.И. Управление потоками электрической энергии в сетях с помощью фазопереключающих вольтодобавочных трансформаторов. "Проблемы региональной энергетики". 2016. №3. С. 39-45.
8. Hovorov P., Novskiy V., Hovorov V., Kindinova A. Management of modes of distributive electric networks of cities under conditions of weak correlation of graphics of active and reactive power. Технічна електродинаміка. 2020. №4. P. 60-66.

#### References (Transliterated)

1. Nazarov V.V. Konceptsiya Smart Grid i real'naya energetika / V. Nazarov // Energetika i elektrifikaciya. 2013. №6. P. 12-15.
2. SHidlovskij A. K. Povyshenie kachestva energii v elektricheskikh setyah / A. K. SHidlovskij, V. G. Kuznecov. M.: Naukova dumka, 1985. 268 p.
3. Golub I.V., Zajcev D.A., Tyrshu M.S. Rezhimy istochnika reaktivnoj moshchnosti, upravlyaemogo fazosdvigayushchim transformatorom. "Problemy regional'noj energetiki. 2018. №2. P. 62-69
4. YAsutis A.V. Analiz raboty vol'todobavochnogo transformatora s tiristornym upravleniem. Sb. rabot Vsesoyuznogo. zaochn. politekhnich. in-ta-M., 1973, vyp. 84. P. 146-156
5. Govorov F.P. Rezhimy raboty i osobennosti elektromagnitnyh processov povyshayushchego transformatora s tiristornym upravleniem: Dis. Kandidat tekhnicheskikh nauk: 05.09.01 L, 1983. 229 p.
6. Govorov F.P., Govorova E.V., Dyumin E.S. Intellektual'nye gibkie sistemy upravleniya rezhimami raboty gorodskih elektricheskikh setej. Upravlyaemye elektroperedachi, voprosy energeticheskoy bezopasnosti, ekonomiki energetiki, ekologii, VIE, razvitiya energosistem. Akademiya Nauk Modovy. 2017. Vypusk №9 – yubilejnyj. P. 163-191.
7. Govorov F.P., Govorov V.F., Romanova T.I. Upravlenie potokami elektricheskoy energii v setyah s pomoshch'yu fazopereklyuchayushchih vol'todobavochnyh transformatorov. "Problemy regional'noj energetiki". 2016. №3. P. 39-45.
8. P. Hovorov, V. Novskiy, V. Hovorov, A. Kindinova Management of modes of distributive electric networks of cities under conditions of weak correlation of graphics of active and reactive power. Tekhnichna elektrodinamika. 2020. №4. P. 60-66.

### Усовершенствованная поведенческая модель нагрузки бытового потребителя-просьюмера

**Александр Кулапин,**

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, Украина, e-mail: [Oleksandr.Kulapin@ieeee.khpi.edu.ua](mailto:Oleksandr.Kulapin@ieeee.khpi.edu.ua)

**Константин Махотило,** к.т.н., с.н.с.,

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, Украина, e-mail: [Kostiantyn.Makhotilo@khpi.edu.ua](mailto:Kostiantyn.Makhotilo@khpi.edu.ua)

**Аннотация.** В работе проведен анализ различных подходов к моделированию суточных графиков электрической нагрузки и предложен метод усовершенствования поведенческой модели нагрузки бытовых потребителей типа «снизу-вверх». В основу метода положено усреднение сгенерированных случайных графиков нагрузки для заданного типа домохозяйств в определенный день года. Усреднение проводится по типу дня недели и продолжительности светового дня. Построены модели для двух типов домохозяйств, которые точнее передают спорадический характер потребления просьюмеров по сравнению с типовыми графиками нагрузки.

**Ключевые слова:** бытовое электропотребление, моделирование нагрузки, просьюмер.

### Improved behavioral load model of the household prosumer

**Oleksandr Kulapin,**

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: [Oleksandr.Kulapin@ieeee.khpi.edu.ua](mailto:Oleksandr.Kulapin@ieeee.khpi.edu.ua)

**Kostiantyn Makhotilo,** Ph.D., Senior Researcher,

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: [Kostiantyn.Makhotilo@khpi.edu.ua](mailto:Kostiantyn.Makhotilo@khpi.edu.ua)

**Annotation.** The paper analyses various approaches to modelling electrical daily load profiles and proposes a method for improving the bottom-up behavioural model of the household load. The method is based on averaging of the generated random load profiles for a given type of household on a certain day of the year. Averaging is carried out according to the type of day of the week and the length of daylight. Models were built for two types of households, which more accurately represent the sporadic nature of prosumers consumption compared to typical load profiles.

**Keywords:** household consumption, load modelling, prosumer.

**Введение.** В последнее десятилетие задача управления работой растущего числа волатильных возобновляемых источников энергии, таких как фотоэлектрические системы (ФЭС), а также развивающимся резко переменным спросом на электроэнергию со стороны таких новых потребителей, как электромобили и индивидуальные системы хранения энергии, стала особенно актуальной. Решению этой задачи посвящены многие исследования с различными подходами [1], анализ которых показывает, что бытовое потребление и генерация энергии в жилом секторе все еще остаются недостаточно изученными и плохо управляемыми процессами в энергосистеме. При этом энергосистемы сталкиваются с появлением нового участника – просьюмеров, т.е. бытовых абонентов, способных не только потреблять, но и генерировать энергию.

В отличие от промышленности, сельского хозяйства и транспорта, сектор бытового электропотребления характеризуется намного большим разнообразием влияющих факторов и внутренних особенностей. Помимо климата,

физических характеристик жилья и используемых электроприборов на бытовое потребление энергии решающим образом влияет поведение людей [2]. Эти же факторы влияют и на мощность, отдаваемую в сеть от индивидуальных крышных ФЭС.

Традиционные методы моделирования потребителя энергии опираются на данные о всех имеющихся у него электроприемниках или о предыстории его общего энергопотребления. По ним рассчитывается или прогнозируется будущее потребление энергии. Эти методы имеют разные сильные и слабые стороны, а также возможности применения, однако все они требуют большого объема точных и детализированных данных о потребителе. В случае домохозяйств сбор таких данных затруднен как большим их количеством, так и требованиями конфиденциальности. А с появлением таких новых типов потребителей, как электромобили и домашние системы хранения энергии, проблемы связаны и с отсутствием достаточно глубокой предыстории данных об их нагрузке.

В связи с этим актуальным становится развитие методов моделирования нагрузки бытовых потребителей и просьюмеров, способных точно передавать особенностей графиков нагрузки существующих потребителей и новых, недавно подключившихся к энергосистеме.

**Методы моделирования.** В целом методы моделирования бытового потребления энергии можно разделить на две категории, условно обозначаемые: «сверху вниз» и «снизу-вверх» [3]. В моделях типа «сверху вниз» используется оценка общего потребления энергии в жилом секторе энергосистемы страны или региона, которая с участием дополнительных параметров преобразуется в данные о потреблении энергии конкретным бытовым потребителем. В них относительно легко могут учитываться изменение таких макроэкономических показателей, как цена на энергию и доходы жителей, а также темпы развития технологий и изменение климата. Модели типа «снизу-вверх», напротив, описывают энергопотребление отдельных потребителей или жилых домов, а затем экстраполируют эти результаты на уровень города, региона или страны [4]. Такие модели опираются на предысторию потребления энергии.

Ярким примером моделей типа «сверху вниз» являются типовые графики электрической нагрузки [5,6]. Обычно они строятся по данным режимного дня или по усредненным данным репрезентативных потребителей. К этому типу моделей относится модель нагрузки потребителя-просьюмера, ранее использованная нами в [7] для моделирования работы смарт-системы коттеджного поселка с крышными ФЭС.

Однако такие модели типа «сверху вниз» могут быть и более сложными. Например, в США «Национальная система моделирования энергетики» для среднесрочного прогнозирования и анализа энергетической политики, включает эконометрическую модель потребления энергии жилищным фондом [6]. Эта модель учитывает парк бытовой техники, состояние наружных ограждений зданий и развитие распределенной генерации. Компонент парка бытовой техники оценивает срок службы и насыщенность ею [8]. Компонент распределенной генерации оценивает стоимость ФЭС, их производительность и степень распространения.

Однако, несмотря на то, что модели типа «сверху вниз» хорошо описывают влияние макропеременных на общее изменение электропотребления, они абстрагируются от деталей внутрисуточных изменений графика нагрузки и описывают их очень приближенно [9].

При использовании подхода «снизу-вверх» объектом исследования является конечный потребитель, и основное внимание уделяется

построению моделей потребления для каждого его электроприемника [10,11]. Методы «снизу-вверх» обеспечивают высокую точность моделирования суточного графика нагрузки потребителя, но требует большого количества данных. Ранее это было серьезным препятствием к их применению, но с развитием АСКУЭ энергокомпаний и распространением разнообразных интеллектуальных систем в домашних хозяйствах объем доступных данных об электрической нагрузке конечных потребителей стремительно растет [12].

В качестве математического аппарата для моделирования нагрузки «снизу-вверх» широко используются методы регрессионного анализа. Так в работе [13] для прогнозирования потребления электроэнергии и максимальной нагрузки домохозяйства в зависимости от типа здания, количество спален и состав семьи используется множественная линейная регрессия. А в [14] предложена функциональная векторная модель авторегрессионного пространства состояний для прогнозирования спроса на электроэнергию, позволяющая агрегировать ее до уровня региональной или национальной энергосистемы. Для построения регрессионных моделей также широко используются искусственные нейронные сети [11].

Тем не менее, при исследовании режимов потребления нового абонента без истории данных о его нагрузке, как в случае моделирования работы смарт-сети просьюмеров в новом коттеджном поселке [7], построение обычных регрессионных моделей крайне затруднено. Наиболее перспективным в этом случае представляется подход, предложенный в [14]. Это – множественная регрессия, включающая поведенческие модели использования электроприборов в быту. В такой модели каждый житель домохозяйства рассматривается как независимый агент, движимый своими желаниями и привычными шаблонами поведения.

В соответствие с психологической моделью поведения, предложенной немецким психологом Д. Дернером [15], в каждый момент времени люди принимают решения (в том числе и об использовании электроприборов), исходя из своих текущих желаний и выбирая лучшее действие из имеющихся вариантов. В поведенческой модели нагрузки [16] используются упрощенные модели желаний бытового потребителя электроэнергии. Например, каждые 5 часов у человека возникает желание поесть, а утром рабочего дня у него есть желание пойти на работу. Выбор доступных действий для человека, как потребителя энергии, стремящегося удовлетворить свои желания, зависит от имеющихся в домохозяйстве устройств. Это могут быть микроволновая печь, электрочайник, светильники, водонагреватели и т.п. Естественно,

момент возникновения желания и выбор способов его удовлетворения являются случайными величинами с определенными законами распределения вероятностей.

Как показали исследования, использованный в модели [16] подход хорошо подходит для формирования реалистичных профилей нагрузки разнообразных домохозяйств, точно отражающих особенности их реальных графиков нагрузки: расположение и форму максимумов и минимумов нагрузки, количество и величину скачков нагрузки, коэффициенты формы и заполнения графиков. На его базе создан и развивается программный комплекс с открытым исходным кодом «Генератор электрических нагрузок LPG» [17].

**Усовершенствованный метод построения графиков нагрузки потребителей-просьюмеров.** Предметом данного исследования являются модели бытовой нагрузки, подходящие для решения задачи управления работой узла smart-сети коттеджного поселка просьюмеров. Ранее в [7] для этого использовались типовые графики нагрузки среднестатистической семьи, состоящей из двоих работающих взрослых и двоих детей. Однако эти графики являются слишком сглаженным, что может привести к получению алгоритмов управления, неспособных справиться с резко переменным характером реальных профилей нагрузки. Поскольку реальные архивные данные о потреблении энергии исследуемым потребителем отсутствуют, для решения поставленной задачи предложено использовать поведенческую модель нагрузки [16].

Однако, прямое использование полученных с помощью LPG графиков также не отвечает поставленной задаче. Каждый сгенерированный LPG график является случайным, уникальным и может существенно отличаться от других реализаций заполнением: величиной и временем вторичных максимумов и минимумов нагрузки (см. рис. 1). Такие отклонения могут быть связаны, например, с распределенными случайным образом решениями членов семьи приготовить пищу, постирать белье или выйти из дома. Они являются неотъемлемой частью поведенческой модели.

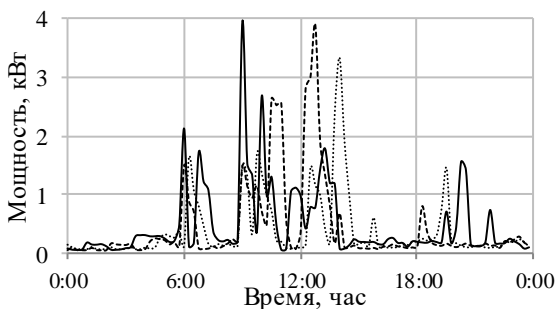


Рис. 1. Различные реализации случайных графиков нагрузки по LPG [16]

В то же время, для настройки алгоритма управления узлом smart-сети необходим повторяющийся график нагрузки, отражающий особенности реального потребления, но лишенный нетипичных отклонений. Для получения такого графика предложено усреднить в определенных временных интервалах случайные профили нагрузки, сгенерированные LPG.

Для построения модели нагрузки введено несколько уровней разбиений данных на временные интервалы. На первом уровне, весь год разбивается на интервалы времени, когда продолжительность светлого времени дня (СВД) не изменяется более чем на 15 минут. Можно считать, что в границах каждого интервала режимы использования осветительных приборов не изменяются. Для широты Харькова выделяются 24 таких интервалов длительностью 10-26 суток.

Далее, в каждом интервале выделяются рабочие и выходные дни. Для рассматриваемых бытовых потребителей характерной особенностью графика нагрузки выходного дня является наличие утреннего и дневного максимумов нагрузки, близких по величине к вечернему максимуму нагрузки рабочих дней. Несмотря на определенные различия, в данной работе не разделяются праздничные дни, субботы и воскресенья, чтобы избежать излишней детализации.

Таким образом, график нагрузки для конкретного дня года определяется как

$$P_m(d, t_k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{c,i}(d_i, t_k), \quad (1)$$

где

$P_m$  – усредненная мощность нагрузки;

$d$  – номер текущего дня года;

$t_k$  – номер текущего интервала суток;

$n$  – количество усредняемых реализаций сгенерированного графика нагрузки;

$P_{c,i}$  – мощность нагрузки согласно  $i$ -й реализации графика нагрузки, сгенерированного LPG;

$d_i$  – номер  $i$ -го дня года, относящегося к тому же интервалу продолжительности СВД, что и  $d$ .

Элементы множества  $\{d_i\}$ ,  $i = \overline{1, n}$  выбираются случайным образом среди номеров дней года, относящихся к тому же интервалу продолжительности СВД, что и  $d$ . При этом допускается повторение значений  $d_i$ , так как соответствующие им реализации случайных графиков нагрузки  $P_{c,i}(d_i, t)$  будут различаться.

Количество усредняемых реализаций сгенерированного графика нагрузки  $n$  может варьироваться в зависимости от желаемой степени сглаживания усредненного графика. Для данной

задачи опытным путем было выбрано значение  $n = 24$ .

Как видно из (1) для построения графика нагрузки сутки разбиваются на интервалы времени с постоянным шагом  $\Delta t$ :

$$t_k - t_{k-1} = \Delta t. \quad (2)$$

В соответствие с рассматриваемой задачей и возможностями LPG величина  $\Delta t$  может выбираться в диапазоне от 1 до 60 минут.

На рис. 2 представлены графики усредненной мощности нагрузки  $P_M(t_k)$ , построенные при  $\Delta t = 1$  мин,  $\Delta t = 5$  мин и  $\Delta t = 15$  мин. Как видно, чем меньше значение  $\Delta t$ , тем более неравномерным является график  $P_M(t_k)$ , тем больше колебаний нагрузки он содержит. При этом графики для  $\Delta t = 1$  мин и  $\Delta t = 5$  мин отличаются намного сильнее, чем для  $\Delta t = 5$  мин и  $\Delta t = 15$  мин. Основное отличие, проявляющееся при переходе от  $\Delta t = 5$  мин к  $\Delta t = 1$  мин состоит в проявлении на графике нагрузки колебаний, связанных со ступенчатым или релейным характером законов управления большинства мощных бытовых электроприборов.

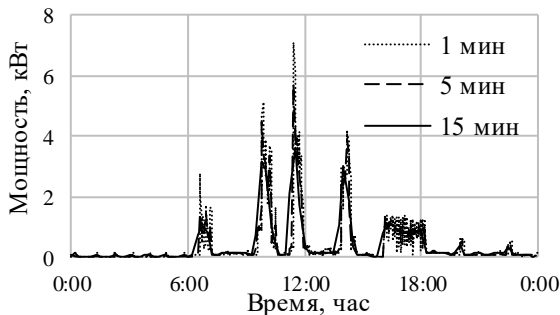


Рис. 2. Усредненные графики нагрузки с различным шагом разбиения суток  $\Delta t$

Меньший шаг  $\Delta t$  детальнее передает спорадический характер бытовой нагрузки, но он означает и большее число точек в модели  $P_M(t_k)$ , больший объем данных для хранения и обработки, а значит и более медленное моделирование процессов у потребителя. Кроме того, управление узлом smart-системы просьюмера должно проводиться с ограничением на число переключений режимов заряд/разряд системы хранения энергии, а также с учетом интервала работы рынка энергии. Поэтому в данном исследовании для модели нагрузки  $P_M(t_k)$  было выбрано значение шага  $\Delta t = 15$  мин.

Определив таким образом параметры разбиений на временные интервалы усреднения для модели (1), в работе были получены графики нагрузки для бытовых потребителей, живущих в коттеджном поселке, в харьковской области. В качестве тестовых объектов исследования были

выбраны два типа семьи. Одна состоит из двух работающих взрослых, другая из двух работающих взрослых и двух детей подросткового возраста. Состав и характеристики бытового оборудования обеих семей соответствует современным представлениям о комфорте и развитию бытовой техники. В качестве общего ограничения также принято, что все дома в коттеджном поселке оборудованы газовой системой отопления и горячего водоснабжения.

На рис. 3 показан график суточной нагрузки семьи первого типа (кривая 1) для одного сезона года, который использовался в работе [7]. Он построен по типовым графикам нагрузки большой группы бытовых потребителей. Его недостатком является слишком гладкий профиль, связанный с высоким уровнем усреднения при построении методом «сверху-вниз». Кривая 2 на рис. 3 показывает пример одной реализации графика нагрузки, сгенерированного LPG для той же тестовой семьи. Как видно, он имеет больше вторичных пиков с большим размахом и более крутыми фронтами. Кривая 3 на этом рисунке представляет пример усредненного графика суточной нагрузки рассчитанного по модели (1). Суточное потребление энергии у всех графиков нагрузки совпадает.

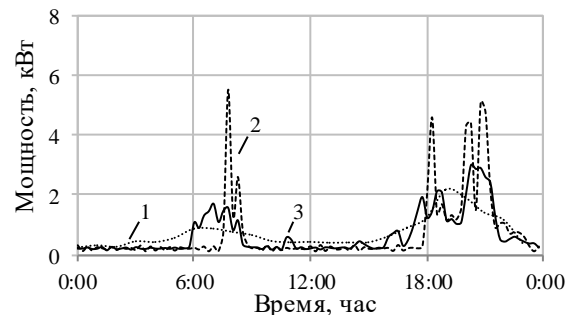


Рис. 3. Графики моделей нагрузки: 1 – типовой [7]; 2 – LPG [16]; 3 – усредненный (1)

Как видно, кривая 3 на рис. 3 занимает промежуточное положение между кривыми 1 и 2. Усредненный график содержит множество вторичных пиков, сконцентрированных в районе утреннего и вечернего максимумов, также пики в другие часы суток, характерные для графиков нагрузки домохозяйства. Это характеристика модели нагрузки очень важна при ее использовании для настройки алгоритмом управления индивидуальной системой хранения энергии просьюмера. Кривая 3 имеет такое же суточное потребление энергии, остается таким же.

С другой стороны, кривая 3 на рис. 3 в силу усреднения имеет в 2-3 раза меньший размах колебаний мощности нагрузки, чем кривая 2. Это значит, что она не передает пики нагрузки,



связанные с одновременным использованием мощных бытовых электроприборов. Тем не менее, такой недостаток предложенной модели является допустимым, так как такие резкие броски нагрузки компенсируются буферным накопителем энергии, подключенным параллельно основному литий-ионному аккумулятору в системе хранения энергии просьюмера. Так как предлагаемая модель нагрузки (1) используется для выбора алгоритма управления именно основными аккумуляторами, можно считать, что она достаточно точно передает все особенности потребления энергии просьюмером в рамках поставленной задачи.

### Выводы

Предложенный метод моделирования нагрузки бытовых потребителей «снизу-вверх» путем усреднения случайных графиков, сгенерированных поведенческой моделью, позволяет получить графики нагрузки, которые точнее передают спорадический характер бытового потребления, чем типовые графики, построенные методами «сверху-вниз». Выбранные параметры разбиения интервалов усреднения позволяют получить достаточно компактный набор данных модели и при этом сохранить особенности нагрузки в разные дни года и часы суток, необходимые для моделирования режимов работы и алгоритмов управления системой генерации и накопления энергии потребителей-просьюмеров.

### Литература

1. Siano, P. Demand response and smart grids—A survey/Renewable and sustainable energy reviews 30, 2014, p. 461-478.
2. Seryak, J., Kissock, K. Occupancy and behavioral affects on residential energy use / Proc. of the Solar conference. American Solar Energy Society; American Institute of Architects, 2003. p. 717-722.
3. Swan, L.G., Ugursal, V.I. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques / Renewable and sustainable energy reviews, 13(8), 2009, p. 1819-1835.
4. Department for Business Enterprise & Regulatory Reform. Energy consumption in the United Kingdom. London; 2007.
5. Wilkerson, J.T., Cullenward, D., Davidian, D., Weyant, J.P. End use technology choice in the National Energy Modeling System (NEMS): An analysis of the residential and commercial building sectors. / Energy Economics, 40, 2013, p.773-784.
6. Energy Information Administration (EIA), 2010c. Model documentation report: residential sector demand module of the National Energy Modeling System. Report No DOE/EIA-M067(2010)/
7. Кулапін О.В., Махотіло К.В. Моделювання смарт-мережі споживачів-просьюмерів з фотоелектричними системами / Вісник НТУ "ХПІ" –

Харків : НТУ "ХПІ", 2019.– № 14 (1339).– С. 61-66.

8. Young, D. When do energy-efficient appliances generate energy savings? Some evidence from Canada. / Energy Policy, 36.1, 2008, p. 34-46.
9. Raffio G, Isambert O, Mertz G, Schreier C, Kissock K. Targeting residential energy assistance. In: Proc. of energy sustainability conf., 2007. p. 489-95.
10. Chuan, L., & Ukil, A. (). Modeling and validation of electrical load profiling in residential buildings in Singapore. IEEE Transactions on Power Systems, 30(5), 2014, p. 2800-2809.
11. Aydinalp-Koksal M., Ugursal V. I. Comparison of neural network, conditional demand analysis, and engineering approaches for modeling end-use energy consumption in the residential sector. / Applied energy, 85(4), 2008, p. 271-296.
12. McLoughlin F., Duffy A., Conlon M. Characterising domestic electricity consumption patterns by dwelling and occupant socio-economic variables: An Irish case study / Energy and buildings, 48, 2012, p. 240-248.
13. Nagbe, K., Cugliari, J., & Jacques, J. Short-term electricity demand forecasting using a functional state space model. / Energies, 11(5), 2018, 1120, <https://doi.org/10.3390/en11051120>.
14. Swan L, Ugursal VI, Beausoleil-Morrison I. Canadian housing stock database for energy simulation. eSim conference, 2008, p. 143-50.
15. Dörner, D., Bauplan für eine Seele. 1. Aufl ed. 1999, Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Verl. 831 S.
16. Pflugradt N., Muntwyler U. Synthesizing residential load profiles using behavior simulation / Energy Procedia, 122, 2017. p. 655-660.
17. Pflugradt N. Modellierung von Wasser und Energieverbräuchen in Haushalten. Dissertation TU Chemnitz, urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-209036

### References

1. Siano, P. Demand response and smart grids—A survey/Renewable and sustainable energy reviews 30, 2014, p. 461-478.
2. Seryak, J., Kissock, K. Occupancy and behavioral affects on residential energy use / Proc. of the Solar conference. American Solar Energy Society; American Institute of Architects, 2003. p. 717-722.
3. Swan, L.G., Ugursal, V.I. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques / Renewable and sustainable energy reviews, 13(8), 2009, p. 1819-1835.
4. Department for Business Enterprise & Regulatory Reform. Energy consumption in the United Kingdom. London; 2007.
5. Wilkerson, J.T., Cullenward, D., Davidian, D., Weyant, J.P. End use technology choice in the National Energy Modeling System (NEMS): An analysis of the residential and commercial building sectors. / Energy Economics, 40, 2013, p.773-784.

6. Energy Information Administration (EIA), 2010c. Model documentation report: residential sector demand module of the National Energy Modeling System. Report No DOE/EIA-M067(2010).
7. Kulapin O. V., Makhotilo K. V. Modeliuvannia smart-merezhi spozhyvachiv-prosiuieriv z foto-elektrychnymy systemamy / Visnyk NTU "KhPI". – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019.–№ 14 (1339).–S. 61-66.
8. Young, D. When do energy-efficient appliances generate energy savings? Some evidence from Canada. / *Energy Policy*, 36.1, 2008, p. 34-46.
9. Raffio G, Isambert O, Mertz G, Schreier C, Kissock K. Targeting residential energy assistance. In: Proc. of energy sustainability conf., 2007. p. 489–95.
10. Chuan, L., & Ukil, A. (). Modeling and validation of electrical load profiling in residential buildings in Singapore. / *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(5), 2014, p. 2800-2809.
11. Aydinalp-Koksal M., Ugursal V. I. Comparison of neural network, conditional demand analysis, and engineering approaches for modeling end-use energy consumption in the residential sector. / *Applied energy*, 85(4), 2008, p. 271-296.
12. McLoughlin F., Duffy A., Conlon M. Characterising domestic electricity consumption patterns by dwelling and occupant socio-economic variables: An Irish case study / *Energy and buildings*, 48, 2012, p. 240-248.
13. Nagbe, K., Cugliari, J., & Jacques, J. Short-term electricity demand forecasting using a functional state space model. / *Energies*, 11(5), 2018, 1120, <https://doi.org/10.3390/en11051120>.
14. Swan L, Ugursal VI, Beausoleil-Morrison I. Canadian housing stock database for energy simulation. eSim conference, 2008, p. 143–50.
15. Dörner, D., *Bauplan für eine Seele*. 1. Aufl ed. 1999, Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Verl. 831 S.
16. Pflugradt N., Muntwyler U. Synthesizing residential load profiles using behavior simulation / *Energy Procedia*, 122, 2017. p. 655–660.
17. Pflugradt, N.; *Modellierung von Wasser und Energieverbräuchen in Haushalten*. Dissertation TU Chemnitz, urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-209036

## Modeling the influence of dustiness of photovoltaic modules on their performance in Matlab

**Danylchenko Dmytro**, PhD, Associate Professor

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine,

e-mail: [dmytro.danylchenko@khipt.edu.ua](mailto:dmytro.danylchenko@khipt.edu.ua)

**Minakova Kseniia**, PhD, Associate Professor

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine,

e-mail: [friday.marjory.johnes@gmail.com](mailto:friday.marjory.johnes@gmail.com)

**Potryvai Andrii**, student

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine,

e-mail: [potryvay.andrew99@gmail.com](mailto:potryvay.andrew99@gmail.com)

**Annotation.** A model of a maneuvering unit based on generating and accumulating capacities, which are elements of an autonomous, mobile settlement, is proposed. Generating, accumulating and maneuvering ability is analyzed. Two types of neural networks for the system of forecasting and analysis of the state of the integrated power system are analyzed. The best option is selected. The variants of placement of accumulator blocks according to the theory of reliability of electric power systems are analyzed. The role of this maneuvering unit and its fate and function in the power system are established.

**Key words:** alternative energy, integrated power system, maneuverability, solar state, autonomous settlement, neural network.

**Introduction.** A significant problem of modern models of photovoltaic systems in operation is the lack of consideration of many seemingly unimportant factors, which together have a significant impact on the performance of the system [1-2]. These factors include: cooling of the photovoltaic module (PV module) surface depending on the wind speed, consideration of the model of daily air temperature change, and consideration of the dustiness of the PV module surface. Therefore, the task of this work is to obtain a model that will take into account the above parameters, its implementation in Matlab, simulation based on data from a real solar power plant (SPP) and comparison of simulation results with the observed during the year generation data.

### Formation of the SPP model.

*Model of the active solar radiation.* To describe the acting solar radiation on an arbitrarily oriented surface  $\beta$  with azimuth  $\gamma$  we use the model described in [3]:

$$P_{PV} = \frac{FF T_{ref}^* [I_{SC} + k_1 (T_{FM} - T_{ref})] [V_{OC} + k_V (T_{FM} - T_{ref})]}{G_{ref} \ln(10^6 G_{ref})} N_{FM} \eta_{conv} G \ln(10^6 G) / T_{FM} \quad (2)$$

where  $N_{FM}$  – number of PV module in SPP;  $FF$  - fill factor of volt-ampere characteristic (VAC);  $T_{ref}$ ,  $G_{ref}$  – values of temperature and illumination of PV module under standard conditions;  $k_1$ ,  $k_V$  – temperature coefficients of shortcircuit current (CC) and no-load voltage (OC) of PV module;  $\eta_{conv}$  – efficiency of PV module with maximum power controller;  $G$  – current insolation level,  $W/m^2$ ;  $T_{FM}$  – current temperature of PV module.

The filling factor of the VAC is determined with the help of the technical data of the PV module by the formula:

$$I_{\text{сум}}^{\beta\gamma} = I_{\text{np}}^{\beta\gamma} + I_{\text{розс}}^{\beta\gamma} + I_{\text{відобр}}^{\beta\gamma} = I_{\text{np}}^{\text{гор}} \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} + I_{\text{розс}}^{\text{гор}} \frac{1+\cos\beta}{2} + \rho I_{\text{відобр}}^{\text{гор}} \frac{1-\cos\beta}{2}, \quad (1)$$

where  $I_{\text{np}}^{\beta\gamma}$ ,  $I_{\text{розс}}^{\beta\gamma}$ ,  $I_{\text{відобр}}^{\beta\gamma}$  - is the total, direct and scattered radiation from clouds, aerosols, and reflected radiation from the ground surface to the slanted surface, respectively;  $I_{\text{np}}^{\text{гор}}$ ,  $I_{\text{розс}}^{\text{гор}}$ ,  $I_{\text{відобр}}^{\text{гор}}$  - the same for the horizontal surface;  $\theta_z$  – is the zenith angle of the Sun;  $\rho$  - albedo of the Earth's surface.

*Model of the generating unit.* To simulate the operation of photovoltaic modules, we use the model proposed in [4]. Its main disadvantage is the use of a constant solar coefficient, which is proposed to eliminate by using a qualifying expression. The improved formula has the form:

$$FF = \frac{I_{MPP} V_{MPP}}{I_{SC} V_{OC}} \quad (3)$$

where  $I_{MPP}$ ,  $V_{MPP}$  – nameplate values of PV module current and voltage at the point of maximum power under standard conditions;  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  – nameplate values of short-circuit current and of PV module CC voltage under standard conditions.

The energy converters are based on simplified models. A standard block from the Simulink library was used to account for the Maximum Power Point Tracker (MPPT). The inverter model is based on ideal voltage

and current sources.  $R_{inv}$  and  $R_{pr}$  are introduced to account for internal losses in the inverter and in the connection cable from the batteries.

Simulation of the electrical load is based on a probabilistic-statistical model, which is calculated by the formula:

$$P_{pi} = \bar{P}_i + \beta\sigma(P_i) \quad (4)$$

where  $P_{pi}$ ,  $\bar{P}_i$  - design active load and mathematical expectation of the load at the  $i$ -th hour of the daily schedule;  $\beta$  - calculation reliability coefficient, determines the probability with which the random values of the load will remain less than the adopted design value of  $P_{pi}$ ;  $\sigma(P_i)$  - average deviation for the  $i$ -th degree of the daily schedule.

*Model of a storage unit.* The modeling of the storage battery (SB) is based on the method proposed by Oliver Tremblay and Louis Desent [5]. The basis for the model is the generalized Shepherd's ratio and is given by the equation:

$$V_{batt} = E_0 - Ri - \frac{KQ}{(Q - \int idt)} + A \exp(-B \int idt)$$

where  $\int idt$  - actual level of SB charge (A\*h);  $R$  - internal resistance of SB (Ohm);  $V_{batt}$  - voltage of SB (V);  $i$  - battery current (A);  $A, B$  - factors characterizing the voltage drop value during exponential discharge zone (V) and inverse value of AB capacity at the end of exponential discharge zone (A\*h)<sup>-1</sup>;  $K$  - polarization resistance (Ohm).

*PV module heating model.* The PV module heating block consists of two models: the ambient temperature and the surface temperature of the solar panel. The model of daily variation of air temperature for northern latitudes has a number of its own features. The key feature is to take into account the effect of wind speed, which does not significantly affect the modeling of the SPP located, for example, in Kharkov, but makes it possible to obtain more accurate results. It should be noted that, unlike wind speed, the temperature change for the latitudes in which most of Ukraine is located have a pronounced diurnal temperature variation, which can be determined using the expression:

$$T(t) = \bar{T} + 0,5\Delta T \cos[2\pi(t_{micu} - t_{max})/t_{nep}], \quad (6)$$

where  $\bar{T}$  - mean daily air temperature, °C;  $\Delta T$  - daily amplitude of air temperature, °C;  $t_{nep}$  - period of air temperature change, h;  $t_{max}$  - current time of maximum temperature, h;  $t_{mecm}$  - local solar time, h.

