

ISSN 1512-0120



ენერგო ENERGY

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

GEORGIAN TECHNICAL UNIVERSITY
FACULTY OF POWER ENGINEERING AND TELECOMMUNICATION

სერიზ : “ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები
და მათი გადაწყვეტის გზები”

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

№ 4 (96)/2020

|

თბილისი, TBILISI

ენერგია

ENERGY

სერია: „ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი
გადაწყვეტის გზები“ დააფინანსა სს „თელასმა“

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

4 (96)/2020

ნაწილი **I**
Part

თბილისი-Tbilisi



ჟურნალ „ენერგია“-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) რევაზ არველაძე, ვლადიმერ კლეპიკოვი (უკრაინა),
ბადურ ჭუნაშვილი, ალექსანდრე პეტროსიანი

საორგანიზაციო კომიტეტი:

ზვიად ვაშაკიძე, თეიმურაზ გამრეკელაშვილი, ენვერ ჩიჩუა, უჩა უჩანეიშვილი, დავით კახიანი,
ემზარ ჩაჩხიანი, ნუგზარ ბერიძე, ომარ ზივზივაძე, ლევან იმნაიშვილი, თორნიკე კიზირია, ომარ
კილურაძე, მიკოლა მუხა (უკრაინა), სიმონ ნემსაძე, იგორ ორლოვსკი (პოლონეთი), არჩილ
სამადაშვილი, მამუკა კობალია, ალა დრანკოვა (უკრაინა), რომან ზაიცევი (უკრაინა), თენგიზ
მუსელიანი, შალვა ნაჭყებია, მაია ტულუში, ვერა შამარდინა (უკრაინა), 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 “Modern problems of energy and ways of their solution” of the magazine “Energy”.

The editor -in-chief – Merab Lortkipanidze

Deputi of the editor -in-chief – Shalva Gagoshidze

Presidium of the Organizing Committee:

David Gurgenidze, Evgeni Sokol (Ukraine) Revaz Arveladze, Vladimer Klepikov (Ukraine), Badur Tchunashvili,
Alexander Petrosyan

Organizing Committee:

Zviad Vashakidze, Teimuraz Gamrekelashvili, Enver Chichua, Ucha Uchaneishvili, Davd Kakhiani, Emzar
Chachkhiani, Nugzar Beridze, Omar Zivzivadze, Levan Imnaishvili, Tornike Kiziria, Omar Kighuradze, Mikola
Mukha (Ukraine), Mamuka Kobalia, Alla Drankova (Ukraine), Roman Zaitsev (Ukraine), Tengiz Museliani,
Shalva Nachkebia, Maia Tughushi, Vera Shamardina (Ukraine), 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
Electromechanical systems

<i>В. Клепиков, А. Тимошенко</i> К повышению силы сцепления колес рудничного электровоза средствами электропривода.	5
<i>В. Шамардина, В. Пилипенко</i> К вопросу выбора электропривода грузоподъемного «крана-шара»	10
<i>В. Бородай, О. Нестерова</i> Система энергоэффективного управления асинхронным приводом механизмов длительного режима работы.	15
<i>В. Котляров, С. Буряковский</i> Автоматизация концептуального проектирования исследовательских стендов электропривода.	21
<i>В. Бушер, Б. Крицкий, В. Крицкий</i> Разработка прототипа системы управления электромеханическим оборудованием судовых аппарелей.	26
<i>Ю. Кутовой, Я. Кириленко, Т. Кунченко</i> Автоматическое управление скоростным режимом рельсовых транспортных средств с помощью технологий компьютерного зрения.	29
<i>Е. Назарова, И. Мелешко</i> Моделирование особенностей возникновения завалов пневмотранспортных систем.	33
<i>О. Chornyi, V. Tytiuk, Yu. Zachepa, V. Kuznetsov, M. Tryputen, V. Nadtochyi</i> Effect of uncertainty of the parameters of a synchronous motor mathematical model on the parametric and numerical stability of its solutions and calculation of dynamic modes.	38
<i>A. Drankova, M. Mukha</i> Electromechanical Systems Laboratory for the Study Shipboard Variable Frequency Drives.	46
<i>Б. Чунашвили, М. Кобаля, А. Петросян, Р. Гургенадзе, Г. Булбулашвили</i> Исследование особенностей электромеханической части маятниковых подвесных канатных дорог и усовершенствование расчетной модели подвижной механической части электропривода.	51
<i>M. Tugushi, M. Loria, G. Gogitidze</i> Electrohydraulic Systems, Method of their Perfection by Means of Electrohydraulic effect.	56

ელექტრომომხმარებლის ტექნოლოგიები
Electrical energy consumption technologies

<i>S. Shevchenko, D. Danylchenko, S. Dryvetskyi</i> Calculation of probability disconnected overhead lines 6-35 kV from thunderstorm activity.	58
<i>S. Shevchenko, D. Danylchenko, O. Pirotti, K. Minakova</i> Overview of selection methods for surge arresters 6-750 kV.	62
<i>О. Шутенко, С. Пономаренко</i> Прогнозирование значений показателей трансформаторных масел с учетом особенностей старения на длительных интервалах эксплуатации.	68
<i>Б. Чунашвили, М. Кобаля, А. Петросян, Т. Гамрекеლაшвили, Н. Ртвеладзе</i> Исследование электромагнитных процессов, проходящих в однофазных и трехфазных кабельных линиях в направлении определения потерь мощности.	74
<i>М. Кєривишвили, К. Церетели, Т. Гамрекеლაшвили</i> Исследование перенапряжении возникших при однофазных коротких замыканиях в распределительной сети 6-10 кВ.	78
<i>О. Шутенко, А. Кулик</i> Распознавание перегревов, которые сопровождаются разрядами с высокой плотностью энергии, по результатам анализа растворенных в масле газов.	82

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

<i>Е. Сокол, В. Замаруев, В. Ивахно, С. Кривошеев, Б. Стысло</i> Использование мультikonверторных систем для повышения эффективности преобразователей электрической энергии	88
<i>В. Замаруев, В. Ивахно, Б. Стысло</i> Определение энергетической эффективности систем постоянного тока	94

ენერგოეფექტიანობა და განახლებადი ენერგიის წყაროები. ენერგო-რესურსების დამზოგავი ტექნოლოგიები ენერგეტიკაში Energy efficiency and renewable energy sources. Energy Saving technologies in Power Engineering

<i>О. Довгалиук, Р. Бондаренко, И. Яковенко</i> Разработка мероприятий по повышению эффективности эксплуатации автономных осветительных комплексов для автодорог Украины.	101
<i>R. Zaitsev, M. Kirichenko, L. Zaitseva</i> Boost-up direct current converter for solar station.	107
<i>К. Минакова, Р. Зайцев</i> Оптимизация базовой модели солнечного коллектора для комбинированных фотоэнергетических систем.	114
<i>D. Danylenko, A. Potryvai</i> Optimization of accumulation units in a mobile, autonomous cottage settlement as a part of maneuvering system.	120
<i>L. Zaitseva, O. Vodoriz, R. Zaitsev</i> ITO/polyimide/Al ₂ O ₃ thin film structure for capacitive transducers.	124

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

<i>Ю. Хутаишвили, А. Прангишвили, Н. Иаишвили</i> О новом подходе применения полупроводникового сенсора для обнаружения метана и моно оксида углерода.	128
<i>ლ. იმნაიშვილი, კ. ქასოშვილი</i> ენერგოეფექტური საყოფაცხოვრებო გაზქურა.	134
<i>მ. ბედინეიშვილი, ლ. იმნაიშვილი, გ. ზედგენიძე</i> კომპიუტერის ენერგომომხმარებლის მონიტორინგი და მართვა.	137
<i>ლ. იმნაიშვილი, მ. ბედინეიშვილი, გ. გოდერძიშვილი, გ. ზედგენიძე, ა. ჭოველიძე</i> ლაბორატორიული ექსპერიმენტის დისტანციური ჩატარების ტექნოლოგია.	141
<i>Ю. Коваль</i> Обзор новых датчиков газа компании FIGARO.	146
<i>ნ. იაშვილი, შ. მესტირიშვილი, კ. მახაშვილი</i> ბუნებრივი გაზის ოდორიზაციის ხარისხის კონტროლის მიკროპროცესორული მოწყობილობა.	150
<i>К. Агеев.</i> Устройство обнаружения утечки газов «Кристалл» для жилых помещений, система мониторинга утечки газов “CERBER”.	153

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

<i>С. Клепикова</i> Структурные взаимосвязи подсистемы управления энергоэффективностью предприятия с использованием искусственных нейронных сетей.	157
<i>M. Melikidze, J. Gvelebiani</i> Renewable energy –major aspects of new regulatory framework of the energy sector in Georgia.	160
<i>Yu. Dubiei</i> Technological Transformations In The Electric Power Complex Of Ukraine	164

ელექტრომექანიკური სისტემები

Electromechanical systems

Владимир Клепиков, Андрей Тимошенко

К повышению силы сцепления колес рудничного электровоза средствами электропривода

Аннотация. В статье обоснованы принципы определения факта буксования и юза колес рудничного электровоза (РЭВ) без измерения скорости проскальзывания колеса относительно рельса. Для повышения надежности установления избыточного проскальзывания предложено проводить измерение пульсаций тока электродвигателя с частотой фрикционных автоколебаний (АКФ) и фрикционных колебаний (ФК) от периодического изменения при движении электровоза силы нормального давления на рельсы. Разработана структура датчика, выполнено компьютерное моделирование и показана реализуемость предложенных принципов.

Ключевые слова: буксование, сила сцепления, фрикционные автоколебания.

Vladimir Klepikov, Andrey Timoshchenko

To increase the adhesion of the wheels of an electric mine locomotive by means of an electric drive

Annotation. The article substantiates the principles of determining the fact of slipping and skidding of the wheels of a mine electric locomotive (REV) without measuring the speed of slipping of the wheel relative to the rail. To increase the reliability of establishing excessive slippage, it is proposed to measure the pulsations of the electric motor current with the frequency of frictional self-oscillations (ACF) and frictional oscillations (FC) from periodic changes in the normal pressure force on the rails when the electric locomotive moves. The structure of the sensor has been developed, computer modeling has been performed, and the feasibility of the proposed principles has been shown.

Key words: slipping, adhesion force, frictional self-oscillations.

Введение. Сила тяги и торможения определяется силой сцепления (трения) колес с рельсами. Увеличение силы сцепления обеспечивает повышение производительности откатки в двигательных режимах электропривода и безопасность движения при торможении. В шахтных условиях вследствие загрязненности, пыли и влаги коэффициент сцепления зачастую весьма низок. Сила сцепления $F_{\text{сц}}$ определяется силой нормального давления P_n колеса на рельс и коэффициентом сцепления ψ , который нелинейно зависит от линейной скорости скольжения обода колеса $v_{\text{ск}}$ относительно рельса.

$$F_{\text{сц}} = P_n \psi(v_{\text{ск}}) \quad (1)$$

Для пары «колесо-рельс» виды зависимости $\psi(v_{\text{ск}})$ при различном состоянии поверхности рельсов описаны в [1,2] и графически показаны на рис. 1 и рис.2. Общим для этих зависимостей является то, что при малых скоростях проскальзывания они имеют круто восходящий участок (так называемая, зона упругого скольжения). За участком упругого скольжения после достижения максимального значения коэффициента начинается участок избыточного проскальзывания с возможным различным характером изменения коэффициента сцепления: «падающий» участок, на котором увеличение скорости скольжения сопровождается

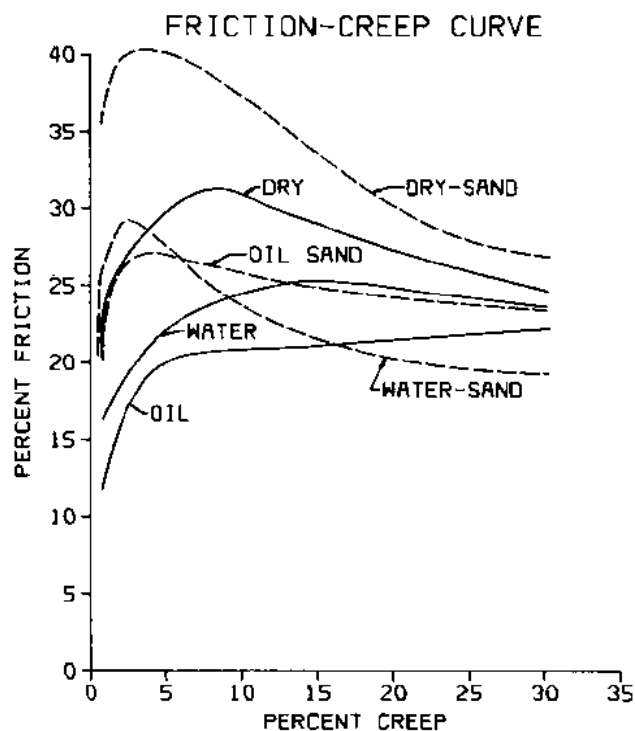


Рис. 1. Характеристики трения колес с рельсами при различных условиях сцепления

снижением коэффициента сцепления; участок слабо возрастающего коэффициента либо участок, на котором коэффициент трения сохраняется относительно низким и практически неизменным. Последний характерен в шахтных условиях эксплуатации из-за наличия на рельсах влаги, угольной пыли или иных загрязнений.

При падающем участке в электроприводе могут возникать нерелаксационные (в отличие от явления stick-slip) фрикционные автоколебания (АКФ) [3]. Определение буксования по наличию в кривой тока с частотой АКФ колесной пары было предложено

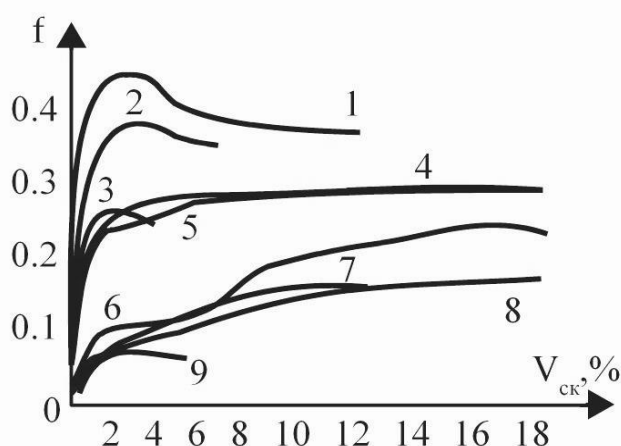


Рис. 2. Характеристики трения колес с рельсами, сухой и чистый контакт (3), тонкий слой угольной или породной пыли (1, 2), породная или угольная пыль толстым слоем (4, 5), обводненный рельс (6), жидкая угольно-породная смесь (7), обводнённая угольно-породная смесь (8), моторное масло (9)

в [4]. Однако при отсутствии падающего участка АКФ не возникают, что снижает надежность данного способа определения избыточного проскальзывания.

Переход рабочей точки в зону избыточного скольжения нежелателен, не только из-за возможного снижения силы сцепления и затрат энергии на истирание обода колеса, но и из-за возможности возникновения АКФ, ставших в свое время причиной выхода из строя на шахтах Донбасса около 150 рудничных электровозов из-за поломок осей колесных пар [3].

Вышеуказанное свидетельствует об актуальности создания автоматической системы регулирования силы сцепления средствами регулируемого электропривода. Создание такой системы требует наличия надежного датчика установления факта избыточного проскальзывания (буксования, юза) с учётом шахтных условий. Для определения буксования, юза колес рельсовых транспортных средств предлагались различные способы: на основе эффекта Доплера [4], применения холостого ролика или измерения скорости колес вагонетки [5], по угловому ускорению колесной пары

[6] и др. Эти и другие известные способы зачастую трудно реализуемы в условиях шахтной эксплуатации рудничного электровоза.

В 1998 г. при проведении экспериментальных исследований в Магдебургском техническом университете им. Отто фон Герике одним из авторов было обнаружено явление усиления колебаний момента электропривода нелинейностью характеристики трения [7,8]. На рис.3 и 4 представлены осциллограммы тока и упругого момента при проскальзывании друг относительно друга двух стальных колес, приводимых в движение частотно регулируемые электроприводами.

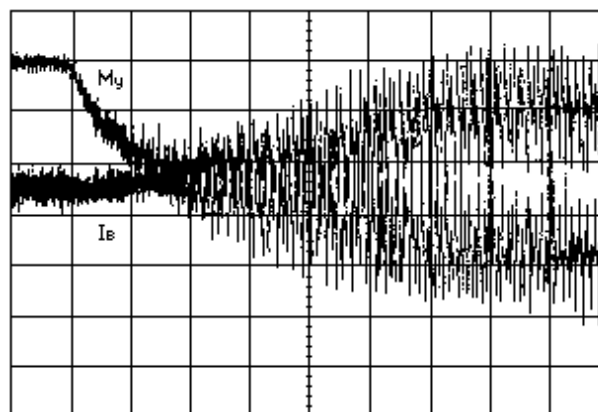


Рис. 3. Осциллограммы при увеличении скорости проскальзывания

Из осциллограммы (рис.3) видно, что при малой скорости проскальзывания в зоне упругого скольжения по мере перехода к зоне избыточного скольжения амплитуда колебаний возрастает, но остается незначительной. Выделение фрагмента этой осциллограммы (рис.4) показало, что в кривой тока помимо АКФ создаются пульсации со значительно меньшей частотой, чем частота АКФ, но в то же время со значительно большей амплитудой. В [7,8] дано объяснение появления низкочастотной составляющей и ее вида как результата колебаний силы нормального давления колес из-за нарушения строгой округлости колеса либо наличия незначительного эксцентриситета. Было показано, что частота низкочастотных колебаний f_n зависит от скорости вращения колеса.

Цель работы. Проанализировать возможность использования вышеуказанного явления для повышения надежности установления факта буксования без измерения механических величин и определить принципы построения датчика распознавания избыточного проскальзывания.

Материалы исследования. Для РЭВ частота низкочастотных пульсаций f_n зависит от скорости вращения колеса f , Гц.

$$f = \frac{v_{\text{л}} + v_{\text{ск}}}{2\pi R_{\text{к}}}, \quad (2)$$

где $v_{\text{л}}$ – линейная скорость движения РЭВ, м/с; $v_{\text{ск}}$ – скорость скольжения колеса относительно рельса, м/с; $R_{\text{к}}$ – радиус колеса, м.

$$f_n = kf, \quad (3)$$

где $k=1,2,\dots$ в зависимости от причины, вызывающей колебания силы нормального давления P_n .

Приведенные на рис.3 и 4 осциллограммы были сняты при наличии в характеристике трения падающего участка. Покажем, что и в случае неизменного значения коэффициента трения в зоне избыточного скольжения низкочастотная составляющая сохранится, причем по мере перехода от участка упругого скольжения к избыточному амплитуда колебаний будет возрастать.

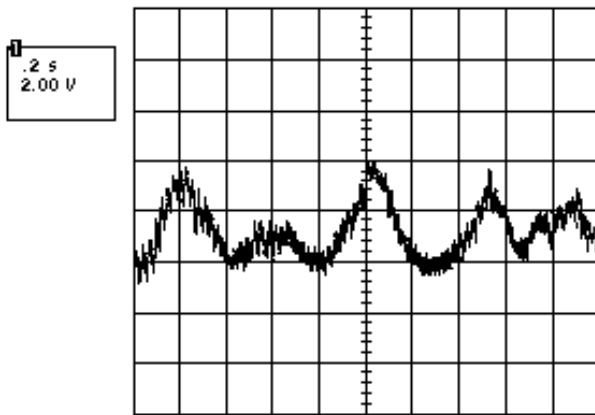


Рис. 4. Увеличенный фрагмент осциллограммы представленной на рис.3

Аппроксимируем механические характеристики трения при разных значениях силы нормального давления линейными участками (рис.5). Так как частота f_n достаточно низкая ($f_n < 10$ Гц) можно считать, что перемещение рабочей точки ЭП происходит по статическим механическим характеристикам электропривода (кривые M_1, M_2, M_3).

Из рис.5 видно, что при изменениях силы нормального давления от P_{min} до P_{max} в зоне упругого скольжения изменение момента электропривода, а следовательно, и тока относительно невелико ΔM_1 и несколько увеличивается ΔM_2 при возрастании $v_{\text{ск}}$.

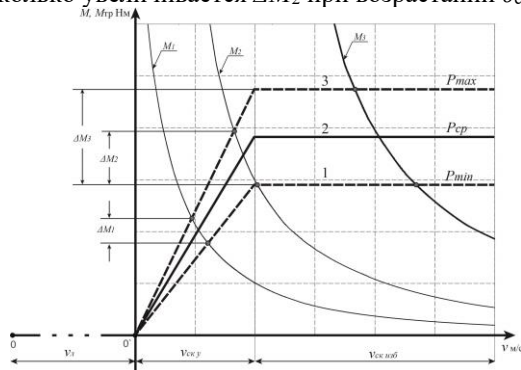


Рис.5. Механические характеристики тягового электродвигателя M_1, M_2, M_3 и характеристики сцепления 1, 2, 3

При полном избыточном скольжении амплитуда ΔM_3 наибольшая. Это позволяет сделать вывод о том, что, дополнив датчик буксования алгоритмом учета характеристик низкочастотной составляющей, можно повысить надежность установления факта избыточного проскальзывания. Ниже, на рис.6, представлена функциональная схема реализации вышеуказанной идеи [9].

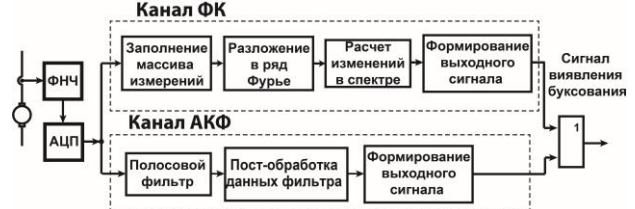


Рис. 6. Функциональная схема системы определения буксования

В канале АКФ определяются пульсации в кривой тока с частотой фрикционных автоколебаний, близкой к собственной частоте упругих колебаний полуоси колесной пары. С этой целью используется полосовой фильтр (ПФ), настроенный на частоту вышеуказанных колебаний, который выделяет сигнал, появляющийся в результате избыточного проскальзывания. Пост-обработка выходного сигнала ПФ, предусматривает вычисление среднеквадратичного значения сигнала за период колебаний. Данное значение сравнивается с пороговой уставкой, что исключает дальнейшее прохождение сигнала от случайных возмущений или самовозбуждения фильтра. В случае превышения уставки формируется сигнал буксования.

Во втором параллельном канале определяется наличие в кривой тока пульсации с частотой фрикционных колебаний (ФК). Для этого используется анализатор спектра, в котором выполняются следующие процедуры: заполнение памяти измерений от аналого-цифрового преобразователя (АЦП); разложение измеренного сигнала на гармонические составляющие по алгоритму быстрого преобразования Фурье; анализ изменений в спектре по сравнению с предыдущей выборкой. Вывод о наличии буксования производится на основании постоянного мониторинга параметров частоты и амплитуды в спектре измеряемого сигнала тока. Изменение в гармоническом составе амплитуды гармоник и сравнение с предыдущим измерением в случае отличия от порогового значения одновременно с изменением частоты свидетельствует о начале или прекращении буксования.

Проверка реализуемости работы датчика была произведена путем компьютерного моделирования. Результаты моделирования представлены на рис.7 и 8.

Временные диаграммы, поясняющие процесс определения буксования по пульсациям тока с частотой АКФ показаны на рис. 7. На верхней

приведен входной частотно модулированный тестовый сигнал с постоянной составляющей, с диапазоном изменения частот от 0.1 до 150 Гц за временной интервал в 40 с., на средней – выходной сигнал полосового фильтра (ПФ), на нижней – выходной сигнал датчика буксования.

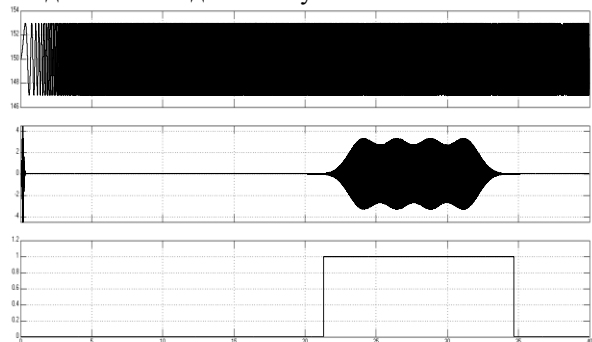


Рис.7. Временные диаграммы канала определения АКФ

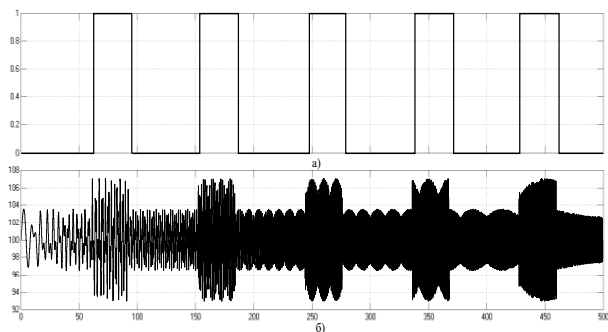


Рис.8. Работа канала ФК, где 8а – сигнал буксования, 8б – входной тестовый сигнал

Работа канала низкочастотных фрикционных колебаний (ФК) проиллюстрирована временными диаграммами рис.8. На рис.8б представлен тестовый частотно модулированный входной сигнал, имитирующий сигнал датчика тока. Данный сигнал содержит постоянную составляющую и низкочастотную с частотой ФК, порожденную изменением силы нормального давления колеса на рельс. Этот сигнал учитывает повышение частоты пульсаций во времени, как это имеет место при повышении скорости скольжения колеса относительно рельса. Сигнал, имитирующий низкочастотные пульсации датчика тока содержит временные интервалы без буксования, что соответствует перемещению рабочей точки по характеристике сцепления в зоне упругого скольжения (0-60 с, 90-150 с и т.д.) и временные интервалы (60-90 с 150-180 с и т.д.), на которых имеет место возрастание амплитуды ФК вследствие перехода в зону избыточного проскальзывания. На рис. 8а показан выходной сигнал буксования канала ФК, используемый при построении систем автоматического регулирования силы сцепления колеса с рельсом.

Вывод. Использование помимо канала пульсаций от АКФ дополнительного канала по

низкочастотной составляющей ФК от колебания силы нормального давления колеса на рельс из-за эксцентриситета либо нарушения округлости колеса повышает надежность определения буксования и юза колес. Компьютерное моделирование подтвердило реализуемость структуры и алгоритмов функционирования датчика при микропроцессорном исполнении управления электроприводом рудничного электровоза.

Литература

1. Magel, Eric E A Survey of Wheel/Rail Friction // United States. Federal Railroad Administration. Office of Research, Development, and Technology, Canada; United States. 2017. 85 p.
2. Костюкевич А.И., Таран И.А, Ковтанец М.В., Ноженко В.С., Экспериментальные исследования характеристик сцепления в контакте «колесо-рельс» при наличии промежуточной среды// «Автомобіле- та тракторобудування». Вісник НТУ «ХПІ». 2011. с.56-62
3. А.А. Ренгевич, П.С. Шахтарь, К.П. Володько и др. Причины поломок осей рудничных электровозов// Вопросы рудничного транспорта: сб. статей. М.: Госгортехиздат, 1962. Вып 6. с. 192-203.
4. Локомотивный скоростемер «БЕКТОР» [Режим доступа] – <http://www.ktrans.kiev.ua/vcc.html>, свободный
5. Шахов В.П. Устройство для обнаружения буксования и юза колес транспортного средства а.с. №422642, (СССР), 1974
6. Патент RU 2446063 С2, Фадеева Г.А., Фадеев Н.А., Матюшков С.Ю., Роговцев Г.В. Способ управления тяговым электроприводом локомотива на приделе по сцеплению, 2010
7. Клепиков В.Б., Палис Ф., Клепиков А.В. О явлении усиления колебаний в электроприводах машин и механизмов с проскальзыванием // Электротехника, №6. 2004. с.7-11.
8. Клепиков В.Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография/ Харьков: Підручник НТУ "ХПІ". 2014. 407 с.
9. Клепиков В.Б. Тимошенко А.В. Деклараційний патент України на корисну модель, Датчик визначення буксування та юзу коліс рудникових електровозів № U201510413 від 26.10.2015.

References (transliterated)

1. Magel, Eric E A Survey of Wheel/Rail Friction // United States. Federal Railroad Administration. Office of Research, Development, and Technology, Canada; United States, 2017 85p
2. Kostyukevich A.I., Taran I.A, Kovtanecz M.V., Nozhenko V.S., E'ksperimental'ny'e issledovaniya kharakteristik szcepleniya v kontakte «koleso-rel's» pri nalichii promezhutochnoj sredy// «Avtomobi`le- ta traktorobuduvannya». Vi'snik NTU «KhPI». 2011r, s.56-62

3. A.A. Rengevich, P.S. Shakhtar', K.P. Volod'ko i dr. Prichiny' polomok osey rudnichny'kh e'lektrovozov// Voprosy' rudnichnogo transporta: sb. statej. – M.: Gosgortekhnizdat, 1962. – Vy'p 6. – S. 192-203.
4. Lokomotivny'j skorostemer «VEKTOR» [Rezhim dostupa] – <http://www.ktrans.kiev.ua/vec.html>, svobodny'j
5. Shakhov V.P. Ustrojstvo dlya obnaruzheniya buksovaniya i yuzu koles transportnogo sredstva a.s. #422642, (SSSR), 1974
6. Patent RU 2446063 C2, Fadeeva G.A., Fadeev N.A., Matyushkov S.Yu., Rogovtzev G.V. Spособ upravleniya tyagovy'm e'lektroprivodom lokomotiva na pridele po ssczeplenyu, 2010
7. Klepikov V.B., Palis F., Klepikov A.V. O yavlenii usileniya kolebanij v e'lektroprivodakh mashin i mekhanizmov s proskal'zyvaniem// E'lektrotehnika, #6, 2004, S.7-11.
8. Klepikov V.B. Dinamika e'lektromekhanicheskikh sistem s nelinejny'm treniem: monografiya/ Khar'kov: Pi'druchnik NTU "KhPI", 2014, 407 s.
9. Klepi'kov V.B. Timoshhenko A.V. Deklaraczi'jniy patent Ukrayini na korisnu model', Datchik viznachennya buksuvannya ta yuzu koli's rudnikovikh elektrovozi'v # U201510413 vi'd 26.10.2015

Сведения об авторах

Клепиков Владимир Борисович, док. техн. наук, проф. зав. каф. «Автоматизированные электромеханические системы» Национального Технического Университета «ХПИ», Харьков, Украина, e-mail: klepikovvladimir390@gmail.com

Тимошенко Андрей Валериевич, ст. преп. кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» Национального Технического Университета «ХПИ», Харьков, Украина, e-mail: andrey.timoschenko@gmail.com

Вера Шамардина, Владимир Пилипенко

К вопросу выбора электропривода грузоподъемного «крана-шара»

Аннотация. Во многих сферах хозяйственной деятельности обеспечение технологических процессов связано с транспортированием грузов, и грузоподъемные краны являются важным звеном, определяющим эффективность производства. Наиболее сложной организационной, финансовой и технической задачей представляется выполнение грузоподъемных операций в местах, недоступных для наземных транспортных средств. В этих случаях особое внимание следует обратить на использование грузоподъемного «крана-шара». Его конструкция имеет грузозахватное устройство, которое системой тросов подвешено к шару, наполненному «легким» газом. Воздушный шар тросами соединен с тремя надежно закрепленными на грунте приводными электродвигателями, которые вращают барабаны с намотанными тросами. В такой электромеханической системе перемещаемый груз имеет пять степеней свободы, перемещение шара и груза в пространстве обеспечивается путем изменения длин тросов, удерживающих шар. «Кран-шар» работает в широком диапазоне изменения нагрузок и возмущающих воздействий. Это обстоятельство обуславливает необходимость применения электроприводов с системами управления, обеспечивающими робастность. Цель работы состоит в синтезе регуляторов, обеспечивающих точное позиционирование грузов в условиях неопределенности нагрузок и возмущающих воздействий в электроприводе постоянного тока. В работе рассмотрено использование двух вариантов синтеза регуляторов. Исследования динамических режимов электропривода, проведенные в ходе структурного моделирования в среде Matlab, показали возможность решения задачи точного позиционирования грузов при использовании предложенных регуляторов, выполнена их сравнительная оценка.

Ключевые слова: грузоподъемный «кран-шар»; позиционирование груза; компьютерное моделирование; системы управления электроприводом «крана-шара».

Vira Shamardina, Vladimir Pilipenko

On the issue of choosing an electric drive for a lifting “crane–balloon”

Summary. In many areas of economic activity, the provision of technological processes is associated with the transportation of goods, and cranes are an important link that determines the efficiency of production. The most difficult organizational, financial and technical task is to perform lifting operations in places inaccessible to ground vehicles. In these cases, special attention should be paid to the use of a lifting “crane–balloon”. Its design has a lifting device, which is suspended by a system of cables from a ball filled with “light” gas. The balloon is connected by ropes to three drive motors securely fixed to the ground, which rotate the drums with wound ropes. In such an electromechanical system, the movable load has five degrees of freedom, the movement of the ball and the load in space is provided by changing the lengths of the cables holding the ball. The “crane–balloon” operates in a wide range of loads and disturbances. This circumstance necessitates the use of electric drives with control systems that ensure robustness. The purpose of the work is to design controllers that provide accurate positioning of loads under conditions of uncertainty in loads and disturbing influences in a DC electric drive. The use of two variants of the synthesis of regulators is considered. Investigations of the dynamic modes of an electric drive, carried out in the course of structural modeling in the Matlab environment, have shown the possibility of solving the problem of accurate positioning of weights using the proposed regulators, and their comparative assessment is carried out.

Keywords: lifting “crane–balloon”; cargo positioning; computer modelling; control systems for the “crane–balloon”; electric drive.

Введение. Подъемно-транспортные операции, выполняемые грузоподъемными кранами, занимают значительное место в различных отраслях хозяйственной деятельности, особенно в работах, связанных с сооружением новых объектов. Наибольшую сложность представляет выполнение грузоподъемных операций в местах, недоступных для наземных транспортных средств. В этой ситуации решением задачи может стать использование подъемного «крана-шара» (рис.1) [1,2]. Зарубежными компаниями производятся

«кран-шары», которые могут обеспечить подъем грузов (от 250 кг до 60000 кг и более) на значительную высоту, а также их транспортировку на заявленные заказчиком расстояния [1,2].

Конструктивно «кран-шар» представляет собой наполненный «легким» инертным газом воздушный шар, помещенный в сетку из тросов, которая соединяется с тремя барабанами. Барабаны, с намотанными на них тросами, вместе с приводными электродвигателями надежно закрепляются на грунте. Позиционирование шара и

груза в пространстве обеспечивается путем изменения длин тросов, удерживающих шар. Перемещаемый жестко подвешенный к шару груз имеет пять степеней свободы. В такой системе обеспечение точного позиционирования груза в пространстве представляется сложной задачей [3].



Рис. 1. Грузоподъемный «кран-шар»

Кроме того, кран работает в широком диапазоне нагрузок и возмущающих воздействий, закон изменения которых не предсказуем. Системы электроприводов, синтезированные по критериям модульного и симметричного оптимума, чувствительны к таким изменениям и могут при определенных условиях потерять оптимальность и работоспособность. Вследствие этого возникает необходимость применения на «кран-шарах» электроприводов с системами управления, обеспечивающими робастность [4].

Цель работы состоит в синтезе регуляторов, обеспечивающих точное позиционирование грузов в условиях неопределенности нагрузок и возмущающих воздействий в электроприводе постоянного тока, установленного на грузоподъемном «кран-шаре».

Изложение основного материала.

Представленная работа является продолжением ранее выполненных авторами исследований электропривода постоянного тока для грузоподъемного «кран-шара» [3]. В работе использована ранее разработанная модель электропривода в среде MATLAB. Она содержит вычислительный блок определения по заданным координатам шара (x , y , z) допустимых длин тросов и, наоборот, позволяет определить по длинам тросов координаты шара; блок контроля сигналов задания координат, который не позволяет задавать недопустимые координаты шара; содержит блоки моделей электроприводов барабанов, а также модель линеаризованной механической части системы «кран-шара». В ходе исследований модель [3] была дополнена моделями для двух других вариантов систем управления электроприводами барабанов.

В [3] позиционирование груза обеспечивается электроприводами барабанов с системой подчиненного регулирования (СПР), имеющей три регулятора: в контурах регулирования

электромагнитного момента, частоты вращения двигателя и положения груза.

Представляет интерес решение задачи позиционирования груза с помощью только одного регулятора. Имитационная модель электропривода «кран-шара», параметры которой приведены в [3], была дополнена и в результате рассмотрены два варианта использования только одного регулятора.

В первом случае предложено использовать робастный регулятор, синтезированный на основе H_∞ -нормы в соответствии с методикой, изложенной в [4,5], на основе структурной схемы обобщенного объекта (рис.2).

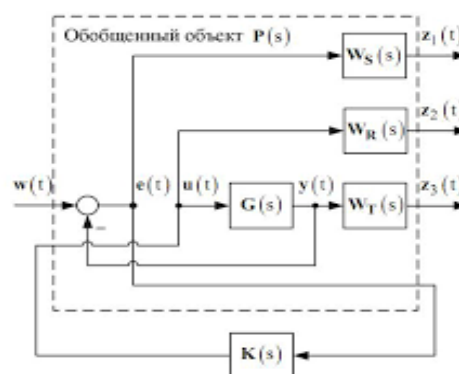


Рис. 2. Структурная схема обобщенного объекта

Здесь G – объект, K – регулятор, r – задание, w – возмущение, v – помеха измерения, e – ошибка регулирования, u – управляющее воздействие, W_1 , W_2 , W_3 – весовые функции, зависящие от частоты.

Синтез робастного регулятора выполнен с использованием приложения Robust Control Toolbox, которое позволяет создавать модели систем, параметры которых точно неизвестны или могут изменяться в большом диапазоне. В качестве исходных при моделировании были приняты параметры объекта из [3], его матрицы:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{R_A}{T_M \cdot c\Phi} & 0 \\ -\frac{c\Phi}{R_A \cdot T_E} & -\frac{1}{T_E} & \frac{1}{R_A \cdot T_E} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{IM}} \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_{IM}}{T_{IM}} \end{bmatrix}; \quad C = [1 \ 0 \ 0]; \quad D = 0,$$

где R_A – сопротивление цепи якоря двигателя; $c\Phi$ – постоянная двигателя; T_M – электромеханическая постоянная времени; T_E – электро-

მაგნიტაა პოსტაანა ვრემენი; K_{IM} , T_{IM} – კოეფიციენტი პერეაჩი და პოსტაანა ვრემენი ისპოლნიტელნო მექანიზმა.

По представленным Robust Control Toolbox алгоритмам получен регулятор 5-го порядка:

$$W_{RR} = \frac{27.18s^4 + 3.286 \cdot 10^5 s^3 + 5.686 \cdot 10^8 s^2 + 4.839 \cdot 10^9 s + 7.628 \cdot 10^9}{s^5 + 2.639 \cdot 10^6 s^4 + 9.486 \cdot 10^7 s^3 + 1.65 \cdot 10^9 s^2 + 8.161 \cdot 10^8 s + 1.442 \cdot 10^8}.$$

Результаты работы электропривода с таким регулятором показаны на рис.3 и рис. 4. Представлены результаты моделирования при условии, что груз необходимо переместить в пространстве из положения с координатами (1; 0,3; 1) в положение с координатами (5; 3; 2).

Анализ рис. 3 и рис. 4 показывает, что при наличии робастного регулятора точность позиционирования грузозахватного устройства не зависит от наличия груза. Процессы позиционирования с грузом и без него практически совпадают.

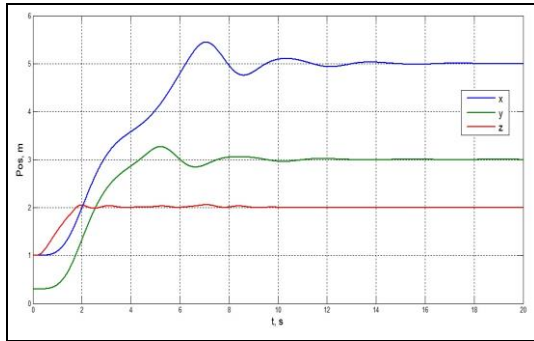


Рис. 3. Позиционирование грузозахватного устройства с номинальным грузом

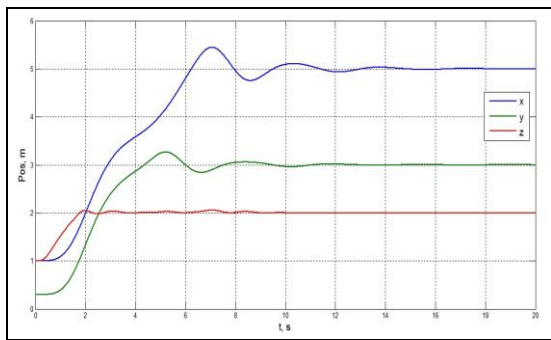


Рис. 4. Позиционирование пустого грузозахватного устройства (без груза)

В качестве второго варианта предложено использовать ПИ-регулятор с передаточной функцией:

$$W_R(s) = K_1 + \frac{K_0}{s} = \frac{K_1 \cdot s + K_0}{s}, \quad (2)$$

где K_0 , K_1 – соответственно коэффициенты передачи интегрирующей и пропорциональной составляющей регулятора.

Передаточная функция разомкнутой системы:

$$W_p(s) = \frac{K_\omega \cdot K_{IM} \cdot K_{OC} \cdot (K_1 \cdot s + K_0)}{s \cdot (T_E \cdot T_M \cdot s^2 + T_M \cdot s + 1) \cdot (T_\mu \cdot s + 1)} = \frac{K_\omega \cdot K_{IM} \cdot K_{OC} \cdot (K_1 \cdot s + K_0)}{T_\mu T_E T_M \cdot s^4 + (T_\mu T_M + T_E T_M) \cdot s^3 + (T_\mu + T_M) \cdot s^2 + s}, \quad (3)$$

где T_μ – постоянная времени широтно- импульсного преобразователя, питающего электродвигателя

K_{OC} – коэффициент передачи цепи обратной связи по положению груза; $K_\omega = 1/c\Phi$ – коэффициент передачи двигателя.

Характеристический полином замкнутой системы при условии, что

$$T_\mu \cdot T_E \cdot T_M \ll 0,$$

можно упрощенно принять в виде:

$$D(s) = T_E \cdot T_M \cdot s^4 + (T_\mu + T_M) \cdot s^2 + (1 + K_1 K_\omega K_{IM} K_{OC}) \cdot s + K_0 \cdot K_\omega \cdot K_{IM} \cdot K_{OC}. \quad (4)$$

Коэффициенты передачи ПИ-регулятора определим из условий устойчивости замкнутой системы. Воспользовавшись критерием Гурвица получим условия устойчивости:

$$\begin{aligned} T_\mu + T_M &> 0; \\ (T_\mu + T_M) \cdot (1 + K_1 K_\omega K_{IM} K_{OC}) - K_0 \cdot K_\omega \cdot K_{IM} \cdot K_{OC} \cdot T_E \cdot T_M &> 0; \\ K_0 \cdot K_\omega \cdot K_{IM} \cdot K_{OC} \cdot ((T_\mu + T_M) \cdot (1 + K_1 K_\omega K_{IM} K_{OC}) - K_0 \cdot K_\omega \cdot K_{IM} \cdot K_{OC} \cdot T_E \cdot T_M) &> 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Откуда получим:

$$\frac{(T_\mu + T_M) \cdot (1 + K_1 \cdot K_\omega \cdot K_{IM} \cdot K_{OC})}{K_\omega \cdot K_{IM} \cdot K_{OC} \cdot T_E \cdot T_M} > K_0 \quad (6)$$

После подстановки численных значений параметров системы получим:

$$\frac{(0.0001 + 0.1554)(1 + K_1 \cdot 1.965 \cdot 1 \cdot 0.51)}{1.965 \cdot 1 \cdot 0.51 \cdot 0.00048 \cdot 0.1554} > K_0. \quad (7)$$

Из (7) получим уравнение линии D-разбиения по двум параметрам ПИ-регулятора:

$$1060.9 + 2084.7 \cdot K_1 = K_0. \quad (8)$$

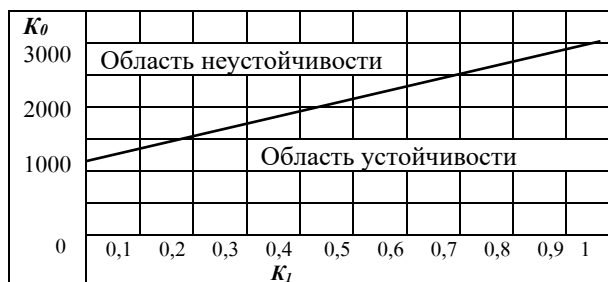


Рис. 5. D-разбиение в области параметров K_0, K_I

Выбираем $K_0=20, K_I=1,0$. Тогда ПИ-регулятор будет иметь передаточную функцию:

$$W_R(s) = \frac{s+20}{s}. \quad (9)$$

Моделирование процессов позиционирования проведено при условии, что в принятой в качестве базовой модели [3] регулирование координат осуществляется ПИ-регулятором. Полученные графики переходных процессов показали, что позиционирование грузозахватного устройства с грузом и без него практически совпадает с результатами, приведенными на рис.3 и рис.4 для случая использования робастного регулятора.

Обсуждение результатов. Сравнительная оценка результатов моделирования с различными вариантами регуляторов может быть выполнена по таблице.

Из таблицы видно, что электропривод подъемного «крана-шара» при использовании трех вариантов регуляторов обеспечивает выполнение задачи точного позиционирования груза и устранения его колебаний, которые носят непродолжительный характер. Однако предпочтение следует отдать применению ПИ-регулятора, как наиболее простого, не требующего реализации сложной структурной схемы.

Таблица

Параметр	СПР	Робастный регулятор	ПИ-регулятор
Позиционирование	+	+	+
Демпфирование колебаний груза, с.	10	10	10
Перерегулирование, %	7,5	9	7,9
Контур тока (момента)	+	-	-
Время моделирования, мин.	40	120	25

Выводы. Проверена возможность использования только одного регулятора в системе управления электроприводом постоянного тока подъемного «крана-шара» для обеспечения позиционирования груза. Сравнительный анализ вариантов выявил преимущества ПИ-регулятора по сравнению с робастным регулятором, синтезированным на основе H_∞ -нормы, и многоконтурной системой подчиненного регулирования.

Литература

- Официальный сайт CL CargoLifter GmbH & Co. KGaA [Электронный ресурс] / фирма CL CargoLifter GmbH & Co. KGaA. Берлин 2019. Режим доступа: <https://www.cargolifter.com/company/about-us>.
- Carl-Heinrich Erstes voll funktionsfähiges CargoLifter Ballonkransystem ab September 2010/ Carl-Heinrich, Gablenz von Kesse, Christoph von Kessel // LifterNews, August. 2010. Dresden. S.8 – 11. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dnb.info/1011256479/34>.
- Шамардина, В. Н. Моделирование процесса позиционирования подъемного «крана-шара» / В. Н. Шамардина, В. В. Пилипенко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2019. № 20 (1345). с.161-166.
- Полилов Е.В. μ -Анализ и синтез робастной системы управления электропривода постоянного тока / Полилов Е.В., Зеленев А.Б., Руднев Е.С. // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. Кременчук: КДПУ. 2009. 3(56). Ч. 2. с.25-30.
- Пакеты расширения MATLAB. Control System Toolbox и Robust Control Toolbox / В.М. Перельмутер. М.: Солон-пресс. 2008. 224 с.

References (transliterated)

- Ofizialny site CL CargoLifter GmbH & Co. KGaA [Электронный ресурс]/фирма CL CargoLifter GmbH & Co. KGaA. Berlin, 2019. Regim dostupa: <https://www.cargolifter.com/company/about-us>.
- Carl-Heinrich Erstes voll funktionsfähiges CargoLifter Ballonkransystem ab September 2010/ Carl-Heinrich, Gablenz von Kesse, Christoph von Kessel// LifterNews, August. 2010. Dresden. S.8–11. [Electrony resurs]. Regim dostupa: <https://d-nb.info/1011256479/34>
- Shamardina, V., Pilipenko, V. Modeling the positioning process of lifting “crane-balloon”. Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Electric machines and electromechanical energy conversion. Kharkiv: NTU “KhPI”. 2019. 20(1345). 161-166. doi:10.20998/2409-9295.2019.20.23.

4. Polylov E.V. μ -Analiz i sintez robustnoj sistemy upravlenija elektroprivoda postoyannogo tok / Polilov E.V., Zelenov A.B., Rudnev E.S. // Visnyk KDPU imeni Myxajla Ostrograds'kogo. Kremenchuk: KDPU, 2009.3 (56) chastyna 2. S.25-30.
5. Pakety rasshireniya MATLAB. Control System Toolbox i Robust Control Toolbox / V.M. Perel'muter. M.: Solon-press. 2008. 224 s.