Significant influence on the efficiency of generation is observed from the operating temperature of PV module when operating in conditions of high insolation. The approximating dependence of PV module surface temperature exceedance is determined depending on insolation and wind speed is determined by the formula:

$$\Delta T_{FM} = 0,0283G - 0,0058GV + 0,0005GV^2 \quad (7)$$

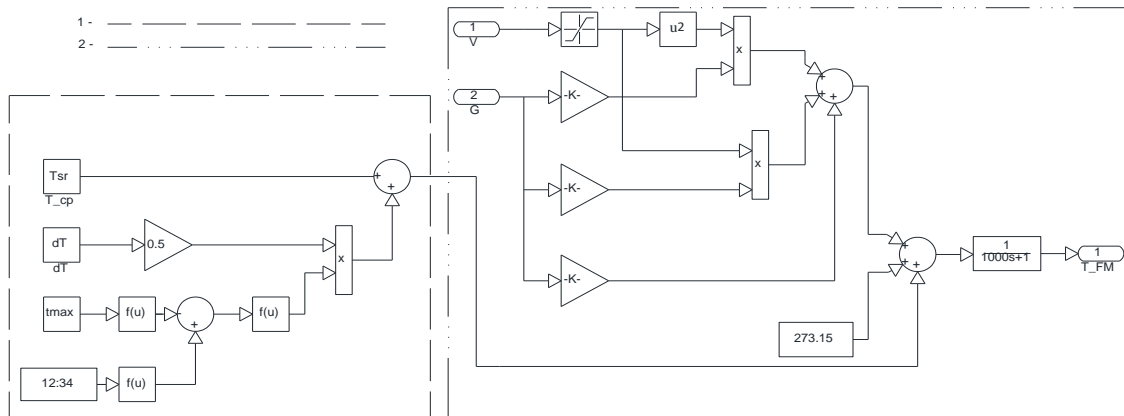


Fig. 1. PV module heating model:  
 1 - Model of daily temperature change; 2 - Model of PV module surface heating

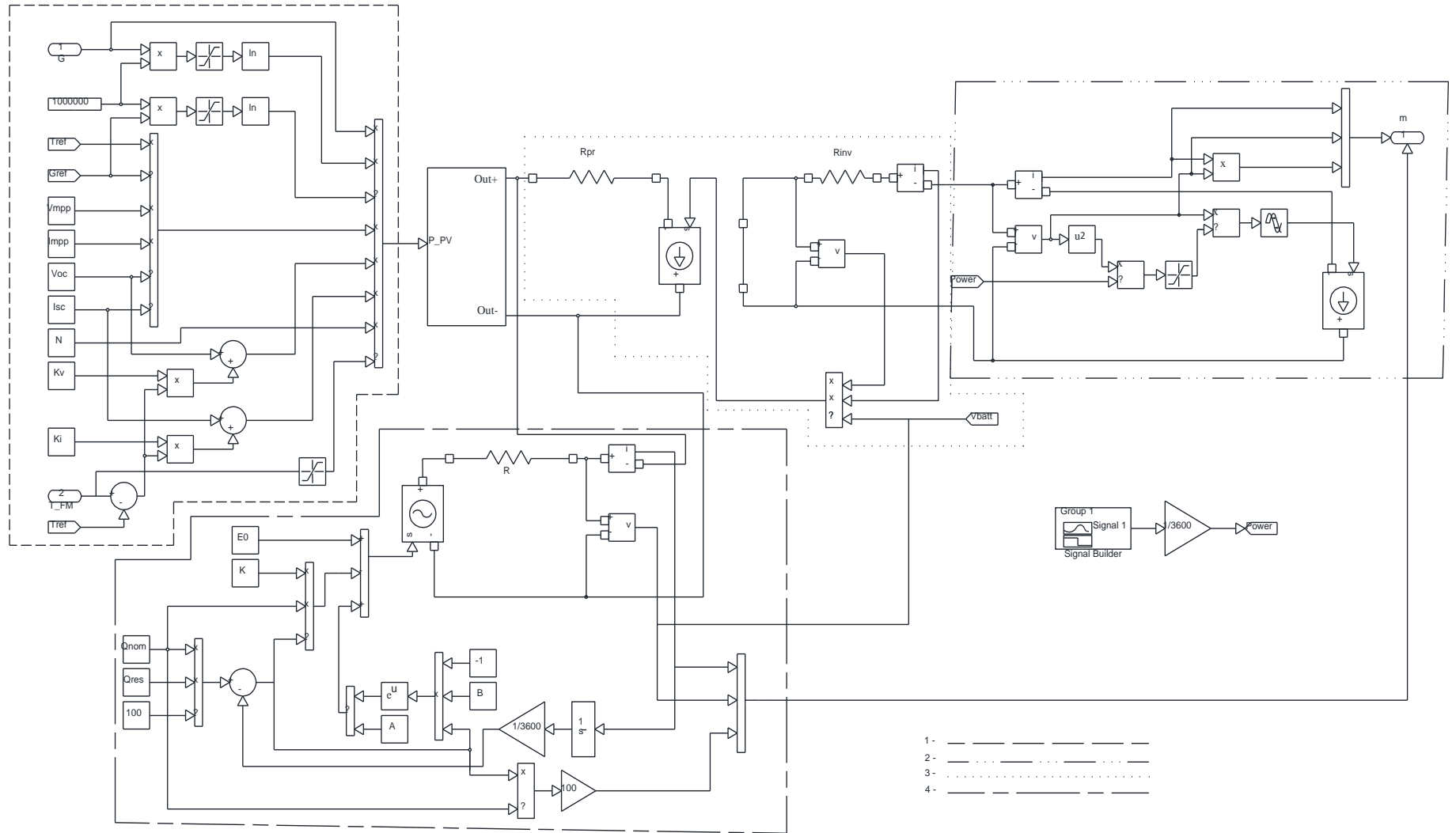


Fig. 2. Diagram of mathematical model of converters: 1. PV module; 2. Load; 3. Inverter; 4. SB

A generalized model is shown in Figures 1 and 2. Accounting for the dustiness of the PV module surface.

The model described above shows insufficiently high accuracy for modeling the operation of the SPP under operating conditions. To improve the proposed model, it was decided to implement a block to account for the influence of PV module surface contamination on the performance of the system. This issue was considered in the works of Kolomiets [8-9], which indicated that the most common type of PV module contamination is dust (accumulation of solid particles with a diameter less than 500 microns). Observations with SPP suggest that the change in the amount of dust deposited on the PV module surface can be described by a slowly growing exponent. Therefore, the basis for the model is the formula:

$$N_{\text{пыль}}(t) = N_0 e^{rt}, \quad (8)$$

where  $N_0$  – is the initial amount of dust on the surface;  $r$  is the rate of growth of the amount of settling dust.

The air humidity has a significant influence on the rate of growth of the amount of settling dust, which must be taken into account to form an accurate graph:

$$r = \frac{((\rho-100)*-1)dN}{NDt} \quad (9)$$

where  $\rho$  – is the air humidity at the selected time of day.

Since sunlight is electromagnetic radiation, it is fair to use the Bouguer-Lambert-Bera law as the basis for calculating the energy absorbed by dust:

$$G_{\text{втрач}} = G_0 e^{-\left(N_0 e^{\frac{((\rho-100)*(-1)dN}{NDt}t)}\right)x}$$

The presence of precipitation significantly affects the amount of dust deposited on the surface of the PV module, so there is a need to create a block to account for the change in the influence of the dustiness of the PV module on the performance of the SPP depending on the amount of precipitation. This dependence is presented in the graph in Fig. 3 [6].

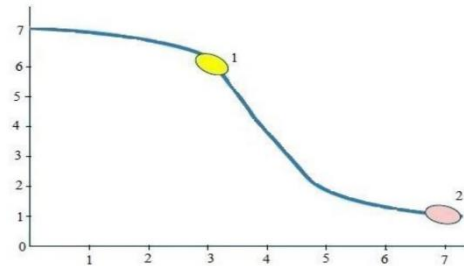


Fig. 3. Influence of atmospheric precipitation on the reduction of PV module energy losses: Vertical axis - loss of PV module capacity,%, horizontal axis - amount of precipitation, mm; 1 - beginning of intensive cleaning; 2 - point after which there is no cleaning

Test experience shows that in the range from 3 to 7 mm of precipitation the most effective cleaning of the PV module surface occurs, but even in such conditions there is no complete elimination of contamination. This is explained by the formation of dust accumulations, the removal of which becomes more and more difficult each time, and the contamination process in the next unit of time begins with a higher level of contamination.

To simplify work with the graph, it is proposed to implement it through two block models, because it can be divided into two zones, which can be described by standard functions.

The first (from 0 to 2.9 mm of precipitation) will be described by the formula:

$$\eta_{\text{втрач.уточ}} = \eta_{\text{втрач}} - \frac{\sqrt{Q}}{2} \quad (10)$$

where  $\eta_{\text{втрач}}$  – is the percentage of the energy from that reported to the surface, which is absorbed by the dust layer;  $Q$  – is the precipitation level at time  $t$ .

The second (from 2.9 to 7 mm) is described by the formula:

$$\eta_{\text{втрач.уточ}} = \eta_{\text{втрач}} e^{-\left(\frac{dQ}{Qdt}\right)x} \quad (11)$$

The function matching is done by means of a comparison unit, which in our case compares the value with the constant (2.9) and directs the signal to the appropriate function.

The implementation of the above proposed functions is shown in Figures 4 and 5.

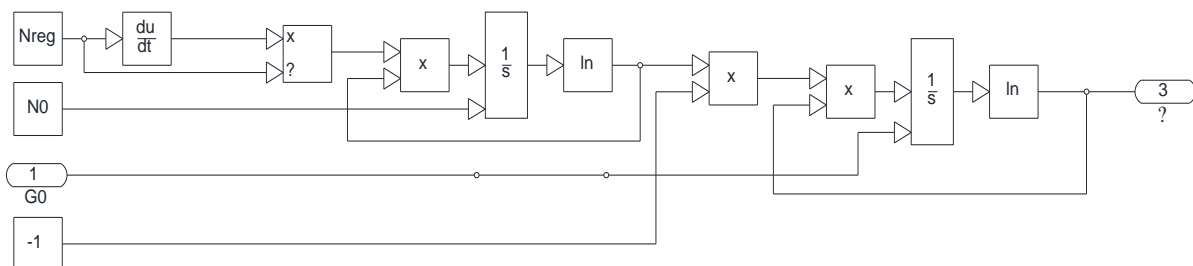


Fig. 4. Implementation of the block of influence of surface dustiness on PV module generation



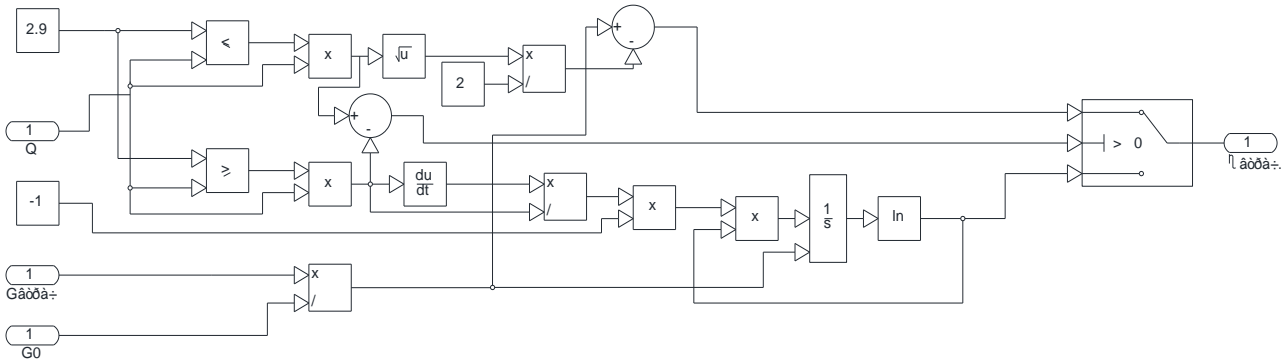


Fig. 5. Implementation of the block of changing the effect of the dust layer on the productivity depending on the precipitation

*Simulation.* To check the performance of the proposed simulation model, the conditions of the city of Chuguev (geographical coordinates 49° 50'07" N, 36° 40'32" E) were chosen for a typical summer day of the year (June 21).

A private SPP is taken as a modeling object. The solar panel is based on polycrystalline photovoltaic modules ALM-340P-144, 9BB. The hybrid inverter IMEON 9.12 is installed. The solar power plant under consideration has no mechanism for automatic orientation of the solar panel to the sun.

The input data for the simulation are meteorological data from the NASA SSE 2020 database for the city of Chuguev. The albedo of the Earth's surface is assumed to be standard: 0.2 for the grass cover, and 0.8 for the snow cover. The mean daily temperature is set at 25.25 °C, the amplitude of the daily temperature change is 6.1 °C, the mean wind speed is 9 m/s, and the local time of maximum temperature is 16 hours of the day.

Figures 6-8 show the time graphs of regime parameters of PV module. In Figure 8, the graph is built taking into account the influence of dust, and surface temperature, but this did not change the appearance of the graph cardinally, because the change in dustiness is relatively slow.

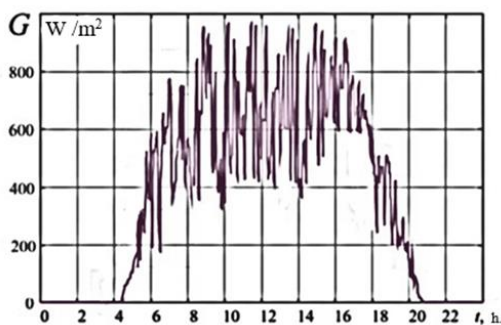


Fig. 6. Diagram of the daily variation of the total solar radiation



Fig. 7. Heating graph of the PV module surface

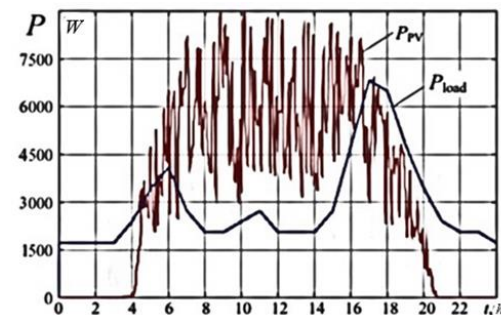


Fig. 8. graph of active energy generation by the PV module.

To better understand the contribution of the improved model, a simulation for 2020 conditions was conducted and two cases were entered into a single table: a simulation without and with the dust impact block.

The result, at first glance, was not terrific. In the first case we obtained an average energy generation of 46.173 kWh per day for the month of July, in the second - 44.17 kWh per day. July was chosen on purpose because we had data from the operation of the 9 kW SPP, which indicated that the generation in July was 43.91 kWh per day. Based on this, it can be argued that the model contributes to the development of accurate modeling of the behavior of photovoltaic systems under operating conditions. The simulation results for 2020 are shown in Figure 9.

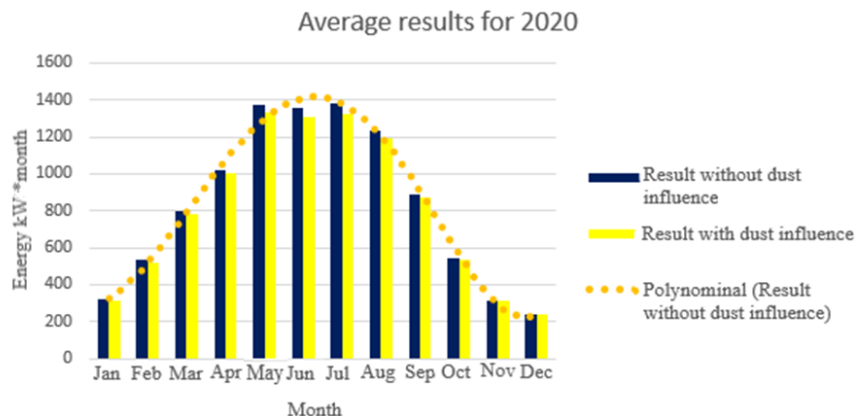


Fig. 9. Comparative graph of the two simulation results

**Conclusion.** In this work, we proposed a mathematical model to simulate the operation of the SPP under operating conditions and modernized by implementing a block model to account for the effect of dustiness of the PV module surface on its productivity for the Matlab environment.

The efficiency of this model was tested on the example of a real object. The effectiveness of the model is confirmed by an increase in modeling accuracy of 4.34%.

The data obtained in modeling allows to increase the accuracy of pro-forecasting of plant generation so as to give recommendations for effective operation of the SPP and opens up the possibility of expanding the modeling of dust behavior on the surface of the PV module and its impact.

## REFERENCES

1. Ярмухаметов У. Р., Ахметшин А. Т. Имитационное моделирование режимов работы солнечных установок с фотоэлектрическими преобразователями в зависимости от внутренних и внешних факторов в среде Matlab/Simulink. Вестник КрасГАУ. 2014. №8. С. 195-200
2. Иванчура В. И., Краснобаев Ю. В., Пост С. С. Имитационная модель автономной системы электропитания. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2014. С. 791-
3. Liu B.Y.H., Jordan R.C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator //ASHRAE Journal. 1961. V. 3. P. 53-59.
4. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2013. 910 p.
5. Jones A.D., Underwood C.P. A thermal model for photovoltaic systems. Solar Energy, 2001, vol. 70 (4), pp. 349-359.
6. Danylchenko D. Optimization of accumulation units in a mobile, autonomous cottage settlement as a part of maneuvering system / Danylchenko D., Potryvai A. // Energy. Series: "Modern problems of power engineering and ways of sloving them". - Georgia, Tbilisi. - № 4 (96). Part 1. 2020.. С. 120-123.
7. Danylchenko D. Optimization of accumulation units in a mobile, autonomous cottage settlement as a part of maneuvering system / Danylchenko D., Potryvai A. // Energy. Series: "Modern problems of power engineering

and ways of sloving them". - Georgia, Tbilisi. - № 4 (96). Part 1. 2020. С. 120-123.

8. Рубаненко О. О. Визначення генерування ВДЕ з використанням штучних нейронних мереж / Рубаненко О. О., Данильченко Д. О., Тептя В. В. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. № 1 (1) 2020
9. Tremblay O., Dessaint, L.A., Dekkiche, A.I. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. pp. 284-289.
10. Tremblay O., Dessaint, L.A. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. World Electric Vehicle Journal, 2009, vol. 3, pp. 1-10.
11. Коломиец Ю.Г., Тарасенко А.Б., Тебуев В.В., Сулейманов М.Ж. Исследование влияния различных видов загрязнений на эффективность эксплуатации солнечных энергоустановок // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(04-06):12-24.
12. Коломиец, Ю.Г. Исследование влияния затенения на эффективность эксплуатации солнечных энергоустановок в условиях плотной городской застройки//Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2017. № 19-21. С. 16-25.
13. Sarver, T. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches [Text] / T. Sarver [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 22. P. 698-733.
14. Goossens, D. Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance [Text] / D. Goossens, E. Van Kerschaever // Solar Energy. 1999. Vol. 66. P. 277-289.
15. Данильченко Д. Розміщення акумуляючих блоків в умовах автономного, мобільного котежного селища / Данильченко Д., Потривай А.// Збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної on-line конференції «Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві». Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С. 124.
16. Fedorchuk S. Using the concept of virtual power plants to provide declared schedules for generating based on renewable energy sources. / Fedorchuk S. // Sciences of Europe. – Praha, Czech Republic, 2019. №39-1. P. 67-70.

## Solar Energy efficiency and renewable source as Georgia's energy independence

**Giga Tvauri**, Researcher at Renewable Energy Sources Laboratory (Res Lab);

Master's Student at Business and Technology University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [tvauri@live.com](mailto:tvauri@live.com)

**Nana Gendzekhadze** Researcher at Renewable Energy Sources Laboratory (Res Lab);

Master's Student at Business and Technology University, Tbilisi, Georgia, e-mail:

[gendzekhadze.nanuka@gmail.com](mailto:gendzekhadze.nanuka@gmail.com)

**Maia Melikidze**, Founder of Renewable Energy Sources Laboratory (Res Lab);

Associate Professor at Business and Technology University, Tbilisi, Georgia, e-mail:

[maia.melikidze@btu.edu.ge](mailto:maia.melikidze@btu.edu.ge)

**Annotation.** *The introductory part of this paper discusses the location of the Earth in the solar system as the only planet where life is possible. The paper discusses the use of solar energy before the twentieth and post-twentieth centuries, as well as the relevance of thermal energy concerning the present. Along with the photo electronic transformation and its advantages, the paper discusses the current energy processes in several European countries. The final part discusses the current situation in Georgia and the country's perspective on renewable energy.*

**Keywords:** *solar system, solar energy, photo electronic transformation, advantages, energy perspective, energy independent*

### Introduction

Solar energy is one of the most ecological and easily assimilated energy sources today, the main goal is to maintain an ecologically clean environment and use a resource that is inexhaustible. 21 century attempts to use solar energy are much more massive than they were in the 20, more organized and alternative for many, especially when it comes to saving the earth's natural resources, polluting the environment. The paper aims to show us the ways of utilization and its advantages. In addition to increasing visibility and awareness for each person, the aim is also to review the solar radiation situation in Georgia, examples of European countries, and their best practices and results, which in turn is a motivating source for Georgia to modify, improve and gain energy independence.

### An evolutionary path to utilization

Some scientists believe that the Earth is the only place in the solar system where life is known to be possible. The reason for the belief is considered to be a correct position of the Earth called - "Goldilocks zone", neither too close nor too far from the heat. In this zone, it is possible to obtain and utilize enough energy for the ongoing chemical and biological processes on Earth. The sun, as well as each star, generates energy during a thermonuclear reaction. It is for the utilization of this energy that mankind has been long engaged in secondary recycling, burning biomass (firewood, coal, gas, petroleum products) obtained by photosynthesis. In addition to the above mentioned, secondary recycling of solar energy is also considered to be the use of hydropower and wind energy. In the twentieth century, humans began to use non-solar-powered energy sources (nuclear energy in nuclear power plants and deep earth

heat (geysers and other heat sources). The energy was converted through various reflective systems (using thermal energy) when the sun was focused through flat or concave mirrors over a large area. Direct conversion of the energy of photons (light particles) of the sun's rays into electrical energy.

1. Use of thermal energy - With the help of this system, properly positioned mirrors reflect the sun's rays, in the center of which the boiler heats up, resulting in the generation of electricity. The given system is considered quite outdated compared to today's reality, because it requires a large area and has more complex structure. The thermal system needs more solar energy than photocells, and also fails to generate energy on cloudy days. This method is mainly used in deserts and semi-deserts.

2. Photoelectric conversion (by photocells) - Derived from the word photoelectric elements, which are also called "Solar batteries", or "Solar panels", are used to convert solar photons into electrical energy. The photocells consist of a thin plate of silicium with a small amount of phosphorus added to the top layer. This creates extra free electrons in the top layer of the plate, called N-type silicium, which has the property of emitting free electrons and is negatively charged. A small amount of boron is added to the bottom of the plate, which tends to attract electrons and is called type P electrons. In the end, Electricity will be generated. Converting sunlight into electricity takes place without any noise and it is a fast process. There are no mechanical parts that might wear out, so their service life is long. Constantly evolving technologies allow us to make photocells thinner and more flexible. Today,

there is a fastening construction, as well as a tile, which is made entirely of photocells. Which means, instead of putting photocells separately on the roof, the roof itself can be made from photocells.

### Current energy situation and solar radiation in Georgia

Over the last several years the growth rate of electricity supply has been falling behind that of electricity consumption. Over the ten years from 2007 to 2017 average growth of electricity consumption was 4.4% , however this grows was even more significant in recent years – 14.4% higher consumption growth rate is energy efficiency. Pg 35

In addition, the share of renewables in the electricity mix of Georgia is among the highest in the world (78% in 2015)- nearly 4/5 of the electricity comes from hydro (the rest from natural gas) although only some 20% of its potential is currently used. Georgia has an immense untapped potential of wind, solar, geothermal and particularly hydro resources, pg 17

Therefore, With the active involvement of the private sector, using Georgia's transit potential and other relevant factors, the country has the opportunity to create a stable and secure energy supply, which in turn will make the country more competitive. Along with improving energy independence, it is important to increase the country's energy efficiency and develop Georgia's existing energy infrastructure.

Our country has very good climatic conditions for a solar power plant to work well. It is a problem-free technology, it has no radiation, It does not harm humans or the environment. Georgia is an ideal place for a solar power station. In this study we will give an example of the eastern part of Georgia. According to the information received and confirmed by the Ministry of Environment of Georgia, the eastern part of the country is sunny on average 280 days a year.

### Experience and achievements of Europe

We would like to consider some examples of European countries in the field of renewable energy: For example, Germany has been actively investing in renewable energy since 1992, making it one of the largest producers in Europe today. Apart from Germany, the use of renewable energy plays an important role in many European countries, including the former Soviet Union. In 2015, 10% of Lithuania's energy came from renewable energy, while in 2016 this figure increased to 28%. An important part of this energy is solar energy. These numbers are growing every year. At 2020 Lithuania had capacity of 120 MW of solar power.

The EU solar market grew by 11% in 2020 with 18.7 GW of installations (info by

<https://www.solarpowereurope.org/>) Europe's total installed solar power capacity jumped from 17.1 gigawatt (GW) in 2009 to 121.6GW in 2018, according to a report released by the International Renewable Energy Agency (IRENA). Solar power continues to make a significant contribution to the overall increase in renewable energy production in Europe. The total [renewable energy produced in the continent](#) increased from 295.7GW in 2009 to 536.3GW in 2018.

Sweden, Finland, Latvia, Austria and Denmark currently produce more than 30% of their total electricity from renewable sources.

Energy profiles Europe's top three solar energy producing countries:

#### 1. Germany 50.1 GW

Leading the way in Europe, Germany is the continent's leading producer of solar energy with an installed capacity of 45.8GW in 2020. The country features among [the top solar producing countries in the world](#), behind China, the US, and Japan.

In 2018, Germany added nearly 3GW of new solar capacity. The country makes up 7.9% of the total consumption of solar power in the world.

#### 2. Italy 25 GW

Although possessing almost half of the installed solar capacity of Germany, Italy ranks second in the list of top European solar producing countries, with a capacity of 25GW in 2020. Italian government set a target of achieving 50GW of installed solar capacity by 2030.

#### 3. UK 13.1 GW

UK plans to phase out coal-fired power plants by 2025. The country is also one of the leading producers of solar power in the world.

(Info [www.nsenerybusiness.com/](http://www.nsenerybusiness.com/))

In addition to efficiency and ecology, the development of renewable energy is a big step towards to Georgia's energy independence. Martynas Nagievicius, President of the Lithuanian Renewable Energy Confederation, says that Lithuania's security is conditioned by their energy independence. It's impossible to protect the country and economics when the Russian Federation is the main supplier of electricity. This is at a time when Lithuania has long been a member of the European Union and NATO. Georgia's main energy supplier is a country that occupies 20% of its territory. We can easily check the level of solar radiation in different parts of the earth. One of the websites [www.solargis.com](http://www.solargis.com). Where we can clearly see that Georgia is one of the best not only in region, also one of the best in Europe.



Let us give the example of our friend Lithuania, which is developing in this direction, and compare data. Average level of solar radiation in Lithuania is between 900 kWh/m<sup>2</sup> and 1100 kWh/m<sup>2</sup> per year. Radiation level in the major cities of Lithuania (kWh/m<sup>2</sup> /year): Vilnius – 990, Kaunas – 1058, Klaipeda – 1062, Siauliai – 974, Nida – 1073. Under these conditions, it is possible to produce an average of 950-1050 kWh of electricity per year by using the latest PV technologies. In Lithuania, a large part of residential buildings are built that they have a special place to install solar panels. Massively upgrading old buildings to install the PV. In capital Tbilisi average radiation is 1450 kWh/m<sup>2</sup>. As we see, we've got better potential about to use sunlight as energy.

### Solar power for Georgia's energy independent

There is one question, what is needed for energy independence? The first option is large hydropower plants. Today, the population of Georgia has a negative view on the construction of hydropower plants. Even today, several HPP projects have been suspended due to public protests. The public mood about green energy is very positive. Install the PV is easy and more safe, that is why renewable energy is the only alternative for Georgia to become energy independent.

The only problem we have with massive solar energy production is the reduction of green spaces. But it is only in the area where a large number of solar panels are standing. The sun shines directly on the panel and the sun's rays do not touch the grass. However, there are places in Georgia where this is not a problem. For example, David Gareji Desert. This place is ideal for solar panel work, the panel work in this place has ideal productivity. Also, in Gardabani, 50 kilometers from the capital, according to the Ministry of Environment, sunlight is ideal. For small consumption, the panel can be installed on the southern part of any roof.

The development of renewable energy in Georgia means not only ecology, also less imports and dependence from Russia. This is a big step for the country to Europe...

### Conclusion:

1. The use of solar energy is the best energy alternative on the territory of Georgia.
2. Using the knowledge and experience of our friendly countries we can more easily develop this energy.
3. According to the sources in the study, we see that solar radiation in Georgia is the best for the development of this field.
4. Development of renewable energy in Georgia is a step towards the country's energy independence.

5. This is the best way to protect the environment. Green energy is the beautiful future of our children.

### Recommendation

For Georgia to achieve energy independence, it is necessary to take concrete effective steps that will be in full correlation with the interests of the state and the population.

This paper discusses the positive reality caused by the geographical location of Georgia, in which the country can integrate renewable energy. Also, the examples of other countries that have shown us how much benefit and progress the use of solar energy has brought in the formation of a sustainable economy.

To make the steps that the Georgian government can take easy to understand, we will consider some of them as a recommendation:

1. In one part of this paper - An evolutionary path to utilization, an alternative to the use of photocells is discussed. That is why the first recommendation is for the Georgian government to encourage construction companies with legislative and financial incentives to motivate the market for companies to build houses that are covered with solar panels. Roofing houses with solar panels will generate electricity and increase the interest and involvement of the population.
2. According to the trends of recent years, in Georgia, agro-culture and related issues are gradually becoming more relevant and important. By relying on this data, using photocells, we can get a double benefit. For more specificity: Overlapping irrigation canals with photocells will result in both an energy supply as well as a reduction in water loss that will be caused by hot days.
3. Installation of solar panels in small and remote/inaccessible settlements will eliminate the problem of long transmission lines. Due to the small population, the construction of transmission lines in these settlements is inefficient, both economically and infrastructurally.

### References

1. Article - <https://www.destatis.de/EN/Themes/Economic-Sectors-Enterprises/Energy/Production/Tables/gross-electricity-production.html>
2. Article- [https://download.terna.it/terna/Monthly%20Report%20on%20the%20Electricity%20System\\_December%202020\\_8d8c1207e54b480.pdf](https://download.terna.it/terna/Monthly%20Report%20on%20the%20Electricity%20System_December%202020_8d8c1207e54b480.pdf)
3. Interview- [https://www.youtube.com/watch?v=gEgNR\\_yFJrk&t=6s](https://www.youtube.com/watch?v=gEgNR_yFJrk&t=6s)

4. Article-

- <https://www.need.org/Files/curriculum/guides/EnergyfromtheSunStudentGuide.pdf?fbclid=IwAR3mDljMLtxAGYz8ytc9-y5y3yI8GTzLIG3XxW1FTTsdqDifglHCqGymhkk>
5. <https://www.solarpowereurope.org/>
6. [www.solargis.com](http://www.solargis.com)
7. [www.nsenerybusiness.com/](http://www.nsenerybusiness.com/)

8. Solar energy for multy family houses in Lithuania/Authors: M.Sc. Joris Nettestroth, M.Sc. Oliver Rosebrock, Kęstutis Kupšys, Vitas Mačiulis, Inga Rovbutas 2019.
9. Sustainable Energy For All In Eastern Europe, The Caucasus And Central Asia. Analysis Of National Case Studies. Alexandre CHACHINE, Consultant, Geneva– 2019



### Микротвёрдость плёнок моноантимонида эрбия

**Заур Джабуа**, доктор технических наук, профессор  
Грузинский технический университет, Тбилиси, Грузия, e-mail: z.jabua@hotmail.com  
**Акакий Гигинеишвили**, доктор физ-мат наук, профессор  
Грузинский Технический Университет, Тбилиси, Грузия, e-mail: kakogigineishvili@yahoo.com  
**Сандро Ферадзе**, магистрант  
Грузинский технический университет, Тбилиси, Грузия, e-mail: sandrikoph@gmail.com

**Аннотация.** Методом наноиндентирования впервые определена микротвёрдость кристаллических плёнок моноантимонида эрбия приготовленных на различных подложках: лейкосапфир, монокристаллический кремний, кварц и ситалл. Показано, что его микротвёрдость зависит от глубины индентирования и материала подложки.  
**Ключевые слова:** моноантимонид эрбия, плёнка, микротвёрдость, подложка

### Microhardness of erbium monoantimonide films

**Zaur Jabua**, Doctor of Science, Professor  
Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: z.jabua@hotmail.com  
**Akaki Gigineishvili**, Doctor of Science, Professor  
Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: kakogigineishvili@yahoo.com  
**Sandro Feradze**, undergraduate  
Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: sandrikoph@gmail.com

**Summary.** The method of nanoindentation for the first time determined the microhardness of crystalline films of erbium monoantimonide prepared on various substrates: leicosapphire, monocrystalline silicon, quartz and sitall.. It has been shown that the microhardness depends on the indentation depth and the substrate materials  
**Keywords:** monoantimonide of erbium, film, microhardness, substrate.

**Введение.** Моноантимонид эрбия –  $ErSb$  является перспективным материалом для термоэлектрогенераторов [1]. Часто материалы, имеющие приемлемые электрические характеристики имеют низкие механические свойства, что ограничивает и нередко делает их непригодным для практического применения, поэтому актуальным является изучение механических свойств материалов. Одним из ключевых механических свойств является микротвёрдость.

**Цель работы.** Целью работы являлась исследование микротвёрдости плёнок  $ErSb$  приготовленных двумя разновидностями вакуумно-термического испарения: испарением из двух независимых источников компонентов и дискретным испарением предварительно синтезированного объёмного материала. Технологии пленок описаны в работе [1].

**Эксперимент.** Исследуемые плёнки  $ErSb$  имели толщину 0.9–1.3 мкм, длину 5 мм, ширину 4 мм. Плёнки были однофазными и однородными, как по толщине, так и по поверхности.

Как известно твёрдость материала представляет его свойство оказывать сопротивление упругой и пластической деформации при вдавливании в него другого материала, который называется индентором. Измерения проводились на установке марки DUN-211S в режиме разгрузки-нагрузки в

диапазоне нагрузки 1-1500 нм индентором викаерса [2]. Время задержки при максимальной нагрузке равнялась 10 с., а время задержки при разгрузке была равна 4 с. Исследовались плёнки одинаковой толщины напыленные на различных подложках, толщина равнялась 1.0 мкм. Скорость вдавливания индентора равнялась 10 нм/с. Определение микротвёрдости проводили анализом кривой нагрузки методом Оливера-Пфана.

**Результаты эксперимента.** На рисунке дана зависимость микротвёрдости пленок  $ErSb$  от глубины индентирования для различных подложек (лейкосапфир, монокристаллический кремний, кварц и ситалл)

Из рисунка видно, что микротвёрдость для всех плёнок зависит от глубины индентирования, особенно это заметно для пленки напыленной на сапфировой подложке, затем на кремниевой подложке, а для плёнок напыленных на ситаловой и кварцевой подложках увеличение микротвёрдости имеют близкий темп роста.



Рисунок. Зависимость микротвердости пленок *ErSb* напыленных на различных подложках от глубины индентирования:

1 - лейкосапфир; 2 - монокристаллический кремний; 3 - кварц; 4 - ситалл

Аналогичная зависимость микротвердости от глубины индентирования наблюдаются для плёнок меди напыленных на медной подложке [3], для алюминиевых плёнок напыленных на стеклянных и кремниевых подложках [4] и для серебряных плёнок напыленных на кремниевых подложках [5]. Как данные настоящей работы, так данные приведённые в работах [3-5] касаются случаев, когда твердость материала плёнки меньше твердости материала подложки.

Значения микротвёрдости материалов подложки и плёнки *ErSb* приведены в таблице.

Данные микротвердости некоторых материалов

Таблица

| Материал    | Микротвердость, $10^9$ Па |
|-------------|---------------------------|
| Цварц       | 8,8 [ 6]                  |
| Кремний     | 11,0 [7]                  |
| Смталл      | 8,60 [8]                  |
| Лейкосапфир | 19,4 [9]                  |
| <i>ErSb</i> | 1,49 [10]                 |

Приведённые данные относятся к плёнкам *ErSb*, приготовленным методом испарения из двух независимых источников.

Характер зависимости микротвердости пленок приготовленных методом дискретного вакуумно-термического испарения предварительно синтезированного объемного материала в пределах ошибки эксперимента не отличается от аналогичных данных плёнок приготовленных методом испарения из двух независимых источников компонентов.

### Заклучение

1. Методом наноиндентирования исследована зависимость микротвёрдости плёнок *ErSb*, приготовленных на подложках лейкосапфира, монокристаллического кремния, кварца и ситалла от материала подложки и глубины индентирования.

2. Показана, что микротвердость зависит от материала подложки и глубины индентирования. С увеличением глубины микротвердость увеличивается и скорость увеличения тем больше чем больше разность между микротвёрдостями подложки и материала плёнки.

3. Показана, что характер зависимости микротвердости пленок от материала подложки и глубины индентирования не зависит от метода приготовления плёнок.

### Литература

1. Гигинеишвили А., Джабуа З., Ферадзе С. Приготовление, электрофизические и механические свойства плёнок моноантимонида эрбия. II International Scientific and Technological Conference: "Modern problem of power engineering and ways of solving them, Tbilisi, Georgia, December 7-10, 2020. p.127-130.
2. Туркадзе Н., Джабуа З., Гигинеишвили А. Микротвёрдость пленок моноантимонида тербия. Журнал физики и инженерии поверхности. 2018, 3. №2, p.4-7.
3. Shaoyua Chen, Lei Kiu, Tzuching Wang. Investigation of the mechanical properties of thin films by nanoindentation, considering the effects of thickness and different coating-substrate combinations. Surface & Coating technology. 2015, 191. p.25-32.
4. Шугуров А.Р., Панин А.В., Оскомов К.В. Особенности определения механических характеристик тонких плёнок методом наноиндентирования. ФТТ. 2008, т.50. вып. 6. с. 1007-1012.
5. Панин А.В., Шугуров А.Р., Оскомов К.В. Исследование механических свойств тонких плёнок Ag на кремниевой подложке методом наноиндентирования. ФТТ. 2006, т.47. вып.11. с.1973-1980.
6. Лебедева С. И., Микротвердость минералов. М. 1977, 257 с.
7. Дриц М.Е. Свойства элементов. Справочник, М. "Металлургия". 1985, 672 с.
8. Химическая энциклопедия. Советская энциклопедия, 1995. т.4. 639 с.
9. Синани А.Б., Дынкин Н.К., Литвинов Л.А., Коневский П.В., Андреев Е.Л. Твердость сапфира в различных кристаллографических направлениях, Известия РАН серия физическая. 2009, т.73. №10, с.1463-1465.

10. Абдусалимова М. Н. Антимониды и висмутиды редкоземельных элементов. Диссертация на соискание ученой степени доктора химических наук. Свердловск. 1987, 385 с.

#### References

1. Gigineishvili A., Jabua Z., Peradze S. Preparation electro-physical and mechanical properties of erbium monoantimonides films. II International Scientific and Technological Conference: "Modern problem of power engineering and ways of solving them, Tbilisi, Georgia, December 7-10, 2020, p.127-130.
2. Turkadze N., Jabua Z., Gigineishvili A. of terbium monoantimonides films. Journal of Physics and Surface Engineering. 2018, 3.№2, p.4-7.
3. Shaoyua Chen, Lei Kiu, Tzuching Wang. Investigation of the mechanical properties of thin films by nanoindentation, considering the effects of thickness and different coating-substrate combinations. Surface & Coating technology. 2015. 191. p.25-32
4. Shugurov A.R., Panin A.V., Oskomov K.V. Features of determining the mechanical characteristics of thin films by nano-indentation. FTT. 2008. v.50. № 6. p. 1007-1012.
5. Panin A.V., Shugurov A.R., Oskomov K.V. Investigation of mechanical properties of Ag thin films on silicon substrate by nanoindentation method FTT. 2006 , v.47. № 11, p..1973-1980.
6. Lebedeva S. I. Microhardness of minerals. M. 1977, 257 p.
7. Dric M.E. Properties of elements. Handbook. M. "Metallurgy ". 1985, 672 p.
8. Chemical Hand book. 1995. v.4. 639 p.
9. Sinani A.B., Dinkin N.K., Litvinov L.A., Konevski P.V., Andreev E.L. The hardness of sapphire in various crystallographic directions, Izv. Run., series physical. 2009. v.73. №10, p..1463-1465.
10. Abdysaliyeva M.N. Antimonides and bismutides of rare earth elements. Sverdlovsk. 1987. 385 p.

## წყალბადის ტექნოლოგიების განვითარება მსოფლიოში და მისი გამოყენების პერსპექტივები საქართველოს ენერგეტიკულ სექტორში

გია არაბიძე, ტექნ. მეც. დოქტორი, პროფესორი;  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, e-mail: [power@gtu.ge](mailto:power@gtu.ge)  
ნათია არაბიძე, ტექნ. მეცნ. კანდიდატი, ასოცირებული პროფესორი;  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, e-mail: [arabidze.natia@yahoo.com](mailto:arabidze.natia@yahoo.com)  
ნიკოლოზ ხოლოდოვი, მაგისტრანტი;  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო,  
e-mail: [nikoloz.kholodov@gmail.com](mailto:nikoloz.kholodov@gmail.com)

**ანოტაცია:** სტატიაში მიმოხილულია ენერგეტიკული მიზნებისთვის წყალბადის გამოყენების მსოფლიოში არსებული სიტუაცია და ტენდენციები. გარდა ამისა, განხილულია მსოფლიოში წყალბადის ენერგეტიკული ტექნოლოგიების არსებული საუკეთესო მაგალითები. აღნიშნული მასალის ანალიზის საფუძველზე მომზადებული არის შესაბამისი რეკომენდაციები საქართველოში წყალბადის ტექნოლოგიების განვითარების მიზნით.

**საკვანძო სიტყვები:** წყალბადი, განახლებადი ენერგია, ენერგეტიკული სექტორის რეფორმირება, კლიმატის ცვლილება, სუფთა ენერჯიები, პარიზის ხელშეკრულება.

## Development of hydrogen technologies in the world and prospects for its use in the energy sector of Georgia

**Gia Arabidze**, Doctor of Technical Sciences, Professor;  
Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [power@gtu.ge](mailto:power@gtu.ge)  
**Natia Arabidze**, Doctor of Science, Associate Professor;  
Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [arabidze.natia@yahoo.com](mailto:arabidze.natia@yahoo.com)  
**Nikoloz Kholodov**, Master's student;  
Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [nikoloz.kholodov@gmail.com](mailto:nikoloz.kholodov@gmail.com)

**Annotation:** The article reviews the current situation and trends in the use of hydrogen for energy purposes in the world. In addition, the best examples of energy technologies of hydrogen in the world are discussed. Based on the analysis of this material, relevant recommendations have been prepared for the development of hydrogen technologies in Georgia.

**Keywords:** Hydrogen, Renewable energy, Energy sector reform, Climate change, Clean Energy, Paris Agreement.

### შესავალი

ცნობილია წყალბადის მიღების სამი ხერხი, რომელიც დამოკიდებულია მისი მიღების ტექნოლოგიაზე. „ნაცრისფერი“ წყალბადი, მიიღება სამრეწველო ქარხნებში წიაღისეული საწვავის, ძირითადად ბუნებრივი არის, გადამუშავებისას. აღნიშნულ პროცესში წარმოქმნება მნიშვნელოვანი რაოდენობის ნახშირორჟანგი. შედარებით სუფთა ვარიანტია "ლურჯი" წყალბადი, ამ შემთხვევაში ნახშირორჟანგის გამონაბოლქვს იჭერენ და ინახავენ, ან ხელახლა იყენებენ. ყველაზე სუფთაა

"მწვანე" წყალბადი, რომელიც მიიღება განახლებადი ენერჯიის გამოყენებით, ნახშირბადის გამოყოფის გარეშე. უკანასკნელი ტექნოლოგიის განვითარება ასევე მნიშვნელოვანია იმ ფონზე, როცა ევროპაში არსებობს ემისიების ვაჭრობის სისტემა (ETS), რომელიც გულისხმობს ნახშირორჟანგის გამოყოფისთვის შესაბამისი საფასურის (ჯარიმის) გადახდას, მაგალითად 2021 წელს 1 ტონა ნახშირორჟანგის საფასური იცვლებოდა 31-44 ევროს ფარგლებში<sup>1</sup> და აღნიშნული საფასური მზარდი ხასიათისაა.

<sup>1</sup> <https://ember-climate.org/data/carbon-price-viewer/>

ევროკავშირის მწვანე შეთანხმებაში (Green Deal) ხაზგასმულია წყალბადის ტექნოლოგიების და ინფრასტრუქტურის განვითარების მნიშვნელობა კლიმატ-ნეიტრალური გარემოს შესაქმნელად 2030 წლისთვის. ევროკავშირის ინდუსტრიის განვითარების პრიორიტეტულ მიმართულებათა შორის, ერთ-ერთი მიმართულებაა სუფთა წყალბადის და ალტერნატიული საწვავის მიღების ტექნოლოგიებისათვის შესაბამისი კვლევების ჩატარება. ამ პროექტების პრაქტიკული განვითარებისთვის ევროკავშირი გამოყოფს მნიშვნელოვან ფინანსურ რესურსებს. საქართველოში ჯერჯერობით წყალბადის ტექნოლოგიებზე მნიშვნელოვანი აქცენტი გაკეთებული არაა, თუმცა აღსანიშნავია, რომ საქართველოს კანონში „განახლებადი წყაროებიდან ენერჯის წარმოებისა და გამოყენების წახალისების შესახებ“, რომელიც თავის დროზე მომზადებული იყო ევროკავშირის განახლებადი ენერჯის დირექტივის საფუძველზე, აღნიშნულია, რომ განახლებადი წყაროებიდან მიღებული ენერჯის მთლიანი საბოლოო მოხმარების წილის გამოთვლისას განახლებადი წყაროებიდან მიღებული წყალბადიც უნდა იქნეს გათვალისწინებული.

#### **სამუშაოს მიზანი**

სამუშაოს მიზანია დავადგინოთ თუ რა ეტაპზეა წყალბადის ტექნოლოგიების განვითარება მსოფლიოში და რა პრაქტიკული პროექტები არსებობს ან/და რა არის დაგეგმილი ახლო მომავალში. გარდა ამისა, ნაშრომში წარმოდგენილი იქნება მსოფლიოში არსებული საკანონმდებლო თუ სტრატეგიული ტიპის დოკუმენტების შესახებ ინფორმაცია, ასევე ნაჩვენები იქნება წყალბადის წარმოების ტექნოლოგიის ხარჯების შემცირების ტენდენცია. ყოველივე აღნიშნულის ანალიზის საფუძველზე შემოთავაზებულია საქართველოში წყალბადის ტექნოლოგიის განვითარების ხელშეწყობისთვის საჭირო ღონისძიებები.

#### **წყალბადის ტექნოლოგიების განვითარება და პერსპექტივები მსოფლიოში**

ევროპაში წყალბადთან დაკავშირებული პოლიტიკა და რეგულირების მექანიზმები წარმოდგენილია ისეთ დოკუმენტებში, რომლებიც არეგულირებენ გაზის, ელექტროენერჯის, ტრანსპორტის, საწვავის, ინდუსტრიისა და ემისიების მიმართულებებს.

2020 წ. ევროკომისიის მიერ დამტკიცებული ევროპული წყალბადის სტრატეგიის მთავარი

ასპექტებია: პრიორიტეტის გაკეთება მწვანე წყალბადზე გრძელვადიან ჭრილში, თუმცა მოკლევადიან და საშუალო ვადიან პერიოდში საჭირო იქნება ასევე „ლურჯი“ წყალბადის გამოყენებაც. სტრატეგიის თანახმად, 2024 წლისთვის ევროპაში მოსალოდნელია მინიმუმ 6 გვტ-ის წყალბადის ელექტროლიზატორების ოპერირება, აღნიშნული რიცხვი 2030 წლისთვის გაიზრდება მინიმუმ 40 გვტ-მდე. რაც შეეხება წყალბადის წარმოებას, 2024 წლისთვის მოსალოდნელია 1 მლნ. ტ-ს წარმოება, ხოლო 2030-სთვის აღნიშნული მაჩვენებელი გაიზრდება 10 მლნ.-მდე.

2020 წლიდან 2030 წლამდე ინვესტიციები ელექტროლიზატორებში მოსალოდნელია 24-დან 42 მლრდ. ევრომდე იყოს. გარდა ამისა, ამავე პერიოდში 220-340 მილიარდი ევრო იქნება საჭირო 80-120 გვტ დადგმული სიმძლავრის მზისა და ქარის სადგურების ასაშენებლად, რომ მოხდეს აღნიშნული სადგურების უშუალო დაკავშირება ელექტროლიზატორებთან. ასევე საჭირო იქნება ინვესტიციები, ნახშირბადის დაჭერისა და შენახვის სადგურების 50%-ის განახლებისთვის, საერთო მოცულობით დაახლოებით 11 მილიარდი ევრო. 65 მილიარდი ევროს ინვესტიციის განხორციელება იქნება საჭირო წყალბადის ტრანსპორტირების, განაწილებისა და შენახვის, ასევე წყალბად-გასამართი სადგურების ასაშენებლად. აღნიშნულის განხორციელებისთვის დიდი მნიშვნელობა ენიჭება მხარდაჭერის სქემებს, რაც საგრძნობლად გაზრდის აღნიშნული ტექნოლოგიების დანერგვას.

მოსალოდნელია გაზის ინფრასტრუქტურის გამოყენება წყალბადის ტრანსპორტირებისთვის დიდ მანძილებზე. 2030 წლისთვის ევროპაში შესაძლებელია ჩამოყალიბდეს ღია და კონკურენტუნარიანი წყალბადის ბაზარი შეუფერხებელი ტრანსსასაზღვრო ვაჭრობით და სექტორების მიხედვით რესურსების ეფექტური გადანაწილებით.

აქვე აღსანიშნავია ის ფაქტიც, რომ ევროკავშირის განახლებადი ენერჯის, განახლებულ დირექტივაში, მოცემულია წყალბადის ტექნოლოგიის განვითარების შესაძლებლობა. იგი შეიძლება იყოს გამოყენებული ჭარბი რაოდენობის განახლებადი ენერჯის ათვისებისთვის, გათბობისთვის, ბუნებრივი აირის ჩანაცვლების გზით, მაგრამ ყველაზე პერსპექტიულია წყალბადის







მქონე კომერციული თვითმფრინავები. ამ ეტაპზე წარმოდგენილია სამი (ნახ.3) თვითმფრინავის კონცეფცია. თვითმფრინავები გათვლილი იქნება 100-დან 200-მდე მგზავრზე.



ნახ. 3.

Airbus-ის თვითმფრინავების კონცეფცია 2021 წ. დასაწყისში გერმანიის ქალაქ ჰამბურგში მსხვილი ინდუსტრიული კომპანიების მიერ ჩამოყალიბდა ჰამბურგის წყალბადის ქსელი, რომლის მიზანია ქვეყნის მასშტაბით წყალბადის წარმოების, განაწილებისა და გამოყენების ერთმანეთთან დაკავშირება. ეს ინიციატივა დიდ როლს ითამაშებს და ხელს შეუწყობს ევროპაში ერთ-ერთ უმსხვილეს ელექტროლიზატორულ ქარხნის მშენებლობას, რომელიც „მწვანე“ წყალბადს ქარისა და მზის ენერჯისგან მიიღებს. სავარაუდოდ, „მწვანე“ წყალბადის წარმოება 2025 წელს დაიწყება, და სადგურის დადგმული სიმძლავრე, რომელიც ჰამბურგში აშენდება, 100 მგვტ. იქნება. ჰამბურგის მწვანე წყალბადის ჰაბის მიერ წარმოებული წყალბადი პირველ რიგში ჩაანაცვლებს წიაღისეულ საწვავს როგორც სამრეწველო წარმოებაში, ასევე ტრანსპორტისა და ლოგისტიკის სექტორში. აქვე აღსანიშნავია, რომ წყალბადის წარმოების დროს მიღებული ნარჩენები სითბო იქნება გამოყენებული ცენტრალური გათბობის ქსელებში და მუნიციპალური ნარჩენების თერმული დამუშავების დროს, რაც კიდევ უფრო შეამცირებს სხვადასხვა ინდუსტრიის გავლენას გარემოზე.

2021 წ. მარტში გერმანიაში „WindH2“ პროექტის ფარგლებში ამუშავდა მწვანე წყალბადის წარმოების ქარხანა, რომელიც ჩაანაცვლებს წიაღისეულ საწვავს მეტალურგიულ საწარმოში. ამ პროექტის ინიციატორები არიან ევროპის მეტალურგიული გიგანტი Salzgitter, ენერგეტიკული კომპანია Avacon და სამრეწველო აირების მწარმოებელი კომპანია Linde. განახლებადი ენერჯის

მისაღებად გამოყენებულია Vestas მიერ წარმოებული შვიდი 169-მეტრიანი ტურბინები, რომელთა დადგმული სიმძლავრე 30 მგვტ. და ოპერირებას უწყევს Avacon. გარდა ამისა, გამოყენებულია ორი 1,25 მგვტ. ელექტროლიზატორი. განახლებადი ენერჯის წყაროების გამოყენებით წარმოებული წყალბადის გამოყენება მოხდება რკინის მადნის დნობასთან დაკავშირებულ პროცესებში. კომპანიის მოლოდინით 2050 წლისთვის კომპანიის ემისიები შემცირდება 95%-ით. პროექტის ჯამური ინვესტიცია დაახლოებით 50 მლნ. ევროა, აქედან ელექტროლიზატორების მშენებლობა სუბსიდირებული იყო სახელმწიფო ბანკი KfW-ს მიერ.

H2stations პორტალის თანახმად, 2020 წ. განმავლობაში მსოფლიოში ექსპლუატაციაში შევიდა რეკორდულად დიდი რაოდენობის წყალბად გასამართი სადგურები, კერძოდ 107 ერთეული (ნახ.4). აქედან, 29 სადგური ევროპაში, 72 აზიის რეგიონში, ხოლო 6 ჩრდილოეთ ამერიკაში. 2020 წლის ბოლოსთვის მსოფლიოში ოპერირებდა 553 სადგური, საიდან 275 აზიაში (პირველ ადგილზე იაპონია -142 სადგური), 200 სადგური ევროპაში (ლიდერობდა გერმანია 100 ერთეულით), ხოლო ჩრდილოეთ ამერიკაში იყო 75 სადგური, რომელითა უმრავლესობა, კერძოდ კი 49 სადგური მდებარეობდა კალიფორნიის შტატში.



ნახ. 4.

მსოფლიოში მოქმედი (ლურჯი) და დაგეგმილი წყალბადგასამართი სადგურები წყალბადზე მომუშავე პირველი კომერციული ელექტროსადგური უნდა აშენდეს იაპონიაში, იამანასის პრეფექტურაში 2022 წ. მარტში კომპანია eRex-ის მიერ. საწყის ეტაპზე სადგურის დადგმული სიმძლავრე იქნება 360 კვტ., რაც საკმარისი იქნება, რომ 100 ოჯახი უზრუნველყოს ელექტროენერჯით. აღნიშნული სადგური

იმუშავენ ეკო-მეგობრულ წყალბადზე, რომელიც იქნება წარმოებული სტარტაპი Hydrogen Technology-ს მიერ. მომავალში eRex გეგმავს დადგენილი სიმძლავრის გაზრდას 50-100 მეგავატამდე, რაც კომპანიას შესაძლებლობას მისცემს შეამციროს ელექტროენერჯის გენერაციის ფასი 0.53 დოლარი/კვტ.სთ-დან 16 დოლარი/კვტ.სთ-მდე.

2021 წლის იანვარში კანადაში, კომპანია Air Liquide-ის მიერ ექსპლუატაციაში შეყვანილი იქნა ამ დროისთვის უმსხვილესი მწვანე წყალბადის ქარხანა. ელექტროლიზატორის დადგენილი სიმძლავრე 20 მგვტ-ია, ხოლო ყოველდღიურად იგი აწარმოებს 8.2 ტ-ს „მწვანე“ წყალბადის. აღნიშნული ქარხანა მუშაობს ადგილობრივი ჰესის მიერ გამოიმუშავებულ ენერჯიაზე და კარგი ადგილმდებარეობის გამო შესაძლებლობა აქვს მწვანე წყალბადით მოამარაგოს როგორც კანადის, ასევე აშშ-ის ინდუსტრია და სატრანსპორტო სექტორი. წყალბადის წარმოების ტრადიციულ პროცესთან შედარებით, აღნიშნული წარმოება თავიდან აიცილებს დაახლოებით 27,000 ტ ნახშირორჟანგის ემისიას წელიწადში (ნახ.5).



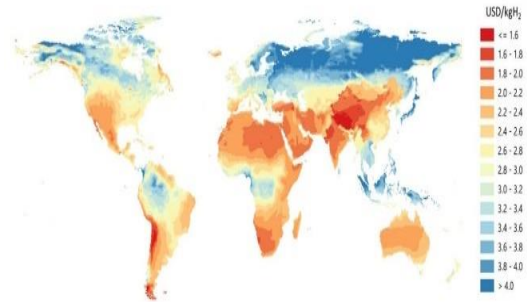
ნახ. 5.

Air Liquide-ის საწარმო

**პერსპექტივები და გამოწვევები საქართველოში**

2019 წ. საერთაშორისო ენერგეტიკული სააგენტოს (IEA) მიერ გამოქვეყნებულ ანგარიშში წარმოდგენილია მწვანე წყალბადის წარმოების ხარჯები გრძელვადიან ჭრილში (ნახ.6). ქვემოთ მოცემული რუკის თანახმად, საქართველოში განახლებადი წყაროებიდან (ქარი და მზე) 1 კგ წყალბადის წარმოება დაჯდება 2.6-დან 3 დოლარამდე, რაც ამ ეტაპზე კონკურენტული ფასი არ არის. თუმცა, ტექნოლოგიების დახვეწის და ეფექტურობის გაზრდის პირობებში შესაძლებელი იქნება კონკურენტუნარიანი წყალბადის წარმოება.

ჰიბრიდული მზის და ქარის სადგურების მიერ წარმოებული წყალბადის ფასი გრძელვადიან ჭრილში



ნახ. 6.

ჰიბრიდული მზის და ქარის სადგურების მიერ წარმოებული წყალბადის ფასი გრძელვადიან ჭრილში.

ენერგეტიკულ სექტორში წყალბადის ტექნოლოგიების გამოყენებას მოქნილობა და სარგებლობა მოაქვს. კერძოდ, მას შეუძლია მოთხოვნის სწრაფი დაკმაყოფილება, როგორც ელექტროენერჯით ასევე სხვა ენერჯით. რაც შეეხება სარგებელს გენერაციის სექტორისთვის, აქ წყალბადის ტექნოლოგიები შეიძლება იყოს გამოყენებული სეზონური ჭარბი გენერაციის დროს, ენერჯის მოწოდებით იმ ადგილებში სადაც არ არსებობს შესაბამისი ენერგეტიკული ინფრასტრუქტურა, გარდა ამისა წყალბადი შეიძლება იყოს გამოყენებული როგორც სარეზერვო ენერჯია.

ენერგეტიკული გაერთიანების მიერ დაკვეთილი კვლევის თანახმად, წყალბადის ტექნოლოგიების განვითარება ტრანსპორტის სექტორისთვისაც სასარგებლო იქნება. მიუხედავად იმისა, რომ 2030 წლისთვის ელექტრომობილების წილი ტრანსპორტის სექტორში იქნება დიდი, წყალბადზე მომუშავე ტრანსპორტსაც ექნება განვითარების შესაძლებლობა, ვინაიდან იგი დააბალანსებს ტრანსპორტის სექტორის იმ სეგმენტს, სადაც ელექტრომობილების მუშაობა ჯერჯერობით პრობლემატურია. კერძოდ, წყალბადზე მომუშავე ტრანსპორტს შესაძლებლობა ექნებათ შორ მანძილზე გადაადგილდეს და იგი გამოყენებული იქნება სატვირთო მანქანებშიც. საქართველოში ამ ტექნოლოგიის დანერგვის დაბალი დონე მოსალოდნელია 2030 წლისთვის, ხოლო გაცილებით დიდი ზრდა მოსალოდნელია 2030 წ. შემდეგ. პროგნოზის თანახმად, 2030 წლისთვის საქართველოს ტრანსპორტის სექტორში განახლებადი ენერჯის 9% სამიზნე

მაჩვენებლის მისაღწევად, საჭირო იქნება 142.35 გიგაჯოული (3.4 ktoe) განახლებადი ენერჯის მოხმარება, რაც ტრანსპორტის სექტორში განახლებადი ენერჯის მთლიანი მოხმარების 0.17%-ს შეესაბამება.

სუფთა წყალბადს (როგორც „მწვანე“, ასევე „ლურჯს“) გააჩნია უზარმაზარი პოტენციალი, შეამციროს გლობალური ანთროპოგენური ემისიების 45-60%-ით და თანაც ისეთ რთულ სექტორებში, როგორც - მაგისტრალური ტრანსპორტი, ფოლადისა და ქიმიკატების წარმოება, გათბობა და სხვ.

აღნიშნული სუფთა ტექნოლოგიების დანერგვის მთავარი მოქმედი პირი უნდა იყოს ინდუსტრია. არსებული და ახალი დანადგარების დანერგვა იქნება სამაგალითო საწყის ეტაპზე. ამისთვის უნდა არსებობდეს მხარდაჭერის და წახალისების მექანიზმები ისეთ ინდუსტრიაში როგორცაა ფოლადის, ცემენტის და მაღალტემპერა-ტურული პროცესის მქონე ქარხნები.

შეფასდეს წყალბადის შენახვის სხვადასხვა ტექნოლოგია მაგალითად, მარილიან კავერებში და ა.შ. წყალბადის ტექნოლოგიის ეფექტური დანერგვისთვის სასურველია კომპლექსური და მრავალსექტორული მიდგომა.

### დასკვნა

აღნიშნულის ანალიზის საფუძველზე დასკვნის სახით გვინდა წარმოვადგინოთ ის ღონისძიებები, რომლებიც სასურველია გატარდეს, ვინაიდან აღნიშნული დააჩქარებს წყალბადის ტექნოლოგიების განვითარებას და უფრო მიმზიდველს გახდის ინვესტიორებისთვის:

- პოლიტიკის კუთხით: ეროვნულ დონეზე უნდა შემუშავდეს რეალისტური მიზნების მქონე სტრატეგია და შესაბამისი მხარდაჭერის მექანიზმები;

- დაფინანსების კუთხით: უნდა შემუშავდეს და განხორციელდეს რისკების განაწილების ინოვაციური სქემები საჯარო და კერძო ინვესტიორებს შორის, სუფთა წყალბადის წარმოების პროექტების დაფინანსებისას;

- უნდა განმტკიცდეს ტრანსსასაზღვრო თანამშრომლობა;

- პოლიტიკაში გათვალისწინებული უნდა იყოს არსებული და სამომავლო ინფრასტრუქტურული საჭიროებები;

- ვინაიდან წყალბადს დიდი პერსპექტივები გააჩნია ტრანსპორტის სექტორშიც, აუცილებელია მოკლევადიან

პერიოდში შემუშავდეს ამ სექტორისათვის ელექტროენერჯისა და წყალბადის გამოყენების ეროვნული სტრატეგია და უნდა განხორციელდეს შესაბამისი აქტივობები, მათ შორის მხარდაჭერის მექანიზმების სახით;

- გარდა ამისა, 2030 წ. მიზნის მიღწევისთვის და საქართველოს ეკონომიკისთვის მაქსიმალური სარგებელის მისაღებად, სასურველია ტრანსპორტში განახლებადი ენერჯის წყაროების დანერგვის ხელშეწყობისთვის შემუშავდეს დამატებითი პოლიტიკა;

- ყოველივე აღნიშნულის გატარებით, ხელი შეეწყობა მდგრად განვითარებას და შეიქმნება ახალი სამუშაო ადგილები.

### ლიტერატურა

1. მწვანე წყალბადის ხარჯის შემცირება: ელექტროლიზერების გამოყენების მასშტაბის გაზრდა კლიმატის 1.5°C მიზნის მისაღწევად, განახლებადი ენერჯის საერთაშორისო სააგენტო, 2020.
2. წყალბადის სტრატეგია კლიმატ-ნეიტრალური ევროპისთვის, ევროპული კომისია, 2020.
3. ენერჯის შენახვა - ევროპაში ელექტროენერჯის მიწოდების უსაფრთხოებაში წვლილის შეტანა, ევროპული კომისია, მარტი 2020.
4. დეკარბონიზაციის რენტაბელობის კვლევა, ევროპული უნივერსიტეტის ინსტიტუტი, 2020.
5. ენერგეტიკული გაერთიანების წევრი ქვეყნების მიერ სატრანსპორტო სექტორში განახლებადი ენერჯის წყაროების გამოყენების ხელშეწყობის საშუალებები, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, E4tech and South East Europe Consultants, 30 ნოემბერი 2020.
6. ნახშირბადის ნეიტრალურობის მიღწევა: წყალბადის როლი, გაეროს ევროპის ეკონომიკური კომისია, 24 მარტი 2021.

### References

1. Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal, IRENA, 2020.
2. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, European Commission, 2020.
3. Study on energy storage – Contribution to the security of the electricity supply in Europe, European Commission, March 2020.
4. Cost-Effective decarbonization study, European University Institute, 2020.
5. Modalities to foster use of renewable energy sources in the transport sector by the Energy Community contracting parties, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, E4tech and South East Europe Consultants, 30 November 2020.
6. Attaining Carbon Neutrality: The Role of Hydrogen, UNECE, 24 March 2021.



## დუღილის პროცესში წარმოქმნილი რეაქტიული ძალების მოქმედების ვიდეოგადაღების შედეგები

ევტიხი მაჭავარიანი, ტექნ. მეცნ. დოქტორი, პროფესორი

საქ. ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ. თბილისი, საქართველო, e-mail: [xutagtu@rambler.ru](mailto:xutagtu@rambler.ru)

გიორგი გიგინეიშვილი, ტექ. მეცნ. კანდიდატი, ასოც. პროფესორი

საქ. ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, e-mail: [g.gigineishvili@gtu.ge](mailto:g.gigineishvili@gtu.ge)

ნათია ქსოვრელი, ასისტენტ-პროფესორი

საქ. ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, e-mail: [qsovreli.nati@gmail.com](mailto:qsovreli.nati@gmail.com)

მაია ჯიხვაძე, ასისტენტ-პროფესორი

საქ. ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, e-mail: [jixvadzemaia@gmail.com](mailto:jixvadzemaia@gmail.com)

**ანოტაცია.** კვლევის ობიექტს, ზოგადად, წარმოადგენს სითხის დუღილის პროცესის მექანიზმი ხოლო კონკრეტულად, დიდ მოცულობაში, ატმოსფერული წნევის პირობებში წყლის დუღილისას აღძრული და ხურების ზედაპირზე მოქმედი რეაქტიული ძალა.

კვლევის მეთოდად გამოყენებულია ექსპერიმენტული მეთოდი, რისთვისაც სპეციალურად დაპროექტებულია და დამზადებულია ლაბორატორიული ექსპერიმენტული დანადგარი და შედგენილია ცდების ჩატარებისა და მიღებული შედეგების დამუშავების მეთოდიკა. წყლის დუღილის პროცესი მიმდინარეობდა ცალი მხრიდან დენგამტარ ზედაპირიან ფირფიტაზე, რომელზეც აღძრული რეაქტიული ძალა იწვევდა გამახურებელი ზედაპირის გადაადგილებას დუღილის საწინააღმდეგო მხარეს.

ავტორთა აზრით პირველად არის მიკვლეული სითხის დუღილისას აღძრული და მდულარე სითხის მხრიდან ხურების ზედაპირზე მართობულად მოქმედი რეაქტიული ძალა, რომლის სიდიდე დუღილისას განვითარებულ ხვედრით თბურ ნაკადზეა დამოკიდებული. ამ მოვლენის ღრმად შესწავლის შედეგად მოსალოდნელია შეიქმნას ახალი ტიპის თბურ ამძრავიანი მექანიზმების ტექნიკური განხორციელების კარგი შესაძლებლობა.

**საკვანძო სიტყვები:** სითხის დუღილი, რეაქტიული ძალა, თბოგადაცემა.

## Results of video recording of the action of reactive forces on the heating surface in the process of liquid boiling

**Evtithi Machavariani**, Doctor of Science, Professor,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [xutagtu@rambler.ru](mailto:xutagtu@rambler.ru)

**Giorgi Gigineishvili**, PhD, Associate Professor,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [g.gigineishvili@gtu.ge](mailto:g.gigineishvili@gtu.ge)

**Natia Qsovreli**, PhD, Assistant Professor,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [qsovreli.nati@gmail.com](mailto:qsovreli.nati@gmail.com)

**Maia Jikhvadze**, PhD, Assistant Professor,

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [jixvadzemaia@gmail.com](mailto:jixvadzemaia@gmail.com)

**Annotation.** The object of research is, in general the mechanism of the liquid boiling process and, more specifically, the reactive force, generated by boiling in large volumeliquid, and acting on the heating surface.

An experimental method is used in the present study, for which a specially developed and prepared laboratory-experimental institution, a compiled methodology for conducting measurements and processing of half-results. The boiling process of water took place on a plate with one a conductive surface on which the induced reactive force forced the heating surface to move in the direction opposite to boiling.

According to the authors, the reactive force arising during boiling of a liquid and acting directly on the heating surface was discovered for the first time. It is expected that an in-depth study of this phenomenon will create a good opportunity for the technical implementation of new types of thermal drive mechanisms.

**Keywords:** liquid boiling, reactive force, heat transfer.

**შესავალი.** სითხის, კერძოდ წყლის გამოყენებული სახალხო მეურნეობის ისეთ დუღილის პროცესი ფართოდ არის დარგებში როგორცაა თბოენერგეტიკა და

ატომური ენერგეტიკა, ქიმიური მრეწველობა, კვების ტექნოლოგია და თანამედროვე მრეწველობის სხვა დარგები. სითხის დუღილის და ორთქლწარმოქმნის ტექნოლოგიური პროცესების განხორციელება დაკავშირებულია მნიშვნელოვანი რაოდენობის ენერგიის ხარჯვასთან (სათბობი, ელექტროენერგია) და აქედან გამომდინარე დუღილის, როგორც ფიზიკური მოვლენის სრულფასოვან შესწავლას დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა ენიჭება. საკმარისია ითქვას, რომ დუღილის პროცესების გამოყენებით მიმდინარე ტექნოლოგიური პროცესებით მიღებული პროდუქციის თვითღირებულებაში სწორედ გამოყენებულ სათბობზე გაწეულ დანახარჯს უკავია ერთერთი ძირითადი ადგილი. ამიტომაც ორთქლის მიმდებ საქვაბე დანადგარებში სათბობზე გაწეული დანახარჯების თუნდაც 1%-ით შემცირება მნიშვნელოვანი ეკონომიკური ეფექტის მიღებას უზრუნველყოფს.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე, სავსებით ცხადია, რომ დუღილის, როგორც ფიზიკური მოვლენის რღმად შესწავლა და მისი მიმდინარეობის კანონზომიერებათა ცოდნა, ფრიად მნიშვნელოვანია როგორც პრაქტიკული, ასევე თეორიული თვალსაზრისით.

სწორედ ამით არის განპირობებული ის ფაქტი, რომ თუ მე-20 საუკუნის 60-იან წლებში სითხის დუღილის პროცესის კვლევას ეძღვნებოდა ყოველწლიურად 300-400 სამეცნიერო ნაშრომი (მსოფლიოს მასშტაბით), 80-იან წლებში ამ ციფრმა 800-ს მიაღწია, ხოლო თანამედროვე პირობებში, სამეცნიერო პუბლიკაციებისა და ინტერნეტში მოთავსებული ინფორმაციის გათვალისწინებით, წელიწადში 1000-ზე მეტია.

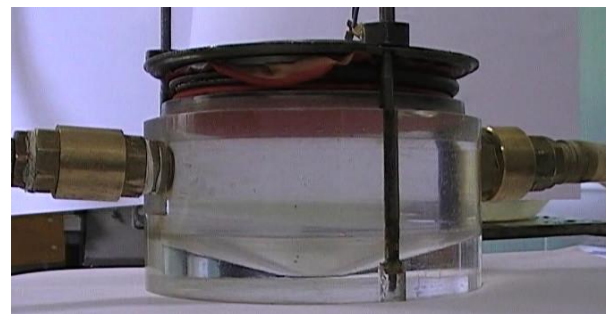
დუღილის პროცესებს თითქმის ყოველწლიურად ეძღვნება მსხვილი სამეცნიერო კონფერენციები და სიმპოზიუმები, როგორც ცალკეული ქვეყნების, ასევე მთელი მსოფლიოს მასშტაბით.