Сведения об авторах

Шамардина Вера Николаевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры «Автоматизированные электромеханические системы»; г. Харьков, Украина; ORCID: 0000- 0002-9274-6517; e-mail: verascha@i.ua.

Пилипенко Владимир Владимирович – студент, Магдебургский Отто фон Герики университет, г. Магдебург, Германия; e-mail: pilipenko1993@gmail.com.

Валерий Бородай, Ольга Нестерова

Система энергоэффективного управления асинхронным приводом механизмов длительного режима работы

Аннотация. Предложен оригинальный способ определения нелинейной переходной функции регулятора энергосберегающего управления асинхронным приводом, который обеспечивает допустимую динамику переходных режимов механизмов длительного режима работы с мало-изменяемым графиком нагрузки и косвенной стабилизацией скорости. Обоснован выбор интервала рационального значения скольжения и последовательности включения схемы управления в зависимости от текущего режима работы системы электропривода.

Показано применение преобразователей переменного напряжения с высоким коэффициентом мощности в системах энергоэффективного управления асинхронным приводом, предложен алгоритм определения параметров RC фильтрующей цепи для обеспечения наилучших условий коммутации силовых ключей преобразователя и осуществления локальной компенсации реактивной мощности двигателя.

Ключевые слова: длительный режим работы, мало-изменяющийся график нагрузки, энергоэффективное управление приводом, схема преобразователя сетевого напряжения, повышенный коэффициент мощности.

Valeryi Borodai, Olha Nesterova

Energy-efficient control system of the asynchronous drive of mechanisms of long-time operation

Summary. The original method is proposed for determining the nonlinear transient function of the energy-saving control regulator of an asynchronous drive, which provides the permissible dynamics of the transient modes of the mechanisms of long-term operation with a slightly variable load curve and indirect speed stabilization. The choice of the interval of the rational slip value and the sequence of switching on the control circuit depending on the current operating mode of the electric drive system is substantiated.

The application of AC voltage converters with a high power factor in energy-efficient control systems of an asynchronous drive is shown, an algorithm for determining the parameters of the RC filtering circuit is proposed to ensure the best conditions for switching the power switches of the converter and local compensation of the reactive power of the motor.

Keywords: continuous operation mode, low-variation load curve, energy-efficient drive control, mains voltage converter circuit, increased power factor.

Мировая энергетическая стратегия последних лет сосредотачивалась на внедрении технологий энергосбережения, в том числе и в электромеханике. Учитывая это, разработчиками электрического привода применяются различные способы реализации таких устремлений. К ним следует отнести:

- использование методов поддержания экономичной работы механизмов длительного режима работы путем стабилизации среднего коэффициента загрузки двигателя на уровне не менее 0,6 относительных единиц;
- привлечение двигателей с повышенным содержанием активных материалов, что позволит повысить их КПД не менее чем на 3-5 %;
- снижение сетевых потерь благодаря централизованным фильтро-компенсирующим устройствам;
- изменение схемы включения двигателя с

треугольника на звезду на период режимов холостого хода или незначительной загрузки;

- способы регулирования электропривода с помощью силовых преобразователей, причем для механизмов длительного режима работы частотное управление является достаточно дорогим, потому логичным является внедрение вместо него тиристорных регуляторов напряжения, как приемлемой альтернативы;

- использование комбинированных способов повышения энергоэффективности, например, реализация системы, где частотное управление привода вентилятора дополняется подбором двигателя со сниженным значением активно-реактивного сопротивления ротора;

- применение индивидуальных фильтро-компенсирующих устройств локального типа, что позволит разгрузить сеть и частично экономить мощность питания в двигателе;

- разработка современных алгоритмов управления частотных электроприводов ведущих мировых производителей, что решает проблему энергосбережения, но не снимает вопрос значительных начальных затрат на управляющее оборудование;

- привлечение систем преобразования с повышенным КПД, которые базируются на принципах широтно-импульсной модуляции управляющего сигнала.

Таким образом, существующие возможности повышения энергоэффективности асинхронного привода приводят к выводу - достижение максимального эффекта энергосбережения возможно в случае решения поставленной задачи комплексно. То есть, необходимо рассматривать систему на участках энергетического канала, силового преобразователя, двигателя и рабочей машины. Кроме того, реализация более действенной и доступной системы управления такой электромеханической системой возможна в случае привлечения регуляторов напряжения со схемой управления, которая базируется на принципе широтно-импульсной модуляции и разрешения вопросов локальной компенсации реактивной мощности и гарантированной коммутации управляющих ключей.

Алгоритм синтеза энергоэффективного регулятора. Итак, идея работы в части регулирования состоит в управлении напряжением двигателя в зависимости от изменения нагрузки по одному из известных законов - минимального тока статора или минимальной мощности питания. С целью реализации этого использована модель АД в осях α - β , которая дополнена преобразователем и регулятором напряжения, где переходная функция последнего определялась по алгоритму. Для нескольких фиксированных значений нагрузки асинхронного двигателя 4A132M8Y3 в установившемся режиме определяют его рациональную мощность путем регулирования напряжения задания по входу преобразователя. Для описанных условий получено ряд механических характеристик рис.1, (1, 2).

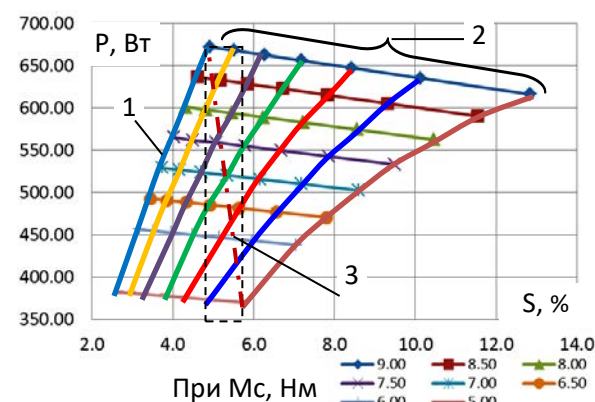
При анализе форм промежуточных зависимостей мощности от напряжения и нагрузки не выявлено экстремумов функции. Поэтому подход к дальнейшему решению задачи поиска рационального питания выполнен путем выбора минимальной мощности из диапазона

скольжений, лимитированных пределами 5,0...5,9 % (рис.1, зона 3). Предложенный диапазон скольжений выбран из соображений реализации автоматической системой привода номинального режима работы двигателя при нагрузке близкой к номинальной и гарантии получения минимально-возможной мощности питания при условии наличия наименьшей нагрузки.

В результате цикла предварительных опытов получен ряд рациональных напряжений задания зависящих от нагрузки, которые составляют в виде сводной таблицы. Следующий шаг синтеза переходной функции регулятора напряжения - построение на основе данных сводной таблицы линии тренда. На её базе получена математическая зависимость по одному из известных законов аппроксимации. Из всех доступных методов наиболее удачным стал полиномиальный

$$U_z = 0,028M_c + 0,0868M_c + 5,8852, \quad (1)$$

где U_z - напряжение задания, В; M_c - момент сопротивления, Нм; $R_2=0,9673$ - максимальный коэффициент детерминации.



P - механическая мощность; s - скольжение;

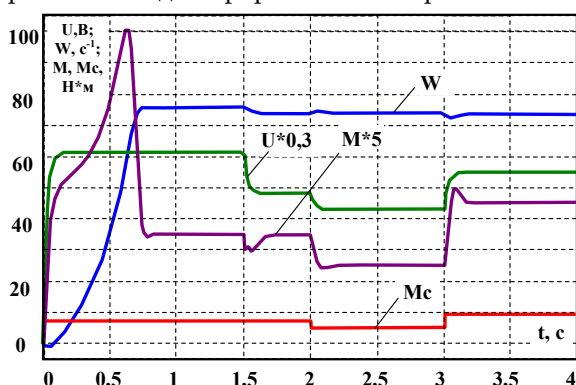
1 - естественная и 2 - искусственные механические характеристики; 3 - зона желаемых скольжений

Рис.1. К иллюстрации определения скольжения

Испытания, проведенные на Matlab модели с регулятором по функции (1) показали, что при запуске двигатель наиболее рационально работает от задатчика интенсивности, что фактически реализует функцию устройства плавного пуска, а после достижения установившегося режима предлагается включать разработанный регулятор, где в качестве обратной связи заведено текущее значение нагрузки. Позитивную роль для снижения динамики при изменении напряжения вносит этот же задатчик интенсивности (рис.2, а),

который в режиме регулирования рекомендуется присоединять последовательно с регулятором.

При опытной проверке системы с двигателем 4A132M8Y3 установлено, что форма изменения напряжения на выходе преобразователя носит экспоненциальный характер (рис.2, а). Практически неизменная величина скорости свидетельствует, что при регулировании напряжения скольжение остается в диапазоне, который был задекларирован выше. Броски всех



W – скорость вращения двигателя;
 U – напряжение на выходе преобразователя;
 M, Mc – электромагнитный и нагрузочный момент двигателя

а

Рис. 2. Графики исследования системы управления:
а) – переходных процессов; б) – мощность питания

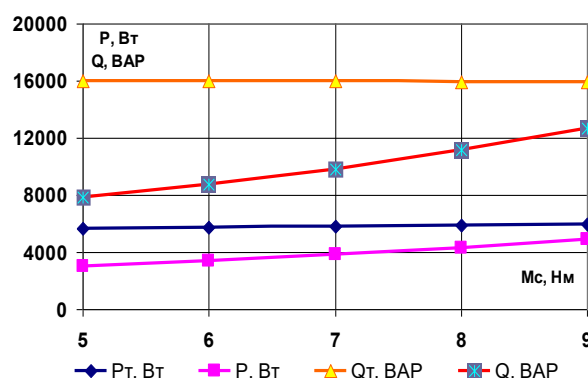
преобразователь, который характеризуется малым коэффициентом мощности. Поэтому следующий этап – усовершенствование системы преобразования.

Определение цепи компенсации нагрузки
Отталкиваясь от последнего вывода, следует констатировать, что тиристорные преобразователи с фазным методом управления характеризуются неудовлетворительной энергетикой. По этому, для реализации более действенной и доступной системы управления электромеханических систем с длительным режимом работы, следует привлекать регуляторы напряжения с принципом широтно-импульсной модуляции при одновременном учете вопросов локальной компенсации реактивной мощности и решения проблемы гарантированной коммутации управляющих ключей.

Пользуясь средствами схемотехнического проектирования, была разработана модель ШИМ преобразователя. Его испытание на активную нагрузку дали достаточно хорошие результаты.

физических величин имеют практически удовлетворительный уровень. Анализ уменьшения напряжения при падении нагрузки позволил уменьшить активную мощность питания до 47 %, а реактивную – до 51 % (рис.2, б).

Результаты данного этапа исследований демонстрирует экономичную работу двигателя. При этом в комплексе применяется тиристорный



активная и реактивная составляющая

P_t, Q_t – традиционного питания;

P, Q – управляемого питания

б

Регулирование напряжения удалось осуществить плавно и в широком диапазоне. В случае работы преобразователя на активно-реактивную нагрузку, где в качестве потребителя выбрана схема замещения (рис. 3) асинхронного двигателя 4A100L4Y3 мощности 4 кВт, скорости вращения 1000 об/мин и номинального напряжения питания 220 вольт, была выявлена полная его неработоспособность. Это фиксировалось в виде значительных бросков напряжения при каждом переключении силовых ключей. При этом эксперимент осуществлялся для установившегося режима и номинального скольжения $s=0,05$, где сопротивление ротора рассчитывалось по уравнению $r_2' \times (1-s)/s=26$ Ом. Понятно, что аварийная работа преобразователя связана с возникновением выбросов энергии, которая накапливается на индуктивностях электрической машины.

Компенсировать последствия такого состояния работы преобразователя предлагается благодаря RC цепи, которая присоединяется

параллельно к клеммам питания схемы замещения. Определять параметры участка компенсации предлагается согласно следующей последовательности:



Рис. 3. Схема замещения АД 4A100L4Y3 установившегося режима.

- сворачивание сопротивления схемы замещения к комплексному виду

$$Z_L = 20.826 + 12.047j, \text{ Ом}, \quad (2)$$

где $j = \sqrt{-1}$;

- приравнивание $x_L = x_C$ и определение с этого уравнения ёмкости, где активное

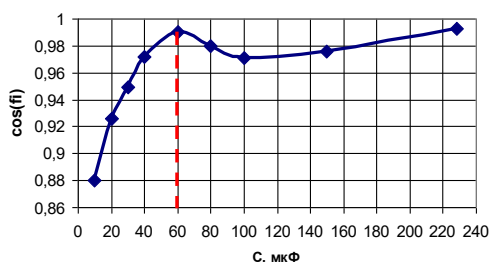


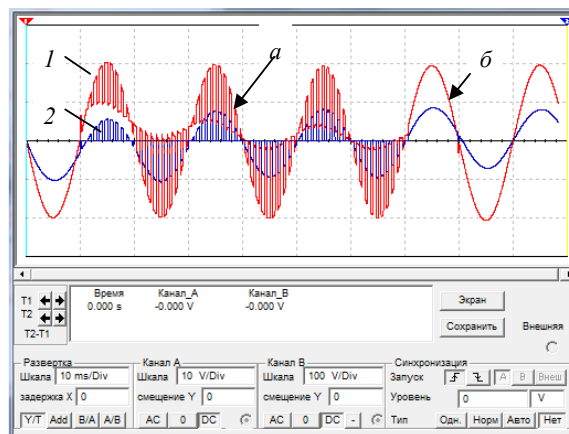
Рис. 4. Экспериментальная зависимость определения рациональной ёмкости

сопротивление остается равным 20,826 Ом. При таком расчете емкость компенсации составляет 228,5 мкФ на фазу двигателя.

- расчетная ёмкость обеспечивает коэффициент мощности равный приближённо 1, что при изменении нагрузки может привести к перекомпенсации системы. Поэтому на этом этапе строится зависимость коэффициента мощности от величины компенсирующего конденсатора, ёмкость которого уменьшают от расчетной до уровня минимально приемлемой, где $\cos(\varphi) = 0.88$;

- далее из графика зависимости выбирается минимальная ёмкость конденсатора, которая соответствует рациональному $\cos(\varphi)$.

По предложенному алгоритму и модели преобразователя получена зависимость рис.4, из которой рациональная ёмкость определена такой, что равна 60 мкФ.



1 – напряжение, масштаб 100 В/деление;

2 – ток, масштаб 10 А/деление;

Режимы а – регулирования; б – номинальный

Рис.5. Результаты моделирования плавного регулирования

Схемное решение плавного управления
Проработка вопроса точной настройки регулирования энергоэффективности асинхронного электропривода показала, что плавное управление имеет преимущество перед возможным ступенчатым управлением, хотя в этом случае следует согласиться на относительную сложность, меньшую надежность, а самое главное - увеличенную начальную стоимость преобразователя. Поэтому для производителей, которые согласны идти на такие условия, может быть предложена система с координатно-фазовым регулированием скважности [1] и дополнительным индивидуальным фильтро-компенсирующим устройством, которое получено в этой публикации. Схемное решение, которое реализует такую

систему, приведено на рис.6, а его завершенность будет при наличии в системе нелинейного регулятора коррекции эффективности [2] в зависимости от нагрузки.

Результатирующие зависимости рис. 5 дают основания утверждать: система плавного управления работает стойко и без проблем коммутации при непрерывной компенсации реактивной мощности. При этом коэффициент мощности выдерживается на уровне не хуже 0,987.

Выводы:

Способ синтеза регулятора эффективного управления предполагает:

- поиск минимальной мощности питания для ряда фиксированных нагрузок установившегося режима путем подбора напряжений задания на

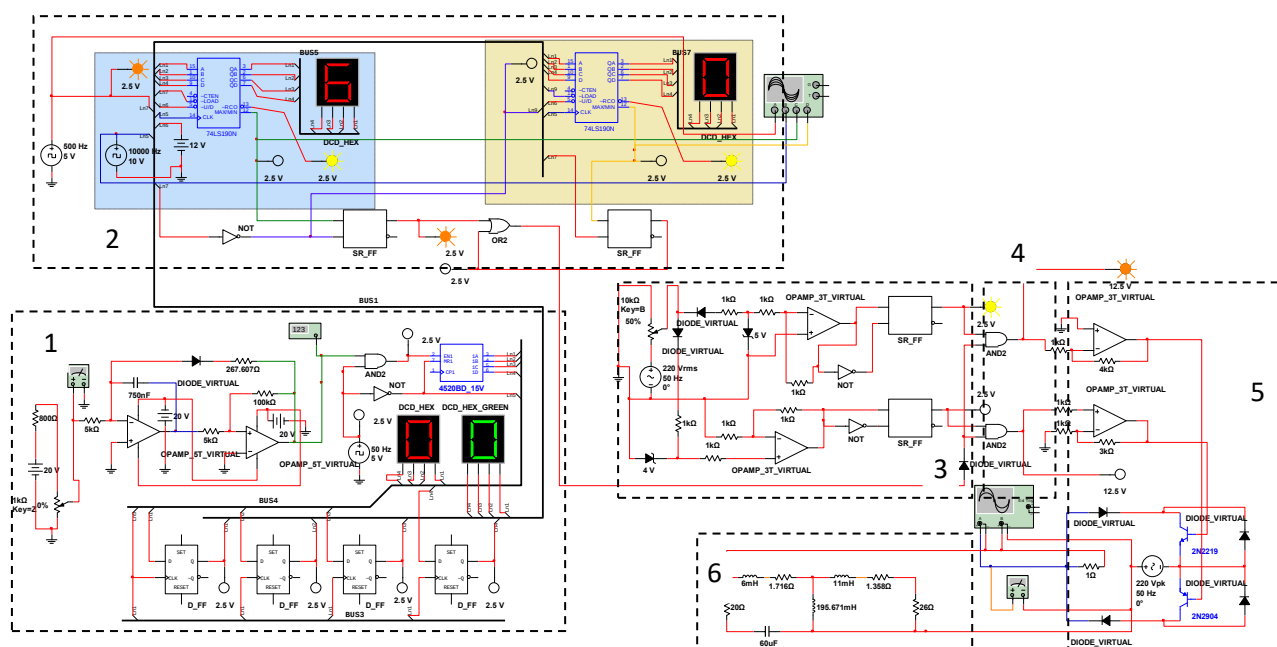
входе преобразователя;

- ввиду монотонного характера изменения зависимостей предварительного этапа исследований поиск рациональной мощности питания привода следует ограничить диапазоном скольжений, при которых обеспечивается номинальный режим работы системы и нагрузке на ней близкой к номинальной, с одной стороны, и достижения минимально-возможной мощности при условии поддержания наименьшей нагрузки, с другой стороны;

- с полученных сводных данных наименьшей мощности для разных нагрузок и при условии выбранного скольжения строится линия тренда, уравнение которой характеризуется наибольшим коэффициентом детерминации.

Испытаниями установлено, что наиболее рациональным методом запуска системы есть метод плавного пуска, а включение регулятора рекомендуется осуществлять в установившемся режиме с последовательно включенным задатчиком интенсивности, который обеспечит необходимое снижение динамики.

Обстоятельства настоящего времени требуют максимальной эффективности АД привода, которая может быть достигнута при создании условий мгновенной подачи в двигатель такого количества энергии, которая не превышает необходимой для преодоления текущей нагрузки, использования двигателя с повышенным КПД, компенсации реактивной мощности индивидуальными фильтро-компенсирующими устройствами и применения



1 – АЦП; 2 – фазовые таймеры; 3 – сетевая синхронизация; 4 – модуляторы; 5 – силовой блок; 6 - нагрузка

Рис. 6. Модель преобразователя с плавным регулированием

преобразователей с повышенным коэффициентом мощности.

Определение параметров цепи компенсации следует выполнять в последовательности:

- сворачивание сопротивления схемы замещения двигателя;
- определение ёмкости конденсатора с реактивной составляющей свернутого сопротивления схемы замещения, а активную составляющую при этом оставляют неизменной;
- построение зависимости коэффициента мощности системы от ёмкости конденсатора по данным эксперимента, где варьирование последней осуществляется в пределах от расчетной до

минимально приемлемой при $\cos(\varphi) = 0,88$;

- определение из графика зависимости рациональной ёмкости RC цепи, которая соответствует выбранному $\cos(\varphi)$.

Экспериментальным способом доказана стойкость системы управления при лучших условиях коммутации силовых ключей и получения коэффициента мощности уровня не хуже 0,987.

Литература

1. Бородай В.А. Широтно-импульсный регулятор с координатно-фазовым управлением скважности /В.А. Бородай, А.Р. Ковалев // Гірна.

Електромеханіка та автоматика: Наук. техн. зб.
2015. Вип. 95. с. 54–58.

2. Бородай В.А. Спосіб синтезу регулятора енергоефективного управління асинхронним приводом механізмів без прямої стабілізації

швидкості / В.А. Бородай, Р.О. Боровик, О.Ю. Нестерова // Електротехніка та електроенергетика Запоріжжя: 2019. №3. с.16-23. DOI 10.15588/1607-6761-2019-3-2.

Сведения об авторах

Бородай Валерий Анатольевич - к.т.н., доцент кафедры электропривода, Тел.: +38-067-100-28-47, Email: boroday_va2@ukr.net, 49600, Украина, г. Днепр, просп. Д. Яворницкого, 19, Национальный технический университет "Днепропетровская политехника"

Нестерова Ольга Юрьевна - канд. педагог. наук, доцент кафедры перевода Тел.: +38-096-541-77-05, Email: olnesterova@yahoo.com, 49600, Украина, г. Днепр, просп. Д. Яворницкого, 19, Национальный технический университет "Днепропетровская политехника"

Владимир Котляров, Сергей Буряковский

Автоматизация концептуального проектирования исследовательских стендов электропривода

Аннотация. Рассмотрены проблемы обеспечения качества и снижения трудоемкости концептуального проектирования. Указаны особенности создания исследовательских стендов, влияющие на эффективность процесса их проектирования. На основе анализа проектов электроприводов предложена методика автоматизации проектирования стендов, использующая средства искусственного интеллекта, язык проектирования SysML и информационную модель проекта в виде семантических сетей в среде пакета программ CoGui. Методика направлена на обеспечение полноты технического описания стендов, необходимого для повышения уровня достоверности научных результатов.

Ключевые слова: проектирование, электропривод, САПР, искусственный интеллект, семантические сети

Vladimir Kotlyarov, Serhii Buriakovskiy

Automation of conceptual design of test benches for electric drives research

Annotation. The problems of quality assurance and reducing the complexity of conceptual design are considered. The features of test benches development that affect the efficiency of the design process are indicated. On the basis of the analysis of the projects of electric drives, a technique for the automation of the design of test benches is proposed. This technique uses artificial intelligence, the SysML language and the project information model in the form of semantic networks, created in the environment of the CoGui software package.

Keywords: design methodology, electric drive, CAD, artificial intelligence, semantic networks

Введение. Проектирование – это многоуровневый процесс, на каждом этапе которого стенд электропривода (ЭП) получает свои описания на определенном языке проектирования. В ходе разработки стенда эти описания трансформируются одно в другое, и проект развивается от выбора его целей до указания конкретных технических решений и их последующей детализации.

Стенды разных типов имеют существенные отличия в целях их создания, а значит, в исходных требованиях и в вариантах их реализации. Стенды для проведения научных исследований зачастую отличаются еще и спецификой организации их проектирования в небольших научных коллективах, для которых это трудоемкий, но вспомогательный вид деятельности. Другой особенностью проектирования таких стендов является необходимость подтверждения высокой степени достоверности научных результатов. Прослеживание взаимосвязей целей создания стенда с требованиями к нему, характеристиками и их технической реализацией, ясное и полное отражение этих связей в проектной и научной документации становятся важнейшими постоянно выполняемыми процедурами.

Особую сложность представляет концептуальное проектирование стендов, выполняемое на стадиях технического задания (ТЗ) и технического предложения. Среди его задач - выбор и анализ целей и показателей качества; оценивание технического уровня проектных решений; декомпозиция и верификация требований; составление и анализ ТЗ; поиск и выбор технических решений. Высокий уровень сложности этих задач определяется одновременным учетом всех аспектов создания стенда -

функционального, конструкторского, технологического и эксплуатационного, значительной долей процедур, которые трудно поддаются формализации, а потому и не имеют простых алгоритмических решений.

Все это с одной стороны создает острую потребность в автоматизации концептуального проектирования, а с другой стороны такую автоматизацию затрудняет и неизбежно требует применения средств искусственного интеллекта (ИИ). Использование ИИ, в свою очередь, означает создание соответствующих баз знаний, которые не могут быть универсальными. Специфика разработки стендов для научных исследований ведет к построению соответствующих специализированных баз знаний по их проектированию.

Общие подходы к применению баз знаний для составления ТЗ давно известны. Проектировщик может воспользоваться процедурой автоматического выбора определяющих признаков при выборе технических требований, отвечающих поставленным целям. Если в ТЗ включаются цели, отсутствующие в базе знаний САПР, то системой ИИ предлагается просмотр всего множества признаков, из которого выбираются наиболее целесообразные. Аналогично, этап оценки технического уровня включает процедуры выбора прототипа, аналога или базового образца для разработки, номенклатуры показателей качества и определение их комплексного показателя, проверку соответствия выбранных показателей требованиям и целям. Эти процедуры выполняются как минимум дважды – при анализе уже известных чужих разработок и потом еще раз при оценивании созданного стенда.

Автоматизация операций концептуального проектирования базируется на применении в САПР концептуальных моделей и предполагает их создание, изменение, анализ соответствующими средствами моделирования. Однако до сих пор достаточно развитые и при этом доступные компьютерные инструментальные средства автоматического синтеза и анализа таких моделей, методики их применения фактически отсутствовали.

Ситуацию существенно изменили новые подходы, получившие сначала применение в автомобильной и авиационной отраслях промышленности, где чаще наблюдается высокий уровень сложности технических решений и требований к ним. Постепенно они начинают применяться и в иных областях, но требуется накопление, описание и анализ опыта их применения, сравнение и выбор средств реализации.

Появление и развитие новых подходов прежде всего связано с направлением, известным как моделирующий системный инжиниринг (model-based system engineering, MBSE). Оно основано на глубоком анализе не только объекта, но и процесса проектирования, включая построение моделей самого процесса. Во многих случаях это так называемые описательные (дескриптивные, семиотические) модели в виде графа семантической сети. В вершинах графа находятся понятия проектирования, а его ребра – это отношения, связи понятий в предметной области. Простейшими примерами таких графов в технике являются электрические структурные и функциональные схемы, но все чаще применяются и другие типы документов и моделей, например диаграммы языка SysML и онтологии. Нами накоплен опыт автоматизации построения таких моделей для стендов ЭП и подобраны средства моделирования, адекватные специфике научной деятельности в этой области.

Цель работы. Описание методики проектирования стендов ЭП, способной сократить трудоемкость и повысить степень обоснованности принятия проектных решений. Рассмотрение практики применения ИИ на базе семантических сетей.

Основная часть. Описание проекта стенда как технического изделия должно включать: 1) A – множество целей применения и функций изделия; 2) E – множество элементов изделия и его проекта; 3) P – множество признаков, характеризующих элементы; 4) Q – множество взаимных связей (отношений) целей, элементов и признаков, задающих структуру проекта. Взаимодействие элементов определяется связями Q , которые соединяют элементы E и признаки P в одно целое. Описание объекта $O_i(A, E, P, Q)$ в целом является совокупностью этих множеств.

Процесс проектирования Π состоит из переходов от одного описания, более абстрактного, к другому, более конкретному: $\Pi = O_0(A, E, P, Q) \Rightarrow$

$O_1(A, E, P, Q) \Rightarrow \dots \Rightarrow O_n(A, E, P, Q)$. В ходе каждого перехода уточняются требования или соответствующие им проектные решения, выбираются их элементы, параметры, связи.

Для задания $O_i(A, E, P, Q)$ применяют различные проектные языки, а выбор методики проектирования задает правила перехода от $O_i(A, E, P, Q)$ к $O_{i+1}(A, E, P, Q)$. Возможно автоматическое выполнение переходов средствами САПР.

В качестве примера рассмотрим показанный на рис. 1 фрагмент описания технических решений проекта подъемного крана. Оно составлено в форме семантической сети, содержащей в своих вершинах понятия проектирования в области асинхронного кранового электропривода и связанные разного рода отношениями между ними. Совокупность узлов и ребер этого графа представляет знания о рассматриваемом проекте – не только факты, описывающие проектную задачу и ее решения, но и правила проектирования, позволяющие автоматически из известных предпосылок (требований или уже принятых технических решений) вывести логические заключения – новые требования и удовлетворяющие им решения. Видно, что сеть содержит как цели проектирования высокого уровня (подъем грузов на большую высоту, обеспечение безопасности системы и т.п.), так и следующие из них частные технические требования, для которых приводятся возможные варианты решения технических задач.

На рис. 1 использованы отношения между концептами (терминами), соответствующие выражениям естественного языка ("вариант", "требует", "уточнение", "противоречит"), имеющимся в исходном текстовом описании проекта. Ясно, что по мере расширения пространства поиска решений количество таких отношений будет расти, отражая разнообразие лексики технического языка разных проектировщиков. Для эффективной автоматизации проектирования число видов отношений в концептуальной модели стенда следует ограничить, сохранив вместе с тем их выразительную силу. Выбрать ограниченный набор терминов проектирования при составлении модели позволяет развитие языков моделирующего проектирования. Использование для узлов и ребер семантической модели проекта условных обозначений языка SysML значительно улучшает ее визуальное восприятие, а семантика этих обозначений выбирается не произвольно, а задается стандартом языка.

SysML [1] был создан и относительно часто используется как лингвистическая база для методологий проектирования именно мехатронных систем. Он позволяет описывать их аппаратное, программное, методическое, алгоритмическое, метрологическое и другие виды обеспечения, структуру, конструкцию, протекающие процессы и порядок проектирования. Для редактирования описаний существуют специализированные редакторы SysML-

диаграмм, инструменты их анализа и преобразования.

При построении концептуальной информационной модели стенда ЭП следует придерживаться ряда правил, обеспечивающих прослеживание проектных решений, их четкую связь с целями создания стенда. В традиционном документо-ориентированном описании проектов, такое прослеживание обеспечено не всегда, или, по крайней мере, не достаточно очевидно. А в языке SysML оно поддерживается на уровне синтаксиса.



Рис. 1. Фрагмент семантической сети проекта

Как пример, на рис. 2 показана декомпозиция требований к стенду кранового ЭП на базе частотного преобразователя (ЧП) в виде фрагмента диаграммы требований, составленной на языке SysML. Видно, что параллельно выстраиваются иерархия

требований (блоки типа <<requirements>>), иерархия соответствующих им технических решений (блоки диаграммы типа <<block>>) и средства их проверки на соответствие требованиям (так называемые тест-кейсы – блоки типа <<testCase>>). Кроме тест-кейсов как средство верификации используют блоки типа <<note>> (measurement of effectiveness) – для явного указания критериев оценивания качества проекта. Применяют так же блоки <<rationale>> для явного обоснования принятых решений, например, ссылкой на опыт применения или технические особенности.



Рис. 2. Описание проекта на языке SysML

В примере на рис. 2 указано, что частотный преобразователь следует испытать на его электромагнитную совместимость (ЭМС). Связь refine на диаграмме показывает операцию уточнения требования, связь satisfy связывает требование с удовлетворяющим ему решением.

Элементы проекта без таких связей автоматически считаются недостаточно обоснованными. Механизм логического вывода интеллектуальной САПР дополняется правилами поиска проблемных элементов и генерирования для них необходимых связей. Например, опыт применения элементов считается имеющимся, если в сходных условиях они применялись в других проектах, описания которых уже есть в базе знаний САПР.

Как особенность проектирования исследовательских стендов укажем, что цели их создания не следуют просто из класса проектируемого объекта, технологического процесса или промышленных

стандартов, а определяются, прежде всего, задачами и результатами проводимого научного исследования, которые по определению отличаются высокой степенью новизны. Но нижние уровни иерархий проектных решений могут автоматически генерироваться по ее уже заданным верхним уровням методами искусственного интеллекта на основе созданной базы знаний.

Для автоматической проверки и преобразования по заданным правилам диаграмм на языке SysML их нужно представить в форме базы знаний какой-либо системы ИИ, например, Protégé. Или же описание проекта стенда сразу выполняется в системе ИИ, с учетом ограничений на типы элементов проекта и их связей по стандарту языка SysML. Хотя диаграммы и приобретают другой внешний вид, но с точки зрения простоты применения непрофессионалами в области ИИ такой путь, без промежуточных средств, на практике оказался проще.

По доступности, легкости освоения и простоте применения было принято решение использовать пакет программ CoGui [2-4], реализующий методы ИИ на базе концептуальных графов – разновидности семантических сетей. Формат базы знаний этого пакета используется и в других программных продуктах – среда разработки ИИ TooCoM, библиотека программ CoGITaNT. Для него нами была создана библиотека условных обозначений элементов проекта, соответствующая обозначениям языка SysML. Так же создан и ряд других библиотек – целей проектирования, часто задаваемых требований и соответствующих им проектных решений.

Как пример, на рис. 3 показано правило проектирования ЭП, соответствующее показанным на рис. 1 и рис. 2 информационным моделям кранового ЭП на базе ПЧ:

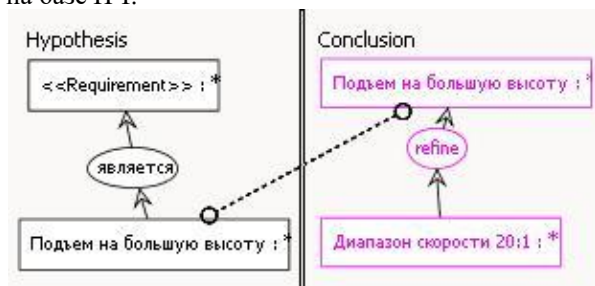


Рис. 3. Правило проектирования ЭП

Правило имеет вид продукции $O_i \Rightarrow O_{i+1}$, где O_i служит предпосылкой (Hypothesis) для автоматически принимаемого заключения (Conclusion) O_{i+1} , которое уточняет (refine) ранее имевшееся требование. Если проектировщик сначала выберет в качестве известного факта требование «Подъем на большую высоту» и внесет его в информационную модель проекта, а затем запустит машину вывода знаний, входящую в состав CoGui, то в список

требований проекта будет внесен диапазон регулирования 20:1.

Приведем еще один пример. Необходимой характеристикой стендов для научных исследований является высокая степень возможности их конфигурирования. Существующие частотные преобразователи реализуют различные подходы к обеспечению этого свойства - от простой параметризации отдельных регуляторов, до возможности автоматизированного проектирования любых изменений всего встроенного ПО в преобразователях с открытой программной платформой. Соответствующий небольшой фрагмент базы знаний по этому свойству ПЧ показан на рис. 4. И вся цепочка проектных решений от требования конфигурирования до его решения в преобразователе серии MBS-FC01 средствами среды CoGui может генерироваться автоматически - по схеме показанной на рис. 5.



Рис. 4. Средства конфигурирования ПЧ

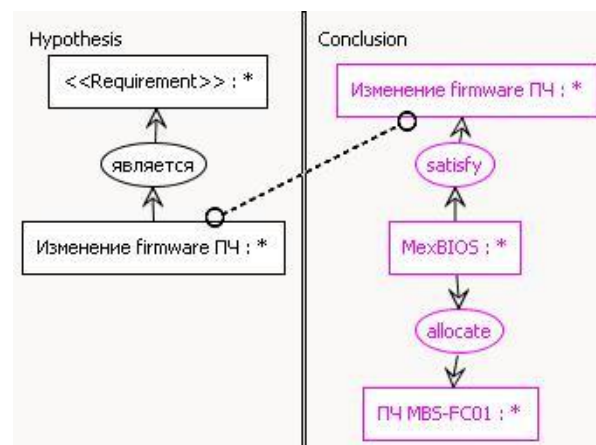


Рис. 5. Правило выбора ПЧ

Таким образом, предлагается следующая методика автоматизации концептуального проектирования стендов ЭП:

1 На языке SysML составляется наглядная графическая информационная модель имеющихся знаний о проектировании;

2 Полученная модель преобразуется в форму, используемую в системе искусственного интеллек-

та CoGui, и в дальнейшем пополняется новыми знаниями по мере выполнения проектных работ;

3 Требования высокого уровня к стенду ЭП и уже принятые проектные решения так же вводятся в CoGui с использованием имеющихся библиотек целей проектирования, требований, элементов технических решений, их параметров и связей;

4 Сформированные концептуальные графы исходных требований автоматически сопоставляются системой ИИ с правилами проектирования. Найденные по этим правилам соответствия решений требованиям включаются в информационную модель проекта, которая затем проверяется и редактируется проектировщиком;

5 Полученная информационная модель проекта автоматически проверяется системой ИИ на непротиворечивость требований и проектных решений. Затем возможен экспорт описания проекта в традиционную текстовую форму;

Заключение. Предлагаемая методика проектирования стендов обладает следующими достоинствами: 1) наглядность и полнота описания технических требований и решений, 2) автоматическое применение и проверка соблюдения правил проектирования, 3) минимальность набора выразительных средств для создания информационной модели проекта и простота использования программных инструментов ИИ.

Автоматизация процесса создания и применения правил проектирования стендов позволяет относительно легко учитывать многочисленные взаимосвязи целей их создания с требованиями к техническим решениям. Это повышает качество принимаемых решений и технической документации стенда, упрощая обеспечение необходимой степени достоверности научных исследований. В конечном счёте, предлагаемая методика повышает эффективность проектирования стендов ЭП.

Литература

1. A Practical Guide to SysML. The System Modeling Language. A volume in The MK/OMG Press Book. Third Edition, 2015;

2. Michel Chein, Marie-Laure Mugnier, Madalina Croitoru.. Visual Reasoning with Graph-based Mechanisms: the Good, the Better and the Best. The Knowledge Engineering Review. 28(03), 2013. DOI:10.1017/S0269888913000234.
3. Bernard Kamsu-Foguem, Germaine Tchunte Foguem, Clovis Foguem. Conceptual graph operations for formal visual reasoning in the medical domain. IRBM, Elsevier Masson, 2014, vol. 35 (n 5), pp. 262-270.
4. Jean-Francois Baget, Michel Chein, Madalina Croitoru, Alain Gutierrez, Michel Leclerc, et al.. Logical, graph based knowledge representation with CoGui. Mohand Boughanem, Hamamache Kheddouci. Atelier GAOC : Graphes et Appariement d'Objets Complexes en conjonction avec EGC'10, Jan 2010, Hammamet, Tunisia. pp.15-25, 2010.

References

1. A Practical Guide to SysML. The System Modeling Language. A volume in The MK/OMG Press Book. Third Edition, 2015;
2. Michel Chein, Marie-Laure Mugnier, Madalina Croitoru.. Visual Reasoning with Graph-based Mechanisms: the Good, the Better and the Best. The Knowledge Engineering Review. 28(03), 2013. DOI:10.1017/S0269888913000234.
3. Bernard Kamsu-Foguem, Germaine Tchunte Foguem, Clovis Foguem. Conceptual graph operations for formal visual reasoning in the medical domain. IRBM, Elsevier Masson, 2014, vol. 35 (n 5), pp. 262-270.
4. Jean-Francois Baget, Michel Chein, Madalina Croitoru, Alain Gutierrez, Michel Leclerc, et al.. Logical, graph based knowledge representation with CoGui. Mohand Boughanem, Hamamache Kheddouci. Atelier GAOC : Graphes et Appariement d'Objets Complexes en conjonction avec EGC'10, Jan 2010, Hammamet, Tunisia. pp.15-25, 2010.

Сведения об авторах

Котляров Владимир Олегович, канд. техн. наук. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» 61002, Харьков, ул. Кирпичева 2, E-mail: vok2kaf@gmail.com

Буряковский Сергей Геннадьевич, док. техн. наук, профессор. Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» 61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2, E-mail: sergbyr@i.ua

Виктор Бушер, Богдан Крицкий, Владислав Крицкий

Разработка прототипа системы управления электромеханическим оборудованием судовых аппарелей

Аннотация. Разработан прототип автоматизированной системы управления кормовой и боковой рампами ролкеров с использованием SCADA Citect, контроллеров и электроприводов Mitsubishi Electric. С учетом особенностей контроллеров и SCADA распределены задачи между ними, обеспечена возможность автоматического подъема/спуска рампы с согласованным управлением электроприводами и защитой от зарывания или отрыва рампы от берега. SCADA обеспечивает удобную работу, индикацию состояния механизмов, в том числе аварий, расчета заданных скоростей электроприводов.

Ключевые слова: Ролкер, аппарат, SCADA, промышленный программируемый контроллер, преобразователь частоты.

Victor Busher, Bohdan Kritsky, Vladislav Kritsky

Development of a prototype of SCADA for electromechanical equipment of ship ramps

Annotation. A prototype of an automated control system for the quarter and side ramps of Ro-Ro using SCADA Citect, Mitsubishi Electric controllers and electric drives has been developed. Taking into account their technical data, tasks are distributed between them, the possibility of automatic raising / lowering of ramps with coordinated control of electric drives and protection against burying or tearing of ramps from the shore is provided. SCADA provides convenient operation, indication of the state of mechanisms, including alarms, calculation of speed assignments for electric drives.

Key words: Ro-Ro, ramp, SCADA, industrial PLC, frequency converter.

Введение. Ролкеры предназначены для перевозки грузов на колесном ходу, которые располагаются на многочисленных палубах, соединенных подъемными горизонтальными и / или наклонными пандусами между собой и двумя загрузочными рампами (аппарелями) – кормовой и боковой – для обеспечения движения грузов своим ходом на берег или с берега (рис. 1).

На ролкерах Noble Ace [2] и Lydden [3] системы подъема / спуска кормовой и боковой рампы построены десятилетия тому назад и предусматривают только ручное управление или использование гидравлического привода, что не соответствует современным требованиям к судам этого класса.

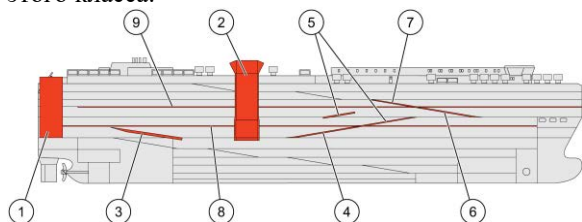


Рис. 1. Типовая конфигурация грузовых палуб и аппарелей на ролкере (1 – кормовая рампа, 2 – боковая рампа, 3 – навес, 4 ... 9 – подъемные и подвижные пандусы и палубы) [1]

Цель работы – разработка прототипа автоматизированной системы управления рампами с использованием современных электроприводов,

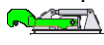
промышленных контроллеров и средств визуализации, диспетчеризации и наблюдения (SCADA).

Разработка SCADA аппарелей. Кормовая аппарат состоит из двух секций, и основной особенностью ее работы является необходимость согласованного управления подъемом и спуском так, чтобы нос рампы не зарылся в берег или не поднималось очень высоко. Кроме того, во время спуска рампы 1-ю секцию опускают, а 2-ю – поднимают, а во время подъема – наоборот. Это усложняет работу оператора. При работе в ручном режиме для исключения ошибок все операции выполняются последовательно для отдельных секций с визуальным контролем положения рампы. Также для корректной работы рампы установлены датчики угла отклонения первой секции рампы от вертикали, после прохождения которых необходимо включать механизм подъема второй секции во время спуска рампы или спуска этой секции во время подъема рампы.

Для автоматической системы управления необходимо распределить зоны ответственности между контроллером и SCADA. С учетом того, что типичная длительность цикла контроллера составляет единицы миллисекунд, она может быть определена точно, и за это время обязательно выполняются все операции программы, то на контроллер необходимо возложить ответственные задачи передачи управляющих команд, анализа состояния каждого исполнительного элемента и

аварийных ситуаций. А SCADA с циклом исполнения примерно 0,05 с, который может случайным образом изменяться из-за фоновых программ, должна обрабатывать команды оператора, формировать диаграммы скорости (положения) механизмов на основании команд и информации от датчиков и обеспечивать визуализацию процессов, сохранение протоколов действий оператора и данных штатных и аварийных датчиков. На основании этого разработана визуальная система, в которой отображается положение рампы, состояние отдельных технологических датчиков, координат и органов управления. На рис. 2 приведены несколько кадров с ключевыми положениями рампы.

Возможности SCADA позволяют реализовать некоторые специальные эффекты, которые с одной стороны подчеркивают на экране важнейшие события, а с другой стороны – уменьшают количество графических элементов.

Так, кнопки за счет изменения цвета одновременно выполняют функции индикатора действия - они передают команду контроллеру и получают от него подтверждение выполнения операции, фиксаторы меняют очертания и цвета в соответствии с командами и их фактическим состоянием:  – открыт;  – закрыт;  – авария, если состояние фиксаторов на левом и / или правом боках рампы не соответствует заданному после определенной задержки времени. За основу графических элементов взяты изображения из технического паспорта приборов [1], но для подчеркивания состояния с помощью Bitmap Editor изменены цвета.

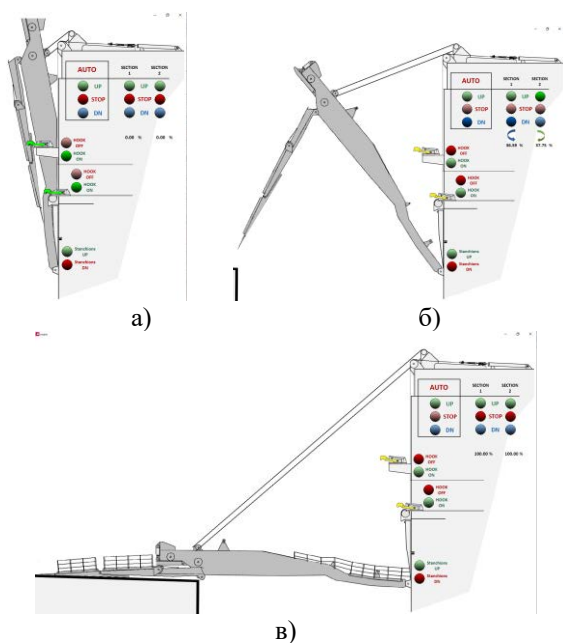


Рис. 2 - Визуальное оформление работы кормовой рампы (а – рампа поднята и зафиксирована; б – самая низкая точка носа при спуске; в – рампа на берегу)

Дополнительные графические элементы отображают направления движения тросов на основании знака скорости соответствующего электропривода, что также подчеркивается с помощью цвета и направления стрелок. Органы управления сгруппированы для каждой секции и отдельно для автоматического управления рампой, а также расположены у изображений соответствующих механизмов.

SCADA боковой рампы построена по тем же принципам. Но существенным отличием боковой рампы является возможность не только подъема и спуска на берег, но и перемещения точки опоры на борту судна к необходимой палубе – 5, 6а, 6б, MaxLevel.

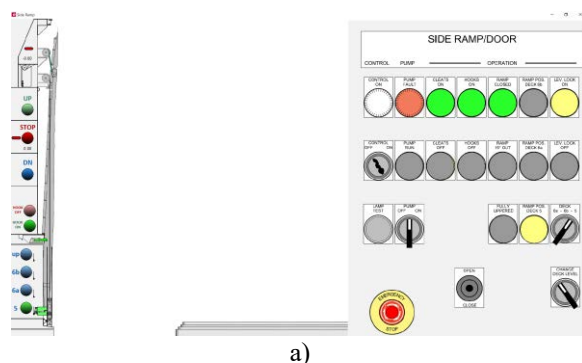
Поэтому алгоритм работы предусматривает контроль двух координат – положение точки опоры в соответствии с командами оператора, аналогично лифту, и спуск / подъем рампы. Положение точки опоры влияет на механизм подъема рампы – максимальный угол спуска зависит от палубы, напротив которой зафиксирована рампа.

В SCADA реализована функция контроля расстояния рампы от берега независимо от палубы, что обеспечивает защиту от зарывания или отрыва рампы от берега.

Состояние фиксаторов отображается графическими элементами: такими же, как кормовой рампы при фиксации к борту и ,  - для фиксаторов опоры рампы. Кнопки управления фиксаторами, подъема / спуска опоры, автоматического подъема / спуска рампы расположены непосредственно рядом с соответствующими механизмами.

Панель справа соответствует фактическому виду секции управления рампой и с помощью графических образов «ламп» и «переключателей», которые меняют свой цвет и угол поворота, отражает состояние механизма.

Основные положения боковой рампы на экране SCADA показаны на рис. 3.