სამწუხაროდ, მიუხედავად ცალკეული ამოცანების გადაწყვეტისას მიღწეული სერიოზული მეცნიერული შედეგებისა, სითხეების დუღილის პროცესში თბოგადაცემის პრობლემა ჯერ კიდევ სრულად არ არის გადაწყვეტილი. ეს უმთავრესად ეხება ისეთ დანადგარებში მიმდინარე დუღილის პროცესებს, რომლებიც განსაკუთრებულ პირობებში მუშაობენ. კერძოდ: მკაცრი

მოთხოვნები მუშაობის რეჟიმის სტაბილურობაზე, დედამიწის გრავიტაციული ველიდან განსხვავებული პირობები, კონსტრუქციის მასალატევადობაზე მკაცრი ზედა ზღვრის არსებობა, პროცესის სრული ავტომატიზაციის მოთხოვნილება და ა.შ.

**სამუშაოს მიზანი.** წინამდებარე ნაშრომი ეხება ავტორების მიერ მიკვლეულ და ჯერ კიდევ ფაქტიურად სრულიად შეუსწავლელ მოვლენას, რომელიც თან ახლავს დუღილის პროცესს. ამასთან, ჩვენი აზრით, მისი გამოკვლევა უთუოდ დიდ წვლილს შეიტანს დუღილის, როგორც ფიზიკური მოვლენის სრულყოფილი თეორიული შესწავლის მნიშვნელოვან საქმეში.

ჩვენს მიერ გამოქვეყნებულ ნაშრომში [1] აღწერილი გვაქვს წყლის აორთქლება კონდენსაციის ურთიერთშენაცვლებითი პროცესებით მომუშავე წყალსაქაჩი ტუმბოს კვლევის პროცესი. ამ კვლევისას გადაღებული ვიდეოფირის ორი ფრაგმენტი ქვემოთ არის წარმოდგენილი.



სურ. 1. აორთქლება კონდენსაციის ურთიერთშენაცვლე პროცესებით მომუშავე რეზინის დიაფრაგმიანი ტუმბოს ხედი მუშა სხეულის კონდენსაციის ბოლოს

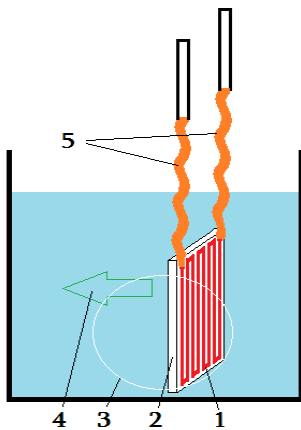


სურ. 2. აორთქლება კონდენსაციის ურთიერთშენაცვლე პროცესებით მომუშავე რეზინის დიაფრაგმიანი ტუმბოს ხედი მუშა სხეულის აორთქლების ბოლოს

ზემოთ მოყვანილი კვლების წარმოებისას დაგვინტერესა, ხომ არ ჰქონდა ადგილი რაიმე მექანიკურ ზემოქმედებას მადულარ ზედაპირზე, როდესაც მასზე წარმოიქმნება და წყდება ორთქლის ბუშტი. ეს ინტერესი გაპირობებული იყო აგრეთვე იმ გარემოებით, რომ ვიცნობდით ჩვენი კოლეგას, პროფესორ ირაკლი შეყრილაძის ნაშრომებს [2, 3], რომლებშიც ავტორი ამტკიცებს ეგრეთწოდებული „მზარდი ბუშტის ტუმბოს ეფექტი“-ს არსებობას დიდ მოცულობაში სითხის დუღილის ბუშტოვანი რეჟიმის პირობებში.

**მიღებული შედეგები.** ზემოხსენებული ინტერესის დასაკმაყოფილებლად ჩვენ დიდ მოცულობაში დუღილის პროცესების სულ სხვა მიზნებით შესასწავლი ექსპერიმენტული დანადგარი ნაჩქარევად და შემოღობიდაგვარად გადავაკეთეთ დაახლოებით ნახ. 1-ზე წარმოდგენილი სქემის შესაბამისად.

სპეციალურად დავამზადეთ მადულარი ელემენტი, რომელიც წარმოადგენდა თბოსაიზოლაციო ფირფიტის ერთ ზედაპირზე დაწებებულ ლითონის ზიგზაგისმაგვარ ელექტროგამახურებელს. მადულარ ელემენტზე ელექტროდენის მიყვანა განვახორციელეთ დრეკადი ელექტროდებით (ნახ. 1).



ნახ. 1. ექსპერიმენტული დანადგარის პრინციპული სქემა:

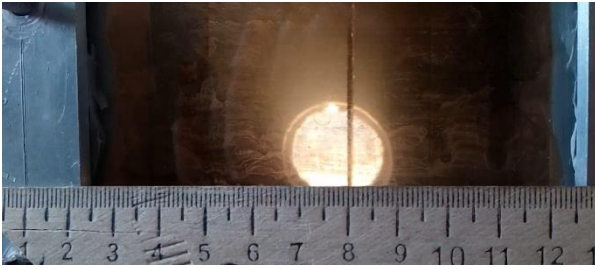
- 1 - ზიგზაგისმაგვარი გამაცხელებელი;
- 2 - თბოიზოლაციური ფირფიტა; 3 - საცქერი ფანჯრის მდებარეობა; 4 - ფირფიტის გადაადგილების მიმართულება;
- 5 - დრეკადი დენმიმყვანები

დამატებითი გამახურებლის (სქემაზე ნაჩვენებია არის) მეშვეობით ჭურჭელში არსებულ წყალს ვაცხელებდით დუღილის ტემპერატურამდე. შემდეგ ზიგზაგისმაგვარ გამახურებელში ვატარებდით სხვადასხვა სიდიდის ელექტროდენს. ვინაიდან წყალს უკვე გააჩნდა დუღილის ტემპერატურა, დენის ჩართვისთანავე ფირფიტის ელექტროგამახურებლიან ზედაპირზე იწყებოდა დუღილი და ერთდროულად ხდებოდა ფირფიტის მარცხნივ გადაადგილება. გამახურებელში გამოყოფილი ხვედრითი თბური ნაკადის ზრდა იწვევდა ფირფიტის გადაადგილების სიჩქარისა და მანძილის ზრდას, რაც კარგად ჩანს ქვემოთ მოყვანილ კადრებში რომლებიც ამოჭრილია შესაბამისი ვიდეოფილმიდან.



სურ. 3. ხურების ზედაპირის თავდაპირველი ვერტიკალური მდებარეობა (ზედა) და გადახრა დაახლოებით  $800\ 000 \left[ \frac{[30]}{[2]} \right]$ -ის ტოლი ხვედრითი თბური ნაკადის ჩართვისთანავე (ქვედა)





სურ. 4. ხურების ზედაპირის თავდაპირველი ვერტიკალური მდებარეობა (ზედა) და გადახრა დაახლოებით  $300\ 000 \left[ \frac{\text{მტ}}{\text{წ}} \right]$ -ის ტოლი ხვედრითი თბური ნაკადის ჩართვისთანავე (ქვედა)

**დასკვნები.** დასასრულ, დასკვნის სახით შეგვიძლია ვთქვათ, რომ აუცილებლად საჭიროა სპეციალურად დამუშავდეს და განხორციელდეს ექსპერიმენტული დანადგარი, რომელიც საშუალებას მოგვცემს უკვე რაოდენობრივად

ზუსტად იქნას გამოკვლეული დამოკიდებულება დუღილისას განვითარებულ ხვედრით თბურ ნაკადსა და გამახურებელი ელემენტზე მოქმედი, ამ უკანასკნელის გადაადგილების გამომწვევი ძალის სიდიდეს შორის.

ვიმედოვნებთ რომ ამ მოვლენის სერიოზული შესწავლა ჯეროვან წვლილს შეიტანს ზოგადად დუღილის მექანიზმისა და დუღილისას განხორციელებული თბოგაცემის პროცესის შემდგომი შესწავლისა და დაზუსტების საქმეში.

#### ლიტერატურა

1. მაჭავარიანი ე., გიგინეიშვილი გ., ჯიხვაძე მ., ქსოვრელი ნ. მუშა სხეულის აორთქლება კონდენსაციის ციკლებით მომუშავე წყალსაქაჩი ტუმბო. International Scientific and Technological Conference "Modern Problems of Power Engineering and Ways of Solving Them", Tbilisi. 7-11 October, 2019.
2. Shekrladze I.G. Boiling heat transfer: Mechanisms, models, correlations and the lines of further research. The Open Mechanical Engineering Journal. 2008;2(1):104-127.
3. Shekrladze, I.G., Nucleate Boiling Heat Transfer: Temperature Pulsations or Local Thermal Shocks, *Materials Performance and Characterization* 3, no. 4 (2014): 69-85.

ენერგეტიკის ეკონომიკა, მენეჯმენტი, მართვა, რეგულირება  
Power engineering economics, management, administration, regulation

**Analysis of The UN Sustainable Development Goal 7 - Affordable & Clean Energy**

**Nino Dvali**, Researcher at Renewable Energy Sources Laboratory (Res Lab);  
Master's Student at Business and Technology University, Tbilisi, Georgia,  
e-mail: [nino.dvali.1@btu.edu.ge](mailto:nino.dvali.1@btu.edu.ge)

**Elene Soselia**, Researcher at Renewable Energy Sources Laboratory (Res Lab);  
Master's Student at Business and Technology University, Tbilisi, Georgia,  
e-mail: [elene.soselia.1@btu.edu.ge](mailto:elene.soselia.1@btu.edu.ge)

**Maia Melikidze**, Founder of Renewable Energy Sources Laboratory (Res Lab);  
Associate Professor at Business and Technology University, Tbilisi, Georgia,  
e-mail: [maia.melikidze@btu.edu.ge](mailto:maia.melikidze@btu.edu.ge)

**Annotation.** *This document is an analysis of the UN Sustainable Development Goals. The results of the study are based on the so-called "Desk research" method and information obtained based on secondary data processing, by using a quantitative method, processing and analyzing statistical data obtained from reliable sources and in the form of publicly published information. The world experience on this topic has been studied and the necessary components have been identified, which are necessary to determine in the long run, whether it is possible to have access to renewable solar resources in the future.*

**Keywords:** *Solar energy, inexhaustible resources, climate change, global challenges, electricity.*

**Introduction:** In 2015, 17 Sustainable Development Goals and 169 economic, social and environmental objectives were adopted by the UN General Assembly. Georgia has expressed support for the given goals and, as of today, is actively working by the plan outlined by 2030.

In this work, the 7th goal<sup>1</sup> is discussed specifically, which provides affordable and clean energy, improving energy efficiency, and developing the economic and social environment of Georgia.

As you know, as the population grows, the amount of fossil resources of their means of subsistence, such as coal, oil, etc., becomes depletable over time and will eventually, after some time, lead to fatal consequences for humanity. That is why we consider that it is necessary to study and initiate the processes of search and development of alternative resources to be able to properly use renewable energy sources over time and thus improve the standard of living and socio-economic benefits. All this will allow us to meet the increased demand, with minimal costs.

**The Aim of the work.** If we consider the fact that renewable energy is an inexhaustible resource, as it includes water, solar, wind, wave energy, and other natural resources, by 2030, its depletion is less expected, however, in the long run, it is interesting to see how

available these resources are for future generations, and how objectively we assess this fact, because climate change is entirely anticipated, and we think that while discussing this, we should consider how appropriate it is to intervene in a naturally occurring eco-environment, as long as we can, it will be interesting to consider historical experiences.

**Thematic Part.** According to scientific works and studies, reality is easily perceived. It is about D. Kbiladze's work "Statistical aspects of economic growth and social status measurement", which describes research methods and techniques that allow us to determine the right results and achieve the desired goals. Since D. Kbiladze's work is based on J. Stiglitz's report "Measurement of Economic Performance and Social Progress", it is necessary to read and evaluate the mentioned report to be able to see the current reality in the long run.

All UN member states agree on a better and more sustainable future, which is related to the current global challenges, and because "the rapid pace of globalization has put on the agenda the problem of socio-economic-ecological development of countries, information process of multilateral process"<sup>2</sup> - poverty, inequality, prosperity, peace, and justice, as well as climate and environmental challenges have become a common goal

---

<sup>1</sup> The 7th goal - Universal provision of affordable, reliable, sustainable and modern energy.

<sup>2</sup> D. Kbiladze, *Statistical aspects of economic growth and social status measurement*. Publishing „Universal“, 2012.

of Georgia and the world, to make reliable and modern energy services more accessible to the population and to be able to consume more renewable energy.

J. Stiglitz's report "Measurement of Economic Performance and Social Progress", discusses the indicators needed for sustainable European development, based on Eurostat data from 2007. In particular, our attention was drawn to the fact that J. Stiglitz's report names climate change as one of the sub-challenges to renewable energy consumption. This provision raises reasonable doubts about the exhaustibility of the use of renewable energy sources in the long run because if artificial interference in the natural environment can cause climate change, we must have detailed information about it to have the right information for proper development. Nenskra Hydropower Plant Project is a real example of it, the construction of which caused a great disagreement not only between the population and the authors of the project but also involved geologists, hydrogeologists, climatologists, and other competent persons.

Also, the production of electricity from renewable energy sources, biofuel consumption, combined heat, and power generation remains a challenge for the development of renewable energy. This also requires human capital and according to J. Stiglitz, human capital increases only as a result of education, and in this regard, we must promote human education to get higher benefits and increase productivity along with the obtained results.

**Existing unused energy resources in Georgia.** Taken into account the Social-economic Development Strategy published by the Government of Georgia in 2020, nowadays, the produced energy does not meet local requirements, which makes energy imports necessary, therefore, it puts supply stability, price control, and quality of production at risk. Why do we need import, when it is entirely possible for us to produce and export existing resources?! Whereas the rich energy and hydro resources of the country are unused and we have the opportunity to get high economic benefits and raise the level of development of Georgia, neglecting such opportunities is a crime.

According to the Global Competitiveness Report 2013-2014, Georgia ranks 52<sup>nd</sup> in terms of the quality of energy supply, and according to the World Bank Doing Business Report 2014, in terms of access to electricity – 54<sup>th</sup>.

Nowadays, getting energy from renewable sources has become quite a common practice, even though in the past it seemed almost impossible. It is already rapidly gaining popularity and becoming a preferred source of energy for a growing number of consumers.

**Comparison of international trends existing in the global market on the example of Georgia.** Now, we would like to discuss international trends in the global market and make a comparison on the example of Georgia.

Thanks to a successful combination of stimulation and demand growth trends that are often found in developed and developing countries around the world, solar and wind energy are successfully competing with traditional energy as their efficiency is constantly increasing.

In 2017, 187 countries around the world ordered a record amount of solar energy (93.7 GW), which is more than the total global volume in 2011 (69 GW), as a result, the global index was 386 GW. Leading countries in this regard are China, Japan, Germany, the USA, Italy, India, and Great Britain. Japan ranks one of the most advanced in the world in terms of solar energy value, mainly due to high capital expenses. The use of renewable energy sources along with energy storage also allows us to achieve price stability and equality in the market. We already have a solar power plant in Georgia, in a rather strategic free industrial zone, which is the first important step to the future.

All leading solar energy markets are implementing large-scale solar power projects with energy conservation, which is a wonderful experience to adapt to in Georgia. Renewable energy sources have already proven their capacity - to improve the resilience and reliability of electricity networks. Companies are constantly looking for cheap, environmentally friendly, and reliable energy sources. Thanks to the driving trends of development, solar and wind energy are now optimally equipped to meet all these requirements. Renewable smart cities consider these demands as an integral part of their strategy, and we need to set the same goal as well, as the use of renewable energy in municipal energy expands consumers' access to electricity while increasing the diversity of energy supply options available to them, which will be of particular interest to mountainous regions and agriculture, as solar and wind energy are already the cheapest source of energy in the world, with significant potential.

All of the above require proper assessment and analysis to reach the most reasonable and favorable conditions. D. Kbiladze's work discusses the topics of assessing economic outcomes and social progress, which is based on J. Stiglitz's report of the commission which analyses the methods of evaluation and not the economic measures. We think that these methods will help us achieve the desired goal.

"Statistical measurement of sustainable development should be guided by the system of national accounts (SNA). It is the internationally agreed modern system of economic information, which is used to analyze and regulate the market economy at the macro level in the country. The most important indicator in measuring the relationship between economic and environmental indicators is GDP<sup>3</sup>.

**UN goals 2030.** According to the goals proposed by the UN, by 2030 energy will become more sustainable and affordable:

7.1 To provide universal access to affordable, reliable, and modern energy services by 2030.

7.2 By 2030, the share of renewable energy in the world energy mix to be increased significantly.

7.3 The global rate of energy efficiency improvement by 2030 to be doubled.

7.4 A To deepen international cooperation by 2030 to promote clean energy research and technology, including renewable energy, energy efficiency, and advanced and clean fossil fuel technologies, and to promote investments in energy infrastructure and clean energy technology.

7.4 B By 2030, to expand the infrastructure of developing countries, especially less developed countries, small island developing countries, and landlocked developing countries, and upgrade modern renewable energy services, according to the appropriate programs.

**We would like to present some facts that will be useful for data processing:**

- 13 percent of the global population still does not have access to modern electricity.
- Energy is the dominant contributor to climate change, which is about 60% of total greenhouse gas emissions.
- In 2012, indoor air pollution from the use of combustible fuels for household energy caused the deaths of 4,3 million people.
- In 2016, the share of renewable energy sources grew at the fastest pace since 2012, up to 0,24 percentage points, and reached almost 17,5 percent due to the rapid growth of hydropower, wind, and solar.

### Conclusions

1. Energy resources can be divided into two categories - renewable and non-renewable. The first includes water, sun, wind, and the second - coal, oil, natural gas. In terms of the use, there is a so-called

traditional and non-traditional (alternative) energy. Traditional includes hydro, thermal and nuclear energy, non-traditional - helio (solar), eolo (wind), geothermal water, biomass energy.

2. Nowadays, the increasing pace of equipment and technology development allows us to use solar energy more efficiently than it was possible in previous years.

3. Through solar power plants, it is possible to convert solar energy into thermal or electrical energy, therefore, it is possible to distinguish between solar thermal installations and solar photocells (solar panels). The heat and electricity obtained from these installations can be used in the long run for both household and energy purposes.

4. The earth receives 500 times more energy from the sun than it is used in energy systems around the world.

5. The main advantages of solar electricity and heat are: reduction of dependence on imported fuel, improvement of energy supply diversity, saving of scarce natural resources.

6. The annual sunshine duration in most regions of Georgia varies from 250 to 280 days. The total annual solar energy in the country by region is 1250-1800 kWh on 1 sq. m area, while the average energy on the same 1 sq. m is equal to 4,2 kWh per day. It means that theoretically, the sun gives out enough energy for one average family on a 1,5-2,0 sq. m area of the earth.

7. A study published in Berlin<sup>4</sup> mentioned the unfortunate fact that despite the high levels of solar radiation in Georgia, the government has no plans to use solar panels, however, the statistics provide quite favorable conditions for investors.

8. As described in the publication, another important factor indicates Georgia's potential in terms of renewable solar energy: The European Bank for Reconstruction and Development has announced a tender in 2019 for the selection of consultants/advisors in various areas of solar renewable energy. Through co-financing, they have also contributed to those who want to consume high-efficiency energy products.

9. The supply of solar panels to mountainous areas has begun in 2014, under the project - "Electricity to all Villages". This project was re-elected after the Government of Georgia announced in 2019 "Strategy for Development of High Mountain Settlements 2019-2023".

10. With these small steps, it will be difficult to get an effective result in the short term. According to UN goals, the need for a 100% result by 2030 is inevitable, and there is less and less time left until 2030, and we waste more resources.

<sup>3</sup> D. Kbiladze, *Statistical aspects of economic growth and social status measurement*. Publishing „Universal“, 2012.

<sup>4</sup> Lucas Schimming, Tatiana Andreeva, Hendrik Meyer, Christoph Urbschat, eclareon GmbH – „ENABLING PV in Georgia“.

## References

1. კბილაძე დ. „ეკონომიკური ზრდისა და სოციალური მდგომარეობის შეფასების სტატისტიკური ასპექტები“, გამომცემლობა „უნივერსალი“, 2012.
2. Joseph E. Stiglitz, Amartya Sen - *Report of the Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress (CMEPSP)*
3. Lucas Schimming, Tatiana Andreeva, Hendrik Meyer, Christoph Urbschat, eclareon GmbH – „ENABLING PV in Georgia“.
4. სტატია - <http://www.eiec.gov.ge/თემები/ენერჯია.aspx>
5. სტატია - <http://mastsavlebeli.ge/?p=1367>
6. “გაეროს მდგრადი განვითარების მიზნების (SDGs) ინტეგრაცია საქართველოს ეროვნულ საჯარო პოლიტიკის სისტემაში” - [https://idfi.ge/ge/extent\\_of\\_sdgs\\_integration\\_in\\_national\\_public\\_policy\\_system\\_of\\_georgia](https://idfi.ge/ge/extent_of_sdgs_integration_in_national_public_policy_system_of_georgia)
7. Manish Ram, Dmitrii Bogdanov, Arman Aghahosseini, Ashish Gulagi, Solomon A. Oyewo ... – „GLOBAL ENERGY SYSTEM BASED ON 100% RENEWABLE ENERGY Power, Heat, Transport and Desalination Sectors“
8. საქართველოს სოციალურ-ეკონომიკური განვითარების სტრატეგია საქართველო 2020 - <https://napr.gov.ge/source/სტრატეგია/ViewFile.pdf>
9. სტატია <https://www.un.org/sustainabledevelopment/energy/>
10. სტატია - <https://greenalt.org/news/nenskra-hpp/>
11. სტატია <https://www.unicef.org/georgia/ka/მდგრადი-განვითარების-მიზნები>
12. სტატია - <http://csrblog.ge/2019/02/26/ხელმისაწვდომი-და-უსაფრთხ/>

## References (Transliterated)

1. Kbiladze D. “*ekonomikuri zrdisa da sotsialuri mdgomareobis shefasebis statistikuri aspektebi*”, *gamomtsemloba “universal”*, 2012. [Statistical aspects of economic growth and social status measurement. Publishing „Universal“, 2012]
2. Joseph E. Stiglitz, Amartya Sen - *Report of the Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress (CMEPSP)*
3. Lucas Schimming, Tatiana Andreeva, Hendrik Meyer, Christoph Urbschat, eclareon GmbH – „ENABLING PV in Georgia“.
4. Article - <http://www.eiec.gov.ge/topics/energy.aspx>
5. Article - <http://mastsavlebeli.ge/?p=1367>
6. “gaeros mdgradi ganvitarebis miznebis integratsia sakartvelos erovnul sajaro politikis sitemashi” [Integration of UN Sustainable Development Goals (SDGs) in the Georgian National Public Policy System]- [https://idfi.ge/ge/extent\\_of\\_sdgs\\_integration\\_in\\_national\\_public\\_policy\\_system\\_of\\_georgia](https://idfi.ge/ge/extent_of_sdgs_integration_in_national_public_policy_system_of_georgia)
7. Manish Ram, Dmitrii Bogdanov, Arman Aghahosseini, Ashish Gulagi, Solomon A. Oyewo ... – „Global Energy System Based On 100% Renewable Energy Power, Heat, Transport, and Desalination Sectors“
8. Sakartvelos sotsialur-ekonomikuri ganvitarebis strategia sakartvelo 2020. [Social-economic Development Strategy of Georgia 2020] - <https://napr.gov.ge/source/strategy/ViewFile.pdf>
9. Article <https://www.un.org/sustainabledevelopment/energy/>
10. Article <https://greenalt.org/news/nenskra-hpp/>
11. Article <https://www.unicef.org/georgia/ka/Sustainable-Development-Goals>
12. Article <http://csrblog.ge/2019/02/26/Affordable-and-safe/>



## Impact of Covid-19 on the Energy Sector Supply Chains

**Archil Samadashvili**, Doctor of Science, Professor

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [a.samadashvili@gtu.ge](mailto:a.samadashvili@gtu.ge)

**Nino Kvaraia**, Ph.D. Candidate

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, e-mail: [n.kvaraia@gmail.com](mailto:n.kvaraia@gmail.com)

**Annotation.** *This article summarizes the issues, challenges and implications of the COVID-19 pandemic on supply-chain activities globally, with an emphasis on the energy sector. The paper also provides strategies and insights into the risk mitigation opportunities for the supply-chain disruptions brought on by the impact of the pandemic. Supply-chain resilience is critical to economic recovery and in order to effectively mitigate the impact of COVID-19, companies must deploy innovative measures across the value-chain.*

**Keywords:** *logistics, supply chain, pandemic, production, disruption*

**Introduction:** Global supply chains have always been vulnerable to the risks associated with unpredictable and long-term events such as natural disasters, trade wars, pandemics, political instability, etc. The coronavirus pandemic has disrupted global operations in all sectors and industries of the economy. The disruptions are largely due to blocking measures that countries have adopted and implemented globally as a strategy to combat the spread of the pandemic. Production halts, movement restrictions of people and goods, border closures, logistical constraints, as well as the slowdown of trade and business activities are the result of COVID-19 lockdown measures.

The COVID-19 pandemic, which started in Wuhan, China, was first officially registered at the World Health Organization (WHO) China office on December 31, 2019. As of May 4, 2021, more than 153 million cases have been reported, of which more than 3.2 million have died [1]. The emergence of the virus in China, which is one of the major hubs of manufacturing and distribution globally, has had a major impact on the supply of finished and semi-finished products to countries around the world that are logistically linked to China.

As was clear at the Federal Energy Regulatory Commission's (FERC's) July two-day virtual technical conference to assess the pandemic's impact on the energy industry, COVID-19 has introduced multiple uncertainties for the power sector [2]. Summarized by the North American Electric Reliability Corp. (NERC), the most crucial risks posed by what it called a "people" event, focus on maintaining critical staff needed to operate and maintain the bulk power system (BPS) and mitigating supply chain issues. The latter, as the Edison Electric Institute's Philip D. Moeller noted, has been

vastly compounded by financial troubles posed by "decreased demand, lower commodity prices, reduced access to credit and reduced market liquidity, increased delinquencies, insolvent customers / unrecoverable defaults, lower and/or more volatile stock prices, construction delays, and lags in rate recovery" [2].

As a number of participants at the conference pointed out, supply chain issues haven't yet cropped up in any substantial way, mainly owing to rigorous planning by industry for emergencies affecting the BPS. Pandemic planning, which is pervasive across the industry, has also prompted a majority of companies to review their supply chain needs, and many participants remain ready to support mutual aid requests. The need for local or regional hubs has become evident in order to avoid / mitigate supply chain disruptions. Still, the industry appears to be bracing for long-term implications, and NERC itself has warned that constraints involving staffing and material shortages could ramp up risks related to the completion of major construction and maintenance projects. These risks include potential equipment and fuel supply chain disruptions.

Georgia's favorable geographical location can be successfully used in the localization of energy supply chains. It is not accidental that ACCIONA, one of the world leaders in the field of renewable energy, is considering the possibility of developing wind and solar stations in Georgia [3]. ACCIONA is a world leader in renewable energy and water management, operating exclusively in five continents, in 20 countries, in the renewable energy sector. The company is also active in the production of wind turbine generators. ACCIONA's annual revenue is €7.5 billion, and the company employs more than 38,000 people [3]. The favorable

investment environment in Georgia for the production of wind turbine generators and the role of Georgia as a transit hub in the region and the EU market, attracts the company.

Supply chain disruption risks are real and have affected global sub-sectors in varying ways, warned the International Energy Agency (IEA) in a series of reports surveying the power sector's global sub-sectors over the first few months of the pandemic. Much of the initial pain came from the sharp slowdown in manufacturing owing to stringent lockdowns to contain infections. Early production slowdowns in China, which accounts for 70% of global photovoltaic (PV) module manufacturing, posed logistical delays, though these have since been resolved. Perhaps harder hit was the wind sector, which saw disruptions from lockdowns in countries that harbor major manufacturing hubs, such as in China, Italy, and Spain. It is, however, possible to replace the Chinese solar panels and wind turbines required for renewable energy sources with appropriate local production products which will be further discussed in this document.

**Purpose of the work:** The aim of the work is to identify potential solutions and mitigation opportunities for the crisis caused by the pandemic. Many countries are analyzing and reviewing their supply chain approaches, while international companies are restructuring their outsourcing strategies to deliver the resources necessary for internal operations to help mitigate the risks of external interruptions from lockdown measures. Governments in developed economies have increased their appeal to businesses to carefully review processes that ensure resilience to disruptions in global supply and industry value chains. There was an attempt in Georgia at one time to create its own production of microgen turbines. This experience can be used to develop wind turbines, which will require financial support from the government.

German brand, iSolar, has been successfully operating in Georgia for three years already. The company officially opened the largest factory in Europe, which produces solar panels, in 2019 in the Hualing Free Industrial Zone, in the city of Kutaisi [4]. The factory's annual capacity is 500 megawatts, and the firm's total annual capacity exceeds 1 gigawatt. "Each installation by iSolar in Georgia is done by local staff," said Alexander Meyer, the company's founder and CEO. The company wants to have a close relationship with each interested individual or business. At the same time, it

realizes that a large part of the Georgian economy is dependent on tourism and agriculture, and because today there is a problem of energy supply and irrigation in different regions of Georgia, iSolar promises to solve this problem at a very reasonable price by introducing and promoting high quality solar panels. In carrying out the task, the brand has an advantage in terms of logistics, as the factory is located in Kutaisi (airport, sea and river transport, etc.)

At the end of March, the Global Wind Energy Council said its forecast of continued growth across the next five years—more than 355 GW of additions—would “undoubtedly be impacted by the ongoing COVID-19 pandemic, due to disruptions to global supply chains and project execution in 2020.” The IEA warned that challenges remain for the industry. “Before the crisis, equipment manufacturers faced financial pressures, with tighter margins stemming in part from competitive bidding and lower renewables prices,” it said. Given new uncertainties, some governments and utilities are delaying procurement, which means reduced order books and cash flow for suppliers. While it's too soon to assess a long-term impact, some analysts suggest that in the immediate future, several entities may shift priorities and business models, looking into repowering existing assets, for example, and adopting more flexible payment terms.

**Thematic part:** Information is growing daily about how the Covid-19 pandemic affects supply chains and disrupts manufacturing operations worldwide. The most vulnerable companies are those that rely on Chinese factories for parts and materials. Historically, pressure to reduce supply chain costs encouraged companies to pursue strategies such as lean manufacturing, offshore services, and outsourcing. Such cost-reducing measures mean that in the event of a supply chain breakdown, production will quickly stop due to lack of parts. Most global companies have limited visibility into all the moving parts in their supply chain.

In the near future, the cost of supplies from China may increase due to overtime and congested freight costs. It will be crucial for companies to identify alternative supply sources. Entrepreneurs around the world are under increasing political and competitive pressure to increase their domestic production and employment in their own countries, reduce or even eliminate dependence on risky sources, and reconsider their use in effective manufacturing strategies. Once information on the epidemic is received, it is likely that the competitive

leader in supply chain will move to more complete proactive modeling of operations. Companies need to analyze their supply chains more deeply and systematically.

Based on the latest information, the production of photovoltaic panels required for the conversion of solar radiation into electricity has started in Georgia. Government incentives should ensure the intensification of activities in this direction.

### **Conclusion:**

#### Improving the visibility of supply chains

Companies should deploy supply chain visibility tools to provide line of sight to capacity constraints into first, second, and third-tier suppliers. [5] This will allow global manufacturers to get more complete information about where components are coming from for their sub-assemblies.

#### Modeling new risks and costs

Business leaders should also consider how new tools and technologies can deliver more intelligence. For example, risk assessment tools using machine learning can find templates that indicate risks or opportunities for macroeconomic, geopolitical, and global health, exchange rates, and other data. These tools can also quickly model alternative supply and transportation scenarios.

Big Data and Data Analytics can transform supply chains. "The three biggest benefits for using big data within supply chains are traceability, relationship management (*e.g.*, better customer service), and forecasting/predictability," states Thomson Reuters report [6]. "The benefits of traceability are obvious. Knowing where your goods are located at any point of the supply chain, being able to predict or be notified of supply chain disruptions, and having contingency plans to address these issues have an enormous impact on profitability, resource planning, and customer satisfaction."

#### Concentration on endurance

The COVID-19 explosion may lead to the readjustment of long-term supply chains to create sustainability. The long, lean and low-cost global supply chains that have dominated the last few decades will never be the same again. Offshore production by low labor cost countries, which at one time was profitable because of price,

efficiency and speed, found themselves vulnerable to extreme shocks of pandemic-like supply and demand.

"Before the pandemic, companies had been very successful at cutting costs dramatically from the supply chain with practices like lean manufacturing, outsourcing, and consolidation," said David Simchi-Levy, a professor of engineering systems at the Massachusetts Institute of Technology (MIT) and director of the MIT Data Science Laboratory [7]. "All of these strategies have allowed them to reduce value, but dramatically increase the likelihood of risk."

The earlier strikes on supply chains were temporary, and remedial. But COVID-19 hit everywhere at once and an unprecedented situation presented itself: borders were closed, factories were closed, transportation was stopped, workers were locked in homes and companies were unable to ship goods. Global supply chains broke down.

Risk management has never been a high priority. However, it is now necessary to focus on risk management, as resource depletion and the climate crisis will lead to wider and more frequent global shocks in the near future. The topic of global supply chains has never been more relevant.

There are two main dimensions to consider:

1. **Recovery Time:** The time that each node - supplier facility, distribution center or transport node - will need to be after a complete breakdown. By removing an item from the supply network during the recovery period, the firm can estimate lost sales, revenue, or margin.

2. **Survival time:** The maximum duration during which customer demand can be met by existing stock.

The relationship between these two measures helps to identify the hidden risk. For example, if the recovery time of a given facility is longer than the survival time, supply chains will not be able to meet demand without a backup plan. Companies can use digital tools to simulate disruptions and identify potential problems, allowing them to assess the cost of disruptions and prepare mitigation plans for the most critical parts of supply chains [8].

The main benefit of having local suppliers is that they can be more reliable, responsive and visible. Not only is it possible to develop individual relationships with local suppliers and meet on a regular basis, but the tools

available for collaboration are less complicated. This also reduces the overall risk. Companies can simulate shorter supply chains and determine where the risks of supplied extended global chains can be reduced by increasing localization.

One trend that may work in favor of switching to local suppliers is that the labor value advantage that companies previously found from countries such as China has deteriorated. Most organizations try to increase the number of their suppliers, potentially reduce redundancy, while suppliers are close to their business - this is an attempt to reduce the risk associated with pandemics and global trade and ensure supply continuity.

More than half of the 341 manufacturers and retailers surveyed by the logistics provider's equal group said they had problems with production and distribution activities and were forced to consider alternative agreements [9]. Now one-quarter plan to move certain operations out of China over the next three years. But just moving production closer to market demand does not provide durability. Organizations therefore need to conduct stress testing on their chains.

Companies can also segment supply chains with some products aiming for cost and efficiency while others for durability. Many American companies analyze that they can buy products made in China from other low-cost geographies, such as Mexico [9]. Or companies may choose regional suppliers that are more expensive but have reduced logistics costs and provide less risk of disruption as we have seen in the case of a pandemic.

In this respect, Georgia has a very favorable geographic location. As a link between Europe and Asia, and a country close to the port, Georgia has the potential to rise to the forefront as one of the main hubs to strengthen European companies. It is imperative to take advantage of the current situation and make Georgia attractive as an investment for large and powerful companies. In this regard, the Georgian government should consider ways to encourage sustainable companies to invest in Georgia.

Significant scientific-engineering potential was created in Georgia for the planning and production of hydro turbines for micro-hydropower plants at the Tbilisi Aviation Plant. Today's capabilities have not only significantly improved it, but also have made it usable for wind turbines. The following two pieces of information confirm this:

1. A digital model for a prototype of a micro-HPP turbine wing prototype was created using the 3D scanning service through a cycle scanning machine (PCB) in the Fablab of the Technopark of the Georgian Technical University [10].

2. "Wind Turbines with Georgian Wings" - is a name of the project that was among the finalists of the Millennium Innovation Award. It is based on the production of polymers (high molecular weight compounds) from Georgian raw materials and then the idea is to make Georgian turbine wings [11].