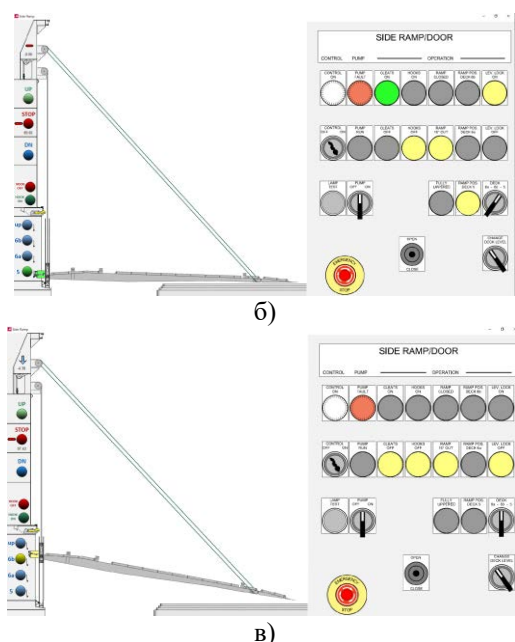


Рис. 3. Визуальное оформление работы боковой рампы (а – рампа поднята и зафиксирована; б – рампа на берегу; в – рампа спускается к палубе 6б)

Для отображения графического образа троса, который создает целостность изображения, использованы функции масштабирования и поворота на основании расчета значений длины L_{rope} и угла φ_{rope} в зависимости от положения точки опоры рампы s_{deck} и угла поворота рампы s_{φ} :

$$L_{rope} = \sqrt{(875 - s_{deck} * 60) * (875 - s_{deck} * 60) + 800 * 800 - 2 * (875 - s_{deck} * 60) * 800 * \cos(\pi/2 + s_{\varphi})},$$

$$\varphi_{rope} = \pi/2 - \arcsin(800 * \sin(\pi/2 + s_{\varphi}) / L_{rope}).$$

Но, кроме графического изображения, расчет условной длины троса дает возможность сформировать задание скорости для электропривода механизма подъема рампы для обеспечения постоянной угловой скорости:

$$v_{rope} = -(L_{rope} - L_{rope_old}) / 0.05,$$

$$L_{rope_old} = L_{rope}.$$

Работа SCADA на компьютере происходит в режиме эмуляции процессов с локальными переменными. Но все константы и переменные в программе SCADA соответствуют тега, связанным с программой контроллера. Поэтому переход на

рабочую версию программы с использованием контроллеров Mitsubishi Electric FX3U [4] и преобразователей частоты FR-F800-E [5] может быть осуществлен за короткое время путем перемещения локальных переменных в теги с привязкой к соответствующим физическим дискретным и аналоговым входам и выходам контроллера и его внутренним переменным.

Выводы. Разработаны прототипы систем управления кормовой и боковой аппаратами роллеров для замены ручного управления на автоматизированные системы с использованием SCADA Citect, промышленных контроллеров и управляемых электроприводов Mitsubishi Electric. В конфигурации системы учтены особенности работы контроллеров и SCADA, что позволило распределить задачи между ними, и обеспечена возможность автоматического подъема / спуска рампы с согласованным управлением электроприводами секций кормовой аппарели и механизмов подъема / спуска рампы и точки опоры боковой аппарели, в том числе для защиты от зарывания или отрыва рампы от берега. Система визуализации за счет совмещения графических образов, контрастных цветов, расположения органов управления рядом с изображением соответствующего механизма обеспечивает удобную работу.

Согласованное управление механизмами рампы обеспечивается расчетом линейных скоростей и соответствующих задающих сигналов для электроприводов на основании изменения условной длины тросов в системе визуализации за счет точных пропорций графических образов фактическим размерам аппарелей.

Литература

1. MacGregor.pdf. 411025, September. 2011. Edition 2. 568 p.
2. http://marinelike.com/en/vessels/7714416-noble_acc.html
3. <https://www.scheepvaartwest.be/CMS/index.php/carriers-ro-ro/8315-lydden-imo-9782091>
4. https://ru3a.mitsubishielectric.com/fa/ru/shared/img/producttables/1_PLC_main_unit_FX3U_FX3UC
5. <https://ru3a.mitsubishielectric.com/fa/ru/products/drv/inv/local/f800>

Сведения об авторах

Виктор Бушер, докт.техн.наук, профессор, Национальный университет "Одесская морская академия", Одесса, Украина. E-mai: victor.v.bousher@gmail.com

Богдан Крицкий, курсант, Национальный университет "Одесская морская академия", Одесса, Украина.

Владислав Крицкий, курсант, Национальный университет "Одесская морская академия", Одесса, Украина.

Юрий Кутовой, Ярослав Кириленко, Татьяна Кунченко

Автоматическое управление скоростным режимом рельсовых транспортных средств с помощью технологий компьютерного зрения

Анотация. Рассмотрены возможности применения современных алгоритмов компьютерного зрения для создания систем автоматического регулирования скорости приводов рельсовых транспортных средств. Показано что указанные алгоритмы позволяют создать системы автовождения и системы реализации максимальной силы тяги по условию сцепления.

Ключевые слова: рельсовое транспортное средство, электропривод, кривизна пути, компьютерное зрение.

Kutovoj Yuri, Kyrylenko Yaroslav, Kunchenko Tatiana

Automatic speed control of rail vehicles using computer vision technologies

Annotation. Possibilities of using modern algorithms of computer vision to create systems for automatic control of the speed of drives of rail vehicles are considered. It is shown that these algorithms make it possible to create auto-driving systems and systems for realizing the maximum traction force based on the adhesion condition.

Keywords: rail vehicles, electric drive, rail track curve, computer vision.

Введение. Скоростной режим рельсовых транспортных средств (РТС) и, в частности, железнодорожного транспорта во многом зависит от кривизны пути. Кривизна пути требует уменьшения скорости движения, а это в настоящее время осуществляется машинистом в соответствии с графиком движения.

Анализ аварийных ситуаций на железных дорогах показал, что причиной большинства сходов с рельс является человеческий фактор и состояние железнодорожного полотна. Поэтому в соответствии с международным стандартом ИЕС 62290 – 1:2014 необходимо повышать степень автоматизации железнодорожного транспорта до третьего и четвертого уровня, исключая человеческий фактор [1].

Решение этой задачи возможно на основе технологий компьютерного зрения и интеллектуальных систем управления электрическим приводом РТС [2, 3, 4, 5, 6, 7].

Цель. Целью настоящей работы является разработка на основе алгоритмов компьютерного зрения систем автоматического регулирования скорости электропривода РТС в зависимости от кривизны пути железнодорожного полотна. С этой целью на кабину машиниста устанавливается камера как показано на рисунке 1.

На этой схема камера формирует видео поток, который поступает на блок обработки изображения покадрово. Для представления кадра используется матрица A размерность которой $N_1 \times M_1$ соответствует высоте и ширине кадра. Значения N_1 и M_1 зависят от настройки камеры. На выходе блока обработки изображения формируется матрица B размер столбцов которой соответствуют координатам левого и правого рельса соответственно, а размер строк N_2 равен количеству точек. Блок анализа полученных контрольных точек

формирует матрицу C , которая хранит два значения R и D , где R это значение радиуса кривизны рельсового полотна, а значение D равно коду дефекта на полотне. Код дефекта равняется единице в случае обнаружения дефекта в противном случае код равен нулю. Выходное устройство формирует сигнал задания скорости.

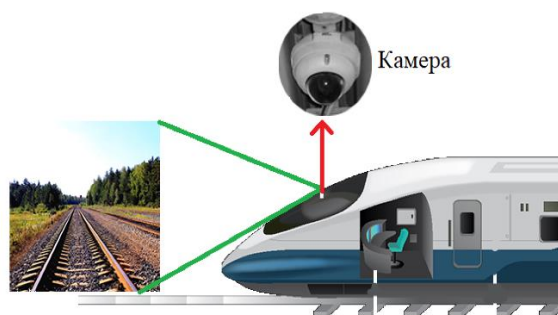


Рис.1. Схема получения изображения с помощью камеры

Материал исследования. Изображение с камеры обрабатывается в определённой последовательности показанной на рисунке 2.

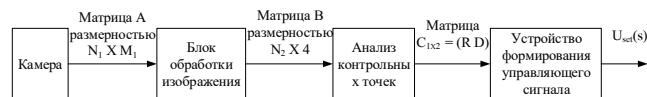


Рис.2. Функциональная схема канала обработки изображения

В блоке обработки изображения используется библиотека алгоритмов компьютерного зрения с открытым исходным кодом OpenCV [8, 9]. Блок-схема алгоритма, реализующего обработку изображения показана на рис.3. Программирование выполнено с использованием языка Python, который достаточно хорошо сопрягается с библиотекой OpenCV.

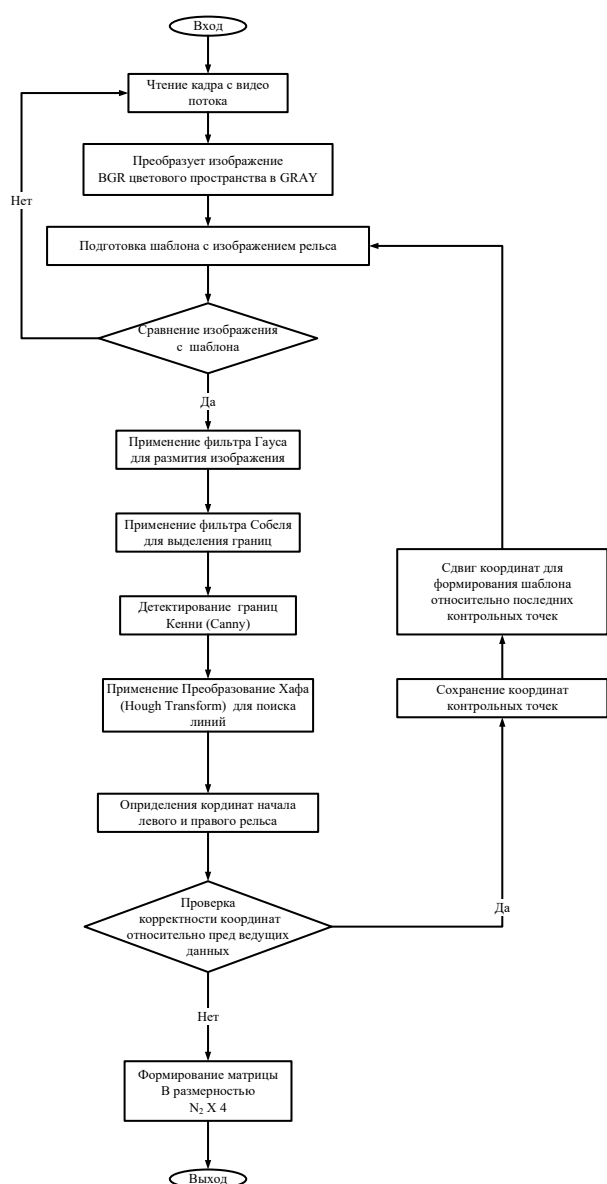


Рис.3. Блок-схема алгоритма обработки изображения

Радиус кривизны пути находится по трем контрольным точкам, по результатам сравнения точек левого и правого рельса относительно друг друга, определение расстояния сдвига между точками из-за кривизны.

На рис.4 приведена блок-схема алгоритма измерения кривизны пути и определения дефектов геометрии железнодорожного полотна.

Далее, в соответствии с функциональной схемой канала обработки изображения, формируется сигнал управления на электропривод, обеспечивающий снижение скорости в зависимости от кривизны.

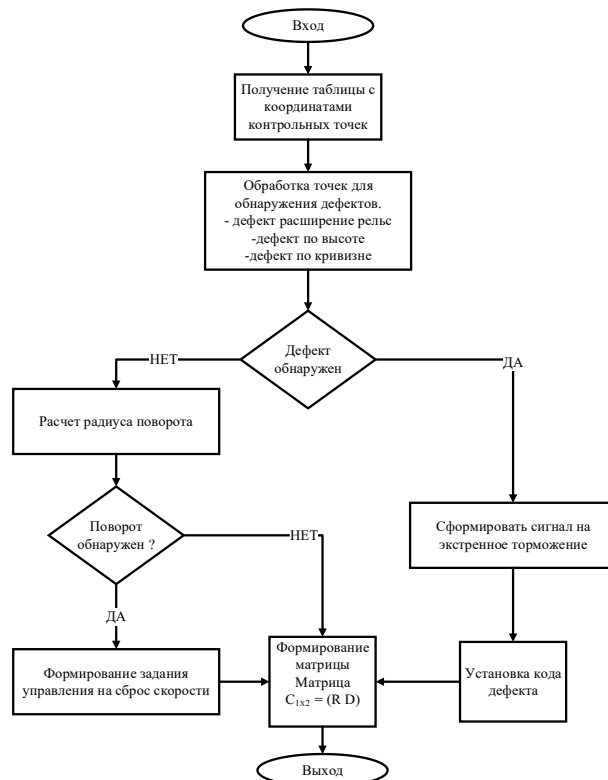


Рис.4. Блок-схема алгоритма определения кривизны пути и дефектов геометрии полотна

На рис.5 приведена структурная схема тягового электропривода, на которую воздействует сигнал с камеры после соответствующей обработки.

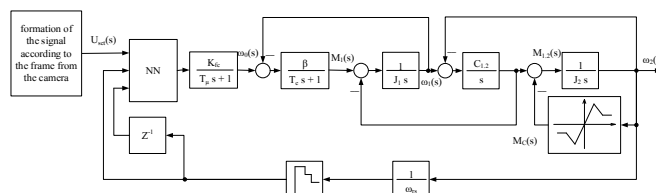


Рис.5. Структурная схема тягового электропривода

Структурная схема, полученная при следующих допущениях: нагрузка между двигателями РТС распределена равномерно, механические характеристики системы на рабочем участке линейные, двигатель и преобразователь представлены аperiодическими звеньями, характеристика сцепления имеет восходящий и падающий участок.

Особенностью данной структуры является наличие в ней нейрорегулятора NN обеспечивающего заданное качество переходного процесса во всем диапазоне нагрузки и при нахождении рабочей точки на падающем участке [10, 11].

Имитационная модель электропривода с автоматическим регулированием скорости в зависимости от кривизны пути, определяемой камерой, показано на рис.6.

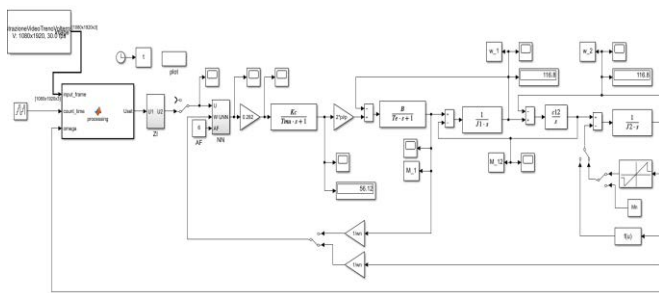


Рис. 6. Имитационная модель электропривода с автоматическим регулированием скорости в зависимости от кривизны пути

Модель, полученная путем интеграции базовых блоков Simulink со скриптом. Для численного эксперимента использовано готовое видеоизображение железнодорожного пути, имеющего кривизну. Кадр из этого видео приведен на рис.7.



Рис. 7. Кадр из видеоизображения с указанием контрольных точек

Моделирование системы показало ее работоспособность, что проявляется в уменьшении скорости движения РТС при движении РТС на участке пути с кривизной. Результаты расчетов на имитационной модели показаны на рис.8, 9, 10.

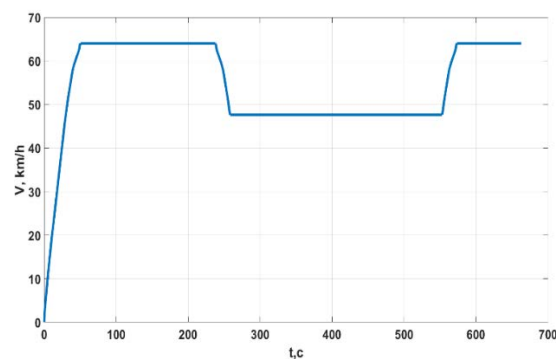


Рис. 8. Некоторые результаты моделирования системы с автоматическим регулированием скорости.

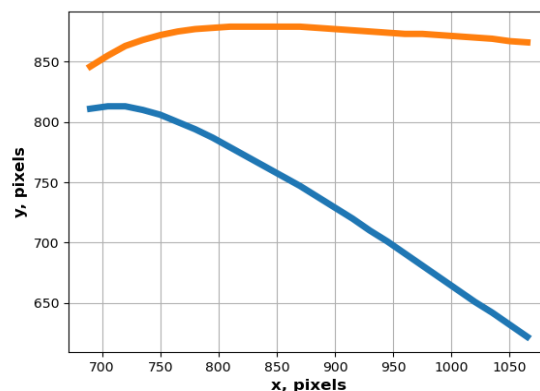


Рис. 9. Пример кривизны на основании которой принимается решение о снижении скорости

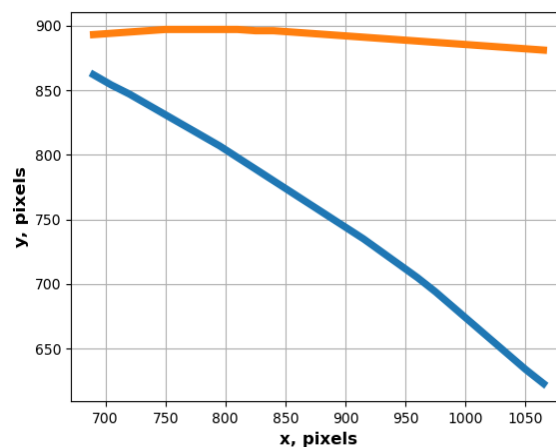


Рис. 10. Пример кривизны на основании которой принимается решение о возвращении скорости в исходное положение

Вывод. Повышение уровня автоматизации РТС возможно на основе технологии компьютерного зрения. Данные технологии обеспечивают автоматическое управление скоростным режимом, позволяют выявить дефекты на пути и препятствий на пути, дают возможность создать системы автовождения, что в конечном итоге повышает безопасность движения РТС.

Литература

1. IEC 62290-1:2014, Railway applications – Urban guided transport management and command/control systems – Part 1: System principles and fundamental concepts, MOD.
2. Systems Engineering Framework for Railway Control & Safety Systems/ Karl Michael King. January 2018 Department of Electronic, Electrical and Systems Engineering University of Birmingham
2. Learning OpenCV 3: Computer Vision in C++ with the OpenCV Library/ Kaehler A., Bradski G.– O'Reilly Media. 2017.
3. Обработка изображений с помощью OpenCV/ пер. с англ. Слинкин А.А. М.: ДМК Пресс. 2016. 210. ил.
4. Компьютерное зрение. Теория и алгоритмы/ пер. с англ А. А. Слинкин. М.: ДМК Пресс, 2019. 506 с.
5. R.L Barbosa and J.F.C Silva. Velocity estimation of a mobile mapping vehicle using filtered monocular optical flow. on Mobile Mapping ..., pages 2–5, 2007.
6. Andrea Giachetti, Marco Campani, and Vincent Torre. The use of optical flow for road navigation. IEEE Transactions on Robotics, 1999.
7. Large displacement optical flow: Descriptor matching in variational motion estimation, PAMI 2011 [PDF] T. Brox and J. Malik
8. Learning OpenCV 4 Computer Vision with Python 3: Get to grips with tools, techniques, and algorithms for computer vision and machine learning, 3rd Edition 3rd Edition, Kindle Edition.
9. https://docs.opencv.org/master/d0/de3/tutorial_py_intro.html
10. Исследование пусковых режимов частотно-регулируемого электропривода магистрального электровоза ДСЗ / Ю. Н. Кутовой [и др.] // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Problems of automated electrodrive. Theory and practice : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ". 2019. № 16. с. 95-98.
11. Neural network control of a frequency-regulated electric drive of a main electric locomotive / Kyrylenko Yaroslav / Kutovoj YuriyObruch / Ihor Kunchenko / Tatiana 2020 IEEE 25th International Conference on Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)

Сведения об авторах

Кутовой Юрий Николаевич / Kutovoj Yuriy Nikolaevich – кандидат технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры автоматизированных электромеханических систем; м. Харьков, Украина; e-mail: kutovoj.yuriy@ukr.net

Кириленко Ярослав Александрович / Kyrylenko Yaroslav Alexandrovich – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» аспирант; e-mail: yaroslav.kyrylenko@khpi.edu.ua

Кунченко Татьяна Юрьевна (Кунченко Татьяна Юрьевна, Kunchenko Tatiana Yur'evna) – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры автоматизированных электромеханических систем; м. Харьков, Украина; e-mail: medvedeva_1412@ukr.net

Елена Назарова, Ирина Мелешко

Моделирование особенностей возникновения завалов пневмотранспортных систем

Аннотация. Учитывая затраты электроэнергии и объемы производства при пневмотранспортировке сыпучих материалов, актуальным является снижение расхода сжатого воздуха, учет при разработке систем автоматического управления потери давления, влияющей на возникновения завалов, на выходе пневмотрассы. Разработаны модели электропривода пневмотранспортной системы, получены графики электромеханических процессов, подтверждающие её адекватность. Использование названных моделей позволит сэкономить время и средства на проведение предварительных экспериментов при разработке новых и модернизации существующих пневмотранспортных систем.

Ключевые слова: пневмотранспортная система, завал, сыпучие материалы, система управления, энергоэффективность.

Elena Nazarova, Iryna Meleshko

Modeling of the occurrence of blockages in pneumatic transport systems peculiarities

Annotation. Considering the cost of electricity and production volumes during pneumatic transportation of bulk materials, it is relevant to reduce the consumption of compressed air, to take into account when developing automatic control systems, the pressure loss affecting the occurrence of blockages at the outlet of the pneumatic line. Models of an electric drive of a pneumatic transport system have been developed, graphs of electromechanical processes have been obtained, confirming its adequacy. The use of these models will save time and money for preliminary experiments in the development of new and modernization of existing pneumatic transport systems.

Keywords: pneumatic transport system, blockage, bulk materials, control system, energy efficiency.

Введение. Пневматический способ транспортировки сыпучих материалов широко распространен на предприятиях металлургической, горной, энергетической, химической, фармацевтической промышленности, в агро-промышленном комплексе и строительстве [1-2]. Трубопроводный транспорт составляет 30 % всех промышленных транспортных систем, что обуславливает актуальность рассматриваемой тематики. Развитие технологий транспортирования сыпучих материалов направлено на снижение удельной стоимости транспортирования одной тонны сыпучего материала за счет снижения потребления электроэнергии в процессе транспортирования; работы с минимально допустимым давлением в пневмотрассе, позволяющей выбрать электродвигатель меньшей мощности, что при таких объемах производства даёт значительный экономический эффект [3].

Недостатком пневмотранспортных систем (ПТС) является вероятность запаздывания при реакции системы автоматического управления (САУ) на изменение давления и, как следствие, возникновения завалов трубопровода сыпучим материалом, что вызывает остановку технологического процесса, простой оборудования и значительные материальные убытки [4]. Энергоемкость процесса транспортирования при пневматическом способе перемещения сыпучих материалов, конструктивные особенности трубопроводов [5-6] и комплектующего

оборудования, технические параметры пневмотранспортных установок во многом зависят от режимов движения сыпучих материалов, возможности автоматизации процессов их транспортирования. Удельный расход электроэнергии и износ трубопровода, определяет его эффективность и зависят от используемого режима транспортирования. Оптимизация электромеханических процессов перемещения сыпучих материалов, а также создание энергосберегающих способов пневматического транспорта, работающего в его нестабильных режимах, является актуальной задачей.

Цель работы - моделирование особенностей возникновения завалов в пневмотранспортных системах при транспортировке сыпучих материалов, сопровождающихся потерей давления на выходе пневмотранспортной системы.

Материалы исследования

С целью исследования изменения давления в пневмотранспортной магистрали проведены замеры в условиях обычного функционирования объекта на ОАО «Запорожский алюминиевый комбинат», где объектом исследования была часть пневмотрассы (рис. 1) от камерного питателя (КП) до приемного бункера (ПБ) электролизного цеха [7].

На рис. 1 показана загрузка глинозема из холодильника печи кальцинации (ХПК) через отверстие в камерный питатель. Поворотом задвижки подачи сжатого воздуха от центрального коллектора, регулируется поступление материала в транс-

портную магистраль, контролируется при этом давление на манометре (P1), давление нагнетания от коллектора сжатого воздуха (SV) и расход глинозема (Al₂O₃). Заслонкой (Z) регулируется подача смеси в пневмотранспортную магистраль. Регулировка подачи сжатого воздуха обеспечивается при помощи приводного двигателя (СТД-1600-24ХЛ4), многоступенчатого центробежного компрессора (К-250-61-2).