We can no longer rely on data from the past to predict the future. Among the practices that need to be reviewed is the use of historical data to make decisions. On-demand forecasting allows companies to manage supply chains in real time.

Real-time data supply of existing statistical models was found to be the best indicator, eliminating the historical biases permeated in them. By using machine learning, companies will be able to better anticipate rapid changes in demand. Today it is a pandemic, but tomorrow it may be another unexpected event.

Using such integrated capabilities, in addition to machine learning, businesses can analyze better real-time supply and demand scenario planning and optimize their supply chains [12]. Through automation, organizations can collect and analyze in real time to provide the hyper-localized visibility needed for production and distribution under expansion or contract.

The pandemic has brought some companies to the brink and many more are struggling to survive. Demand for some products may be lower for some time. Many businesses will focus on analyzing supply and demand shifts, and mitigating them, as well as figuring out how to get employees back to safe and productive working conditions.

## References

1. Who coronavirus disease (covid-19) dashboard. <https://covid19.who.int/> (02/05/2021)
2. Patel, S. (3/8/2020, August 3). *The Growing Strain of Power Sector Supply Chain Disruptions*. POWER Magazine. <https://www.powermag.com/the-growing-strain-of-power-sector-supply-chain-disruptions/>
3. Government of Georgia (2020). *One of the world leaders ACCIONA is considering the possibility of developing wind and solar stations in Georgia*. [http://gov.ge/index.php?lang\\_id=-&sec\\_id=541&info\\_id=74956](http://gov.ge/index.php?lang_id=-&sec_id=541&info_id=74956)

4. Bibileishvili, Ana (28/2/2020, February 28) *The largest solar panel factory in Europe is operating in Kutaisi.* <https://www.entrepreneur.com/article/346923>
5. PricewaterhouseCoopers. (2020). *COVID-19: Operations and supply chain disruption.* PwC. <https://www.pwc.com/us/en/library/covid-19/supply-chain.html>
6. Kane, J. (18/1/2021, January 18). *Data analytics is transforming supply chain management.* Thomson Reuters Institute. <https://www.thomsonreuters.com/en-us/posts/international-trade-and-supply-chain/data-analytics-supply-chain-management/>
7. Hixson, G. (22/12/2020). *5 Supply Chain Truths for a Post-COVID-19 World.* SAP Insights. <https://insights.sap.com/5-supply-chain-truths-post-covid-19-world/>
8. *How Coronavirus Could Impact the Global Supply Chain by Mid-March.* (28.02.2020). Harvard Business Review. <https://hbr.org/2020/02/how-coronavirus-could-impact-the-global-supply-chain-by-mid-march>
9. Olson, D. (2014). *Supply Chain Risk Management: Tools for Analysis* (2nd ed.). Harvard Business Publishing.
10. Georgia's Innovation & Technology Agency (2021). <https://gita.gov.ge/eng/static/49/fablabeji>
11. Millennium Challenge Account - Georgia. (2021) <http://www.mcageorgia.ge/>
12. *Impact of COVID-19 on the supply chain industry.* (2020). <https://www.pwc.com/ng/en/assets/pdf/impact-of-covid19-the-supply-chain-industry.pdf>



### Management of the energy economy of Ukraine: some aspects of the development of mining enterprises

**Yuliia Papizh**, PhD (Economics), Associate professor,  
Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: papizhyuliia@gmail.com

**Annotation.** Sustainable development of a mining company is affected significantly by principals of external economic environment that is local, national and global economies. The problem of choosing a model of sustainable development of a mining enterprise is determined, which makes it possible to predict the trajectory of its development in the short and long term, the choice of optimal solutions. The actual balance between economic, ecological and social sectors of mining company development is influenced by many factors intrinsic to developing countries. The following impact factors can be outlined among others. A vertical between lowest company level and highest national economy level of sustainable development is not introduced yet. Rapid changes of politics that are as unexpected as close to uncertainty usually come with changes of current pattern of stakeholders' diversity that has negative impact on strategic planning. As a consequence sustainable development framework need to be improved for the mining company purposes. In turn achieving its sustainability requires a new approach to strategic planning, monitoring and reviewing activities of the mining company as sustainable development applies for sustainable management. Therefore running mining company in a sustainable way means that interests of all economic agents are met optimally subject to constraints on sustainable development principals, lifecycle of the company is as long as possible and its profitability is resilient to unfortunate costs. It is proposed to manage the mining enterprise in order to ensure its sustainable development on the basis of the principle of sustainable development based on the value of the object. The main purpose of this method is to monitor production costs in order to reduce them and redistribute overhead costs. In this case, the object of cost accounting (function, process, cost generation center) differs from the object of costing, which represents products and services. Thus, the integration of these provisions in order to adapt to the harmonious development of the mining company can help resolve the conflict between the principles of sustainable development and the rules of a market economy.

**Key words.** mining enterprises, management, sustainability, development, energy economy.

**Introduction.** Exploring the core essence of sustainable development namely its principals and concepts, analyzing relationship of sustainable development and other economic theories and studying current ideas of how to make mining companies to grow sustainably provide some insights into contradictory connection of sustainable development itself and mining company activities within the market economy. As we see it these contradictory challenges remaining untaken up prevent mining companies from adhering to balanced economic, environmental and social interests in practice and disallow to put economic, social and ecologic sectors of internal and external environment together around the mining company providing its integration into local and national economies.

**Analysis of recent research and publications.** Existing models of sustainable development, which under certain modifications can be applied to mining enterprises, can be divided into three classes: mathematical, graphical and combined models. Among them are the following: the model of global sustainable development of Phillips J. [5], the model of sustainable development of the enterprise Krainka D., Glavik P. [2], the model of sustainable development of cities Marquez B., Espinoza-Fernandez I. [2], model of sustainable development of underdeveloped communities Angulo F., Olivara J. [3], cognitive model of sustainable innovative development of enterprise Bogatikova V.M [7], cybernetic model of functioning

of the industrial enterprise Forrester D. [17], simulation model of sustainable development of small and medium industrial enterprise Maligina S.N., Abalimova D.M. [11], cognitive map of sustainable development of the city Petrikova E.M. [14]. Thus, the analysis of sustainable development models presented in the scientific literature allows us to conclude that representatives of European scientific schools pay more attention to building graphical models, while scientists from other countries focus on mathematical modeling of socio-ecological and economic processes.

The **arm** of the article is to determine the possibility of managing mining enterprises in order to ensure their sustainable development on the basis of the principles of sustainable development and the rules of a market economy.

**Results.** The first challenge could be described as fundamental contradiction between postulates of the market economy according to which mining companies perform and managers' estimation of a level of importance and significance that social and environmental projects are of. As a consequence it mirrors their attitude to such projects which in such case do not occupy priority positions among company goals. Saying reverse sustainable development process is considered by managers and owners of assets to be of high cost and low benefit.

At the same time a mining company is committed to the market economy rules and recognizes benefit as the only one driver for its activities. Unfortunately

usual results and outcomes of ecologic and social projects benefit society as they are services provided in education, health, culture and rest sectors without direct financial profit for a company.

Not having a clear measurable indicator to evaluate positive effect of their impact on the company image or market value makes sustainable development projects to be evaluated abstractly and subjectively. Rising in market value of sustainably developed company and its climbing up to the top of ranking among different companies are worth moving towards sustainability if the company is actually a corporation, being sold and meets eligible financial criteria to be finally ranked. Otherwise social and environmental projects require to be financed at the expense of the company with reducing the profit gained. By extension, alternative cost of such projects accounted as virtual effect that would be achieved due to financing other economic business may exceed ecologic and social effect as assessed by experts and seen after sustainable development measures. All this pushes risks that the company will refuse to take social and ecologic projects up especially under conditions of new top management board or new owners being introduced or particularly without any government subsidies being provided.

Thence the conceptual platform for sustainable development of mining company is required to integrate the process of sustainable development itself into market economy model to ensure that the company benefits from being committed to sustainability principals and that such benefit is clearly measured in money equivalent. Globally there is a good example of it concerning artificially made world market for quotas on CO<sub>2</sub> emissions according to Kyoto Protocol where a company is able to sell unused quotas to other demanders secured after implementing innovative green technologies. In such the case green technologies become an investment project with certain level of profit.

It was found that a mining company by its nature violates the principles of sustainable development not only during active operation stage of its life cycle, but also after its liquidation as an economic entity.

Then a dilemma arises. It is proposed to think it of as a dilemma of transitioned stability roll in the development of the mining company (Sustainability Roll in Transitive Mining) (Fig. 1).

The economic essence of sustainability roll observed during the development of the mining enterprise can be determined as a concentration of resources to perform more tasks in one or two areas – that is, economic, social and environmental. It accordingly allows satisfying the interests of certain groups of stakeholders to a greater extent than others. If a mining company is active in the economic area, then its standing could not be called absolutely sustainable due to the significant ecosystem disruption

(social and economic sustainability roll). In turn, the termination of the process of destroying the ecosystem causes social and economic shocks in the territorial development (environmental sustainability roll). Therefore, in this regard, it can be concluded that both the actual mining activities and its termination shall not contribute to the achievement of sustainable development of internal and external environments of the company. This precedes the question of the possibility to ensure sustainable development of a mining company even after its liquidation, as an economic entity.

Sustainability roll is a dynamic characteristic of the mining enterprise development, which is explained by its shift and especially clearly observed in the transition from active mining enterprise economic activity to its termination. This suggests that the roll of the enterprise agile in time. At different points of time, at different stages of development of the enterprise we can see deterioration in the economic, social or environmental internal and external subsystems of the company due to a specific variant of the reallocation of resources.

Taking into consideration all said above, we can formulate the following provision to complement existing theoretical foundations for sustainable development of the mining enterprises. Sustainability in the development of the mining company does not disappear or appear as a permanent feature because the company always has internal economic, social and environmental impact and is always integrated into external upper system. However, the efficiency and effectiveness of sustainable development of the mining enterprise depends on the harmonious interaction of these areas. It is reflected in the roll of sustainability of mining enterprise that is changing in the transitional stages of its operations. Mining company after termination of economic activity also has a roll of its sustainable development at a post-termination stage.

The second and the third contradictions are relevant to life cycle and basic activities of a mining company. In fact mining company according to the core essence of its activities breaks principals of sustainable development not only during the mining process itself but also after being abandoned and closed. Herewith closure of the mining company means as finished mining process so terminated legal entity status. Then the dilemma could be found in mining company sustainable development and overall performance. It is offered to consider that dilemma under the name of Sustainability Roll in Transitive Mining. Further description of it may be encapsulated in the following statements.

At the moment of terminating the process of digging resources which is the point of actual transition of the mining company from being a mine to uncertain phase of its life cycle a special phenomenon of changing sustainability roll or such roll's occurring could be

observed in interaction of economic, social and ecological internal and external systems of the company. The economic nature of the sustainability roll allows defining that the mining company is rolled when resources are concentrated to achieve goals of one or two of three balanced sectors of the company. If it is so, economic interests of certain stakeholders are satisfied more or in a better way.

During intensive mining development of the mining company cannot be identified as sustainable absolutely because of dramatic impact on environment. It is therefore social and economic sustainability roll. Destroying environment comes to a stop when mining is recessed. But then social and economic shocks of spatial development occur. It is ecological sustainability roll. Thus as mining company activities so its closure does not contribute to absolute sustainability of interaction of internal and external systems. Consequently a principal question arises whether it is possible to achieve sustainable development of a region or territory where mining company is situated even after its status of legal entity being terminated.

Sustainability roll is a dynamic feature of mining company development that is shown due to its changes occurring at the moment of cutting extraction of minerals off. Hence sustainability may be supposed to roll over time that is different phases of the mining company life cycle can suffer economic, social and environmental slowing down caused by certain model of production factors' distribution.

In addition to current theory of providing development of the mining company according to sustainability principals the following items can be delivered. The mining company sustainability does not appear and vanish but is a permanent for it as the company always has internal economic, social and ecologic environment as well as always is integrated into local (regional) equal systems. But the extent to which sustainable development of the mining company is beneficial economically and efficient socially depends on the level of harmony met by economic, social and ecologic systems in their interacting. Particularly this harmonic interaction can be described by means of sustainability roll that changes during phases of transition. As mentioned above, the mining company also has sustainability roll even after terminating the process of digging minerals and such roll is stuck to post closure phase.

Let's consider in details contradictory challenges arising from mismatch of sustainable development principals and mining company market activities over phases of mining and its stop as well as negative impact of these contradictions on the company itself and local economy.

Primary activities of the mining company for extracting not renewable natural resources come into

conflict with the sustainability principal to save nature for future generations. But keeping existing reserves of not renewable natural resources unused that requires a rapid closure of mining company along with complete their exhausting lead to a necessary closure of mining company identically.

As a consequence mining company closure directly affects spatial depression while sustainable development supposes economic systems to be developed in a long period to provide high life standards on those territories.

The mining company liquidation requires new investment projects to be found by the owner. For employees it means losses of their jobs. By extension, environment destroyed through mining need to be recovered or otherwise it is the company that has sole responsibility for it and nothing excludes liability for its fraud.

Contradictions pointed out above make risks of shaping or exacerbation of economic, social and ecologic spatial depression with deprivation of source of financing state and local budgets, pushing up unemployment, resettlement and reeducation of miners including members of their families, worsening ecology and having risks of territorial flooding and underground gas methane explosion.

Thus the concept of mining company sustainable development must suggest its life cycle extension through diversifying its activities in a way that ensures absence of sustainability roll particularly during the process of transition from digging minerals to its termination.

The forth conflict item is that socially and ecologically important objects of external environment are not integrated into the model of the mining company particularly into the legal one. But at the same time sustainable development suggests that economic, social and ecologic systems to be closely related. As rule social and ecologic objects are local or the state property so they are not included into the model of the mining company and don't meet distributed company's resources. However the company is relatively responsible for such objects development to achieve its own sustainable development. In this connection a strong factor of interpersonal agreement between owners of the company and social and ecologic objects is to be found that in different cases drives or slows down redistribution of resources for these objects.

Consequently uncertainty of organizational hierarchy and lack of rights and liabilities of the company to run social and ecologic objects located on the nearby territory reserved by law make such objects to be considered by the company only as ones for sponsorship in case of appropriate profit and owner's wish.

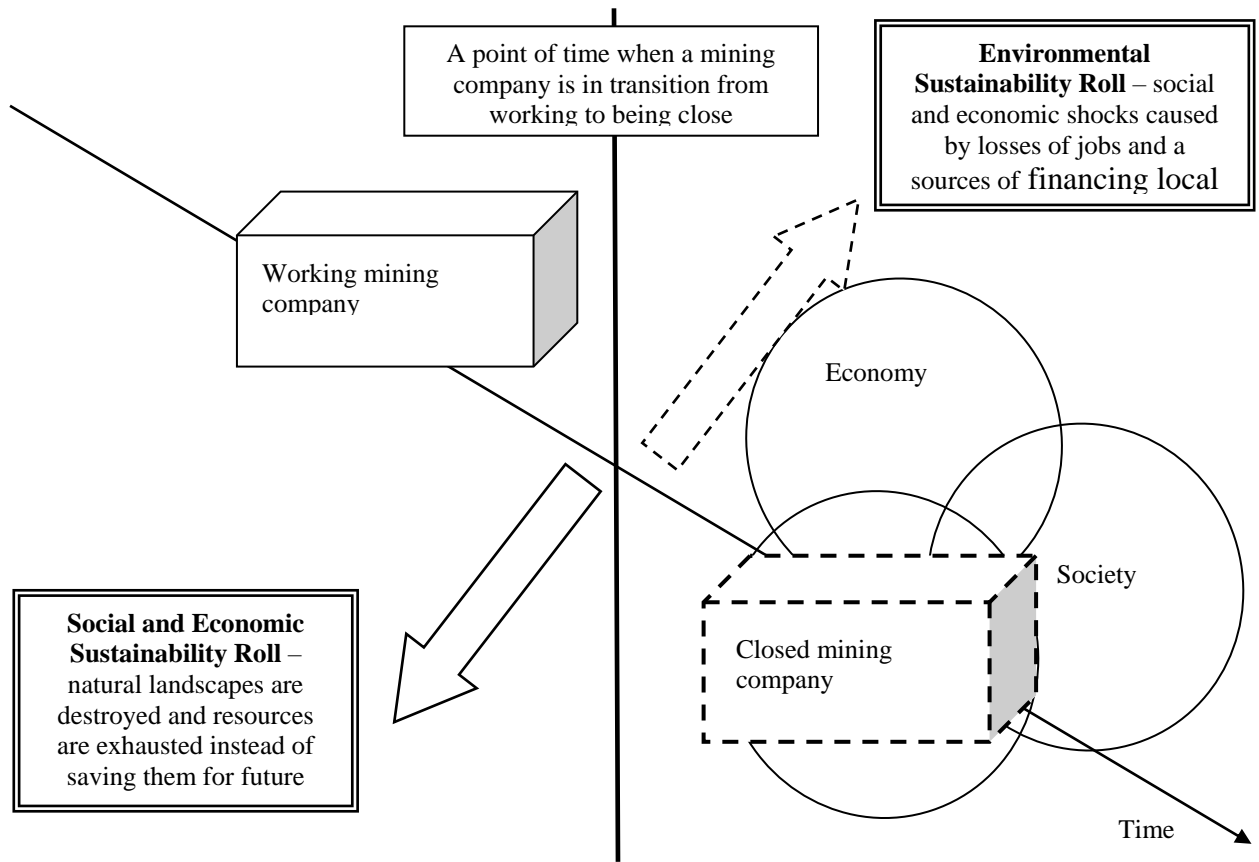


Fig. 1. Sustainability Roll in Mining Transition

For regional economy this contradiction means loss of stable finance source for maintaining social infrastructure and objects of ecologic safety, their destroying and high dependence on decision of company's owner. Thus the concept of the mining company sustainable development must suggest that social and ecologic objects should be integrated into the company model in a certain way.

### Conclusions

The above analysis of the existing contradictions between the principles of sustainable development and the principles of the mining enterprise allows to propose to manage the mining enterprise in order to ensure its sustainable development based on the principle of sustainable development based on the value of the object. It should be noted that in the context of the article, the approach of sustainable development based on object value does not apply to the widely used in practice costing based on activities, process accounting, accounting center responsible, which demonstrate methods of cost accounting in general.

The main purpose of these methods is to monitor production costs in order to reduce them and redistribute overhead costs. In this case, the object of cost accounting (function, process, cost generation center) differs from the object of costing, which represents products and services.

In contrast to these approaches, the proposed approach to sustainable development aims to analyze the economic activity of the mining company to ensure its sustainable development in order to find and use reserves to enhance the harmony of economic, social and environmental systems by eliminating the above principle of sustainability.

The integration of these provisions in order to adapt to the harmonious development of the mining enterprise can help resolve the conflict between the principles of sustainable development and the rules of a market economy.

## References (Literature)

1. Krajnc D., Glavic P. How to Compare Companies on Relevant Dimensions of Sustainability. *Ecological Economics*. 2005. №55. P.551-563. URL: <http://ejournal.narotama.ac.id/files/ANALYSIS.pdf>.
2. Marquez B., Espinoza-Hernandez I., Sergio Magdaleno-Palencia J. Sustainable System Modelling for Urban Development Using Distributed Agencies. URL: [http://cdn.intechopen.com/pdfs/29220/InTech-Sustainable\\_system\\_modelling\\_for\\_urban\\_development\\_using\\_distributed\\_agencies.pdf](http://cdn.intechopen.com/pdfs/29220/InTech-Sustainable_system_modelling_for_urban_development_using_distributed_agencies.pdf).
3. Nonlinear Dynamics and Bifurcation Analysis in Two Models of Sustainable Development / F. Angulo et al. *Revista Internacional Sostenibilidad, Tecnologia y Humanismo*. 2009. №5. P. 41-46. URL: [http://www.researchgate.net/publication/43067722\\_Nonlinear\\_dynamics\\_and\\_bifurcation\\_analysis\\_in\\_two\\_models\\_of\\_sustainable\\_development/file/79e41507d7eaa14395.pdf](http://www.researchgate.net/publication/43067722_Nonlinear_dynamics_and_bifurcation_analysis_in_two_models_of_sustainable_development/file/79e41507d7eaa14395.pdf).
4. Papizh Yu. Features of effective clustering in mining regions of Ukraine. *Економічний вісник Донбасу*. 2016. № 4(46). P. 67-69.
5. Phillips J.A Mathematical Model of Sustainable Development Using Ideas of Coupled Environment-Human Systems. *The PelicanWeb's Journal of Sustainable Development*. 2010. Vol.6. №5. URL: <http://www.pelicanweb.org/solisustv06n05page2jasonphillips.html>.
6. Амоша О.І., Стариченко Л.Л., Череватський Д.Ю. Стан, основні проблеми і перспективи вугільної промисловості України: наук. доповідь. Донецьк: ІЕП НАН України. 2013. 44 с.
7. Богатиков В.Н., Халиуллина Д.Н. Когнитивная модель развития инновационного предприятия как сложной динамической системы. URL: [http://www.rusnauka.com/4\\_SND\\_2013/Tecnic/12\\_127921.doc.htm](http://www.rusnauka.com/4_SND_2013/Tecnic/12_127921.doc.htm).
8. Воронков Д.К., Погорелов Ю.С. Развитие предприятия: управление змінами та інновації: монографія. Харків: Адва™, 2009. 436 с.
9. Демешок О.О. Механізм управління забезпеченням економічної безпеки у промисловості : автореф. дис. ... д-ра екон. наук :08.00.03 «Економіка та управління національним господарством»; Донецьк. 2012. 28 с.
10. Інституціональне забезпечення інноваційного розвитку вугільної промисловості: монографія / О.І. Амоша та ін. Київ : НАН України, Ін-т економіки пром-сті, 2015. 196 с.
11. Мальгина С.Н., Абальмова Д.Н. Разработка системы имитационного моделирования развития малого и среднего промышленного предприятия. *Труды ИСА РАН*. 2008. Т.39. С. 256-262. URL: <http://www.isa.ru/proceedings/images/documents/2008-39/256-262.pdf>.
12. Макогон Ю. Вугільна галузь України: проблеми та перспективи сталого розвитку: аналітична записка. URL: Режим доступу: <http://www.old.niss.gov.ua/Monitor/desember08/5.htm>
13. Папіж Ю.С. Аналіз процесів та явищ інноваційного розвитку в економіці України: від економіки підприємства до регіональної економіки. Інноваційний розвиток економіки: процеси та явища: монографія/В.Я. Швець, М.С. Пашкевич, Ю.С. Папіж. Д.: НГУ, 2013. 612 с.
14. Петрикова Е.М. Системно-динамическая модель развития моногорода. URL: [http://www.monocityforum.ru/netcat\\_files/143/180/h\\_244f008370132958e15b27ea6016ae52](http://www.monocityforum.ru/netcat_files/143/180/h_244f008370132958e15b27ea6016ae52).
15. Проценко Н.Б. Організаційно-економічний механізм забезпечення довгострокової економічної стійкості промислових підприємств : автореф. дис. ... канд. екон. наук : 08.00.04 «Економіка та управління підприємствами (переробна промисловість)»; Донецьк, 2009. 19 с.
16. Трубочанін В.В. Диверсифікація виробництва на промислових підприємствах : автореф. дис. ... д-ра екон. наук : 08.00.04 «Економіка та управління підприємствами (за видами економічної діяльності)»; Донецьк, 2011. 32 с.
17. Форрестер Д. Основы кибернетики предприятия (Индустриальная динамика). М., 1971. 340 с.

## References (transliterated)

1. Krajnc, D. and Glavic, P. (2005), "How to Compare Companies on Relevant Dimensions of Sustainability", *Ecological Economics*, vol. 55, pp. 551-563. URL: <http://ejournal.narotama.ac.id/files/ANALYSIS.pdf>.
2. Marquez, B. Espinoza-Hernandez, I. and Sergio Magdaleno-Palencia, J. "Sustainable System Modelling for Urban Development Using Distributed Agencies". URL: [http://cdn.intechopen.com/pdfs/29220/InTech-Sustainable\\_system\\_modelling\\_for\\_urban\\_development\\_using\\_distributed\\_agencies.pdf](http://cdn.intechopen.com/pdfs/29220/InTech-Sustainable_system_modelling_for_urban_development_using_distributed_agencies.pdf).
3. Angulo, F. et al (2009) "Nonlinear Dynamics and Bifurcation Analysis in Two Models of Sustainable Development", *Revista Internacional Sostenibilidad, Tecnologia y Humanismo*, №5, pp. 41-46. URL: [http://www.researchgate.net/publication/43067722\\_Nonlinear\\_dynamics\\_and\\_bifurcation\\_analysis\\_in\\_two\\_models\\_of\\_sustainable\\_development/file/79e41507d7eaa14395.pdf](http://www.researchgate.net/publication/43067722_Nonlinear_dynamics_and_bifurcation_analysis_in_two_models_of_sustainable_development/file/79e41507d7eaa14395.pdf).
4. Papizh, Yu. (2016), "Features of effective clustering in mining regions of Ukraine", *Економічний вісник Донбасу*, no 4(46), pp. 67-69.



5. Phillips, J.A. (2010) "Mathematical Model of Sustainable Development Using Ideas of Coupled Environment-Human Systems", *The PelicanWeb's Journal of Sustainable Development*, vol.6, no5, URL: <http://www.pelicanweb.org/solisustv06n05page2jasonphillips.html>.
6. Amosha, O.I. Starychenko, L.L. and Cherevats'kyj, D.Yu. (2013) *Stan, osnovni problemy i perspektivy vuhil'noi promyslovosti Ukrainy* [State, main problems and prospects of the coal industry of Ukraine], IEP NAN Ukrainy, Donetsk, Ukraine.
7. Bohatykov, V.N. and Khalyullyna, D.N. *Kohnytnaia model' razvytiia ynovatsyonnoho predpriatya kak slozhnoj dynamicheskoi systemy* [Cognitive model of development of an innovative enterprise as a complex dynamic system], URL: [http://www.rusnauka.com/4\\_SND\\_2013/Tecnic/12\\_127921.doc.htm](http://www.rusnauka.com/4_SND_2013/Tecnic/12_127921.doc.htm).
8. Voronkov, D.K. and Pohorelov, Yu.S. (2009) *Rozvytok pidpriemstva: upravlinnia zminy ta innovatsii* [Enterprise development: change management and innovation], AdvA™, Kharkiv, Ukraine.
9. Demeshok, O.O. (2012) "Mekhanizm upravlinnia zabezpechenniam ekonomichnoi bezpeky u promyslovosti", Ph.D. Thesis, *Ekonomika ta upravlinnia natsional'nym hospodarstvom*, Donetsk, Ukraine.
10. Amosha, O.I. et al (2015) *Kyiv Instytutsional'ne zabezpechennia innovatsijnoho rozvytku vuhil'noi promyslovosti* [Institutional support for innovative development of the coal industry], NAN Ukrainy, In-t ekonomiky prom-sti, Kyiv, Ukraine.
11. Malyhyna, S.N. and Abalymova, D.N. (2008) "Razrabotka systemy ymytatsyonnoho modelirovaniia razvytiia maloho y sredneho promyshlennoho predpriatya", *Trudy YSA RAN*, T.39, pp. 256-262. URL: <http://www.isa.ru/proceedings/images/documents/2008-39/256-262.pdf> (Accessed 09 February 2021).
12. Makohon, Yu. *Vuhil'na haluz' Ukrainy: problemy ta perspektivy staloho rozvytku: analitychna zapyska* [Coal industry of Ukraine: problems and prospects of sustainable development], URL: <http://www.old.niss.gov.ua/Monitor/desember08/5.htm/> (Accessed 07 February 2021).
13. Shvets, V.Ya. Pashkevych, M.S and Papizh, Yu.S. (2013) *Analiz protsesiv ta iavysch innovatsijnoho rozvytku v ekonomitsi Ukrainy: vid ekonomiky pidpriemstva do rehional'noi ekonomiky* [Analysis of processes and phenomena of innovative development in the economy of Ukraine: from the economy of the enterprise to the regional economy]. *Innovatsijnyj rozvytok ekonomiky: protsesy ta iavyscha* [Innovative development of economy: processes and phenomena ], NHU, Dnipro, Ukraine
14. Petrykova, E.M. *Systemno-dynamicheskaia model' razvytiia monohoroda* [System-dynamic model of monotown development], URL: [http://www.monocityforum.ru/netcat\\_files/143/180/h\\_244f008370132958e15b27ea6016ae52](http://www.monocityforum.ru/netcat_files/143/180/h_244f008370132958e15b27ea6016ae52) (Accessed 09 February 2021).
15. Protsenko, N.B. (2009) "Organizational and economic mechanism for ensuring long-term economic stability of industrial enterprises", Ph.D. Thesis, *Economics and enterprise management (processing industry)*, Donetsk, Ukraine.
16. Trubchanin, V.V. (2011) "Diversification of production at industrial enterprises", Ph.D. Thesis, *Economics and management of enterprises (by type of economic activity)*, Donetsk, Ukraine.
17. Forrester, D. (1971) *Osnovy kibernetiki predpriatija (Industrial'naja dinamika)* [Fundamentals of enterprise cybernetics (Industrial dynamics)], Moskva, Rossiia.

## Factors of technological development of global power industry and their influence on the ukrainian energy sector

**Yu.V. Dubiei**, Cand.Sci. (Econ.), Assistant-Professor  
Dnipro University of Technology, yuliya.dubey@gmail.com

**Annotation.** *The article is devoted to identifying the features and priority areas of technological development of electric power companies in the context of globalization of economic processes. The main factors influencing the direction of technological development of world leaders in the power industry are identified as: the interests of the board of directors, the behavior of market subjects, consumer sentiment and competitive pressure. The need to change the energy sector of Ukraine, which can become an important factor in its socio-economic development is substantiated. The article can be recommended to specialists in the field of theory and practice of management of technological development in the electric power industry.*

**Key words:** *technological development, electric power complex, scientific and technical developments, innovations, world leaders in the energy sector.*

**Introduction.** In the 21st century, electricity markets around the world have changed significantly as market forces have increased in the supply and distribution of energy. Markets have become open, a large number of competitors have emerged, mergers and acquisitions have taken place, businesses have become more rational in their operations, technologies have been improved, and consumers have become more demanding for new functions.

There are various electric power companies operating all over the world: small and large; public and private; specialized in one direction and integrated; local, regional, national and international ones. There are more than 7,000 sites in over 170 countries in the distribution network alone. The world's largest energy companies in terms of asset value, revenue and number of consumers include: NextEra Energy, Enel, Duke Energy, Dominion Energy, Iberdrola, Southern Company, National Grid, Engie, Exelon, EDF, AEP. The following energy companies can be distinguished on the European continent: EDF, Iberdrola, Enel, Engie, E.ON, Fortum Naturgy, EDP, RWE, Orsted, National Grid, SSE [1].

Many international electricity companies have already moved far from their old business formats. Some of the world's leading companies in the energy sector have reorganized certain segments in the value chain, usually based on technological development.

In the past, it was challenging for utilities to innovate in technological development. Some of them focus on applied research and development, which is not in line with the goals of technological development today. In the past, R&D tended to focus on the assessment and application of technology, rather than developing an innovative model that could lead to new sources of increased energy production costs.

The subject of the article is the technological development of the world electric power industry.

**Purpose of the work.** The purpose of the article is to determine the factors influencing the direction of technological development of world leaders in the electric power industry.

The theoretical and methodological basis of the study is the scientific development of domestic and foreign scientists related to the substantiation of an effective mechanism for the technological development of the electric power industry, legislative and regulatory acts of Ukraine in this area, materials of specialized international scientific conferences and symposia. During the research, the following methods were used: groupings - to assess the degree of implementation of innovations and scientific and technical developments of world leaders in the electric power industry on the European continent; generalizations - to determine the factors influencing the direction of technological development in the electric power industry.

The need for technological development in the context of globalization of economic processes causes fundamental changes in the formation of the vector of development of the global electric power industry, revealing new business opportunities that increase the importance of energy companies and their value for customers.

For most of the world leaders on the European continent, technological development is one of the main strategic priorities. Eight of the twelve world leaders in the electric power industry on the European continent are adherents of innovation and scientific and technical development, while the rest of the electric power companies are just forming their competencies in this direction (Figure).

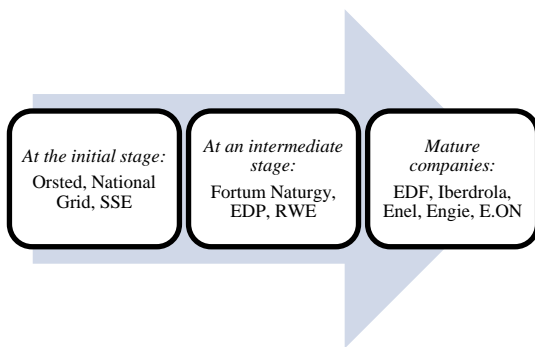


Figure. The degree of implementation of innovations and scientific and technical developments of world leaders in the electric power industry on the European continent [1]

Note: The score is calculated taking into account the presence of centers of innovation development, scientific and technical development, and presence in four areas of value creation of an electric power product: distributed energy resources, smart homes, electric vehicles, industrial and commercial energy services.

Let us consider the main factors influencing the direction of technological development of world leaders in the electric power industry: the interests of the board of directors, the behavior of market actors, consumer sentiment and competitive pressure.

The board of directors critically evaluates the performance of the contractors: how the directions of their technological development take into account the vector of market changes, business models, modernization of infrastructure facilities and growth potential. The directors have a major influence on creating the proper content, defining the boundaries and priorities of the direction of technological development.

Similar to the issues considered by the board of directors, investors focus on the issues like the relevance of the chosen direction of technological development, its validity, priorities and consistency of elements.

The emergence of scientific and technological developments attracts the attention of market players and strengthens their expectations for innovative changes in the field of supply, the development of transmission networks and their performance. However, the focus is shifted from the effect of technological innovation on the use energy.

Consumer sentiments indicate that they are becoming more demanding in their preferences and expectations than before. They are reasonably aware that new technologies enable the choice and management of infrastructure, control of equipment, monitoring of consumption, transparency in billing, and ultimately the ability to control energy costs in general.

Utilities' technological advancements must take into account the increased knowledge and expectations

of consumers and offer solutions that relate to environmental protection, cost reduction and process simplification. Innovative solutions must provide for a transition from passive interaction to active participation, where companies must anticipate changes in customer needs, not respond to them. Consequently, a synergistic effect is achieved by combining breakthrough scientific and technological developments and changing consumer expectations and behavior.

New, atypical players in the marketplace, be it original equipment manufacturers, software developers, platform creators, or related market players offering energy products, may have a similar advantage. Radical market changes open up opportunities for new companies to the detriment of conservative energy companies.

Equipment manufacturers have a strong competitive position as they create assets that consumers demand. Software developers are also well established because they offer their product based on expertise that utilities are unable to produce. Management solution providers act as integrators between technology and software.

The creators of Internet platforms (Amazon, Facebook, Google, Apple and Netflix), due to the accumulated competencies in the field of energy supply and energy trading, also have a certain position in the energy markets.

Companies operating in adjacent markets (telecom operators, infotainment providers, oil and gas companies, and electric vehicle manufacturers) easily integrate energy services into their competitive offerings.

The above factors, influencing the direction of technological development of the world leaders in the electric power industry, suggest that the contours of the direction depend on a large number of aspects. The planning of direction of technological development occurs both in the context of the influence of each factor and a combination of these factors.

The identification of these factors brought to the fore the problem of the development of Ukrainian electric power industry within the framework of traditional approaches, existing principles and methods, including technological transformation.

Thus, the energy strategy of Ukraine for the period up to 2035, according to the development strategy [2], determines that in order to ensure the possibility of parallel operation of the unified energy system of Ukraine with the energy union of European countries, a significant amount of organizational and technical measures should be carried out, which will be aimed at modernization, technological and economic development of the national electric power complex, since at this point in time, most of the generating assets

and power grids are worn out by more than 50% and are ineffective [3].