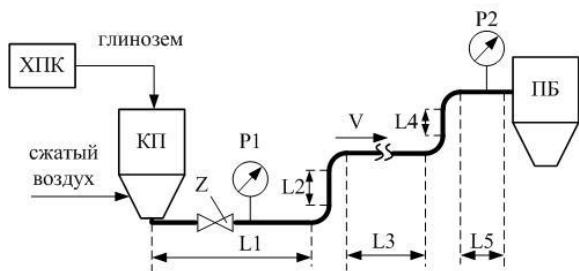


Рис. 1. Структурная схема экспериментального участка ПТС

Было обнаружено, что снижение давления на выходе ПТС уменьшает энергоэффективность системы в целом, а также может привести к закупориванию сыпучим материалом транспортирующего трубопровода [7].

Компрессор характеризуется газодинамическими характеристиками (зависимость давления от расхода). Если взять какую-либо точку на статической характеристике нагнетателя, то можно проследить ее траекторию движения при изменении частоты вращения компрессора [8].

Рассмотрим математическую модель компрессорной установки по второму контуру расхода воздуха (Q). Следовательно, стабилизировать на основании установки будем расход воздуха на данном этапе модель представлена без учета задвижек и второго контура по давлению, а также перегрева двигателя, так как это реализуется аппаратно помощью теплового реле, таким образом, исследован изотермический процесс [9]. Простейшая теория компрессорных машин, обладающая приемлемой точностью, основывается на термодинамике идеального газа. В данном случае используется закон Бойля-Мариотта, то есть объем газа пропорционален давлению при постоянной температуре

$$PV = \text{const}, T = \text{const}.$$

Для реализации центробежного компрессора в одиночных трубопроводах используется аperiodическое звено второго порядка, в данной системе запаздывание не учитывается. Таким образом, передаточная функция компрессора, в которой входным сигналом является угловая скорость вращения вала приводного двигателя, а выходным сигналом является расход, выглядит следующим образом

$$W_K(p) = \frac{\omega_0(p)}{Q(p)} = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad (1)$$

где T_1, T_2 – постоянные времени компрессора; K – коэффициент усиления передаточной функции ком.

Математическая модель трубопровода с жидкостью состоит из равенства расходов на входе (узел i) и выходе (узел j) и уравнения потерь давления по длине и имеет вид (2) [10]. При рассмотрении пневмотранспортировки смеси воздуха с глиноземом принято допущение, что смесь с некой усредненной плотностью (псевдожидкость) можно рассматривать как жидкость

$$\begin{cases} Q_i = Q_j, \\ P_j = P_i - \lambda \frac{8\rho L_{tr}}{\pi^2 D_{tr}^5} Q_i |Q_i|. \end{cases} \quad (2)$$

В системе (2) L_{tr}, D_{tr} – длина и диаметр трубопровода; ρ – плотность рабочей жидкости; λ – коэффициент потерь давления по длине трубопровода:

$$\lambda = \begin{cases} 75 / \text{Re} & \text{при } \text{Re} \leq 2300, \\ 0,3164 \cdot \text{Re}^{-0,25} & \text{при } \text{Re} > 2300, \end{cases}$$

где Re – число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{4|Q_i|}{\pi \cdot D_{tr} \cdot \nu}, \quad (3)$$

где ν – кинематическая вязкость; $\nu = \eta / \rho$, η – динамическая вязкость жидкости; η (воздуха) = $1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с; ρ (глинозема) = $3,5-3,9$ г/см; $L_{tr} = L_e = 370$ м; $D_{tr} = D = 0,143$ м.

При разработке новых и модернизации существующих САУ ПТС целесообразно использовать математические и компьютерные модели этих систем, что позволит сэкономить время и средства на проведение предварительных экспериментов [11-13]. Упрощенная функциональная схема электропривода пневмотранспортной системы показана на рис. 2, где САУ – система автоматического управления; Д – приводной двигатель (СТД-1600-24ХЛ4); К – компрессор (К-250-61-2 – многоступенчатый центробежный компрессор); Z – управляемая задвижка; P1, P2 – датчики давления на входе и выходе ПТС соответственно; ПТС – пневмотранспортная система, учитывающая траекторию и геометрические размеры; ПБ – приемный бункер.

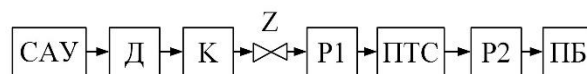


Рис. 2. Упрощенная функциональная схема электропривода пневмотранспортной системы

Для описания динамических режимов работы синхронного электродвигателя (СД) при любом способе управления его скоростью удобно

обратиться к модели обобщённой двухфазной машины переменного тока [14].

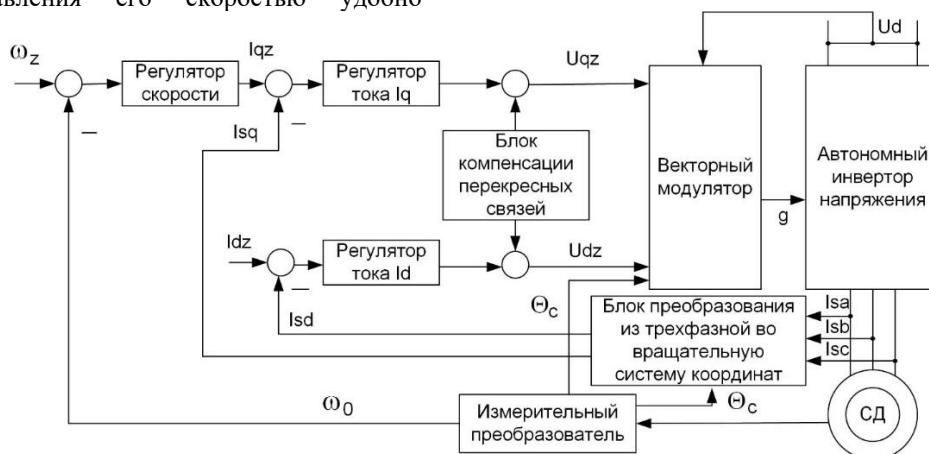


Рис. 3. Функциональная схема векторного управления СД

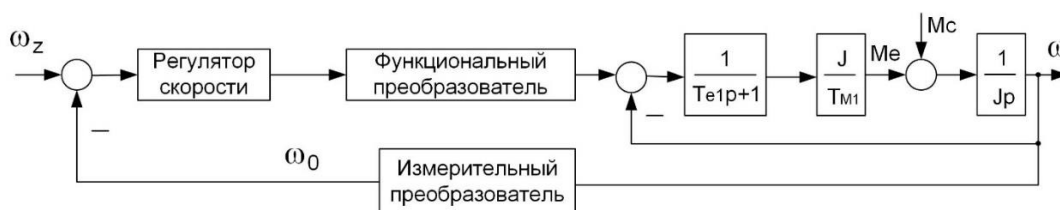


Рис. 4. Упрощенная линеаризованная функциональная схема системы автоматического управления СД

Синтез системы векторного управления, поддерживающей составляющую тока статора I_{sd} равной нулю, выполнен на основе математической модели СД при постоянном потоке ротора в системе координат (d, q) , ориентированной по магнитной оси ротора [15].

Функциональная схема системы векторного управления СД с заданием на продольную составляющую тока статора $I_{sd} = 0$ изображена на рис. 3, где ω_z , I_{dz} , I_{qz} , U_{dz} , U_{qz} - задание скорости, токов и напряжений, I_{sa} , I_{sb} , I_{sc} - токи фаз статора, U_{kd} , U_{kq} - компенсационные составляющие, g - ШИМ сигнал, поступают на АИН.

Нулевое задания тока по оси d обеспечивает направление тока статора во всех режимах работы электропривода перпендикулярно магнитной оси ротора. Преобразователь координат $abc \rightarrow dq$. Данный блок выполняет преобразование фазных токов статора СД из естественной трехфазной системы координат (a, b, c) в ортогональную синхронную систему координат (d, q) . θ_c - угловое положение ротора в электрическом пространстве, для измерения которого в схеме присутствует блок «измерительный преобразователь» [15,16].

Векторный модулятор преобразует напряжение статора, заданное в системе координат (d, q) , в импульсы управления ключами инвертора напряжения на основе метода векторного формирования ШИМ. АИН является составной частью двухзвенного преобразователя частоты со звеном постоянного тока.

Регулятор скорости (РС) обеспечивает поддержание заданной скорости вращения вала двигателя. Сигналом задания скорости является внешний сигнал, который задается пользователем или системой управления верхнего уровня. В качестве обратной связи по скорости используется сигнал, пропорциональный текущей скорости двигателя, рассчитанной с помощью измерительного преобразователя как производная от угла поворота ротора. Выходной сигнал регулятора скорости является сигналом задания момента двигателя. В данной системе реализована так называемая система подчиненного регулирования координат [16].

Динамические характеристики синхронного двигателя, работающего в режиме вентильного двигателя (бесколлекторного двигателя постоянного тока) [14] аналогичны соответствующим харак-

теристикам обычного электродвигателя постоянного тока.

Структура, составленная на основе полного линейаризованного описания СД [15] соответствует структуре описания двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (рис. 5). Скорость синхронного двигателя в этом режиме пропорциональна напряжению, приложенному к статорным обмоткам [14].

На основании математического описания [7, 17] и (1)-(3) составлена компьютерная модель электропривода пневмотранспортной системы

(рис. 6) и получены электромеханические процессы этой системы (рис. 7) средствами Matlab-Simulink.

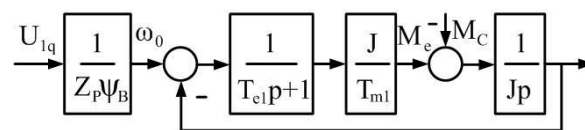


Рис.5. Структурная схема линейаризованного описания СД

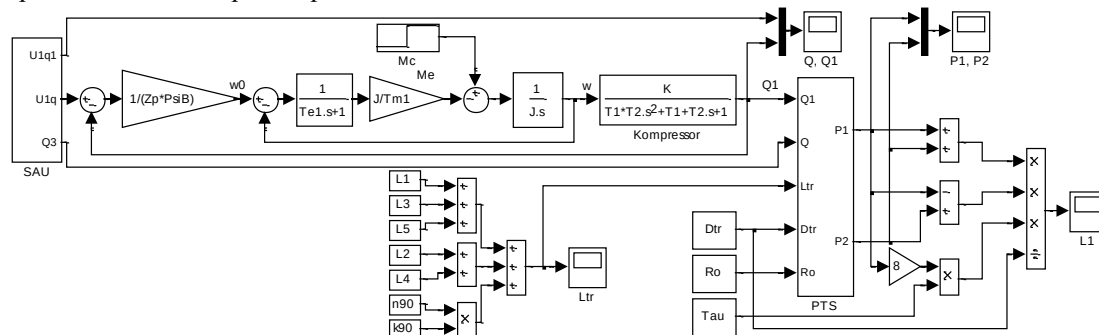


Рис. 6. Компьютерная модель электропривода пневмотранспортной системы

результаты моделирования давления на входе P_i и на выходе P_j пневмотрассы (в)

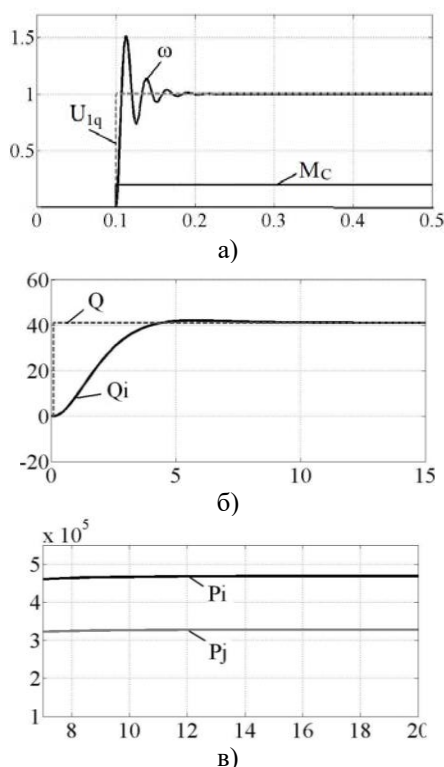


Рис. 7. Электромеханические процессы пневмотранспортной системы: переходные процессы СД с учетом приложенной номинальной нагрузки M_c (а), переходные процессы электропривода компрессора (б),

Полученные графики электромеханических процессов электропривода ПТС подтверждают адекватность разработанной математической и компьютерной моделей с погрешностью 5-7%.

Выводы. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что снижение давления на выходе ПТС уменьшает энергоэффективность системы в целом, а также может привести к появлению завалов. С целью снижения потребления электроэнергии пневмотранспортной системой предлагается осуществлять транспортировку сыпучих материалов со скоростью, обеспечивающей минимально допустимое по технологическому процессу давление.

Разработаны математическая и компьютерная модели электропривода пневмотранспортной системы, получены графики электромеханических процессов, подтверждающие её адекватность с погрешностью 5-7%. Использование названных моделей позволит сэкономить время и средства на проведение предварительных экспериментов при разработке новых и модернизации существующих ПТС.

Для более рационального использования энергоресурсов путем стабилизации давления при разработке САУ ПТС рекомендуется прогнозировать изменение ее электромеханических параметров учитывая место возможной закупки ПТС и ввести дополнительный сигнал регулирования давле-

ния, тем самым снизить потребление электроэнергии и материальные затраты, связанные с ликвидацией завалов.

References

1. Harald Wilms. Pneumatic conveying: optimal system design, operation and control pneumatic conveying. Available at: <https://www.chemenonline.com/pneumatic-conveying-optimal-system-design-operation-and-control/>.
2. Mills D. Pneumatic Conveying Design Guide. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004, 637 p.
3. Gomes L. M. & Mesquita, A. Effect of particle size and sphericity on the pickup velocity in horizontal pneumatic conveying. Chemical Engineering Science, 2013, no.104, pp. 780-789.
4. Marcus, R. D. & Leung, L. S. & Klinzing, G. & Rizk, Fadi. Pneumatic Conveying of Solids: A Theoretical and Practical Approach. Drying Technology, 1993, no. 11, pp. 859-860.
5. Hu, Shengyong & Zhou, Fubao & Geng, Fan & Liu, Yingke & Zhang, Yifan & Wang, Qingxiang. Investigation on blockage boundary condition of dense-phase pneumatic conveying in bending slits. Powder Technology, 2014, no. 266, pp. 96–105.
6. Zhang, Yifan & Zhou, Fubao & Xia, Tongqiang & Liu, Chun & Wang, Xinxin & Liu, Jun & Chen, Yazeng. Experimental Investigation on Blockage Boundary for Pneumatic Conveying of Powders in Narrow Bifurcation Slits. Drying Technology, 2015, Vol.34, pp. 1052-1062, doi: 10.1080/07373937.2015.1092157.
7. Nazarova, O.S. Experimental research and computer modeling of the obstruction occurrence in the pneumatic conveying systems peculiarities / O.S. Nazarova, I.A. Meleshko // Herald of Advanced Information Technology, 2020, Vol.3, No.1, pp. 428–439. DOI: 10.15276/hait 01.2020.9
8. Lupinos, O. N., Pylypenko, D. V., Fedun, R. V. Avtomaticheskoe upravlenie kompressornoi stanstiei ochistnih sooruzhenii [Automatic control the compressor cleansing buildings], Naukovi pratsi DonNTU, 2009, no.148, pp. 30-36.
9. Shamina, V. A. Avtomatizatsiia tehnologichnih ob'ektiv ta protsesiv. Poshuk molodih. Zbirnik naukovih prats XII naukovo-tehnichnoi konferentsii aspirantiv ta studentiv. – Donetsk, DonNTU, 2012, pp. 269-299 (in Ukrainian).
10. Truboprovod [Pipeline]. Available at: http://www.simumath.net/library/book.html?code=HYSTR_library.
11. Nazarova, O. S. Modelirovanie elektromekhanicheskikh protsesov vzaimosviazannih mnogomassovih system [Modeling of electromechanical processes of interconnected multi-mass systems] *Energia*, Tbilisi, 2019, pp. 60-64.
12. Nazarova, O. S., Osadchyy, V. V., Meleshko, I. A., & Oleinikov, M. O. Identifikaciia kutovoi shvidkosti pri zavadah v optichnii sistemi enkodera [Identification of angular velocity during interference in the optical encoder system], *Visnik NTU "KhPI"*, 2019, pp. 65-69 <http://doi.org/10.20998/2079-8024.2019.16.12>.
13. Nazarova Olena. Computer Modeling of Multi-Mass Electromechanical Systems. The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020), 2020, Vol. 2608, pp. 489-498. CEUR-WS.org/Vol-2608/paper36.pdf
14. Rudnev, E. S. & Morozov D. I. Linearizovanaia matematicheskaia model sinhronnogo dvigatelja s postoiannimi magnitami kak ob'ekta upravleniia [Linearized mathematical model of synchronous engine with permanent magnets as a control object], *Zbirnik naukovih prats DonDTU*, 2016, no.1(45), pp. 88-93.
15. Kovalechuk, D.A., Mazur A.V. Vektornoye upravleniye sinkhronnym elektrodvigatel'm [Vector control of a synchronous motor] // *Avtomatyzatsiya tekhnologichnykh i biznes-protsesiv*. – 2014. – №17. – С. 71-75.
16. Chorny O.P., Lugovoi A.V., Rodkin D.Yo., Sysuk G.Yu., Sadovoi O.V. Modelyuvannya elektromekhanichnykh system [Modeling of electromechanical systems], Kremenchuk, 2001, 410 p.
17. Nazarova, E. S., Bondarenko, V. I., & Meleshko, I. A. Issledovanie yavleniya transportnogo zapazdyvaniya v pnevmotransportnoy sisteme sypuchikh materialov [The research of transport delay occurrence in pneumatic transport system of the bulk materials] Problems of energy saving in electrical systems. Science, formation and practice. Kremenchug, 2018, no.5, pp. 27-29.

Сведения об авторах

Елена Сергеевна Назарова, кандидат технических наук, доцент, Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, nazarova16@gmail.com

Ирина Анатольевна Мелешко, аспирант, Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, iameleshko@gmail.com

Oleksii Chornyi, Valerii Tytiuk, Yuriy Zachepa, Vitaliy Kuznetsov, Mykola Tryputen, Volodymyr Nadtochy

Effect of uncertainty of the parameters of a synchronous motor mathematical model on the parametric and numerical stability of its solutions and calculation of dynamic modes

Summary. The features of modelling and research of synchronous motors have been considered by numerical calculation of their mathematical models for two cases: according to Park-Gorev equations and using the SimPowerSystems libraries of the Simulink environment of the MATLAB mathematical package. Solutions of a synchronous motor model in the simulation of solely dynamic modes have been analyzed. It has been shown that while calculating the synchronous motor models, not only quantitative but also qualitative deviations arise in the basic indicators of their dynamic modes. The simulation results have been represented.

Key words: synchronous motor, mathematical model, modelling, parameters, dynamic modes.

Introduction. Synchronous motor (SM) is the most complex object in terms of mathematical modelling. The complexity is stipulated not by the order of differential equation of a model or complex nonlinear relations (the mentioned can be solved in one or another way) but by the fact that the model means the availability of numerous parameters: active and inductive resistances, transient and subtransient resistances, mutual inductance of windings, time constants; moreover, it is impossible to know all those parameters for sure. Nowadays there is great amount of different methods and methodologies for calculating the parameters of SM models but they require certain initial parameters of the equivalent circuit, e.g. at least inductive resistances along the longitudinal and transversal axes, inductive dispersion resistance of stator winding and field winding. Among other things, the reference literature gives mostly the general data – motor rating in terms of its operating mode. That is the reason why calculation of the SM models involves not only quantitative but also qualitative deviations in main parameters of their dynamic modes. The indicated features are to be known and understood along with the understanding of their nature of occurrence and methods/means of their consideration. The research objective is to study parametric and numerical stability of the solutions of a mathematical model of synchronous motor in terms of uncertainty of its parameters and their effect on the calculations of dynamic modes.

Materials and research results. Nowadays, there are great deal of SM models of different structures and operating conditions as well as the ones taking into account saturation, magnetization etc. However, despite numerous scientific papers dealing with modelling, among which [1–4] are the most well-known ones, there is no universal model for engineering calculations of SM operation in static and dynamic modes. That is explained not by the complexity of the model equation solution (modern mathematical methods make it possible to do that easily) but by the uncertainty of the model parameters. There is a well-known mathematical description of the SM model in three-phase coordinate system [5]. However, no general model is known to be implemented in terms of any software environment,

including MATLAB, due to the complexity of determining the winding parameters: proper and mutual inductivities between stator and rotor windings.

Transfer to the system of Park-Gorev equations can simplify in a way the problem of SM model solving [5, 6], e.g. for equations with equal mutual inductivities [7]:

$$\vec{U} = R\vec{i} + L \frac{d\vec{i}}{dt} + \omega_r L_z \vec{i},$$

where $\vec{U} = [U_d \ U_q \ U_f \ 0 \ 0]^T$, $\vec{i} = [i_d \ i_q \ i_f \ i_{ed} \ i_{eq}]^T$;

$$R = \begin{bmatrix} R_d & & & & \\ & R_q & & & \\ & & R_f & & \\ & & & R_{ed} & \\ & & & & R_{eq} \end{bmatrix}; L = \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_d & M_d & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & M_q \\ M_d & 0 & L_f & M_d & 0 \\ M_d & 0 & M_q & L_{ed} & 0 \\ 0 & M_q & 0 & 0 & L_{eq} \end{bmatrix};$$

$$L_z = \begin{bmatrix} 0 & -L_q & 0 & 0 & -M_q \\ L_d & 0 & M_d & M_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

ω_r is angular velocity of rotor spinning; $R_d, R_q, R_f, R_{ed}, R_{eq}$ are active resistances of stator windings along axes d, q , of field and damper windings along axes d, q ; $L_d, L_q, L_f, L_{ed}, L_{eq}$ are proper inductivities of stator windings along axes d, q , of field and damper windings along axes d, q ; M_d, M_q are the mutual ones between the windings along axes d, q ; U_d, U_q is voltage of stator windings along axes d, q ; and $i_d, i_q, i_f, i_{ed}, i_{eq}$ are currents of stator windings along axes d, q , of field and damper windings along axes d, q .

Electromagnetic moment is equal to:

$$M_e = U_d i_d + U_q i_q - R_s (i_d^2 + i_q^2).$$

Equation of rotor motion is:

$$T_j \frac{ds}{dt} = M_e - M_R;$$

$$\omega_r = \omega_s (1-s),$$

where T_j is time constant; M_R is moment of resistance;

s is slip; and ω_s is angular velocity of field rotation.

To simplify practical modelling, it is possible to use the SM equations represented in relative units, operating not with inductivities and mutual inductivities but with inductive resistances. Currently, basic values for the equation of stator windings are generally accepted; in case of rotor windings, different authors have their own values. While reducing the rotor values to relative units, so-called "system of units x_{ad} " or system of equal mutual inductivities is the most widely used one. Nevertheless, a problem of defining the values

of uninductive resistances has not been completely solved yet. Practically no reference books or catalogues with motor rating from the manufacturers can help do that. Table 1 will show the characteristics of the CDH series motors of 6000 V, 50 Hz as the example of the data represented in reference sources [8].

Table 1 demonstrates that the given information is not enough for modelling; thus, some data are calculated in terms of the represented data while others are calculated according to the empirically identified range of their variations. In this case, only researcher's experience can help select the most reasonable data.

Tables 2–3 show some ratios and ranges of variations of main parameters of the SM equivalent circuit [9].

Table 1 – Characteristics of the CDH series motors of 6000 V, 50 Hz

Nominal size of a motor	Power, kW	Stator current, A	$\cos \varphi$	Efficiency, %	Rotation frequency, rot/min	$\frac{M_{\max}}{M_{\text{nom}}}$	$\frac{I}{I_{\text{nom}}}$	$\frac{M}{M_{\text{nom}}}$	$\frac{M_s = 0.05}{M_{\text{nom}}}$
CDM3-2-22-34-60Y4	1600	185	0.85	93.6	100	2.8	6.3	1.2	1.3
CDM3-2-22-41-60Y4	2000	229	0.85	94.3	100	2.8	6.3	1.1	1.3
CDM3-2-24-59-80Y4	4000	451	0.90	95	75	3.6	9.0	1.2	1.3

Table 2 – Approximated values of the parameters of synchronous machines

Name	Turbo-generator (two-pole)	Salient-pole generators and motors with damper windings	Salient-pole generators and motors without damper windings	Synchronous compensators
E''	1.08	1.13	1.18	1.2
X''_d	0.21 _(0.13...0.35)	0.24 _(0.13...0.35)	0.35 _(0.2...0.45)	0.25 _(0.18...0.38)
X'_d	0.32 _(0.236...0.421)	0.37 _(0.2...0.5)	0.35 _(0.2...0.45)	0.4 _(0.25...0.4)
X''_q	0.22 _(0.192...0.286)	0.75 _(0.4...1.0)	0.75 _(0.4...1.0)	1.25 _(0.7...1.5)
X_2	0.26 _(0.18...0.349)	0.24 _(0.13...0.35)	0.55 _(0.3...0.7)	0.24
X_0	0.11 _(0.077...0.16)	0.02...0.2	0.04...0.25	0.24 _(0.02...0.15)

where X''_d , X'_d , X''_q , X_2 , X_0 are reactivities in relative units

Table 3 – Base values in the theory of synchronous machines

Name	Designation	Claculation formula	Numerical value	Measure unit
Voltage	U_b	$U_b = U_{f.N}$	$230 / \sqrt{3} = 133$	V
Current in the armature winding	I_b	$I_b = I_{f.N} = I_{l.N} / \sqrt{3}$	$19.4 / \sqrt{3} = 11,2$	A
Power	S_b	$S_b = 3U_b I_b$	4468.8	VA
Resistance	Z_b	$Z_b = U_b / I_b$	11.87	Ohm
Current in the field winding	$I_{ex.b}$	$I_{ex.b} = I_{ex.0}$	5.7	A
Rotation frequency of armature	n_b	$n_b = n_N = 60 f_1 / p$	1500	rot/min

Additional parameters may be found according to

Table 4. In terms of modern synchronous salient-pole

machines of medium and high capacity, $X_d = 0.6-1.6$ and $X_q = 0.4-1.0$. Resistance X_d is defined mostly by the armature reaction since a relative value of inductive

resistance stipulated by the dispersion flow is low $X_\sigma = 0.1-0.2$.

Table 4 –Parameters of synchronous machines

Parameters	Turbo-generators		Salient-pole generators and motors		Synchronous compensators
	Two-pole	Four-pole.	with damper windings	without damper windings	
X_d	$\frac{1.6}{0.9-2.0}$	$\frac{1.2}{0.9-1.5}$	$\frac{1.2}{0.7-1.6}$	$\frac{1.2}{0.9-1.6}$	$\frac{1.8}{1.5-2.2}$
X_q	$\frac{1.35}{0.85-1.9}$	$\frac{1.5}{0.85-1.45}$	$\frac{0.75}{0.45-1.0}$	$\frac{0.75}{0.45-1.0}$	$\frac{1.1}{0.9-1.4}$
X'_d	$\frac{0.24}{0.14-0.34}$	$\frac{0.24}{0.20-0.28}$	$\frac{0.37}{0.20-0.50}$	$\frac{0.35}{0.20-0.45}$	$\frac{0.40}{0.30-0.60}$
X''_d	$\frac{0.15}{0.10-0.24}$	$\frac{0.15}{0.12-0.17}$	$\frac{0.22}{0.13-0.30}$	$\frac{0.30}{0.18-0.40}$	$\frac{0.25}{0.18-0.38}$
X_0	0.01-0.08	0.015-0.14	0.02-0.20	0.04-0.25	0.02-0.25
X''_q	$(1.0-1.3)X''_d$	–	$(1.0-1.1)X''_d$	$2.3X''_d$	X''_d
X_2	$1.22X''_d$	$1.22X''_d$	$1.05X''_d$	$(1.4-1.6)X''_d$	X''_d
T_{d0}	$\frac{5.5}{3-12}$	$\frac{6.2}{4.0-9.2}$	$\frac{5.6}{2.0-9.0}$	$\frac{5.6}{2.0-9.0}$	$\frac{8.0}{5.0-14.0}$
T'_d	$\frac{0.7}{0.4-1.6}$	$\frac{1.1}{0.9-1.6}$	$\frac{1.3}{0.8-2.5}$	$\frac{1.3}{0.8-2.5}$	$\frac{1.5}{1.0-2.8}$

In terms of nonsalient-pole machines of medium and high capacity, the resistance is usually $X_{cn} = 0.9-2.4$. Resistances expressed in relative units characterize the machine parameters demonstrating relative (as for nominal voltage) value of voltage drop in terms of nominal current. In addition, those values help compare the properties of generators with different capacities. Sometimes the machine certificate indicates the value being inverse to X_d and called a short circuit ratio: $SCR = 1/X_d$. That ratio characterizes the value of stable short circuit current $I_{fuse.n} = SCR \cdot I_n$ occurring in terms of nominal current of the generator excitation (corresponding to the nominal voltage). In terms of the aforementioned values X_d and X_q , $SCR = 0.5-1.0$ for nonsalient-pole machines, and $SCR = 0.8-1.8$ for the salient-pole ones. Transient time constant $T'_d = 0.4-3.0$ s, determining current attenuation $I_{fuse.p}$, depends not only on the parameters of armature winding but mostly on the parameters of field winding. If a machine has damper winding, then transient current occurs in it as well, decelerating the resulting current decrease. In this context, amplitude of short circuit current is higher than in terms of nonavailability of damper winding $I'_{fuse} = E_m / x''_d$, where $x''_d = 0.12-0.35$ is subtransient inductive resistance along the longitudinal axis. Attenuation of the armature current is determined by the subtransient time constant $T''_d = 0.03-0.15$ s, which depends mainly on the damper

winding parameters. Since EMFs in the armature winding phases are shifted in time, they have different start angle α_0 ; consequently, they also have different phase currents within the transient period. Moreover, periodical components of currents in the armature phases generate a spatially fixed magnetic field, which crosses the spinning rotor. Due to that, periodical EMFs and currents occur within the rotor winding. As the rotor is asymmetric along the longitudinal and transversal axes (because of different values of air gap in the salient-pole machines and due to the fact that there is a field winding within the longitudinal axis), a variable component of double frequency occurs in the aperiodic armature current.

Table 4 also contains following designations: X''_q is the transverse subtransient inductive resistance of the armature winding; $T_a = (X''_d + X''_q) / (\omega R_a)$ is the time constant of aperiodic armature current.

Table 4 brings together the values calculated in terms of the catalogue data and the formulas for calculating the data for modeling. Below there are exact values of the parameters of a synchronous motor being modelled.

Table 5 represents the calculation data for a synchronous motor which determination involves three methods: method 1 – [1], method 2 – [10], and method 3 – [11].

Analysis of parametric stability of the solutions of the SM mathematical model

Earlier, the authors have demonstrated that

modelling of electric machines may be influenced by the modelling method [12] with the involvement of transfer functions by solving a system of differential equations or even by using specialized mathematical packages for modelling.

First, study the parametric stability of the solutions

of the SM mathematical model in terms of the MATLAB mathematical package involving the DEE element (Fig.1) that helps solve a system of mathematical equations written in Cauchy form developed according to Park-Gorev equations.

Table 5 – Claculation data of a synchronous motor

Name	Method 1	Method 2	Method 3
Active resistances of a stator and field winding, Ohm	$r_a = 0.016 \frac{U_n}{P_n}$	–	$r_a = 0.002..0.008$
	$r_f = \frac{I_n^2 R_f}{3U_f I_n}$	–	–
Transient inductive resistance, r.u.	$x_d' = 0.1..0.5$	$x_d' = \frac{0.24}{0.14..0.34}$	$x_d' = 0.2..0.4$
Subtransient inductive resistances, r.u.	$x_d'' \approx 0.13..0.35$	$x_d'' \approx \frac{0.15}{0.10..0.24}$	$x_d'' \approx 0.12..0.3$
	$x_q'' \approx 0.13..0.35$	$x_q'' \approx (1.0..1.3)x_d''$	$x_q'' \approx 0.12..0.3$
Longitudinal and transversal inductive resistances of a rotor, r.u.	$x_{ad} \approx 0.5..1.8$	$x_{ad} \approx 2\pi f \psi_{ad} / i_d$	$x_{ad} \approx 1.1..2.5$
	$x_{aq} \approx 0.3..0.9$	–	$x_{aq} \approx 1.1..2.5$
Inductive dispersion resistance, r.u.	$x_\sigma \approx 0.1..0.3$	–	–
Inductive resistances of a stator and rotor, r.u.	$x_d = x_\sigma + x_{ad}$	$x_d \approx \frac{1.6}{0.9..2.0}$	$x_d \approx 1.2..2.75$
	$x_q \approx x_\sigma + x_{aq}$	$x_q \approx \frac{1.35}{0.85..1.9}$	$x_q \approx 1, 2..2, 75$
Inductive dispersion resistance of a field winding, r.u.	$x_{\sigma f} \approx 0.1..0.3$	–	–
Inductive resistances of a damper winding along the longitudinal and transversal axes, r.u.	$x_{ed} = x_{ad} + x_{\sigma ed}$	–	–
	$x_{eq} = x_{aq} + x_{\sigma eq}$	–	–

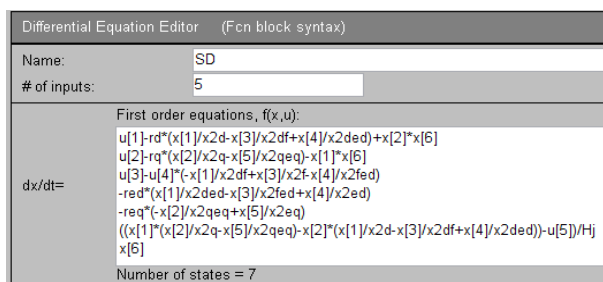


Fig. 1. DEE unit with specification of the synchronous motor equations

Effective parameters of the SM windings in relative units, for which the modelling is performed, have following values: $r_d = 0.01$, $r_q = 0.01$, $r_f = 0.0022$, $r_{ed} = 0.057$, $r_{eq} = 0.024$, $x_d = 1.4746$, $x_q = 0.8116$, $x_{ad} = 1.274$, $x_{aq} = 0.655$, $x_c = 0.125$, $x_{ed} = 1.28$, $x_{eq} = 0.712$, $x_f = 1.356$, $u_f = 0.0115$, $H_j = 500$.

Consider dynamic process of the SM starting for the parameters corresponding to: the certified values (Table 5); the average value of the data variation range (Table

5); the left-hand limit of the data variation range (Table. 5); and the right-hand limit of the data variation range (Table. 5).

According to the obtained results, uncertainty of the SM parameters while modelling along with the following forced setting of their approximated values results in the quantitative changes in the dynamic modes. For instance, that is the increased oscillating nature of the processes while specifying the parameters in terms of average value or even obtaining a negative result like during the specification of the parameters corresponding to the left-hand limit of the values of data variation range.

Thorough analysis of the methods for SM parameters calculation as well as the modeling results shows that they depend considerably on the accuracy of specification of inductive dispersion resistance x_c .

Consider the changes in main characteristics of dynamic modes in terms of changes in inductive dispersion resistance x_c within the range of (0.1..0.3) (Table 5) in terms of unchangeable x_{ad} , x_{aq} , being

equal to the certificate parameters: $x_{ad} = 1.274$, $x_{aq} = 0.655$. The research results are shown in Fig. 2.

Analysis of the stability of the obtained solution for SM models in MATLAB

A problem of the stability of the obtained solutions has been already considered in a fairly complete manner in different technical literature [13–15].

However, that concerned mostly a model obtained on the basis of Park-Gorev equations. Development of

the MATLAB element and library basis has resulted in the fact that the users and researchers (undergraduates and postgraduates) are using progressively SimPowerSystemsMatlab. In this context, few researchers pay attention to the constraints of some models, which are mentioned by the developers of those models in their Help-files.

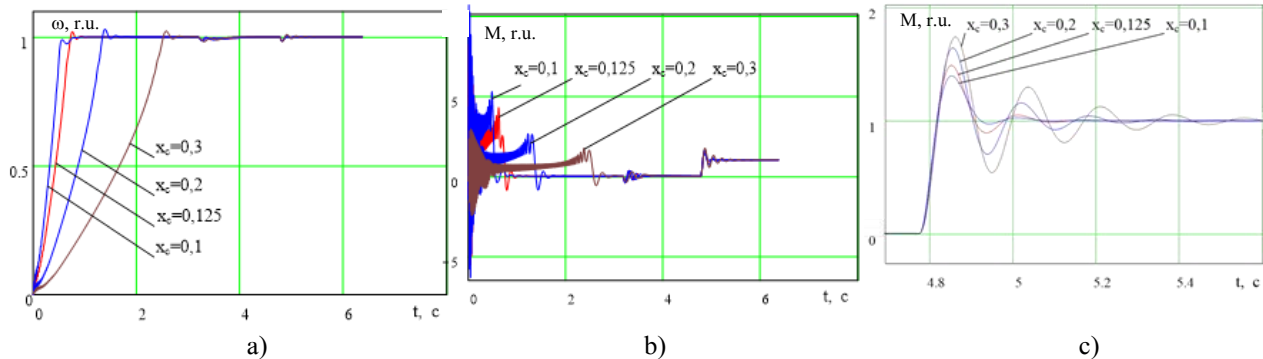


Fig. 2. Processes of SM starting in terms of changing inductive dispersion resistance: a) change in angular velocity, b) change in electromagnetic moment, c) change in electromagnetic moment in terms of nominal loading surge

However, they sometimes even do not mention that; consequently, the obtained results are hard to analyze and even draw the corresponding conclusions. Thus, study the stability of the obtained solutions for the SM model on the basis of library element.

Take into consideration that the processes in SM are sensitive to the accuracy of parameters determination; thus, use the parameters of the SM library element: 60 kVA, 400 V, 50 Hz.

The SM model is supplied by a three-phase symmetric voltage but internal structure is built on the equations in “dq” coordinates.

The model is described in detail in helpmodel [16]. However, one should pay attention to the fact that the developers specify “Discrete” as the integration method, indicating that other variants are possible as well: “Trapezoidalnoniterative” (installed on default) or “Trapezoidaliterative” (alg. loop). That is why we should study the parameters of the obtained solution for different numerical methods or SM parameters installed by the model developers (Fig.3). A model for consideration is developed in the form of a structural scheme (Fig. 5). Carry out the study for the proposed numerical methods (Fig.4).

In this context, take all parameters of numerical integration as the standard ones (on default): integration step, absolute error, relative error, and other adjustment functions (Fig.6). Fig. 7 show the time processes of changes in the SM coordinates with the indicated numerical methods.

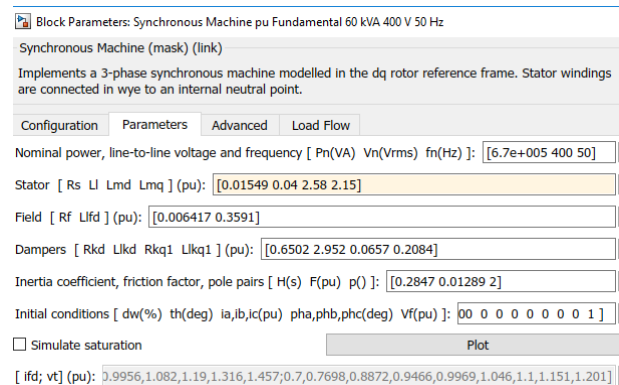


Fig. 3. Window for the SM parameters entry



Fig. 4. Window of selection of a numerical method to integrate differential equations of the SM model

Consider the solution stability in terms of oscillating SM parameters. As it has been mentioned before, insignificant changes are used for inductive dispersion resistance of SM stator winding – x_{σ} at the level of $\pm 10\%$, corresponding changes will take place in other parameters as well: such as x_{ad} , x_{aq} etc.

Figures 8–9 demonstrate the research results.

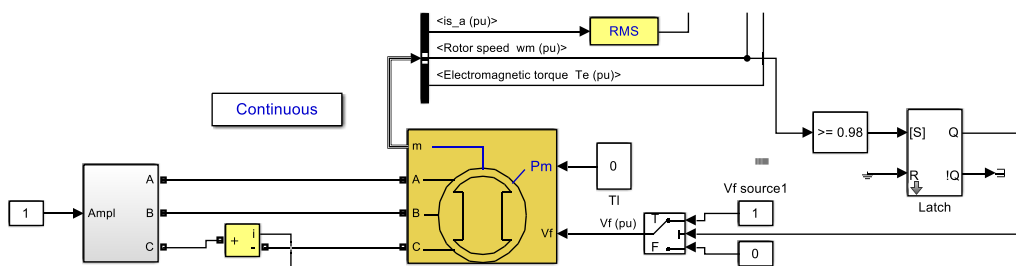


Fig. 5. Structural scheme of the SM model

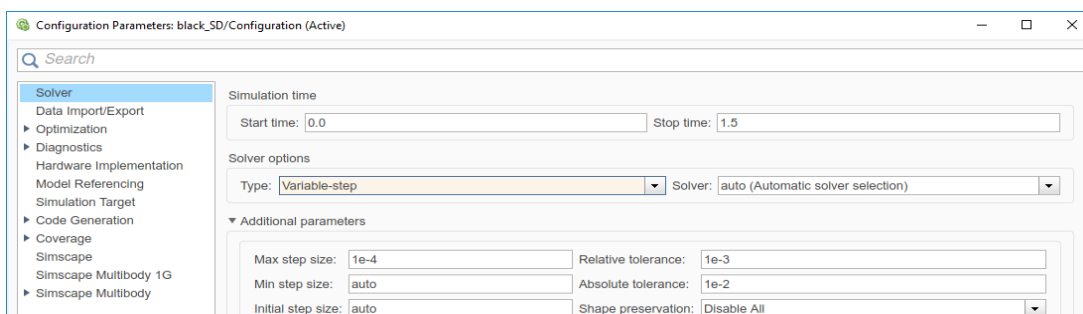


Fig. 6. Window of the adjustment of integration parameters and generation of model solving

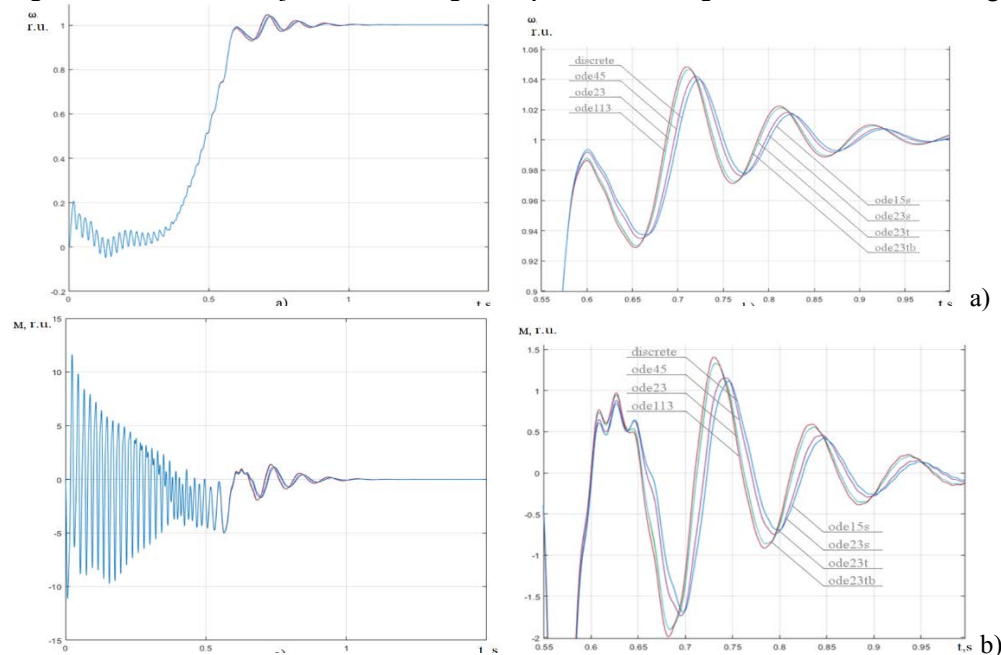


Fig. 7. Time change in the SM angular velocity – a) and electromagnetic moment – b) while SM starting for different methods of model integration: starting and starting fragment

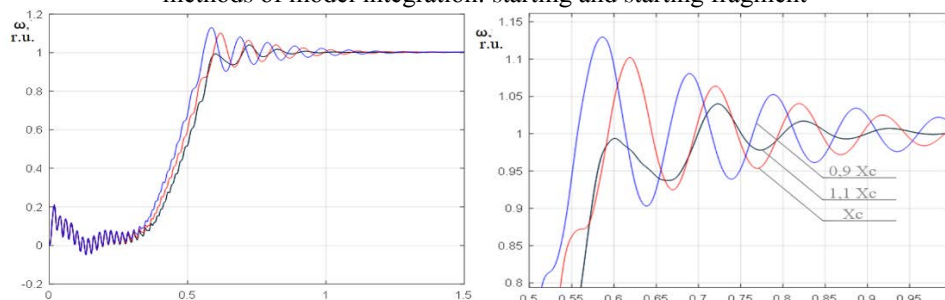


Fig. 8. Time change in the SM angular velocity while SM starting in terms of different values of inductive dispersion of the SM stator winding: starting and starting fragment

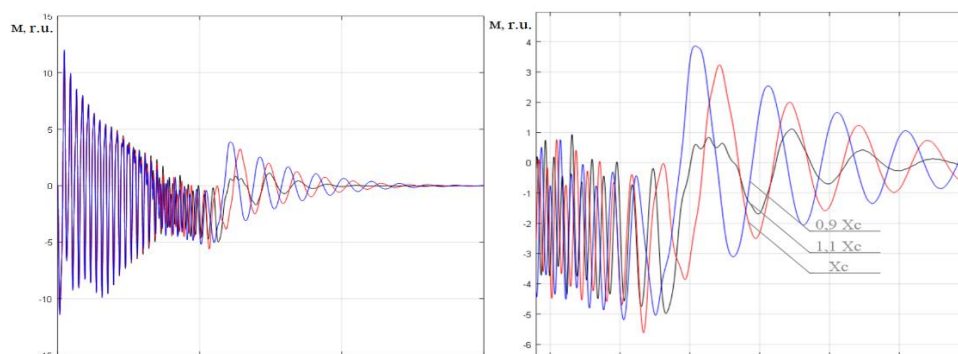


Fig. 9. Time change in the SM electromagnetic moment while SM starting in terms of different values of inductive diffusion of the SM stator winding: starting and starting fragment (AVM). Moscow: Vysshaya shkola. [in Russian]

Conclusions. Solutions of the SM model written in Park-Gorev equations have been studied. While calculating the SM parameters, there may be not only quantitative but also qualitative deviations in main parameters of their dynamic modes. Analysis of the calculation methods shows that there are considerable deviations in the parameters if the exact initial values are not known. That may result in great differences in calculated dynamic processes obtained under such conditions in terms of uncertain motor parameters even under the deviated parameters within the range of admissible values. The only way to increase the calculation accuracy and approximation of the obtained processes to the real-motor processes is to specify accurate data in the models. That is especially true concerning the inductive dispersion resistance, which has the greatest effect on the qualitative and quantitative results of modelling.

Selection of a certain numerical method does not affect considerably the processes for the SM model. However, that is true only for the models not containing the functions like “sign” or others with simple discontinuities. Modelling accuracy may be improved in “ConfigurationParametersblackSD” of the corresponding “Maxstepsize” for the methods with changeable integration step as well as by reduction of “Relativetolerance” and “Absolutetolerance”.

The indicated features should be known and understood along with the understanding of their nature of occurrence and methods and means of their consideration.

REFERENCES

1. Chorniy, O. P., Lugovoj, A. V., Rodkin, D. Y., Sysjuk, G. Ju., & Sadovoj, O. V. (2001). *Modeljuvannja elektromechanichnyh system: pidruchnyk* [Modeling of electromechanical systems: a textbook]. Kremenichuk. [in Ukrainian]
2. Sipaylov, G. A., & Loos, A. V. (1980). *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin (AVM)* [Mathematical modeling of electric machines

3. Kopylov, I. P. (2001). *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electric machines]. Moscow: Vysshaya shkola. [in Russian]

4. Basharin, A. V., & Postnikov, Yu. V. (1990). *Primery rascheta avtomatizirovannogo elektroprivoda na EVM* [Examples of the calculation of an automated electric drive on a computer]. Leningrad: Energoatomizdat. [in Russian]

5. Vazhnov, A. I. (1980). *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transient processes in AC machines]. Moscow: Energiya. [in Russian]

6. Chernykh, I. V. (2017). *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electrotechnical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMK Press Litres. [in Russian]

7. Strizhkov, I. G. (2012). Osnovy teorii sinkhronnykh mashin s neskolkimi obmotkami na statore. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 10 (84), 469–507. URL: <http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/36.pdf>

8. Kopylov, I. P. (1988). *Spravochnik po elektricheskim mashinam: v 2 t* [Handbook of electrical machines: in 2 t]. Moscow: Energoatomizdat. [in Russian]

9. *Tochnoe i priblizhennoe privedenie v otnositelnykh edinitsakh* [Accurate and approximate reduction in relative units]. URL: <http://mybiblioteka.su/1-97430.html>

10. Sipaylov, G. A., Kononenko, E. V., & Khorkov, K. A. (1987). *Elektricheskie mashiny (spetsialnyy kurs)* [Electric machines (special course)]. Moscow: Vysshaya shkola. [in Russian]

11. Zabudskiy, E. I. (2008). *Z12 Elektricheskie mashiny. Ch. 3. Sinkhronnye mashiny* [Z12 Electric machines. Part 3. Synchronous machines]. Moscow: MGAU. [in Russian]

12. Chorniy, O. P., Tolochko, O. I., Tityuk, V. K., Rodkin, D. Y., & Chekavskiy, G. S. (2016).

Matematichni modeli ta osoblivosti chiselnikh rozrakhunkiv dinamiki elektroprivodiv z asinkhronnimi dvigunami [Mathematical models and peculiarities of numerical calculations of dynamics of electric drives with asynchronous engines]. Kremenichuk: PP Shcherbatikh O. V. [in Ukrainian]

13. Chorniy, O. P., & Tityuk, V. K. (2013). Osoblivosti doslidzhennya modeley sistem elektroprivodu u SimPowerSystems z klyuchovimi elementami. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*, 3 (23), 33–48.