New prospects are emerging in the electricity sector in the context of scientific and technological integration. More investment is needed to manage grid assets in the market as we move away from large-scale power supplies and invest in grid upgrades, which brings more stable revenues.

Renewable energy innovations around the world have provided global leaders with a sustainable base for growth, as government subsidies provide an opportunity to lower operating costs and achieve higher profit margins.

New diverse segments of value creation are emerging, such as management, energy supply (energy consumption), electric vehicles, home automation, and increased consumer control over their energy consumption. Some of the world's leaders are already betting on the energy services market to generate new revenue streams as consumers seek to address their energy challenges in a holistic manner.

Scientific and technical developments are only gaining momentum among energy companies, and it will be a long time before companies see a meaningful result from their implementation. Competent leaders are already finding ways to improve competitiveness for their companies through the development and implementation of various models and the use of methods that will make it possible to introduce innovations into the organizational structure [5].

Recently, the world's electricity leaders have been closely monitoring the development and implementation of disruptive technology solutions, realizing that the technology revolution is not abating, but a natural result of certain suppliers finding solutions to unmet customer needs.

In the direction of technology development in the electric power industry, there is a transition from analog and standardized systems to digital systems, which are personalized and distributed. Technologies are becoming miniaturized and applied to meet the specific needs of utilities and their customers. Moreover, technologies are reaching a universal level, which makes it possible for energy companies to apply appropriate systems to solve various operational problems. Scientific and technical developments are actively improving, and utilities should improve their

competence in the field of their deployment. The relevance of technological development will become a particularly important indicator that allows utilities to understand how to optimize technology [4].

**Conclusions.** The article can be recommended to specialists in the field of theory and practice of technological development management in the electric power industry. Changes in the energy sector of Ukraine can become an important factor in its socio-economic development. The energy transition will require significant resources, as well as the need to implement appropriate structural changes in the economy. The transformation of the system in the electric power industry will not only make it possible to modernize the electric power industry on a new technological, organizational and information basis, but will also become a powerful incentive for the innovative development of related industries, as well as for the development of energy science in general.

#### References

1. Development strategies of the world electric power industry. The future of electricity and industry players determining its successful development// available at: <https://www.strategyand.pwc.com/>
2. Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2035 roku ta dalshu perspektyvu [Ukraine's energy strategy for the period up to 2035] // available at: <http://www.mpe.energy.gov.ua>.
3. Enerhetyka Ukrayiny: suchasnyy stan i nayblyzhchi perspektyvy [Energy of Ukraine: current status and short-term prospects] / A.A. Khalatov // Visnyk Natsionalnoyi akademiyi nauk Ukrayiny. 2016. №6. P. 53-61.
4. Preobrazovaniya v elektroenergetike: sobstvennyy put' [Electricity Transformation: Your Own Path] // available at: [https://www.pwc.ru/ru/power-and-utilities/assets/energy-transformation\\_rus.pdf](https://www.pwc.ru/ru/power-and-utilities/assets/energy-transformation_rus.pdf)
5. Zvit za rezultatamy modelyuvannya bazovoho ta alternatyvnykh stsenariyiv rozvytku enerhetychnoho sektoru [Report on the results of modeling the baseline and alternative scenarios for the development of the energy sector] // available at: [https://energytransition.in.ua/wp-content/uploads/2018/11/perehid\\_ukraini\\_na\\_vidno\\_vlyuvanu\\_energetiku\\_do\\_2050\\_roku.pdf](https://energytransition.in.ua/wp-content/uploads/2018/11/perehid_ukraini_na_vidno_vlyuvanu_energetiku_do_2050_roku.pdf)

## Prerequisites for Hydro Power Plant Design

**Maka Jishkariani** PhD, Associate professor

Georgian Technical University, Faculty of Power Engineering and Telecommunication,

Department of Electric Energy and Electric Mechanics. Tbilisi, Georgia. [m.gudiashvili@gtu.ge](mailto:m.gudiashvili@gtu.ge);

**Summary.** *The analysis of the investment project to be implemented in Georgia includes general characteristics: in particular, the location of the project to be implemented, installed capacity, topography, climatology, noise, socio-economic effect, mode of operation and seismicity aspects. Following the enactment of the Public-Private Partnership Act, the USAID Energy Program and the Georgia Energy Development Fund jointly developed the Interactive Renewable Energy Investor Guide to help investors and developers understand the laws or regulations in place in Georgia.*

**Key words:** *Investment project, hydropower plant, regulatory base.*

**Introduction.** The analysis of the investment project to be implemented in Georgia includes general characteristics: in particular, the location of the project to be implemented, installed capacity, topography, climatology, noise, socio-economic effect, mode of operation and seismicity aspects. Following the enactment of the Public-Private Partnership Act, the USAID Energy Program and the Georgia Energy Development Fund jointly developed the Interactive Renewable Energy Investor Guide to help investors and developers understand the laws or regulations in place in Georgia. Based on this guide, the investor makes a significant financial, technical and operational analysis and also assesses the potential risks during the project development, financing, construction and operation [1].

**Aim of the work.** The purpose of this paper is to introduce stakeholders to the laws and regulations without which investing capital is a big risk. Legal Framework - Construction and operation of hydroelectric power plants must pay attention to the following laws:

- Resolution of the Government of Georgia №426 "On Approval of the Rules for the Development and Implementation of a Public-Private Partnership Project" (August 17, 2018);
- Law of Georgia on Public-Private Partnership (May 4, 2018).
- Law of Georgia "Environmental Assessment Code" (June 1, 2017);
- Resolution of the Government of Georgia № 57 "On the procedure for issuing a construction permit and permit conditions" (March 24, 2009);
- Law of Georgia on State Property (July 21, 2010);
- Law of Georgia on the Cost of Acquisition of Replacement Land and Compensation for Damage Caused during Non-Agricultural Land Allocation (July 1, 2020);
- Order of the Minister of Justice of Georgia №4 "Approval of the Instruction on Public Registry" (January 15, 2010);
- Constitution of Georgia;
- Law of Georgia on Agricultural Land Ownership (June 25, 2019);

- Resolution of the Government of Georgia № 57 "On Issuance of Construction Permits and Permit Conditions" (March 24, 2009);
- Government of Georgia - Resolution №257 "On the Procedure for Issuing Permits and Permit Conditions for the Construction of Facilities of Special Importance (Except for the Construction of Radiation or Nuclear Facilities) (May 31, 2019);
- Law of Georgia on License and Permit Fees (12 August 2003);
- Law of Georgia on Local Fees (May 29, 1998);
- Resolution №255 "On the Rules and Conditions for Issuing a Construction Permit and Putting a Building into Operation" (May 31, 2019).
- GNERC Resolution №10 "Approval of the Rules for Network Connection" (April 17, 2014);
- GNERC Decision №21/31 "On the request for connection to the transmission network General and technic-economic criteria for refusal and methodology for their evaluation "(March 23, 2017);
- Ministry of Economy and Sustainable Development of Georgia-Resolution №515 "Approval of the Rules and Conditions for Submission of Proposals on Technical-Economic Study, Construction, Ownership and Operation of Power Plant Construction to the Ministry of Economy and Sustainable Development of Georgia, which is not a Public-Private Partnership Project" (October 31, 2018).

### Thematic Part

**Topography** -This section should describe the following indicators: Where will be located a power plant, in which part of the Georgia. In which urban area will be located the headwork (dam) and the power plant. Characterization of the river, the total and the portion on which will be build a power plant. How many kilometers will cover the dam and reservoir area of river? How many meters or kilometers will be from a pressure tunnel to the power station. There are or not mountains and how much is the height peak of the mountains [2].

**Climatology** - Which zones (tropical, subtropical) attributable to the project area, the typical climate (winter, summer), the data from the weather station



(meters above sea level) is taken. Zone average annual temperature °C (showing maximum and minimum), maximum and minimum monthly temperatures [3].

Hydrology - Descript of the river basin and its tributaries, where and how they align with the river flowing, which water flow measure stations data were used.

Water Flow Assessment - In this section should be collected the data of the daily stream flow from measuring station. There is important to taking a long-term monthly average flow  $m^3/s$ . After the determination of the water catchment area (ha) using program ArcGIS 9.3 software application ArcHydro.

Noise - Vehicles generated the noise during the construction and land preparation activities. dBA – is the noise assessment unit, at which middle and high frequencies are particularly well- defined. dBA units, which are often used to reduce or control noise, is subjective assessment of noise level [4].

Power Plant Zone - Classification of land area to use (pasture land, hay, yielding). Biological observations: some important plant species, or group of endemic species not existence of the power zone and its vicinity, is considered one of the main advantages of this project implementation of the selected location.

Headrace Tunnel - In this section should be described headrace tunnel depth (m) and length (km) from the powerhouse to the dam. The difference of heights (pressure) between these two points (m).

Socio - Economic Environment - Social and economic consequences that may arise as a result of the implementation of the project during construction and operational phases, mainly affecting the area on which the project and its surrounding area, that is located near populated areas. For the definition of the socio - economic environment can be used data from the Department of Statistics [5].

Type of Power Plant - Before the power plant construction, there must be assessed ground and underground PP types. Construction costs can be reduced to some extent in the case of an underground power plant construction, as the metallic finish and tunnel coverings will be reduced. However, a comprehensive comparison of alternative options should be assessed in detail. Considering two options, sizes, unforeseen costs and other expenses are taken into account. Considering all these factors, cost comparisons will be made with the summary of each of the two alternatives [6]:

- Pressure tunnel, powerhouse and output channels of the surface - type plant;
- Pressure tunnel, power, output channel, leading to the construction and management of underground type of power plant.

Operation Mode - In general, there are several alternative modes of operation of the hydroelectric projects; basic load, peak load or their combination. In case of base load mode, all the generators are constantly

working, except when one is stopped for service or repair, or lack of flow in the reservoir, which does not provide enough minimal pressure. In case of peak mode, the operation stops during the night period, when demand for electricity is low, usually from evening 8 hour to morning 5 hour. In case of its combination, one of the turbines is constantly working and others work depending on demand of the system [7].

Greenhouse Gas Emissions from Water Reservoirs - Carbon dioxide ( $CO_2$ ) and Methane ( $CH_4$ ) cause the global warming, that is why they are called greenhouse gases (GHG). Greenhouse gases are produced during the combustion of organic fuel, but an important source of their creation could be large volume reservoirs of hydroelectric power stations, due to the vegetative and organic waste in it. So the hydro power stations have its own global warming potential (GWP). The main reason for the emission of carbon dioxide and methane from hydro reservoirs is organic Carbon, which creation reasons are: water vegetation and soil, plankton and algae, sewage and garbage accumulated on the bottom, which also is filed with man-made organic compounds. Greenhouse gas emission level is determined by many dynamic factors: reservoir parameters and the mode of the use, natural and climatic conditions, ecological environment and so on. On the basis of the analysis, conducted in one hundred hydro power plant reservoirs located in different parts of the world, revealed that, overall, the annual emissions of greenhouse gases are 48 megaton of Carbon dioxide and 3 megaton of Methane [8].

Seismicity an Earthquake Control - The Caucasus is one of the most seismically active regions in the Alps and the Himalayas collision zone. The main seismic activity is caused by crossing the Arabian and Eurasian plates. Historical and instrumental seismological data analysis shows that the region has a moderate seismicity. In this region can be occurred powerful earthquake of magnitude 7 and micro seismic intensity IX. According to an analysis of historical and instrumental seismological data, the Caucasus characterized by the so-called moderate seismicity. Recurrence period of strong events in the area is 1000 years series (ERL-8). Besides the natural seismicity in such regions where can construct high dams, should be considered the so-called Induced seismicity. Induced seismicity occurs when the reservoir is filled. Usually, the induced seismicity is medium size, but locally they would have quite large effect. There must be considered threat of landslides caused by the seismic events, such landslides can cause rapid changes in water levels, wave formation, blocking rivers gorges and flooded buildings. Around the construction location of power plants should be established local seismic networks in order to determine fault parameters of the dam and, therefore, the seismic hazard [9]. First of all, is need to assess seismic hazard for planning and control purposes, and undertake control the construction process of dams and other structures.

During the strong earthquake there is important the proper awareness and action of population, on the one hand, and the rapid response of the government and special services, on the other hand. Unfortunately, as demonstrated by recent earthquakes in Georgia, the earthquake with the average strength, due to the unpreparedness of the population, caused damage and casualties (earthquakes in Tbilisi, 2002, 2006, and in Oni, 2009). It is recommended to aware the public about earthquakes, seismicity of the region and the rules of behavior during an earthquake. Trainings should be conducted in schools for the first place. Local authorities and services (rescue, medical, and others) Must be prepared for quick response, they should compose a possible disaster scenarios and action plans. Creation a local seismic network will analyze seismicity and active fault research, also determine the quake's epicenter as soon as possible, strengths and possible effects. Information should be provided to the relevant departments for quick response. It is also important to inform people that they have to act quickly in case of a strong earthquake, and not panic in case of a weak earthquake [10].

Impacts On Surface Water - A determining factor of siltiness of mountain reservoirs are solid sediments, in particular suspended sediments, which flow characteristics are essential. This process are being arranged in mining areas of reservoirs with particularly intense rivers. In addition, a source of filling the reservoirs can be landslide, mudslide and abrasive processes, as well as transported by wind sediment [11]. Usually, main factor of siltation of reservoirs is sediment runoff and in mountain reservoir siltation plays a major role the buoy sediment, that is confirmed by conducted observations. It should be noted that the reservoirs are being silt actually faster than it was predicted, so in order to increase the accuracy of determining the average annual runoff volume, often used data from operating reservoirs. To mitigate the impact of construction on surface water is necessary to carry out the following activities: Before starting work, the contractor shall request permission to discharge water from the construction object; Waste (discharged) water should not change the receptor of water and the concentration should not exceed the limit prescribed by law; Measures should be taken to avoid polluted water (with mineral and organic particles or hidrokarbons) discharge in surface waters, especially where the soil layer is removed; Information about spills of hazardous products must be immediately forwarded to the appropriate agencies; Every opportunity of water recycling should be explored, mostly about the waste water and drainage water from construction process [12];

In case of absence of municipal water treatment plant, residual waters from the workers' camps should be cleaned before they are discharged into the river. In this case, the mobile equipment of water purification should be used; Before discharges, waste waters of the land and

excavation, can be placed in the sump, and then the hydrocarbon separator; Construction equipment and technical installations must be in good condition, to ensure no spill of fuel or oil. Hydraulic systems should be checked regularly and replaced if necessary; Vehicles tanks should be filled only in the work place and not in the zone of flow water; Laundry of machines and tools must be located in strategic locations of construction facility, in compliance with the legal requirements of the Convention; Waste oils, emulsions, waters with lubricants, sediment mass, the residual oil from the oil separators is dangerous and should be treated in compliance with the Convention; Water from concrete production and infiltration water with caustic acidity (PH) should be neutralized and cleaned before discharge. The cleaned device can work with CO<sub>2</sub> and a strong acid; A simple type of toilet for the construction camp should be made with cement mortar lining to prevent leakage of sewers into the groundwater [13]. A simple type of toilet pits should be systematically cleaned with sanitation trucks; During the construction shall be installed treatment plants of sewers, with septic tanks which ensure compliance with the standard; Regular and proper collection of waste (to avoid their accumulation on the ground) and place it in landfills that are consistent with the international standards; During the the roads construction process should be made the guardrail (plaited, boards, sandy pockets etc.) In order to prevent enter of solid material into river; Environmental protection specialist(s) hiring, which will constantly monitor the performance of preventive and mitigating measures and make reports; The laboratory tests conducted on the water main components [14].

During the monitoring should be used visual inspection methods: the inspection with documenting of violations, measurement of the parameters using special apparatus and instruments and obtained results analytic process. In order to ensure the protection of water quality, the construction contractor with the help of environmental specialist shall ensure monitoring activities. Should be monitored construction camps, construction sites and surface water bodies (especially after the intense rain or snow melting):

- ✓ To check machinery for assurance of properly functioning before starting work;
- ✓ Solid waste management during the transport and storage time;
- ✓ Permanent quality control for waste water pollution prevention;
- ✓ Treatment facilities periodically for properly functioning;
- ✓ Laboratory analysis of water, spills of pollutants or treatment facilities after fixing technical problems [15].

During construction, environmental monitoring should be conducted regularly, along with the construction. Operation phase of the project will require the following actions:

- ✓ To clean drinking and agricultural water used by the power plant maintenance staff (in the case of a sewerage system failing) in simple treatment facilities;
- ✓ To make simple facility to determine the quantity and quality of water discharged from the power plant building in order to conduct the initial inventory and permanent monitoring of used water;
- ✓ Systematic monitoring of seepage water leak from the base of the hydro power plant dam and regime to eliminate undesirable events development;
- ✓ Appropriate training and instruction of personnel in environmental issues.

Impact on Hydrogeological Conditions - The process of underground works of HPP involves: excavation a foundation of building, construction, removal of the deeper layers of the soil in some areas, wells, withdrawal, etc. Implementation of work includes the risks of undesirable events development, among which should be noted:

- ✓ The possible crossing of the underground water-bearing horizons can groundwater capacity change (decrease or increase) at the nearby of the construction facilities;
- ✓ In the case of spill (or scattering) of oil or other toxic substances there can be contamination of ground water, which may eventually lead to water pollution, especially at construction sites where groundwater is relatively shallow depth from the ground surface horizons are located;

In the power plants location there is naturally high humidity due to soil and groundwater high levels, rainfall abundance and etc. Water flow increase during the work process, will have a hindrance impact on both the construction and operational process. Therefore is necessary to conduct waterproofing and artificial lowering of the groundwater level – drainage, to prevent flooding of the construction [16].

Groundwater contamination can occur by an indirect way – if the construction process is conduct in chemically contaminated soils, and contaminated water discharge from rain or snowmelt. Groundwater pollution may also occur during hydraulic connection to their horizons with contaminated surface waters. From the above, it is necessary to carry out the monitoring on groundwater wells hydrodynamic characteristics and chemical composition.

### Conclusion

After the general review of the project and the evaluation of the technical parameters, if interested, the investor can conduct a feasibility study for a specific project. This event is permitted by the legislation of Georgia and does not require any consent and permission from the authorities. At the end of this phase, the investor, along with other important data, should have information on the amount of investment to be

made, the capacity of the power plant to be built, the volume of water resources to be used, the land to be allocated, the project implementation period and the estimated cost of electricity generated.

### References

1. Interactive Renewable Energy Investor Guide (2018). Retrieved from [https://vre.gedf.com.ge/cdn/library/Brochure%20Geo\\_Updated.pdf](https://vre.gedf.com.ge/cdn/library/Brochure%20Geo_Updated.pdf);
2. Jishkariani M. (2019). Electricity Tariffs in Georgia. Warsaw, Poland: World Science 9(49), Vol.1. doi:10.31435/rsglobal\_ws/30092019/6697;
3. Jishkariani M., Dvalishvili N., Kurakhchishvili L. (2020). Evaluation of Calorific of Municipal Solid Waste (MSW). In: Ghosh S.(eds) Sustainable Waste Management: Policies and Case Studies. Springer, Singapore. doi.org/10.1007/978-981-13-7071-7\_23;
4. Jishkariani M.(2019). Establish of Energy Efficiency Passports for Private Property Owners, Small and Medium Businesses. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/335620279\\_Establish\\_of\\_Energy\\_Efficiency\\_Passports\\_for\\_Private\\_Property\\_Owners\\_Small\\_and\\_Medium\\_Businesses](https://www.researchgate.net/publication/335620279_Establish_of_Energy_Efficiency_Passports_for_Private_Property_Owners_Small_and_Medium_Businesses);
5. Jishkariani M.(2020). Safety Rules for Power Engineering Companies. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/342233298\\_Safety\\_Rules\\_for\\_Power\\_Engineering\\_Companies](https://www.researchgate.net/publication/342233298_Safety_Rules_for_Power_Engineering_Companies);
6. Jishkariani M. (2020). Failure Mode and Effect Analysis in Energy Companies. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/341914208\\_Failure\\_Mode\\_and\\_Effect\\_Analysis\\_in\\_Energy\\_Companies](https://www.researchgate.net/publication/341914208_Failure_Mode_and_Effect_Analysis_in_Energy_Companies);
7. Jishkariani M.(2020). Fault Tree Analysis (FTA) For Energy Enterprises. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/341494947\\_Fault\\_Tree\\_Analysis\\_FTA\\_For\\_Energy\\_Enterprises](https://www.researchgate.net/publication/341494947_Fault_Tree_Analysis_FTA_For_Energy_Enterprises);
8. Jishkariani M.(2020). Risk Management and Losses Calculation in Energy Enterprises. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/341130738\\_Risk\\_Management\\_and\\_Losses\\_Calculation\\_in\\_Energy\\_Enterprises](https://www.researchgate.net/publication/341130738_Risk_Management_and_Losses_Calculation_in_Energy_Enterprises);
9. Jishkariani M.(2020). Load Measurement Forms and Reliability of Power Supply Systems. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/340234067\\_Load\\_Measurement\\_Forms\\_and\\_Reliability\\_Of\\_Power\\_Supply\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/340234067_Load_Measurement_Forms_and_Reliability_Of_Power_Supply_Systems);
10. Jishkariani M. Tsotskhalashvili S. (2020). Features of Electricity Pricing in Georgia. „Energy” #4(96),part2.Pp.188-190.

URL:<https://www.researchgate.net/publication/348975571>  
[71 Features of Electricity Pricing in Georgia.](https://www.researchgate.net/publication/348975571)

11. Bochorishvili L., Topuria M., Jishkariani. M. (2020). Features of Preparing Students In Economic Disciplines In Higher Technical Schools. International Scientific Conference on "Modern Problems of High School Pedagogy and Ways to Solve Them". Pp.78-84. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/348944253> [53 Features of Preparing Students in Economic Disciplines in Higher Technical Schools;](https://www.researchgate.net/publication/348944253)
12. Vezirishvili-Nozadze K., Jishkariani M., Pantskhava E. (2021). Energy Efficiency - The Most Important Factor in Increasing The Country's Energy Independence // *The World of Science and Innovation*. Abstracts of the 7<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference. Cognum Publishing House. London, United Kingdom. 2021. Pp.132-140. URL:<https://sci-conf.com.ua/vii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-the-world-of-science-and-innovation-10-12-fevralya-2021-goda-london-velikobritaniya-arhiv/>.
13. Vezirishvili-Nozadze K., Jishkariani M., Pantskhava E. (2021). Climate Change Impact Assessment on Energy. *Middle East 5<sup>th</sup> International Conference on Contemporary Scientific Studies*. March 27-28, 2021, Ankara, Turkey. ISBN-978-625-7898-38-6. Vol.1. Pp. 369-376. URL:<https://www.researchgate.net/publication/350890344> [Climate Change Impact Assessment on Energy;](https://www.researchgate.net/publication/350890344)
14. Vezirishvili-Nozadze K., Jishkariani M., Pantskhava E. (2021). Renewable and non-Traditional Energy Sources // *Actual trends of modern scientific research*. Abstracts of the 8th International scientific and practical conference. MDPC Publishing. Munich, Germany. Pp. 232-239. URL: <https://sciconf.com.ua/viii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-actualtrends-of-modern-scientific-research-14-16-marta-2021-goda-myunhen-germaniya-arhiv/>;
15. Vezirishvili-Nozadze K., Jishkariani M., Pantskhava E. (2021). Impact of Climate Change on Georgia's Energy Sector - Vulnerability and Adaptation // *Science and Education: Problems, Prospects and Educations*. Proceedings of the 7<sup>th</sup>
16. <sup>h</sup> International Scientific and Practical Conference. CPN Publishing Group. Kyoto, Japan 2021. Pp.175-183. URL: <https://sci-conf.com.ua/vii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-science-and-education-problems-prospects-and-innovations-1-3-aprelya-2021-goda-kioto-yaponiya-arhiv/>;
17. Jishkariani M. Tsotskhalashvili S. (2021). Using Google Sheets to Analyze Electricity Tariffs // *World science: Problems, Prospects and Innovations*. Abstracts of the 5th International scientific and practical conference. Perfect Publishing. Toronto, Canada. 2021. Pp. 97-101. URL:<https://sci-conf.com.ua/v-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-world-science-problems-prospects-and-innovations-27-29-yanvarya-2021-goda-toronto-kanada-arhiv/>.

## Elaboration of Sustainable Financing Taxonomy for Georgia

**David Advadze**, PhD in Economics, Acting Head of Sustainable Development Division, Ministry of Economy and Sustainable Development, Tbilisi, Georgia, e-mail: [advadzed@gmail.com](mailto:advadzed@gmail.com)

**Nino Lazashvili**, PhD, Assistant Professor, Faculty of Energy and Telecommunication, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia. e-mail: [nlazashvili@yahoo.com](mailto:nlazashvili@yahoo.com)

**Annotation.** *The article "Elaboration of Sustainable Financing Taxonomy for Georgia" represents one more research of authors, which aims at assistance and promotion of development of green economy in Georgia.*

*Based on country's context challenges in connection with green economy development are examined. There is underlined the role and importance of special financing, which will be targeted at the implementation of the projects promoting sustainable, inclusive and green development. Availability of finances, especially green finances, was identified as one of the essential challenge on the way to the sustainable economic development.*

**Key Words:** *Taxonomy, Sustainable Development, Green financing.*

### Problem Context and Situation Analysis

Modern approaches, based on developed countries' practice show, that adoption of new type of activities, which are directed towards the greening of economy, are necessary for the achieving of economic growth.

Georgia has signed an Association Agreement (AA) with EU with the aim to promote political association and economic integration with EU, based on common values and close links, including by increasing Georgia's participation in EU policies, programmes and agencies.

Among the goals of Georgian green development are:

- Conducting of economic policy which ensures sustainable development of the country;
- Introduction of environmentally-friendly, modern technologies and development of a "green" economy.
- Encouragement of FDI-s oriented towards the introduction of new, environmentally-friendly and resource-saving technologies.

The analysis of the different activities, programs and projects dedicated to the sustainable, inclusive and green development has revealed the necessity of conducting of awareness rising measures among business circles.

Simultaneously, lack of special financing, dedicated to the implementation of green projects is a huge problem in the way to a green economy development in the country.

Financial system has a key role to play here, as there is no sustainable development without sustainable financing, be it public or private. Access to finance has been identified as a challenge for economy, especially green economy.

Commercial banks are the main source of SME finance, but the sector is regarded by lenders as relatively high risk. Interest rates tend to be relatively high (15%+), as are collateral requirements (often 200%). Rates offered in the micro-finance sector are considerably higher.

Borrowers often are already over-indebted or lack sufficient assets against which to borrow. Project finance approaches are not often used. Leasing and factoring financial products also remain underdeveloped. Lack of competence or insufficient awareness among borrowers, is the real problem in the mentioned process, as well.

### Objectives and Expected Results

In the first place, it is very important to understand how 'sustainable' is defined. One of the main challenges is a lack of clear common definition and classification system of what is green activity, what type of projects or businesses might be considered as a green, which could serve as a boost for rising of sustainability of overall economy of the country. Defining what types of investments/loans qualify as "sustainable", also allows market participants to better align their efforts. It will be very helpful against greenwashing, too.

Based on abovementioned, the urgent need for elaboration of clear taxonomy of sustainable finance has emerged. Availability of sustainable financing taxonomy will strengthen the role of the financial sector in the sustainable development of the country and, for this purpose, will represent a framework for sustainable finance. This framework implies consideration of social, environmental, and governance (ESG) issues by the financial sector and capital market participants, which is important for financial stability and sustainable development of the economy.

Adopted Taxonomy of sustainable financing will have 2 groups of main beneficiaries, those are: 1) financial institutions and banks, which in their decisions to open special "green" lines of loans for business representatives, will follow the adopted Taxonomy of sustainable development for defining "sustainability" of their projects and 2) companies, who are eager to implement resource efficient, sustainable, green,



inclusive etc. projects and for this reason are applying to financial institutions.

This second group of beneficiaries of the sustainable financing - companies and businesses – will receive a simplified process of attaining of “green” financing lines for their projects. In the process of planning their activities, they will know precisely, what type of activities should enclose their business-plans, how should it be designed to have chance of receiving of so called green credit lines from financial institutions.

So, we can identify the main goal of the Sustainable Financing Taxonomy as rising of financing for as more number of sustainable and green activities/projects/programs/businesses as possible. Elaboration of sustainable financing taxonomy is leverage for achieving of this goal. Simultaneously, we can predict 4 following results, which will assist to the development of sustainable financing in the country:

- ❖ Awareness rising and capacity building for sustainable finance market –  
 Country lacks understanding of risks from short-termism. There is low knowledge on benefits from developing of sustainable projects. There is a wide range of international standards and good practices that Georgian financial market players may use as guidance towards sustainable finance. Organizing and facilitating workshops, trainings and conferences dedicated to the green economy opportunities are another way for increasing the awareness.
- ❖ Rising of financial flows to the sustainable, green and socially inclusive sectors –  
 By defining what types of investments/loans qualify as “sustainable”, all market players will be able to better align their efforts and incentives
- ❖ Introduction ESG (environmental, social and governance) management into risk-assessment and decision-making processes of financial institutions and corporations –  
 By effectively managing ESG risks and identifying opportunities alongside these risks, financial institutions can create long-term value for their business
- ❖ Enabling financial institutions to make decision more clearly on financing of sustainable projects/businesses. Finally, we can say, that Sustainable Financing Taxonomy is designed to be applicable by various actors for a variety of financial products.  
 It reflects the needs of major local users that are commercial banks and microfinance institutions. The table below provides examples of potential users, alongside the possible ways of application.

| Main Users                                                                           | Possible Application                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Commercial Banks, Microfinance Institutions, and other Financial Institutions</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Use as a guide for developing sustainable finance strategies;</li> <li>• Design and develop sustainable finance products (such as green, social, and sustainable loans and credits) more easily and consistently;</li> <li>• Measure and monitor existing and new sustainable finance flows in the portfolio;</li> <li>• Disclose ESG related information in more consistent, comparable manner;</li> <li>• Enhance ESG risk management practices;</li> <li>• Fulfill requirements set by the Corporate Governance codes more effectively (including filling out the NBG Template for ESG disclosure requirements);</li> <li>• Improve efficiency of sustainable lending and funding operations;</li> <li>• Reduce transaction costs by easing identification and verification process of eligible assets;</li> <li>• Decrease uncertainty and reputational risk.</li> </ul> |
| <b>Capital Market Participants (bond issuers, investors, etc.)</b>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Use for developing an eligibility criteria of the projects;</li> <li>• Identify financial products that are aligned with sustainability criteria more easily and consistently;</li> <li>• Identify and select projects/activities that can be financed with the green, social, and sustainable bonds more easily and consistently;</li> <li>• Disclose ESG related information in more consistent, comparable manner;</li> <li>• Enhance ESG risk management practices;</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |



|                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fulfill requirements set by the Corporate Governance Code more effectively;</li> <li>• Decrease uncertainty and reputational risk.</li> </ul>                                                                                                                           |
| <b>Certifiers, Verifiers and other relevant actors</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Provide a consistent reference for standard setters and product developers;</li> <li>• Use as a benchmark for pre- and post-issuance impact assessments, certifying and labeling green, social, and sustainable projects, and verifying the use of proceeds.</li> </ul> |

- Address wider issues of access to finance for SMEs, building SME financial literacy, exploring credit guarantees for SME.
- Lower cost of green credit and improve borrowing conditions for SMEs by working with national development funds and commercial banks.
- Improve the availability, efficiency and effectiveness of green finance through various means.
- Raise awareness among SMEs around energy-efficiency and renewable energy opportunities, support the uptake of energy management systems and promote the economic and commercial benefits of green investment and branding.

### Collaboration and stakeholders participation

As it was mentioned above, SF Taxonomy is designed to be applicable by various actors for a variety of financial products. Therefore, elaboration process of the Georgian Taxonomy of sustainable financing, demands participation of a wide range of institutions.

As the main participants in the elaboration of Sustainable financing taxonomy for Georgia we can list following institutions: National Bank of Georgia, Ministry of Finance, Ministry of Economy and Sustainable Development and Ministry of Environmental Protection and Agriculture.

In the initial stage, taxonomies of different states have been selected for consideration as an examples. On the second stage, with consideration of Georgia context, participating experts will define acceptable definition for Georgia.

Sustainable financing taxonomy with regards of transport sector, construction and building sector, energy sector and innovations, are under consideration of the Ministry of Economy and Sustainable Development of Georgia.

### Recommendations for policy makers

For the purpose of elaborated Sustainable Financing Taxonomy to become effective and productive from the point of view of rising of the number of sustainable, green, recourse efficient and inclusive projects, it is necessary to implement certain policies.

The recommendations for policymakers are as follows:

- Implementation of legislation on energy efficiency and renewable energy, strengthening of enforcement.
- Ensure explicit policy consideration of the role of SMEs in the green transition.

### Integration of Sectorial Goals and Conditions

Opportunities abound in Georgia for the use of a green economy approach. The priority for reaching Green Growth is to stimulate (green) investments through (1) the formulation of a strategy that coherently addresses market development, and (2) through capacity building. A coordinated approach is needed, starting from awareness raising and capacity building, then progressing to the creation of competences on the supply side and a stimulus to demand, with continuous efforts in collecting information and data. This is all aimed at creating the conditions for sustainable and green business operations, and therefore leading to sustainable development.

New policies will need to be introduced, existing ones will need to be leveraged, and certain processes will need to be modified in order to make full use of the benefits of the Green Economy approach. These include the budgetary process, which is currently primarily carried out at the sectorial level. In this respect, it will be crucial to highlight the hidden benefits and costs of each policy, because, among others, these may lead to improved climate resilience as well as reduced vulnerability from market drivers.

The Green Economy approach also supports monitoring and evaluation, which is especially key for the EU Association agreement, and for government accountability.

It is believed that the development of the Green Growth strategy, based on the Green Economy approach, will increase the effectiveness of government interventions, leading a stronger, more sustainable and more resilient development of Georgia.

## References

1. GET Georgia (2018), "Banking sector monitoring Georgia 2018", *Policy Study Series*, No. PS/01, German Economic Team Georgia/Berlin Economics, Tbilisi/Berlin, [https://www.get-georgia.de/wp-content/uploads/2018/03/PS\\_01\\_2018\\_en.pdf](https://www.get-georgia.de/wp-content/uploads/2018/03/PS_01_2018_en.pdf).
2. European Union (2014), "Association Agreement between the European Union and the European Atomic Energy Community and their Member States, of the One Part, and Georgia, of the Other Part", *Official Journal of the European Union L 261/7*, Vol. 57/30 August, [https://eeas.europa.eu/sites/eeas/files/association\\_agreement.pdf](https://eeas.europa.eu/sites/eeas/files/association_agreement.pdf).
3. Improving access to green finance for small and medium-sized enterprises in Georgia <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/dc98f97b-en/index.html?itemId=/content/publication/dc98f97b-en>

## ელექტროენერგიაზე ტარიფების ზრდის ფაქტორები და მისი შემცირების პარადიგმა

დემურ ჩომახიძე, მეცნ.დოქტორი, პროფესორი

საქ. ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, [demurchomakhidze@yahoo.com](mailto:demurchomakhidze@yahoo.com)

თათა ფილიპიდის, აკადემიური დოქტორი, ასისტ. პროფესორი.

საქ. ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქ.თბილისი, საქართველო, [t.filippidis@gtu.ge](mailto:t.filippidis@gtu.ge)

**ანოტაცია.** განხილულია ელექტროენერგიის ტარიფების ზრდაზე მოქმედი ფაქტორები, ტარიფების გაანგარიშების მეთოდები, საბაზრო ეკონომიკის პირობებში ენერგეტიკულ პროდუქციაზე ტარიფების რეგულირების საკითხები, ტარიფების მოკლევადიანი და გრძელვადიანი გაანგარიშების მეთოდები და კორონავირუსით გამოწვეული ნეგატიური გავლენის შემსუბუქების მიზნით სახელმწიფოს მხრიდან სუბსიდირების პოლიტიკის გატარება ენერგეტიკის დარგში და მისი ნეგატიური გავლენა ქვეყნის ეკონომიკის განვითარებაზე. მოცემულია ტარიფების შემცირების წინადადებები და ავტორების მხრიდან დანახული პარადიგმა.

**საკვანძო სიტყვები:** ელექტროენერგიის ტარიფი, საბაზრო ეკონომიკა, რეგულირება, სუბსიდირება, ფასწარმოქმნა.

### Factors of electricity tariffs increase and the paradigm of its reduction

Demur Chomakhidze, Dec, , Professor. GTU, Tbilisi, Georgia. [demurchomakhidze@yahoo.com](mailto:demurchomakhidze@yahoo.com)

Tata Filippidis, PhD, Professor. GTU, Tbilisi, Georgia. [t.filippidis@gtu.ge](mailto:t.filippidis@gtu.ge)

**Annotation** The article discusses the factors influencing the electricity tariffs increase, methods of tariff calculation, issues of regulation of tariffs on energy products in a market economy, short-term and long-term tariff calculation methods and the implementation of state subsidy policies in the field of energy and its negative impact on the development of the country's economy in order to mitigate the negative impact caused by the coronavirus. The article presents tariff reduction proposals and the paradigm seen by the authors.

**Keywords:** electricity tariff, market economy, regulation, subsidy, pricing.

ნებისმიერი ინტეგრირებული ეკონომიკური სისტემის მიზანია მასში შემავალი ელემენტების ეფექტიანობის გაზრდა სისტემური ეფექტის ხარჯზე, რაც მიიღწევა ყველა მონაწილის სისტემური ურთიერთქმედების ყველაზე მნიშვნელოვანი ფინანსური ბერკეტების კოორდინაციით. ეს ბერკეტები მოიცავს ფასებს, რენტაბელობას, მონაწილეთა ხარჯების სტრუქტურას, საგადასახადო შემოსულობებს. ტარიფებისა და ფასების დონე აქტიურ გავლენას ახდენს სისტემის სუბიექტების ფუნქციონირებისა და განვითარების ეფექტურობაზე, აგრეთვე გარემომცველი გარემოს ეფექტურობაზე. სისტემებში ტარიფებისა და ფასების დონე, წარმოადგენს საქონლის განაწილების კომპლექსს, განსაკუთრებით მასობრივი საქონლის პოპულარიზაციისას, განსაზღვრავს მთელი ეროვნული ეკონომიკის ფუნქციონირებისა და განვითარების ეფექტურობას.

ელექტროენერგიის დარგი არის ეროვნული ეკონომიკის ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი სექტორი, რომელიც განსაზღვრავს ქვეყნის ეკონომიკურ და სოციალურ განვითარებას.

ელექტროსადგურების, ელექტრო და თბური ქსელების მთლიანობა, რომლებიც ერთმანეთთან დაკავშირებულია ელექტროენერგიისა და სითბოს წარმოების, გარდაქმნისა და განაწილების უწყვეტი პროცესით, ამ რეჟიმის ზოგადი ადმინისტრაციული, ტექნიკური და დისპეტჩერიზაციის კონტროლით, ქმნის ენერგეტიკულ სისტემას. რამდენიმე ენერგეტიკული სისტემა ქმნის ინტეგრირებულ ენერგეტიკულ სისტემას.

ელექტროენერგიის დარგში ფასწარმოქმნა გულისხმობს ფასებისა და ტარიფების დადგენის პრინციპებსა და სპეციფიკურ მექანიზმებს. არსებობს ფასების ორი მნიშვნელოვანი ტიპი:

1. რეგულირდება სახელმწიფოს მიერ, და არსებობს სხვადასხვა ვარიანტებში: სახელმწიფო

ორგანოები ადგენენ ფასების (ტარიფების) აბსოლუტურ ღირებულებას ან მათი განსაზღვრის მეთოდოლოგიას;

2. კონკურენტული (საბაზრო, უფასო) ფასწარმოქმნა, რომელშიც ფასები ყალიბდება მიწოდებისა და მოთხოვნის საფუძველზე, სახელმწიფო მარეგულირებელი ორგანოების ჩარევის გარეშე; ამასთან, იშვიათია მთავრობის მიერ კონკურენტული ფასების შეზღუდვა მაღალი და დაბალი მაჩვენებლებით.

სხვადასხვა ქვეყანაში ელექტროენერჯის განვითარების მრავალფეროვანი მოდელის მიხედვით, დარგის რეფორმაზე ყოველთვის მოქმედებს ფასების პრაქტიკა. ამასთან, ყველაზე ლიბერალური მოდელის პირობებშიც, როგორც წესი, ენერგეტიკის დარგში საბაზრო ფასებთან ერთად, არსებობს ფასების რეგულირების სფეროები.

თუ დარეგულირებული ფასები ჭარბობს (მაგალითად, მაგალითად, ქვეყნის ელექტროენერჯის რეფორმირების გარდამავალი პერიოდის განმავლობაში), კონკურენტუნარიანი ბაზრის ფასების დონე მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია რეგულირებული ფასების დონეზე.

დარგის ვერტიკალურად ინტეგრირებული მოდელში, პრაქტიკულად, ყველა ფასს არეგულირებს მთავრობა. თავისუფალი ბაზრის არარსებობის შემთხვევაში, ფასები გაყოფილია მიწოდებისა და მოთხოვნისგან და ფორმირდება დირექტივით.

მოსახლეობის ჯვარედინი სუბსიდირება, როგორც წესი, პოლიტიკური მოსაზრებებით არის განპირობებული: ელექტროენერჯის ტარიფის მკვეთრად გაზრდის სურვილი, მოსახლეობისთვის უკიდურესად მტკივნეულად აღიქმება. გარდა ამისა, ჯვარედინი სუბსიდირების აღმოფხვრა მოითხოვს სოციალური დაცვის სისტემის პარალელურ რესტრუქტურირებას, რასაც ასევე დრო სჭირდება. ამ მიზეზების გამო, გარდამავალ ქვეყნებში მოსახლეობის ჯვარედინი სუბსიდირება ეტაპობრივად წყდება.

საბითუმო ბაზრის სუბიექტების უმეტესობას შეუძლია არჩევანი გააკეთოს ფასების ორ ძირითად თავისუფალ მექანიზმს შორის:

ელექტროენერჯის ყიდვა-გაყიდვის ორმხრივი ხელშეკრულებების ფარგლებში

ფასების და მიწოდების მოცულობების უფასო განსაზღვრა;

წონასწორობის ფასი, რომელიც ორმხრივი ხელშეკრულებების ფასებისგან განსხვავებით, ხელშეკრულების მხარეების მიერ განსაზღვრული, წარმოიქმნება ნებისმიერი რაოდენობის ფასის შედარებითი შედარების შედეგად ელექტროენერჯის მომწოდებლებისა და მყიდველებისგან, რომლებიც თავისუფლად განსაზღვრავენ ამაში მითითებულ ფასს. ფასის შეთავაზებები:

რეგულირებადი ტარიფების გაანგარიშების მთავარი მეთოდი არის ეკონომიკურად დასაბუთებული ხარჯების მეთოდი ("ხარჯები +"). რეგულირებადი საქმიანობის განმახორციელებელი ორგანიზაციებისათვის ტარიფების დადგენისას, საჭირო მთლიანი შემოსავლის ოდენობა იყოფა წარმოების მოცულობაზე, რომელიც გამოითვლება ერთიანი ენერგოსისტემის წარმოებისა და ელექტროენერჯის მიწოდების კონსოლიდირებული ბალანსის საფუძველზე, როგორცაა ხარჯზე დაფუძნებული ფასები (ტარიფები) და ჯვარედინი სუბსიდირება, საერთოა.

დანახარჯზე დაფუძნებული ფასები მოიცავს ფასების (ტარიფების) ფაქტობრივი ყველა დანახარჯის ჩათვლით. შედეგად, ენერგეტიკულ საწარმოებს ნაკლები სტიმული აქვთ ეფექტურობის გასაუმჯობესებლად: ყოველივე ამის შემდეგ, ისინი ანაზღაურდებიან თავიანთი ხარჯებისგან, მიუხედავად მათი მუშაობის ეფექტურობისა. ამავდროულად, ფასებსა და ტარიფებში შეიძლება იყოს ინვესტიციის კომპონენტი - კაპიტალური ინვესტიციების სახსრები, რომელთა მოცულობა, ბაზრის შეზღუდვების არარსებობის შემთხვევაში და წარმოების ხარჯების საიმედო სურათი, განისაზღვრება თანაბრად თვითნებურად.

საზოგადოებისათვის ტარიფების პრობლემა ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი და მწვავეა. ამიტომ ამ საკითხს განსაკუთრებული სახელმწიფოებრივი მიდგომა ესაჭიროება. ცენტრალიზებული დაგეგმვის პირობებში ტარიფები დირექტიულად წესდებოდა. მაშინ მგეგმავთა ამოცანა იყო წონასწორობის დამყარება, იმას, რაც უნდა ეწარმოებინა ეკონომიკას და იმას შორის, რაც სურდათ მომხმარებლებს. თუმცა იმ პერიოდში ხელისუფლება ვერასოდეს ვერ მიუახლოვდა დოვლათის ისეთ მიწოდებას

საზოგადოებისათვის, როგორც ამას ადგილი აქვს საბაზრო ეკონომიკის ქვეყნებში.

საბაზრო ეკონომიკის პირობებში ენერგეტიკულ პროდუქციაზე ტარიფს მარეგულირებელი ორგანოები ადგენენ. ეს იმიტომ ხდება, რომ ფასწარმოქმნის საკითხები ძალიან მნიშვნელოვანია და რეგულირების გარეშე იგი ვერ გადაწყდება. კომპანიას სურს, რომ ტარიფი რაც შეიძლება მაღალი იყოს, ხოლო მომხმარებლის ინტერესებშია მისი მინიმუმამდე შემცირება. მარეგულირებელმა ორგანომ კი უნდა შეძლოს მხარეთა ინტერესების სწორი დაბალანსება, არ უნდა დაზიანდეს არც ერთი მხარის მოთხოვნები. აქ მნიშვნელოვანია იმის აღნიშვნა, რომ ტარიფების ნებისმიერი შემცირება ყოველთვის როდია ხელსაყრელი საზოგადოებისათვის. ამით შეიძლება საპირისპირო შედეგები მივიღოთ – თანდათან შემცირდეს დარგის ეფექტიანობა და საბოლოოდ შეიძლება დაინგრეს კიდევ.

სწორი სატარიფო პოლიტიკის გატარება უმნიშვნელოვანესი პრობლემაა არა მარტო ენერგეტიკული სექტორისათვის, არამედ მთლიანად საზოგადოებისათვის და, მათ შორის, ქვეყანაში ეკონომიკური რეფორმების წარმატებით განხორციელებისათვის.

ელექტროენერჯიასა და ბუნებრივ გაზზე ტარიფების დადგენის მეთოდოლოგიური საფუძველია ენერჯიის წარმოებაზე, მიწოდებაზე, ტრანსპორტირებაზე, გადაცემაზე, დისპეტჩერიზაციასა და განაწილებაზე, აგრეთვე ექსპორტსა და იმპორტზე გაწეული სრული დანახარჯების ანაზღაურება.

ამ თვალსაზრისით, სატარიფო სისტემის საბაზრო პრინციპებზე გარდაქმნა ენერგეტიკულ სექტორში მიმდინარე ეკონომიკურ გარდაქმნათა ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი შემადგენელი ნაწილია.

ელექტროენერგეტიკის სექტორში მიმდინარე ეკონომიკურმა და ორგანიზაციულ-სტრუქტურულმა რეფორმებმა უნდა უზრუნველყოს ენერგეტიკის სექტორის რეაბილიტაცია და მისი საბაზრო ეკონომიკის პრინციპებზე ორიენტირებულ ეფექტურ დარგად გადაქცევა. ამ პროცესში ერთ-ერთი უმთავრესია ენერჯიის ყველა საფეხურის (წარმოება, გადაცემა, დისპეტჩერიზაცია, განაწილება, მიწოდება და მომსახურება) ტარიფების დადგენა და

რეგულირება, რომელიც ეფუძნება კანონს და საერთაშორისო პრაქტიკაში მიღებული ენერჯიის ტარიფების დადგენის პრინციპებს, რომელთა მიხედვითაც ენერჯიის ტარიფი სრულად უნდა ასახავდეს, ერთი მხრივ, მის წარმოებაზე, გადაცემაზე, მიწოდებაზე, დისპეტჩერიზაციასა და განაწილებაზე გაწეულ დანახარჯებს, უზრუნველყოფდეს გაწეული კაპიტალური დაბანდებების ამოგების სამართლიან დონეს, ენერგეტიკული საწარმოების ფინანსურ და ტექნიკურ სტაბილურობას და, მეორე მხრივ, იცავდეს მომხმარებლებს ენერჯიაზე მონოპოლიური ფასებისაგან.

საქართველოში ელექტროენერჯიის ტარიფის სრულ (რეალურ) ღირებულებაზე გადასვლა, მრავალი ობიექტური მიზეზის გამო, ეტაპობრივად ხორციელდება. აქ, პირველ რიგში, გათვალისწინებულია ქვეყნის ეკონომიკის ცალკეული დარგის განვითარების ხელშეწყობის აუცილებლობა და მოსახლეობის გადახდისუნარიანობა.

ბაზრის წონასწორობა ნიშნავს იმას, რომ ბაზარზე გამოტანილი ყველა პროდუქტი ისეთ ფასებში გაყიდონ, რომ ერთნი – თანახმანი არიან გაყიდონ, ხოლო მეორენი – გადაიხადონ. წონასწორობა იმას ნიშნავს, რომ ადამიანებს შეუძლიათ იმოგონ ბაზარზე ნივთები, რომლის ყიდვაც მოუნდებათ.

გადაწყვეტილებას, როგორც გაყიდვის, ისე ყიდვის შესახებ, ღებულობენ სხვადასხვა ადამიანები, ხოლო ფასების მექანიზმის საშუალებით მყარდება წონასწორობა ამ ორ გადაწყვეტილებას შორის. მას აქვს განსაკუთრებული მნიშვნელობა, ვინაიდან საბაზრო ეკონომიკის დროს არც მთავრობასა და არც სხვა ვინმეს არ ძალუძს აიძულოს ადამიანი, იყიდოს ის საქონელი, რომელიც მას არ სურს. საბაზრო ეკონომიკის პირობებში ფასის წარმსაბაზრო ეკონომიკის ყველა ქვეყანაში ენერჯიაზე ტარიფის დადგენის მთავარი მეთოდოლოგიური საფუძველი სრული ღირებულების პრინციპია. ყველა შემთხვევაში, ელექტროენერჯიის მიწოდებელმა უნდა აინაზღაუროს გაწეული დანახარჯები და მიიღოს გარკვეული მოგება, ხოლო მომხმარებელმა სრულად დაიკმაყოფილოს თავისი მოთხოვნა.

გრძელვადიანი ტარიფების გაანგარიშება ხდება საკალკულაციო მუხლების მიხედვით, საწარმოთა მიზანშეწონილი ხარჯების,



გადასახადებისა და მოგების პროგნოზირების საფუძველზე. ამასთან, გაითვალისწინება ხარჯების შემცირება. ეს დაკავშირებულია იმ გარემოებასთან, რომ კერძო მფლობელობაში მყოფ საწარმოში როგორც დასაწყისში, ისე მომავალშიც აუცილებლად მოსალოდნელია ხარჯების შეზღუდვა.

გრძელვადიანი ტარიფის გაანგარიშების მოდელში შეიძლება ჩაიდოს სხვა დაშვებებიც. კერძოდ, ამონაგების სიდიდე ზუსტდება იმის გათვალისწინებით, თუ კონკრეტულ შემთხვევაში, როგორ არის დაფინანსებული ინვესტიციის საერთო თანხა – საკუთარი კაპიტალით, თუ კრედიტით. შესაბამისად გაანგარიშდება ფონდებზე ამონაგების და დისკონტირების დონეები. დისკონტირების მეთოდი გამოიყენება მომავალში მისაღები თანხების მიმდინარე ღირებულებათა გამოსათვლელად.

განვიხილო პერიოდში საქართველოში ელექტროენერჯის ტარიფის მატება მოსახლების შემოსავლების ზრდასთან შედარებით მნიშვნელოვნად დიდი იყო, მაგრამ ხაზგასმით უნდა ითქვას, რომ სახელმწიფო რეგულირების გარეშე ეს ზრდა კიდევ უფრო დიდი იქნებოდა. ეს გაპირობებულია, პირველ რიგში, საქართველოში ელექტროენერჯის დიდი დეფიციტის არსებობით, აგრეთვე, ქვეყანაში საბაზრო ეკონომიკის პრინციპების დანერგვით. ელექტროენერჯის დეფიციტის პირობებში, ელექტროენერჯის მიმწოდებელთა მოთხოვნილება მაღალ ტარიფზე გაცილებით დიდი იქნებოდა.

საქართველოს წინაშე ამჟამად არსებულ უამრავ პრობლემათა შორის უსაფრთხო და მდგრადი ენერჯეტიკული უზრუნველყოფის თემა განსაკუთრებულია. ყველამ ვიცით, რომ ენერჯეტიკა ეკონომიკის მაცოცხლებელ ძარღვს წარმოადგენს. მასზე დამოკიდებული ქვეყნის სოციალურ-ეკონომიკური განვითარება და სიმდიერე, მოსახლეობის კეთილდღეობა და ა.შ. ენერჯეტიკული უსაფრთხოების მიღწევის გარეშე ვერ მივაღწევთ ეკონომიკურ უსაფრთხოებას; უფრო მეტიც, საფრთხე შეექმნება ქვეყნის დამოუკიდებლობას და სახელმწიფოებრიობას. განსაკუთრებით აღსანიშნავია ის ფაქტი, რომ ენერჯიაშემცველებზე ფასების მატება ან კლება ჯაჭვური რეაქციით მყისვე აისახება

სამომხმარებლო ბაზარზე. ამიტომ სულაც არ არის გასაკვირი, რომ ელექტროენერჯიაზე სამომხმარებლო ტარიფის ყოველი მატება საზოგადოებაში მწვავედ აისახება. ასე იყო 2020 წლის ბოლოსაც, როცა ტარიფის მნიშვნელოვანი ზრდა დაფიქსირდა, თუმცა გარკვეული დროით მომხმარებელთა დიდი ნაწილისათვის იგი დასუბსიდირდა. ეს კი ჩვენი ეკონომიკისათვის, ცხადია, მძიმე ტვირთია.

ელექტროენერჯის ფასები საქართველოსა და თურქეთში, წყარო „ესკო“

ცხრილი

|                                                           | ივლ-19 | აგვ-19 | სექ-19 | ოქტ-19 | ნოვ-19 | დეკ-19 | 2019  | იან-20 | თებ-20 | მარ-20 | აპრ-20 | მაი-20 | ივნ-20 | ნიშ-20 |
|-----------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| საბოლოო ელექტროენერჯის გასული ფასი საქართველოში           | 4.7    | 4.9    | 5.0    | 5.0    | 5.2    | 5.1    | 4.8   | 5.1    | 4.9    | 6.1    | 5.1    | 4.1    | 4.3    | 4.9    |
| % ცვლილება წყ                                             | 30%    | 4%     | 12%    | -6%    | 2%     | -4%    | -5.0% | 0%     | -5%    | 21%    | 5%     | 54%    | 68%    | 16.5%  |
| საშუალო ფასი საქართველოში ინტერკონტინენტურ ელექტროენერჯზე | 5.2    | 5.2    | 5.1    | 4.7    | 5.0    | 5.2    | 4.8   | 5.1    | 3.2    | 3.8    | 4.4    | 5.5    | 1.5    | 3.9    |
| % ცვლილება წყ                                             | -13%   | 12%    | 20%    | -7%    | 1%     | 0%     | -4.1% | 2%     | -29%   | 3%     | -11%   | 0%     | -72%   | -11.2% |
| საშუალო ფასი საქართველოდან ევროკონტინენტურ ელექტროენერჯზე | 7.2    | 5.5    | 1.7    | 5.5    | 5.5    | -      | 3.2   | 5.1    | 6.3    | 5.5    | 5.5    | 3.7    | 3.4    | 3.7    |
| % ცვლილება წყ                                             | 110%   | -7%    | -71%   | -25%   | 0%     | 0%     | -0.4% | 0%     | 0%     | -8%    | 35%    | 22%    | 7%     | 19.6%  |
| ელექტროენერჯის საბაზრო ფასი თურქეთში                      | 5.4    | 5.4    | 5.3    | 5.1    | 5.3    | 5.4    | 4.7   | 5.4    | 5.0    | 4.0    | 2.7    | 3.0    | 4.3    | 4.1    |
| % ცვლილება წყ                                             | 23%    | 2%     | 1%     | -7%    | -4%    | 9%     | -0.3% | 23%    | 1%     | -18%   | -21%   | -11%   | 0%     | -2.7%  |

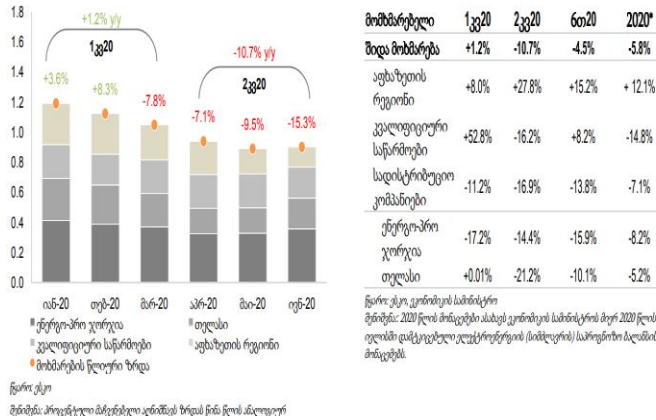
წყარო: ესკო საქსტატი წყნ. EUREC  
 გზისა და ენერჯის სახელმწიფო კომისია (სსეკ) არაა რეგულირებადი ელექტროენერჯის ფასების კონტროლი

აუცილებელია მიწოდება-მომხმარებელთა ოპტიმალურად გაწონასწორდეს საბაზრო ღირებულების და ეკონომიკურად დასაბუთებული ტარიფის საშუალებით. გადახრა ოპტიმალური სიდიდიდან როგორც ზრდის, ასევე შემცირების მიმართულებით, აზიანებს მომხმარებელს და ქვეყნის ეკონომიკას. ტარიფი და სოციალური პრობლემები ა. პრობლემა არა ტარიფის სიდიდეში, არამედ მოსახლეობის სიღარიბეშია - ტარიფის ხელოვნური შემცირება კი მეტ სიღარიბეს იწვევს. ტარიფი ხშირად ხდება სოციალური პრობლემებით სპეკულირების საგანი. გავიხსენოთ თუნდაც წინა წლების სატელევიზიო გამოკითხვები, სადაც გამვლელებს ეკითხებიან რამდენად უჭირთ ელექტროენერჯის საფასურის გადახდა. World Experience For Georgia-ს სტატისტიკური მონაცემებით, მოსახლეობის მთლიან ხარჯებში ელექტროენერჯის ღირებულება მხოლოდ 3-დან - 4%-მდე შეადგენს. ანუ, სხვა ხარჯებთან შედარებით, განსაკუთრებულად მაღალი წილით არ გამოირჩევა. შესაბამისად, პრობლემა არა იმდენად ტარიფის სიდიდეში, არამედ მოქალაქეთა სიღარიბეშია, რომელთაც, სავარაუდოდ, ასევე უჭირთ საკვების, ტანსაცმლის, წამლის და სხვა აუცილებელი ხარჯების გაღება. ნათქვამს ადასტურებს ქვემოთ



**III საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია "ენერჯეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები", თბილისი, საქართველო, 2021 წლის 7-10 ივნისი**  
**III International Scientific and Technological Conference "Modern problem of power engineering and ways of solving them", Tbilisi, Georgia, June 7-10, 2021**

მოყვანილი დიაგრამაც, სადაც ნაჩვენებია ევროკავშირის და ყოფილი საბჭოთა ქვეყნების ელექტროენერჯის ტარიფების და ერთ სულ მოსახლეზე მშპ-ს (PPP) მაჩვენებლები (ნახაზი).



**ნახაზი. ელექტროენერჯის მოხმარება და წლიური ზრდა, გვტ.სთ**

ელექტროენერჯის მოხმარება 2020 წლის პირველ ნახევარში წლიურად 4.5%-ით შემცირდა და 6.1 კვტ.სთ შეადგინა. ელექტროენერჯის მოხმარების კლება კოვიდ 19-ის პანდემიიდან გამომდინარე დაწესებული შეზღუდვებითაა განპირობებული. კლება ყველაზე საგრძნობი იყო მეორე კვარტალში (-10.7% წ/წ), რადგან შეზღუდვები მარტის მეორე ნახევრიდან დაიწყო. ეკონომიკისა და მდგრადი განვითარების სამინისტრო 2020 წელს მოხმარების 5.8%-იან წლიურ კლებას პროგნოზირებს (2020 წლის საპროგნოზო ბალანსში ივლისში შესული ცვლილების მიხედვით).

კორონავირუსის ნეგატიური გავლენის შემსუბუქების მიზნით, მთავრობამ კომუნალური მომსახურებები დაასუბსიდირა. სუბსიდიის პირველი ნაწილი გავრცელდა 2020 წ. მარტის, აპრილისა და მაისის მოხმარებაზე, ხოლო მეორე ეტაპი 2020 წ. ნოემბრიდან 2021 წ. თებერვლის ჩათვლით პერიოდზეა დაგეგმილი. შეღავათი ვრცელდება იმ აბონენტებზე, რომელთა მოხმარებაც ნაკლებია 200 კვტ.სთ-ზე ელექტროენერჯის შემთხვევაში და 200მ 3-ზე ბუნებრივი გაზის შემთხვევაში. ეს მოხმარება დაახლოებით შეესაბამება თვიურად 37 ლარის გადასახადს ელექტროენერჯის შემთხვევაში და 100 ლარის მოხმარებას ბუნებრივი აირისთვის.

მარტი-მაისის პერიოდში სუბსიდიით 7.6 მილიონმა აბონენტმა ისარგებლა და სუბსიდიის ჯამურმა მოცულობამ 167.7 მლნ. ლარი შეადგინა. აღსანიშნავია, რომ მთავრობამ მსურველებს დოტაციაზე უარის თქმის შესაძლებლობა მისცა. სუბსიდიის პირველ ეტაპზე შეღავათზე ნებაყოფლობითი უარი 9,600-მა აბონენტმა განაცხადა.

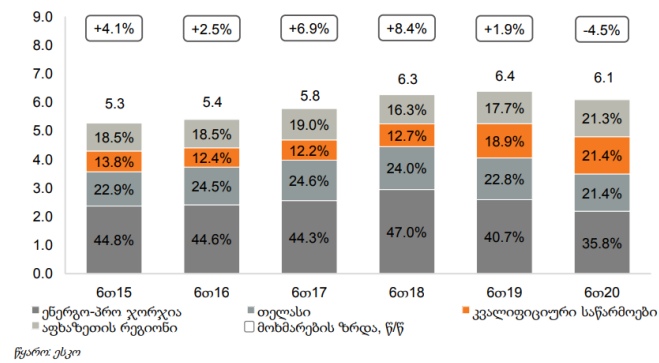
ელექტროენერჯის მოთხოვნა, მიწოდება და ფასები - 2020 წ. პირველი ნახევარი ელექტროენერჯის მოხმარება ელექტრო-ენერჯის მოხმარება 2020 წ. პირველ ნახევარში წლიურად 4.5%-ით შემცირდა და 6.1 კვტ.სთ შეადგინა. ელექტროენერჯის მოხმარების კლება კოვიდ-19-ის პანდემიიდან გამომდინარე დაწესებული შეზღუდვებითაა განპირობებული. კლება ყველაზე საგრძნობი იყო მეორე კვარტალში (-10.7% წ/წ), ხოლო ეკონომიკის სამინისტროს საპროგნოზო ბალანსის მიხედვით 2020 წელი მოხმარების წლიური 5.8%-იანი კლებით დასრულდება. აღსანიშნავია, რომ აფხაზეთის რეგიონის ელექტროენერჯის მოხმარება გაიზარდა ორივე კვარტალში, როცა დანარჩენ საქართველოში მოხმარების მნიშვნელოვანი კლებაა. აფხაზეთის რეგიონის ელექტროენერჯის მოხმარება 2020 წლის პირველ ნახევარში წლიურად 15.2%-ით, პირველ კვარტალში 8.0%-ით, ხოლო მეორე კვარტალში 27.8%-ით გაიზარდა. ამ რეგიონის გარეშე დანარჩენი საქართველოსთვის ელექტრო-ენერჯის მოხმარება შემცირდა წლიურად 8.8%-ით 2020 წლის პირველ ნახევარში, 0.7%-ით პირველ კვარტალში და 16.7%-ით მეორე კვარტალში.

2020 წლის მეორე კვარტალში ელექტროენერჯის მოხმარება 10.7%-ით შემცირდა. შემცირება ძირითადად პანდემიით გამოწვეულ შეზღუდვებს და შემცირებულ ეკონომიკურ აქტივობას უკავშირდებოდა. ყველაზე მეტად თელასის მოხმარებამ დაიკლო, წლიურად 21.2%-ით. შემცირდა პირდაპირი მოხმარებლების ელექტროენერჯის მოხმარებაც (წლიურად 16.2%-ით), რაც, პანდემიით გამოწვეული შეზღუდვების გარდა, უკავშირდება კრიპტობიზნესით დაკავებული ზოგიერთი კომპანიის დაკლებულ აქტივობას.

ტარიფების ცვლილების თვალსაზრისით განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ის ფაქტორი, რომელიც ტარიფის ზრდაზე ერთობლივ

გავლენას ითვალისწინებს (ეკოლოგია, საექსპლოატაციო და საინვესტიციო დანახარჯები) ცნობილია რომ, სათბობ მომპოვებელ დარგებში (ნავთობი, ნახშირი, ბუნებრივი გაზი.) აგრეთვე ჰიდროენერგო მშენებლობაში ახალი სიმძლავრეების ამოქმედება სულ უფრო ძნელ პირობებში ხორციელდება. ამას თუ დავუმატებთ ეკოლოგიურ მოთხოვნათა გათვალისწინების

გრაფიკი: ელექტროენერგიის მოხმარება, კვტ.სთ



აუცილებლობას, ცხადი ხდება რომ ერთი და იგივე ოდენობის ენერგიაშემცველის მოპოვება – წარმოება სულ უფრო მეტი ჯდება. შესაბამისად ობიექტურად უარესდება დარგის ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლები, მათ შორის ტარიფიც. მაშინ სად არის გამოსავალი?

ჩვენი აზრით ასეთი გამოსავალი არის. **უნდა მივაღწიოთ დარგში მეცნიერულ-ტექნოლოგიური და მენეჯერული პროგრესის წინ მსწრები ტემპებით დანერვას ბუნებრივი პირობების გაუარესებისა და სხვა უარყოფითი გამოწვევების ტემპებთან შედარებით.** წინააღმდეგ შემთხვევაში გაუარესდება დარგის ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლები, გაიზრდება ენერგია შემცველებზე ფასები.

სამომხმარებლო ტარიფი უნდა ასახავდეს ენერგიის მიწოდების ობიექტურ, მიზანშეწონილ ხარჯებს (ინვესტიციის ჩათვლით) მათი საბაზრო ღირებულებით და იძლეოდეს სამართლიან მოგებას ენერგოკომპანიებისათვის. სამომხმარებლო ტარიფს აქვს უმნიშვნელოვანესი როლი ენერგიის მიწოდება-მოხმარების დაბალანსებაში. - ტარიფის ხელოვნურად შემცირების დროს ვითარდება უფრო ენერგოინტენსიური დარგები და იზრდება ჯამური მოხმარება. ამავე დროს, შემცირებული ტარიფი აზარალებს ენერგოკომპანიებს და ამცირებს ენერგეტიკაში ინვესტირების სტიმულს, რითაც ამცირებს მიწოდების შესაძლებლობებს, ზრდის იმპორტდამოკიდებულებას და აუარესებს მიწოდების ხარისხს. - მაღალი ტარიფი კი პირიქით, ზღუდავს ეკონომიკის განვითარებას ამცირებს მოხმარებას და მოსახლეობის კომფორტის დონეს. მაგრამ, ამავე დროს, ზრდის ინვესტირების და მიწოდების სტიმულს. ტარიფების ხელოვნური ზრდა ენერგოკომპანიების სასარგებლოდ შესაძლოა კორუფციული გარიგების მანიშნებელი იყოს.

**ლიტერატურა**

1. ჩომახიძე დ. „ენერგეტიკული მენეჯმენტის თავისებურებები და პრინციპები“/ დამხმარე სახელმძღვანელო. თბილისი. 2020.
2. ჩომახიძე დ. „ენერგეტიკაში არსებული ტარიფების ცვლილების მიზეზ-შედეგობრივი ასპექტები“ <http://mcm.ge/82121/>
3. [www.esco.ge](http://www.esco.ge)
4. <https://galtandtaggart.com/upload/reports/19389.pdf>  
[http://weg.ge/sites/default/files/taripebi\\_socialuri\\_da\\_ekonomikuri\\_epektebi\\_final.pdf](http://weg.ge/sites/default/files/taripebi_socialuri_da_ekonomikuri_epektebi_final.pdf)

სპეციალისტების მომზადება ენერგეტიკის მიმართულებით  
Training of specialists in the field of power engineering

Оценка качества изучения учебных дисциплин в процессе профессиональной подготовки/переподготовки специалистов электроэнергетического профиля

**Наталья Зачепа, PhD**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина  
e-mail: zachepa.nataliia@ukr.net

**Юрий Зачепа, PhD, доцент**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина  
e-mail: iurizachepa@gmail.com

**Алексей Черный, д.т.н. профессор**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина  
e-mail: alekseii.chornyi@gmail.com

**Лариса Герасименко, д.т.н, доцент**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина  
e-mail: gerasimenko24@gmail.com

**Оксана Хребтова, PhD**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина  
e-mail: 34092@ukr.net

**Аннотация.** В работе решается актуальная задача оценивания качества процесса обучения при подготовке, переподготовки и повышения квалификации специалистов технических специальностей с применением различных форм проведения лабораторного практикума для получения необходимых навыков безопасного выполнения технологических операций. Развита методика оценки эффективности усвоения информации, которая позволяет формировать, развивать и совершенствовать обучение специалистов с применением информационно-коммуникационных технологий.

**Ключевые слова:** информационные технологии, оценка качества образования, виртуальный лабораторный комплекс, критерий приобретения навыков.

Quality Assessment of Academic Subjects Learning in Professional Training / Development of Specialists in Electrical Energy Industry

**Nataliia Zachepa, PhD**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine,  
e-mail: zachepa.nataliia@ukr.net

**Iurii Zachepa, PhD, Associate Professor**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine,  
e-mail: iurizachepa@gmail.com

**Oleksii Chornyi, Doctor of Science, Professor**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine,  
e-mail: alekseii.chornyi@gmail.com

**Larysa Herasimenko, Doctor of Science, Associate Professor**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine,  
e-mail: gerasimenko24@gmail.com

**Oksana Khrebtova, PhD**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: 34092@ukr.net

**Annotation.** The paper deals with an important problem of quality assessment of learning in professional training, further training and development of specialists in technical specialties using various forms of laboratory practice to master necessary skills for safe performance of technological operations. The approach of assessing the effectiveness of information learning has been developed, which enables forming, developing and improving the training of specialists using information and communication technologies.

**Key words:** information technology, education quality assessment, virtual laboratory complex, criterion for skills mastering.

**Введение.** Современное образование, основанное на компетентностном подходе актуализирует необходимость результативного обучения. Молодой инженер сегодня должен быть готов с первых дней пребывания на производстве выполнять необходимые функции диагностики, наладки оборудования, устранения неполадок, разрешения конфликтных ситуаций и т. д. Только высокий уровень сформированности общих и специальных компетентностей может свидетельствовать о качестве полученного образования. Под качеством образования специалиста понимают совокупность приобретенных знаний, умений, навыков, свойств, характеристик, способствующих квалифицированно и своевременно выполнять работу соответственно с паспортом специальности, демонстрировать активную гражданскую позицию, повышать приобретенную квалификацию, а при необходимости и сменить профессию [1]. Анализ современных исследований в педагогике дает возможность выделить целый комплекс проблем, усложняющих приобретение качественного образования: несоответствие структуры знаний и умений молодых специалистов производственным требованиям, что обусловлено разрывом системных связей между наукой и производством; проблема оценки конкурентноспособности специалиста на рынке труда, несоответствие квалификационных характеристик требованиям рынка труда [2]. Но несмотря на объективность данных проблем, процесс обучения в вузе должен обеспечить высокий уровень сформированности компетентностей и их соответствие основным требованиям стейкхолдеров: работодателей, самой личности и общества.

Новая концепция системы мониторинга и контроля качества подготовки специалистов, которая активно внедряется в Украине Национальным агентством обеспечения качества образования, проведение внешней и внутренней экспертиз, не разрешает вопросов оценки качества подготовки в контексте одного учебного предмета.

**Цель работы.** Описание возможной системы оценки качества обучения и усвоения информации будущими энергетиками в процессе изучения учебных дисциплин.

**Материалы и результаты исследований.** Вопросы мониторинга качества образования актуальны в исследованиях последних лет: П. Канивец, О. Мелешко, Ю. Перфильев, В. Суслов., разрабатывающие схему формирования показателей качества подготовки специалиста [1–3] обосновывают необходимость изменения парадигмы оценки качества и внедрение динамического подхода, в контексте которого качество рассматривается как позитивные изменения в

процессах и результатах образования, обусловленные развитием науки и производства и отражающие тенденции в изменении целей образования, запросов обучающихся, общества и рынка труда. Выявление таких изменений позволяет оперативно вносить корректирующие воздействия в процесс обучения, способствующие эффективному решению задач управления качеством образования.

Для применения динамического подхода при оценке качества результатов образования необходимо накапливать данные о познавательной творческой активности, уровне сформированности компетентностей, усвоенных знаниях и умениях или о других учебных достижениях студентов на протяжении всего периода обучения и фиксировать эти данные для анализа прироста качества в виде дескриптивной (описательной) статистики и различных документов на количественном и качественном уровнях измерения. Таким образом, в динамическом подходе оценка качества результатов обучения строится на проведении многофакторного анализа изменений по ряду показателей качества образования, позволяющих выявлять тенденции изменения качества, прогнозировать их и принимать не только оперативные, но и стратегические управленческие решения.

Опираясь на компетентностный и динамические подходы в своей работе, а также используя модель Дональда Кирпатрика [4], разработана и апробирована методика оценки качества изучения отдельной дисциплины. Исследования проводились в Кременчугском национальном университете имени Михаила Остроградского на протяжении 2018–2020 годов.

Предложенная методика, в отличие от модели Д. Кирпатрика, включает три составляющих диагностики. Последний, четвертый уровень, предложенный Д. Кирпатриком, направлен на выявление изменений в экономических показателях подразделения или предприятия в результате обучения. Рассчитать экономическую эффективность обучения, тем более изучения одной дисциплины, очень сложно, поскольку на эти показатели влияет значительное количество факторов, изолировать которые друг от друга практически невозможно. Поэтому мы исключили этот уровень оценки.

Таким образом, предлагаем производить оценку качества изучения учебного предмета по таким критериям:

- анализ оценки удовлетворенности соискателей высшего образования учебным предметом (анкетирование, беседы, интервью, фокус-группа);
- контроль уровня полученных знаний

(тестирование, опросы);

– демонстрация полученных знаний и умений на практике (выполнение заданий на виртуальных и физических лабораторных стендах);

– оценка результатов обучения.

Первый критерий должен показать удовлетворенность образовательным / учебным процессом слушателей. Полученная на этом уровне информация имеет важное значение, поскольку негативная реакция слушателей относительно изучения дисциплины негативно скажется на мотивации студентов, их желании активно работать, изучая учебный материал, и в последующем – применении полученных знаний и навыков на практике. Анкетирование позволило оценить рейтинг курса (актуальность и содержание курса, готовность применить полученные знания и навыки на практике и т.д.) и рейтинг преподавателя (компетентность преподавателя, его методическая грамотность, доступность изложения материала, коммуникабельность и т.д.). Для повторяющихся краткосрочных курсов использовали статистическое управление качеством процесса обучения с применением контрольных карт Шухарта. На рис. 1 приведена контрольная карта рейтинга курса «Автономные источники питания для электроприводов», который изучают руководители низшего и среднего звена энергоуправления промышленных предприятий.

За центральную линию CL принят средний рейтинг курса  $XCL = 8,3$  балла (при оценке по 10-ти бальной системе), полученного на основе анализа данных обучения, полученных ранее. В результате статистической обработки информации получены верхний  $XUCL = +3s$  и нижний  $XLCL = -3s$  контрольные пределы, где  $s = 0,61$  балла – среднее значение средних квадратичных отклонений рейтинга курса подгрупп обучения.

Процесс обучения находится в статистически управляемом состоянии, отклонение рейтинга от приемлемого вызвано только случайными причинами. Выход рейтинга за контрольные границы является результатом действия особых причин, которые следует выявить, исключить или ослабить. На графике рейтинга курса можно выделить три серии точек.

Первая серия точек № 1, расположенных вблизи центральной линии, свидетельствует о том, что процесс обучения находится в статистически управляемом состоянии, его качество предусмотрено и обучение удовлетворяет предъявляемым требованиям. Однако, начиная с пятой точки, наблюдается тенденция к потере управляемости. На этом этапе обучения заведующему кафедрой необходимо было бы посетить занятие в роли супервизора,

проанализировать его с позиции актуальности и выяснить уровень комфортности созданных условий организации.

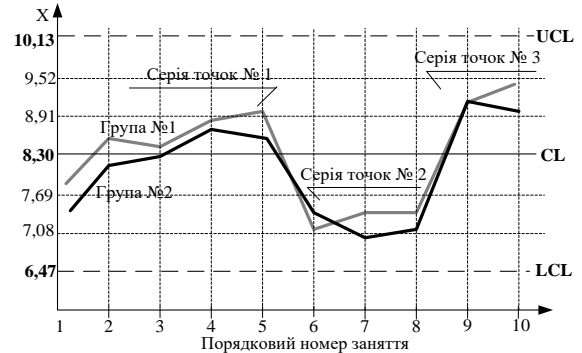


Рис. 1. Контрольная карта рейтинга курса «Автономные источники питания для электроприводов»

Анализ проведенных занятий выявил такие причины ухудшения ситуации: избыточное количество часов, затрачиваемых на теоретическую подготовку, тогда как слушатели ставили целью отработать практические навыки; начиная с восьмого, занятия проводились без отрыва от производства после работы и поэтому усвоение материала слушателями было затруднено утомлением. После коррекции программы курса: использование кейс-метода, ситуационного моделирования, профессионально-ориентированных заданий, использования виртуальных лабораторных стендов, направленных на формирование практических умений и навыков слушателей, проблемы были успешно решены, что способствовало качественному улучшению процесса обучения – серия точек № 3 (9-10 занятия) расположены выше центральную линию и имеют положительную динамику в верхней контрольной границы.

Второй уровень посвящен измерению полученных в процессе обучения знаний. С этой целью была проведена экспресс-диагностика в форме тестирования (открытые и закрытые задания). Были проведены констатирующие и контрольные срезы знаний.

В табл. 1 и 2 представлены результаты тестирования слушателей по курсу «Автономные источники питания в электроприводе», где на каждом занятии был предоставлен тест из 20 заданий. Таких тестов было проведено 10. Табл. 1 – Данные тестирования слушателей группы № 1. Табл. 2 – Данные тестирования слушателей группы № 2.

Результаты такого тестирования показывают (рис. 2, 3), как изменились знания и компетенции слушателей за период изучения дисциплины. В



**III საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია "ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები", თბილისი, საქართველო, 2021 წლის 7-10 ივნისი**  
**III International Scientific and Technological Conference "Modern problem of power engineering and ways of solving them", Tbilisi, Georgia, June 7-10, 2021**

данном случае – это двухмесячные курсы повышения квалификации или 52 учебных дня.

Тестовая диагностика позволила достоверно и оперативно оценить уровень подготовленности и при необходимости скорректировать программу

обучения с учетом способности и заинтересованности слушателей к восприятию информации (занятия 6–8 согласно рис. 1) и пропусков в знаниях (по данным табл. 1 и 2).

Таблица 1.

| Ф. И. О.       | Дата / Баллы |              |              |              |              |              |              |              |             |              |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
|                | 05.09        | 10.09        | 17.09        | 24.09        | 01.10        | 03.10        | 08.10        | 17.10        | 22.10       | 27.10        |
| С 1            | 0,55         | 0,45         | 0,65         | 0,65         | 0,65         | 0,7          | 0,8          | 0,8          | 0,8         |              |
| С 2            | 0,45         | 0,55         | 0,7          | 0,7          | 0,7          | 0,6          | 0,8          | 0,8          | 0,85        |              |
| С 3            | 0,45         | 0,65         | 0,7          | 0,8          | 0,85         | 0,8          | 0,8          | 0,7          | 0,75        | 0,8          |
| С 4            | 0,5          | 0,55         | 0,55         | 0,6          | 0,7          | 0,6          | 0,8          | 0,75         | 0,8         | 0,8          |
| С 5            | 0,4          | 0,6          | 0,6          | 0,35         | 0,35         |              | 0,8          |              | 0,75        | 0,8          |
| С 6            | 0,4          | 0,5          | 0,6          | 0,3          | 0,55         | 0,35         | 0,8          | 0,45         | 0,7         |              |
| С 7            | 0,45         | 0,6          | 0,55         | 0,55         | 0,65         | 0,65         | 0,6          | 0,65         | 0,7         | 0,75         |
| <b>Среднее</b> | <b>0,45</b>  | <b>0,526</b> | <b>0,616</b> | <b>0,613</b> | <b>0,683</b> | <b>0,675</b> | <b>0,756</b> | <b>0,717</b> | <b>0,77</b> | <b>0,788</b> |
| <b>Медиана</b> | <b>0,45</b>  | <b>0,55</b>  | <b>0,65</b>  | <b>0,60</b>  | <b>0,70</b>  | <b>0,650</b> | <b>0,80</b>  | <b>0,75</b>  | <b>0,75</b> | <b>0,80</b>  |

Таблица 2.

| Ф.И.О.         | Дата / Баллы |              |              |              |              |              |              |             |              |              |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
|                | 05.09        | 10.09        | 17.09        | 24.09        | 01.10        | 03.10        | 08.10        | 17.10       | 22.10        | 27.10        |
| С 8            | 0,3          | 0,5          |              |              |              | 0,55         | 0,6          | 0,4         | 0,7          |              |
| С 9            | 0,45         | 0,45         | 0,65         | 0,7          | 0,6          | 0,75         | 0,75         | 0,75        | 0,65         | 0,75         |
| С 10           | 0,15         | 0,35         | 0,7          |              |              | 0,6          |              |             | 0,7          |              |
| С 11           | 0,35         | 0,15         | 0,6          | 0,5          | 0,65         | 0,75         | 0,7          | 0,8         | 0,7          | 0,7          |
| С 12           |              |              | 0,6          |              |              |              | 0,75         |             | 0,85         | 0,75         |
| С 13           | 0,25         | 0,5          | 0,6          | 0,55         |              | 0,65         |              | 0,65        | 0,6          | 0,8          |
| С 14           | 0,15         | 0,3          | 0,6          | 0,6          | 0,55         | 0,6          | 0,55         |             | 0,65         | 0,75         |
| <b>Среднее</b> | <b>0,34</b>  | <b>0,427</b> | <b>0,654</b> | <b>0,636</b> | <b>0,521</b> | <b>0,646</b> | <b>0,693</b> | <b>0,70</b> | <b>0,70</b>  | <b>0,754</b> |
| <b>Медиана</b> | <b>0,32</b>  | <b>0,45</b>  | <b>0,60</b>  | <b>0,65</b>  | <b>0,525</b> | <b>0,625</b> | <b>0,725</b> | <b>0,75</b> | <b>0,675</b> | <b>0,75</b>  |

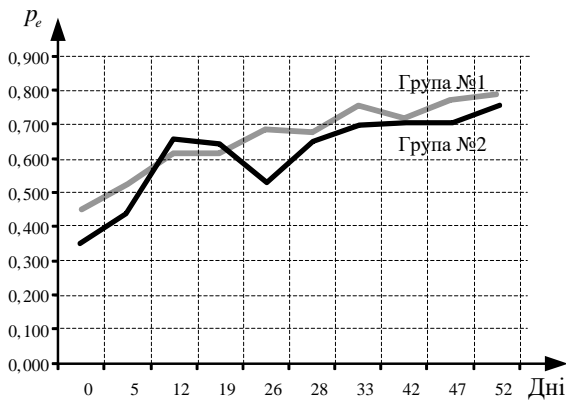


Рис. 2. Среднее значение успеваемости слушателей групп №1 и №2 по данным тестирования

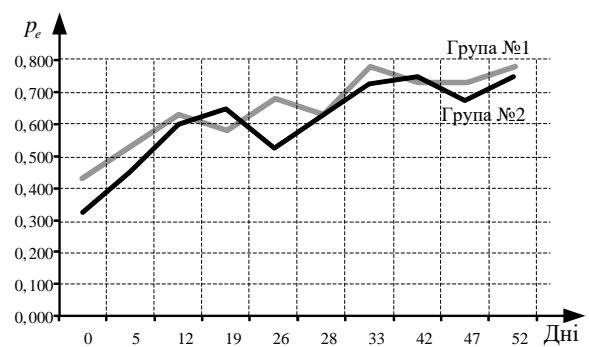


Рис. 3. Медиана значения успеваемости слушателей групп №1 и №2 по данным тестирования

Целью третьего уровня является оценка степени применения полученных знаний и навыков в практической деятельности. Качественное применение результатов обучения на практике можно оценить с помощью анализа результатов выполнения практических и лабораторных работ, выпускных работ специалистов, тематика которых непосредственно связана с решением проблем конкретного подразделения предприятия, является местом работы слушателя. Защита работы или сдачи экзамена перед комиссией, в которую входят руководители специалиста, позволяет оценить степень усвоения материала и насколько отработаны практические навыки.

Для вышеуказанных групп слушателей был проведен эксперимент с целью сравнить эффективность приобретения практических навыков выполнения технологических операций путем выполнения лабораторного практикума на физических стендах и виртуальных лабораторных стендах, которые моделируют производственные процессы.

Необходимость использования стендового оборудования подтверждена опросом 54 преподавателей института, которые отметили, что работа только с синтезированными математическими моделями привела к тому, что у студентов возникли трудности в понимании физической природы электромагнитных и механических процессов реальных объектов [5]. Это стало толчком для разработки и исследования виртуальных лабораторных комплексов (ВЛК). Они имитируют реальные физические объекты, созданные с помощью компьютерных систем, которые могут выступать заменителями реальных производственных приборов и процессов, обеспечивающих визуальные и звуковые эффекты на основе технологии бесконтактного информационного взаимодействия, которые позволяют пользователю непосредственно действовать с помощью специальных сенсорных устройств и устройств управления [6].

Использование ВЛК для подготовки специалистов как электроэнергетической отрасли, так и специалистов других отраслей, позволяет повысить качество профессиональной подготовки и переподготовки энергетиков, снизить расходы на профессиональную подготовку за счет сокращения ее сроков проведения в безопасных условиях; повысить степень объективности оценки квалификации работников, которые проходят обучение (их знаний и умений) благодаря максимальной реалистичности поставленной задачи.

Слушатели группы № 1 отработали лабораторные работы на физическом стенде,

слушатели группы № 2 – на ВЛК. При защите лабораторной работы слушателям был предложен тест из 10 заданий, который состоял из вопросов по теории процессов в исследуемых системах и электрических цепях, а также выполнение лабораторной работы. Результаты ответов, а именно количество правильных ответов слушателей, представлены в табл. 3, 4. Табл. 3 – Итоги ответов группы № 1 по результатам лабораторного практикума на физическом стенде. Табл. 4 – Итоги ответов группы № 2 по результатам лабораторного практикума на виртуальном стенде.

Таблица 3

| Ф.И.О          | Лабораторна робота |            |            |            |
|----------------|--------------------|------------|------------|------------|
|                | 1                  | 2          | 3          | 4          |
| С 1            | 4                  | 3          | 3          | 2          |
| С 2            | 4                  | 2          | 6          | 6          |
| С 3            | 8                  | 6          | 7          | 4          |
| С 4            | 4                  | 4          | 2          | 3          |
| С 5            | 6                  | 7          | 4          | 5          |
| С 6            | 6                  | 6          | 6          | 4          |
| С 7            | 5                  | 7          | 6          | 2          |
| <b>Среднее</b> | <b>5,9</b>         | <b>4,5</b> | <b>5,0</b> | <b>3,3</b> |

Таблица 4

| Ф.И.О          | Лабораторна робота |            |            |            |
|----------------|--------------------|------------|------------|------------|
|                | 1                  | 2          | 3          | 4          |
| С 8            | 8                  | 4          | 5          | 6          |
| С 9            | 6                  | 5          | 6          | 7          |
| С 10           | 7                  | 6          | 5          | 8          |
| С 11           | 1                  | 4          | 7          | 9          |
| С 12           | 9                  | 6          | 5          | 5          |
| С 13           | 9                  | 3          | 6          | 8          |
| С 14           | 4                  | 4          | 6          | 7          |
| <b>Среднее</b> | <b>6,3</b>         | <b>5,0</b> | <b>5,7</b> | <b>7,1</b> |

Итоги ответов слушателей при защите лабораторных работ в хронологическом порядке показаны на рис. 4. Анализ кривых позволяет констатировать, что существует четкая тенденция к ухудшению результатов тестирования в первой группе, и улучшение результатов тестирования во второй.

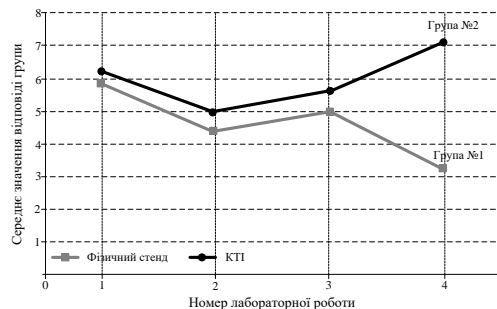


Рис. 4. Результаты тестирования групп слушателей курсов повышения квалификации

Среднее значение разницы ответов между группами для первых трех работ весьма незначительна, и только для четвертой работы стремительно растет (табл. 5, рис. 5). Поэтому для проверки качества полученных результатов проведена их статистическая оценка.

Среднее значение ответов по группам слушателей

Таблица 5

|                 | Лабораторна робота |            |            |            |
|-----------------|--------------------|------------|------------|------------|
|                 | 1                  | 2          | 3          | 4          |
| Группа № 1      | 5,9                | 4,5        | 5,0        | 3,3        |
| Группа № 2      | 6,3                | 5,0        | 5,7        | 7,1        |
| <b>Разность</b> | <b>0,4</b>         | <b>0,5</b> | <b>0,7</b> | <b>3,8</b> |

Среднее значение рассчитываем как  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ , где  $x$  – значение ответов по табл. 3, 4. Несмещенная оценка дисперсии:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (1)$$

Границы доверительных интервалов

$$\bar{x} - \frac{t_{1-\alpha/2} \tilde{\sigma}}{\sqrt{n}} < \bar{x} < \bar{x} + \frac{t_{1-\alpha/2} \tilde{\sigma}}{\sqrt{n}}, \quad (2)$$

где  $1-\alpha/2$  – квантиль распределения Стьюдента.

Принимая коэффициент вероятности  $\alpha = 0,05$ , находим для первой группы, с девятью степенями свободы,  $t_{1-\alpha/2} = 2,262$ ; для другой группы – с шестью степенями свободы,  $t_{1-\alpha/2} = 2,447$ . Учитывая доверительные интервалы, построим распределение ответов слушателей (рис. 5).

Как видно из рисунка, использование ВЛК увеличивает процент усвоения учебной информации. Наблюдается кумулятивный эффект после третьей лабораторной работы – стремительный рост количества верных ответов в группе, выполнявшей лабораторный практикум на ВЛК. Следовательно, можно утверждать, что на этом этапе происходит усвоение теоретических положений и слушатели начинают сознательно выполнять задачи лабораторного практикума, а не слепо руководствуются методическими рекомендациями.

Оценить применения полученных при обучении знаний на практике можно и в форме коучинга, когда в ходе прямого наблюдения за работником на рабочем месте преподаватель или соответствующее лицо, например, энергетик цеха проверяет и дает рекомендации по ликвидации пробелов в усвоении материала.

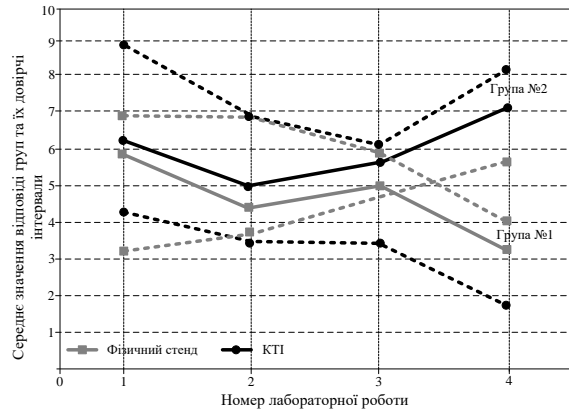


Рис. 5. Распределение ответов и их доверительные интервалы при тестировании групп слушателей

Для интегрированной оценки качества обучения и усвоения информации предложен критерий приобретения навыков выполнения технологических операций:

$$K_{mn} = 1 - \bar{x}_n, \quad (3)$$

где  $K_{mn}$  – коэффициент приобретения навыков выполнения технологических операций;

$\bar{x}_n = \frac{1}{K} \sum_{n=1}^K x_n^*$  – среднее значение ошибочных или

лишних действий персонала при отработке определенного алгоритма технологического цикла;  $K$  – минимально-допустимое количество операций для выполнения определенного алгоритма технологического цикла;  $x_n, x_n^* = x_n / K$  – соответственно фактическое и нормированное количество операций, выполненных работником при отработке определенного алгоритма технологического цикла.

Для трех групп студентов четвертого курса дневной формы обучения по дисциплине «Системы управления электроприводами» лабораторный практикум из 10 работ был проведен следующим образом: группа № 1 выполняла практикум на физическом стенде; группа № 2 – на ВЛК, а группа № 3 подготовку выполняла на ВЛК, а результаты практикума представляла на физическом стенде. В табл. 6 приведены данные о среднем количестве лишних операций, выполненных студентами при выполнении лабораторного практикума. Таблица 6 – Среднее количество лишних операций, выполненных студентами на лабораторном практикуме.

По результатам табл. 6 построены графики (рис. 6) динамики уменьшения количества лишних операций, осуществляемых студентами при выполнении лабораторного практикума.

В табл. 7 представлены данные по

определению коэффициента приобретения навыков выполнения технологических операций. По результатам табл. 7 построены графики (рис. 7) изменения коэффициента, характеризующего степень эффективности

применения ВЛК как интегрированной оценки приобретения навыков выполнения технологических операций.

Таблица 6

| Группа | Лабораторная работа |    |    |    |    |   |   |   |   |    |
|--------|---------------------|----|----|----|----|---|---|---|---|----|
|        | 1                   | 2  | 3  | 4  | 5  | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| № 1    | 10                  | 12 | 13 | 9  | 10 | 9 | 9 | 8 | 9 | 7  |
| № 2    | 10                  | 10 | 9  | 10 | 8  | 8 | 6 | 7 | 6 | 6  |
| № 3    | 6                   | 4  | 4  | 6  | 4  | 3 | 4 | 3 | 3 | 2  |

Таблица 7

| Группа | Лабораторная работа |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|        | 1                   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| № 1    | 0,47                | 0,37 | 0,32 | 0,53 | 0,47 | 0,53 | 0,53 | 0,58 | 0,53 | 0,63 |
| № 2    | 0,47                | 0,47 | 0,53 | 0,47 | 0,60 | 0,58 | 0,68 | 0,63 | 0,68 | 0,68 |
| № 3    | 0,68                | 0,79 | 0,78 | 0,79 | 0,82 | 0,8  | 0,84 | 0,84 | 0,86 | 0,89 |

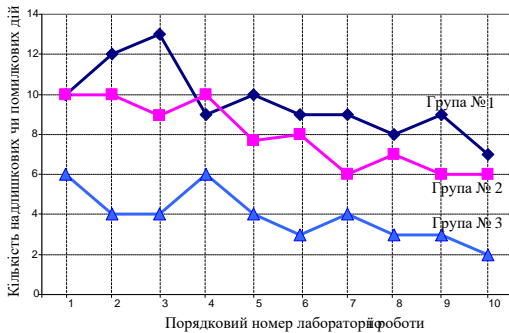


Рис. 6. Среднее количество лишних операций, выполненных студентами

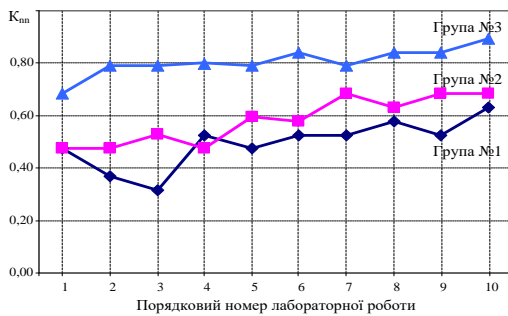


Рис. 7. Среднее значение коэффициента  $K_{nn}$  по группам

Итак, по результатам проведенного эксперимента установлено, что среднее значение коэффициента приобретения навыков выполнения технологических операций составляет: группа № 1 – 0,49; группа № 2 – 0,58; группа № 3 – 0,809.

Полученные результаты значение коэффициента как интегрированной оценки критерия (3) приобретение навыков выполнения технологических операций полностью коррелируется с результатами каждого из этапов оценки качества: критерии 1 и 2 – рис. 1–3,

критерий 3 – рис. 4, критерий 4 – рис. 7.

Для подтверждения адекватности и автоматизации расчета критерия приобретения навыков выполнения технологических операций необходимо получить обобщенную модель на основе данных респондентов. Задача в такой формулировке сводится к применению методов аппроксимации. Одним из эффективных методов построения среднего квадратичного приближения является метод наименьших квадратов [7].

Как видно из рис. 8, данные по каждому из респондентов эксперимента, в том числе лучшего студента группы, среднее значение коэффициента (данные табл. 7) с достаточной точностью отражают динамику его изменения в зависимости от хронологии выполнения лабораторного практикума.

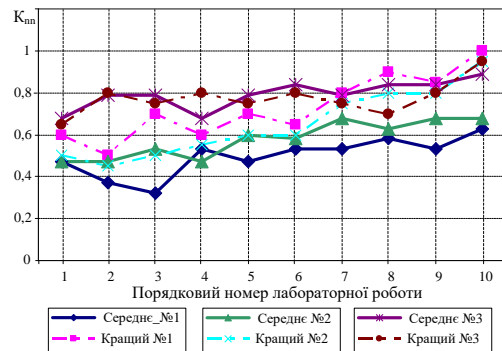


Рис. 8. Динамика изменений коэффициента  $K_{nn}$  по его средним значениям в группе и данными лучшего студента этой группы

Поэтому для синтеза регрессионной модели в дальнейшем использованы только данные табл. 7. В результате исследований ряда зависимостей

$K_{nm} = f(\bar{x}_n)$ ,  
 окончательную модель аппроксимации примем как рациональную функцию вида:

$$K_{nm} = a(\bar{x}_n)^b, \quad (4)$$

где  $a = 0,68189432$ ;  $b = 0,10084136$  – значения коэффициентов регрессионного уравнения.

Адекватность моделей проверена с коэффициентом детерминации  $R^2$ :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (K_{nm\_i} - K_{nm\_cp})^2}{\sum_{i=1}^N (K_{nm\_i}^* - K_{nm\_cp})^2}. \quad (5)$$

Выбранная функция вида (4) проходит через большое количество характеристических точек и имеет наименьшее количество коэффициентов регрессионного уравнения, характеризуется наименьшей погрешностью в вычислениях и крупнейшим параметром  $R^2$ .

#### Выводы

1. Показано, что оценка качества обучения учебной дисциплины является надежным инструментом контроля результативности подготовки и переподготовки специалистов, и позволяет реализовать стратегию обеспечения и поддержания высокого уровня качества процесса обучения, повышая тем самым компетентность студентов и квалификацию энергетиков.

2. Определена и статистически подтверждена эффективность проведения практической подготовки с применением виртуальных лабораторных комплексов. Доказана эффективность внедрения компьютерных тренажеров-имитаторов при проведении практической подготовки специалистов по усвоению учебно-практической информации.

3. Установлено, что применение виртуальных лабораторных комплексов повышает качество усвоения информации не менее, чем на 13%.

#### Литература

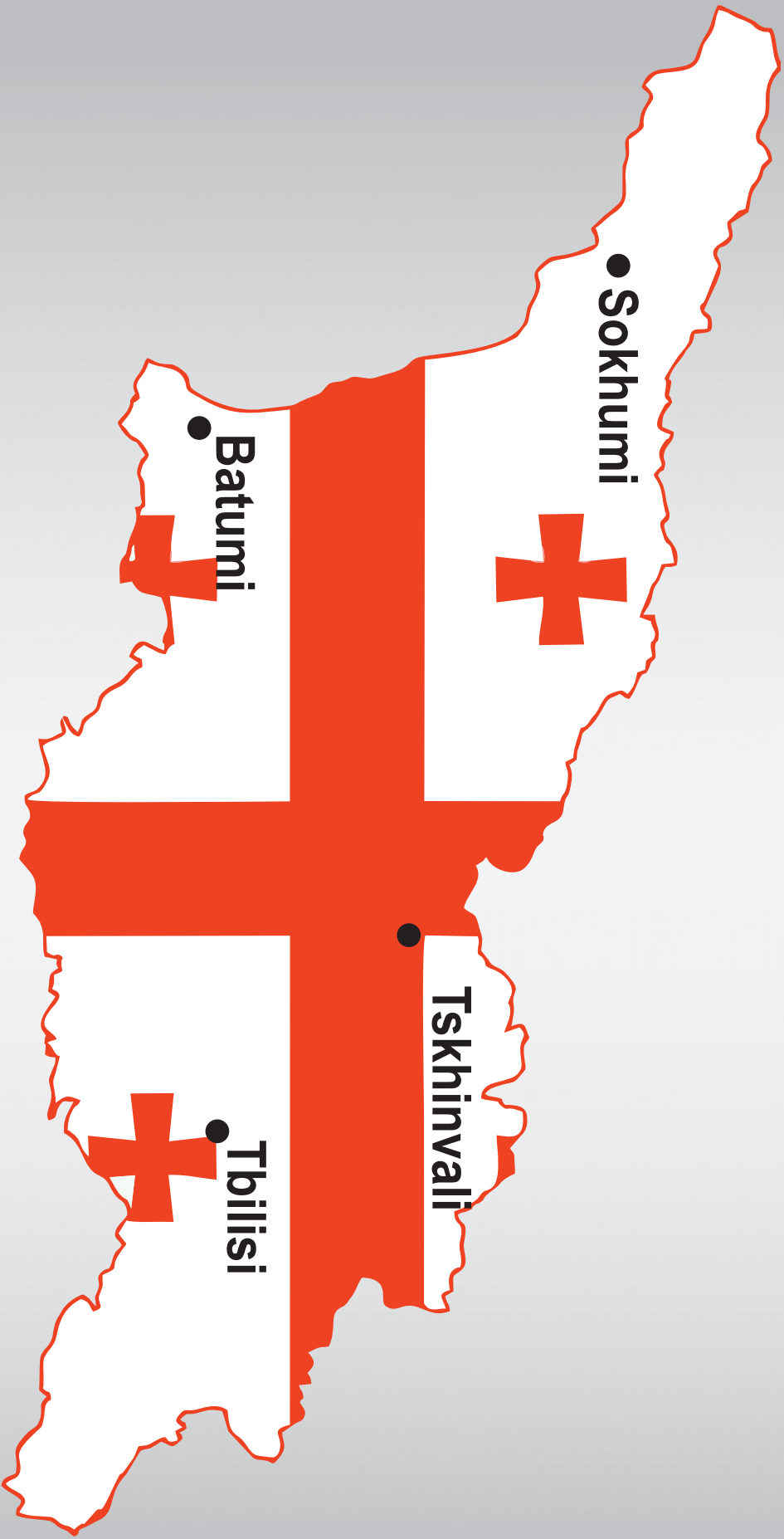
1. Канивец П.И. Модели и методы оценки качества подготовки и повышения конкурентоспособности специалистов: дис. канд. економ. наук. Новочеркасск, 2004. 230 с.
2. Перфильев Ю. С. Показатели для оценки качества образования <file:///C:/Users/geras/Desktop/274-288.pdf>
3. Суслов А.Г. Система оценки качества подготовки специалиста// Качество. Инновации. Образование. 2005. № 3. С. 58-61.

4. Киркпатрик Д.Л., Киркпатрик Д.Д. Четыре ступеньки к успешному тренингу: практическое руководство по оценке эффективности обучения. М: Эйч Ар Медиа, 2008. 128 с. (пер. с английского М. Чомахидзе-Дорониной)
5. Chornyi O., Herasymenko L., Zelenska L. Diagnostic Assessment of The Competency Maturity of Electrical Engineers Through Profession-oriented problems // Proceedings of the 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP). – Kremenchuk, Ukraine, 2020. P. 423–426.
6. Чорний О.П. Віртуальні лабораторні комплекси – технологія підвищення якості підготовки фахівців / О.П. Чорний, М.В. Загірняк, А.М. Гуржій, С.А. Сергієнко, Д.Й. Родькін; Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2017. 232 с. ISBN 978-617-639-116-6
7. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ /Н.Дрейпер, Г. Смит. М.:Финансы и статистика, 1986. 365 с.

#### References (transliterated)

1. Kanivecz P.I. Modeli i metody` ocenki kachestva podgotovki i povыsheniya konkurentosposobnosti spetsialistov: dis. kand. ekonom. nauk. Novoчеркасск, 2004. 230 s.
2. Perfil'ev Yu. S. Pokazateli dlya ocenki kachestva obrazovaniya <file:///C:/Users/geras/Desktop/274-288.pdf>
3. Suslov A.G. Sistema ocenki kachestva podgotovki spetsialista // Kachestvo. Innovaczi. Obrazovanie. 2005. # 3. S. 58-61.
4. Kirkpatrik D.L., Kirkpatrik D.D. Chetyre stupen`ki k uspehnomu treningu: prakticheskoye rukovodstvo po otsenke effektivnosti obucheniya. M: Eych Ar Media, 2008. 128 s. (per. s angliyskogo M. Chomakhidze-Doroninoy).
5. Chornyi O., Herasymenko L., Zelenska L. Diagnostic Assessment of The Competency Maturity of Electrical Engineers Through Profession-oriented problems // Proceedings of the 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP). Kremenchuk, Ukraine, 2020. P. 423–426.
6. Chornyi O.P. Virtualnyi laboratorni kompleksi – tekhnolohiya pidvyshchennya yakosti pidhotovky fakhivtsiv / O.P. Chornyi, M.V. Zahirnyak, A.M. Hurzhiy, S.A. Serhiyenko, D.Y. Rod'kin; Kremenchuk: PP Shcherbatykh O.V., 2017. – 232 s. – ISBN 978-617-639-116-6
7. Dreyper N. Prykladnoy rehressyonnyy analiz / N. Dreyper, H. Smyt. M.: Fynansy y statystyka, 1986. 365 s.





● Sokhumi

● Batumi

● Tskhinvali

● Tbilisi