14. Chorniy, O. P., & Tityuk, V. K. (2013). Osoblivosti doslidzhennya modeley elektroprivodiv z asinkhronnimi dvigunami pri zhivlenni ikh vid peretvoryuvachiv z shirotno-impulsnoyu modulyatsieyu

vikhidnoi naprugi. *Inzhenerni ta osvutni tekhnologii v elektrotekhnichnikh i kompyuternikh sistemakh*, 3 (3). URL: eetecs.kdu.edu.ua

15. Chorniy, O. P., Burdilna, E. V., Romanov, O. Yu., Tityuk, V. K., Pozigun, O. A., & Berday, Abdelmashid. Osoblivosti chiselnogo rozvyazku sistem diferentsialnikh rivnyan modeley elektromekhanichnikh sistem u programnomu seredovishchi Matlab. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*, 2 (38). 33–48.

16. Starting a Synchronous Motor. URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/starting-a-synchronous-motor.html>

About the Authors

Oleksii Chorniy, Doctor of Science, Director of the Educational and Scientific Institute of Electromechanics, Energy Saving and Control Systems, Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenichuk, Ukraine, e-mail: alekseii.chorniy@gmail.com

Valerii Tytiuk, Doctor of Science, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, e-mail: dinalt2006@gmail.com

Yuriy Zachepa, PhD, associate professor, Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenichuk, Ukraine, e-mail: zip1981@ukr.net

Vitaliy Kuznetsov, PhD, associate professor, National metallurgical academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine, e-mail: wit1975@i.ua

Mykola Tryputen, PhD, associate professor, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: nikolay.triputen@gmail.com

Volodymyr Nadtochy, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

Alla Drankova, Mykola Mukha

Electromechanical Systems Laboratory for the Study Shipboard Variable Frequency Drives

Annotation. *The paper presents a laboratory complex of the modern electromechanical systems created at the National University «Odessa Maritime Academy», which use in scientific research of the variable frequency drives (VFD) and in the master's and bachelor's programs of the preparing shipboard electro-technical officers. The presented laboratory complex also allows study of the power quality of autonomous electrical systems, which include autonomous generating sets and modern electric drives with voltage and frequency converters. The laboratory also studies methods of increasing the energy efficiency of autonomous power systems by means of a variable frequency drive.*

Keywords: *electromechanical systems laboratory, variable frequency drives, master's and bachelor's programs, experimental research*

I. INTRODUCTION

The issues of energy efficiency and electric power quality for shipboards are very important when for one side reducing the amount of emissions into the atmosphere is one of the main concerns of the shipping industry today and second side an available great progress in implementation of the modern controlled electric drives of bow thrusters, propulsions, cargo cranes, mooring winches, pumps, fans and other.

Shipboard electric power systems are an autonomous power system, have distinctive features that influence their static operational characteristics and dynamic transients, which should consider in the design and operation. The commensurability of ship generators and high-power electric drives is leads to more severe transient modes and the danger of a power electric plants de-energizing [1,2].

Electromagnetic disturbances observed in autonomous power electric systems are more serious than observed in shore systems in their operation modes.

Effects of incorrect systems operation can be profoundly serious [3]. Therefore, question of the harmonic disturbances determining electric energy quality in ship's power systems has not only technical aspect, but also determines the safety of the ship's operation. The low quality of the shipboard electrical energy has its own economic and environmental aspects.

Reducing energy costs per unit of cargo transportation and reducing the amount of emissions into the atmosphere is one of the main concerns of the shipping industry today. Therefore, the development of an energy-efficient strategy for the operation of sea and river transport is a priority and relevant investigation, and an energy effectiveness of the vessel should be a part of the design and construction criteria for ships.

At present in the shipboard energy flow "generation - consumption of electricity" the potential for improving energy efficiency is use only to a small extent. The specificity of improving energy efficiency in this complex is the significant saving of primary fuel resources by reducing power consumption.

Undesirable losses occur during the production, distribution, conversion and use of electricity in the ship's autonomous electrical system. In addition, ship electricity consumers mainly have an active inductive load, that is, the total current of generators, transformers and cable lines should increase relative to the required active load

by a value that is inversely proportional to the value of the power factor, which is proportional to the increase in the number of electricity consumers. Therefore, generating plants must provide additional reactive power, which, in turn, reduces their efficiency due to the increased fuel consumption of primary engines (diesel engines).

Thus, one of the ways to increase an energy efficiency of the ship's operation and reduce a power consumption along with improving the operation modes of the ship's propulsion and optimizing the operation of an auxiliary equipment and mechanisms is a develop of managing methods of the shipboard electrical energy flows.

In our opinion, there are two ways to solve this problem. This determines two areas of research into this problem: 1) optimal control of the electrical energy flow at the stage of its generation and distribution; 2) optimization of energy flows at the consumption stage, i.e. at the stage of electromechanical electricity conversion.

The main research results associated with the 1-st area presented in our papers [4-6]. A new solution of the scientific-applied problem of increasing the energy efficiency of shipboard autonomous electric power systems by means of dynamically compensating reactive power in the load circuit (as a function of changing the load reactive conductivity) made it possible to increase the speed and accuracy of the reactive power compensation in transient operational modes and voltage stability of an autonomous ship electrical system. This allowed to generally reduce energy consumption and carbon dioxide emissions into the atmosphere from the vessel.

The best solution to the problem of designing a new-builds ships with a more energy efficient option is the potential for reducing the size of the shipboard power plant, which can operate with power factor close to unity.

Based on the given values of the generating plants efficiency [7], we can conclude that saving one unit of electricity at the consumption stage allows saving up to five units of conventional primary fuel.

Therefore, in our opinion, the 2-nd strategic direction of research, which is associated with a more efficient use of electrical energy, is reasonably arguable. Moreover, if you keep in mind that the component of the total generated energy, which converted using vessel's electromechanical systems, is more than 90%. Accordingly, the introduction of energy-efficient electromechanical systems has the potential to reduce electricity consumption by more

than 10-15% of the total generated and is one of the priority areas for increasing the vessel's energy efficiency.

A modern variable frequency drive (VFD) is becoming an integral part of ship systems and complexes [8], where energy-efficient and resource-saving technologies are widely used. Therefore, the study and research of such electric drives for various applications with a typical load of ship mechanisms is an actual task.

This work belongs to the second direction of research and represents a laboratory complex for performing experimental studies of variable-frequency electric drives.

Given the importance of this issue for the master's program our cadets and research, we would like to present our experimental installation and experience gained.

The aim of this work is to create a laboratory installation for studying and testing a control laws, evaluating the energy parameters of an adjustable electric drive of ship's electromechanical systems with a typical load.

II. OPPORTUNITIES AND TASKS OF THE LABORATORY

An experimental research complex has been created in the laboratory of electromechanical systems for the study of ship's frequency-controlled electric drives with typical loads (see fig. 1, 2), [5, 6, 9].

For study the frequency-control laws of VFD and their impact on the operational efficiency of shipboard electric power systems, and for the studying the technical means and methods of ensuring the electric power quality of an autonomous electric network used the electronic multi-measuring device (model ME96SSRA-MB), and related software EMU4-sw1 of Mitsubishi Electric.



Fig. 1. View of the control part of the laboratory installation: 1 – PLC series IQ-R; 2 – Servodrive Amplifier MR-4J; 3 – PLC series FX3U64M; 4 – HMI GOT-1575; 5 – PLC Alpha2; 6 – Speed Sensor; 7 – Asynchronous Motor – DC Generator Aggregate; 8 – Solid State Relay (switches); 9 – Manual Setting Load Range; 10 – DC Generator Load Simulator (6 stages of load resistor)

Typical load simulators for the studied induction motors were either a direct current generator with independent excitation (Fig. 1, aggregate 7), or the same frequency-controlled asynchronous motor (Fig. 2, aggregate 5).

Switching of the load resistors 10 of the generator G1 and, accordingly, the loads of the asynchronous motor M1 were performed according to the algorithm that provides the typical nature of the load of ship mechanisms (for example, fans, turbopumps), which was implemented using PLC Alpha2 5, electronic solid state relays 8 and speed sensor 6, [9].

Autonomous power supply of the laboratory installation was provided from two brushless synchronous generators (3 kW of each), which simulate the shipboard autonomous power electric system comparable power with the studied electric drives.

A short list of experimental research and training tasks that can solved based on the laboratory equipment, as follows:

- studying of the power electric quality of an autonomous power supply network in the operating modes of electric drives of shipboard mechanisms with a typical load and using frequency converter (FC);



Fig. 2. Frequency converters with asynchronous motors: 1 – Electronic Multi-measuring Device ME96SSRA-MB; 2 – Inverter FR-F840-E2; 3 – Inverter FR-A740; 4 – Current Transformers (output side of FC); 5 – Two Asynchronous Machines Aggregate (1.5 kW)

- research of methods, schematic solutions, and technical means of improving the power quality with implementing passive and active filtering;
- the study of the principles, algorithms, and control laws of shipboard electric drives and electromechanical complexes supplied from autonomous power network;
- the study of methods and techniques, software, and hardware for conducting experimental research, methods and technologies for processing and visualization of research results;
- studying the induction motors conditions, diagnostic of most typical motors fault types and estimation basing on the analysis of power consumption signal under operating modes [7];
- studying the energy-efficient modes of an electromechanical systems operation with a typical ship load;
- configuration and application of the standard communication apparatus on the example of hardware and software of Mitsubishi Electric;
- using of an experimental research results in master's diploma thesis, as well as in the department research works.

III. MAIN PART

Functional schematic diagram of the laboratory installation for the study of asynchronous electric drives with frequency converters FR-A740 and FR-F840 shown in Fig. 3.

The measuring equipment of the laboratory and the related software are a helpful instrument for research work,

provides convenient opportunities for receiving and presenting research results.

MMI block includes the multi-measuring device ME96SSRA-MB [10], an oscilloscope ExtechMS420, which provide measure and record electrical energy parameters, power quality indicators, and their time and phase dependencies.

In the installation presented, the power supply parameters of the FC (input parameters) and the load parameters (output parameters of the FC) were measured with the ME96SSRA-MB device using current and voltage transformers. Current, voltage, active power, reactive power, apparent power, power factor and frequency are measured. In addition, it can measure harmonics (current and voltage) and count active energy (imported and exported) and reactive energy (imported lag, imported lead, exported lag, exported lead). It can expand the remote I / O function to ModBus RTU communication, which provides visualization on the HMI (GOT2000). This allows to effectively manage, control and monitor research processes. The GOT2000 can be easily integrated with other Mitsubishi Electric devices such as PLCs, inverters or motion control systems for complete automation and training.

Modelling of the VFD operating modes is carried out using a two-machine unit, consisting of two identical induction electric motors, each with a power of 1.5 kW and connected by a coupling. In the frequency converters that power these motors (see Fig. 3), the DC circuits are interconnected.

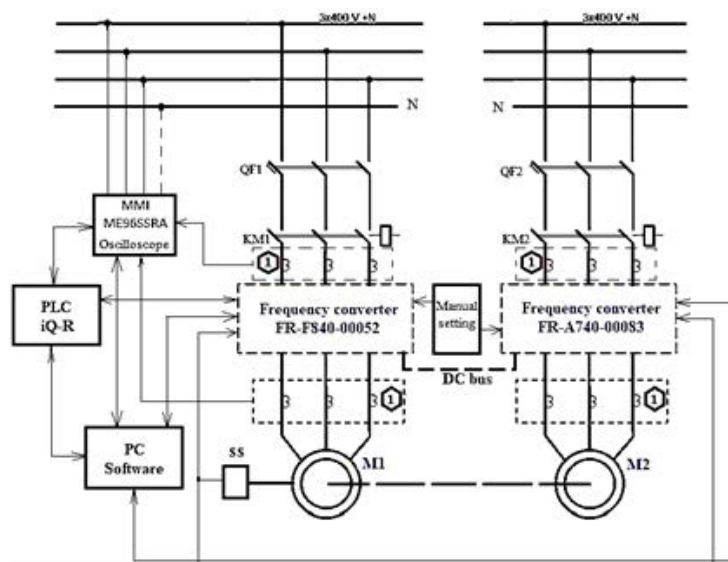


Fig. 3. Functional schematic diagram of laboratory installation

The law of variation of load torque on the shaft of the testing motor (e.g. M2) is given by the PLC in accordance with the typical mechanical characteristics of ship mechanisms (e.g. fans, centrifugal pumps, cargo mechanisms, conveyors), and transmitted to the FC corresponding input of loading motor (M3). The M3 electric motor operates in

a braking mode, the braking torque of which varies according to the law of a specific ship mechanism.

To configure and debug the investigated frequency drive with the FR-F840 inverter, the FR Configurator 2 package is used. With this software can change the drive settings, control the drive on various modes directly through the computer, track changes in the main drive pa-

rameters and obtain the time characteristics of the process under study in real time. The specific advantages of the software package are as follows:

- FR Configurator2 allows controlling the operation mode of both converters (FR-A740 and FR-F840) simultaneously over the Modbus network;
- setting of various parameters is facilitated by full and group viewing functions;
- test mode allows simulating the operation of the inverter;
- convenient and understandable display functions providing output of digital and analog data, error messages and waveform signals;
- advanced diagnostic system allows to quick and effective troubleshooting;
- the auto-tuning function allows to implement the control laws of various motors most accurately;
- all electric drive settings can be saved in a special file and moved as settings to other drives.

Thus, the presented laboratory setup and accompanying software make it possible to design and study modern ship variable frequency drives of various mechanisms and complexes, configure control systems, and study their operating modes, including in terms of energy efficiency.

As an example of the solution of research tasks performed on the presented laboratory equipment, the results of the influence of the quality of the autonomous power supply network on the operation of a frequency-controlled pump drive are given.

The inverter FR-F840 of pump drive was powered from 2 synchronous generators (2x3 kW, 400 V, 50 Hz), those simulating the shipboard autonomous power supply.

During experimental research, the influence of the qualitative parameters of the shipboard network (namely, the maximum deviations of voltage and frequency allowed for ships) on the energy parameters of frequency-controlled electric drives of centrifugal pumps was studied.

In addition, the influence of the FC operating mode on the power grid was also assessed and the spectrum of prevailing voltage and current harmonics was determined [11].

An example of the obtained waveforms of starting a pump drive and the output voltage of the FC is shown in Fig. 4. These curves were obtained at 93,2% load torque of the asynchronous pump motor.

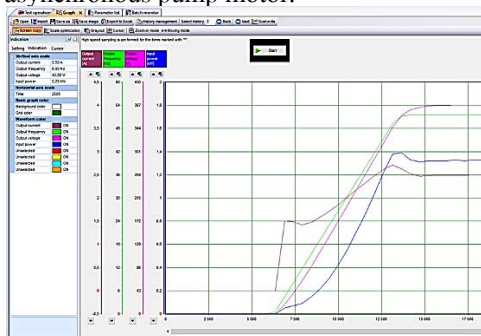


Fig. 4. Oscillograms of the start-up of the variable frequency pump drive according law $U/f^2 = const$

The main energy parameters of the investigated motor obtained using FR-Configurator2 software are shown in the tabl. 1.

Table 1

No.	Item	St. No.
1	Output frequency	54,06Hz
2	Output current	2,55A
3	Output voltage	388,8V
4	Frequency setting value	52,50Hz
5	Speed/machine speed	3150r/min
6	Motor torque	93,2%
7	Output current peak value	3,23A
8	Converter output voltage peak value	562,4V
9	Input power	1,41kW
10	Output power	1,37kW
11	Load meter	39,1%
12	Motor excitation current	1,53A
13	Motor load factor	49,0%
14	Cumulative power	14,92kW
15	Energy saving effect	0,86kW
16	Cumulative energy saving	31,78kW

CONCLUSIONS

The presented experimental laboratory installation, which powered from autonomous power electric plant, frequency-controlled electric drives based on two-machine electrical aggregates, programmable controllers, graphic control panels and communication equipment allows to create and research of the physical models of shipboard drives and various PLC-based control systems. The available measuring hardware makes it possible to analyse and evaluate of the energy efficiency parameters of electric drives and of the electric power quality of the autonomous power grid.

The active participation of cadets in the creation of such laboratory facilities, the solution of research problems presupposes their mastery of new information technologies and modern design methods.

It also has an undeniable professional and practical effect for future ship engineers, which, in our opinion, is a necessary result of the educational process.

REFERENCES

1. Prousalidis, J., Styvaktakis, E., Hatzilau, I.K., Kanellos, F., Perros, S. and Sofras, E. (2008) 'Electric Power Supply Quality in ship systems: an overview', Int. J. Ocean Systems Management, Vol. 1, No. 1, pp.68-83.
2. Mindykowski, J.K. (2003) Assessment of Electric Power Quality in Ship Systems Fitted with Converter Subsystems, Shipbuilding and Shipping Ltd, Gdansk, ISBN 83-88621-07-6.
3. Report on the investigation of the catastrophic failure of a capacitor in the aft harmonic filter room on board RMS Queen Mary 2 while approaching Barcelona on 23 September 2010. Marine Accident Investigation Branch, December 2011.
4. Mukha M. Dynamic compensation of reactive power in ship-based autonomous electric power systems: Dr. tech. sci. diss: 05.09.03/ Lviv Polytechnic National University. Lviv. 2018. 404 p. (in Ukrainian)

5. A. Drankova, M. Mukha, S. Mikhaykov, I. Krasovskyi / Electromechanical Laboratory Complex for Power Quality Studies of the Ship Electrical System. Conference: 2019 IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE). September 2019. DOI: 10.1109/CPEE47179.2019.8949147.
6. Mukha M., Drankova A., Krasovskyi I. /The experimental installation for the study and research of electromechanical systems energy-efficient modes // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Problems of automated electrodrive. Theory and practice. Collection of Scientific papers. Kharkiv NTU "KhPI", No4 (1358). 2020. P.67-71. doi: 10.20998/2079-8024.2020.4.11.
7. Energy-efficient electromechanical systems of wide technological purpose. Monograph / Zagirnyak M.V., Klepikov V.B., Kovbasa S.M., Mikhalsky V.M., Peresada S.M. Sadovoy O.V., Shapoval I.A. Kiev, Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, 2018. 310 p. ISBN 978-966-02-8403-6. (in Ukrainian)
8. Using Variable Frequency Drives (VFD) to save energy and reduce emissions in newbuilds and existing ships. Energy efficient solutions. Authors: Jan-Erik Rasanen, Eric W Schreiber. White paper - ABB Marine and Cranes. - ABB, 24.04.2012. 11 p.
9. S. Mikhaykov / The load control device of the variable frequency drive on the basis of PLC //Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Problems of automated electrodrive. Theory and practice. Collection of Scientific papers. Kharkiv NTU "KhPI", No. 4 (1358). 2020. P.30-34. doi: 10.20998/2079-8024.2020.4.04. (in Ukrainian)
10. Electronic Multi-Measuring Instrument, model ME96SSRA-MB, User's Manual: Detailed Edition. Mitsubishi Electric Corporation, IB63C45A. 108 p.
11. IEC Standard 61000-4-30 Testing and Measurement Techniques – Power Quality Measurement Methods.

About the Authors

Alla Drankova, PhD, National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine. E-mail: drankova64@gmail.com
Nikolay Mukha, ScD, professor, National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine. E-mail: n.mukha52@gmail.com

Бадур Чунашвили, Александр Петросян, Реваз Гургенадзе, Георгий Булбулашвили

Исследование особенностей электромеханической части маятниковых подвесных канатных дорог и усовершенствование расчетной модели подвижной механической части электропривода

Аннотация. Показано, что задача повышения электродинамических показателей электроприводов маятниковых подвесных канатных дорог (МПКД) и точности управления перемещением подвесных сосудов может быть эффективно решена только на основе совершенные системы управления с учетом всех особенностей кинематической схемы. При этом основное значение придается расчетным моделям подвижной механической части (РМПМЧ) электропривода МПКД. Анализ кинематических схем МПКД позволил оценить полученных результатов исследования электродинамических процессов существующими РМПМЧ. Доказано, что существующие РМПМЧ электроприводов без опорных МПКД и дорог с промежуточными опорами не полноценно отражает динамические процессы проходящие в подвижной механической части, поскольку начальная расчетная модель составлена без учета фрикционной связи между канатоповодящим шкивом и тяговым канатом. Доказано, что трение между тяговым канатом и канатоповодящим шкивом изменяется в функции перемещения подвесных сосудов. В следствие, создаются так называемые фрикционные автоколебания, существенно влияющие на динамические процессы и показатели управления. На основе проведенных исследований для безопорных МПКД и дорог с промежуточными опорами разработаны усовершенствованные РМПМЧ электроприводов учитывающие, изменяющейся в процессе перемещения, трение между канатоповодящим шкивом и тяговым канатом.

Ключевые слова: маятниковые, канатные дороги, усовершенствование, расчетная модель, подвижная механическая часть, электропривод, фрикционная связь.

Badur Tchunashvili, Alexander Petrosyan, Revaz Gurgenadze, Georgi Bulbulashvili

Study of Peculiarities of Electromechanical Part of Pendulum Suspended Rope Ways and Improvement of The Design Model of The Pendant Mechanical Part of The Electric Drive

Annotation. It is shown that the problem of increasing the electrodynamic performance of electric drives of pendulum aerial ropeways (MPKD) and the accuracy of controlling the movement of suspended vessels can be effectively solved only on the basis of perfect control systems, taking into account all the features of the kinematic scheme. In this case, the main importance is attached to the design models of the movable mechanical part (RMPMCH) of the MPKD electric drive. The analysis of the kinematic schemes of the MPKD made it possible to evaluate the results of the study of electrodynamic processes by the existing RMPMCH. It has been proved that the existing RMPMCH of electric drives without supporting MPKD and roads with intermediate supports does not fully reflect the dynamic processes taking place in the moving mechanical part; along the splinter, the initial design model was drawn up without taking into account the frictional connection between the traction pulleys and the traction rope. It is proved that the friction between the traction rope and the traction sheave changes as a function of the movement of the suspended vessels. As a result, the so-called frictional self-oscillations are created, which significantly affect the dynamic processes and control indicators. On the basis of the research carried out for unsupported MPKD and roads with intermediate supports, improved RMPMCH electric drives have been developed taking into account the friction between the traction pulleys and the traction rope that changes during movement.

Key words: pendulum, cable cars, improvement, design model, moving mechanical part, electric drive, frictional links.

Введение. Развитие горнодобывающей промышленности, расширение зон отдыха, спорта и туризма обуславливают потребность в непрерывном увеличении потока разного вида перевозок, в частности и на маятниковых подвесных канатных дорогах (МПКД), как одного из самых экономичных, эффективных и дешевых видов грузового и пассажирского транспорта [1]. Однако он имеют низкий уровень энергетических показателей, обусловленный двумя связанными между собой факторами: замедленным временем рабочего цикла, вызывающем увеличение потерь

электроэнергии в силовой части электропривода, и электромеханическими колебательными процессами в электромеханической части. Эти факторы непосредственно связаны с динамическими свойствами системы управления электроприводом, в котором решающую роль играет особенность подвижной механической части МПКД [2].

Постановка задачи. Подвижная механическая часть электроприводов МПКД весьма сложна (Рис. 1) и представляет собой многомассовую систему с изменяющимися в больших диапазонах при перемещении подвесных сосудов упругими связями

[3]. В свою очередь, тяговый канат (ТК) приводится в движение двигателем, через фрикционные передачи, по средством канатоведущего шкива. При этом, вследствие трения между тяговым канатом и

канатоведущим шкивом создаются так называемые фрикционные автоколебания, существенно влияющие на динамические процессы и показатели управления.

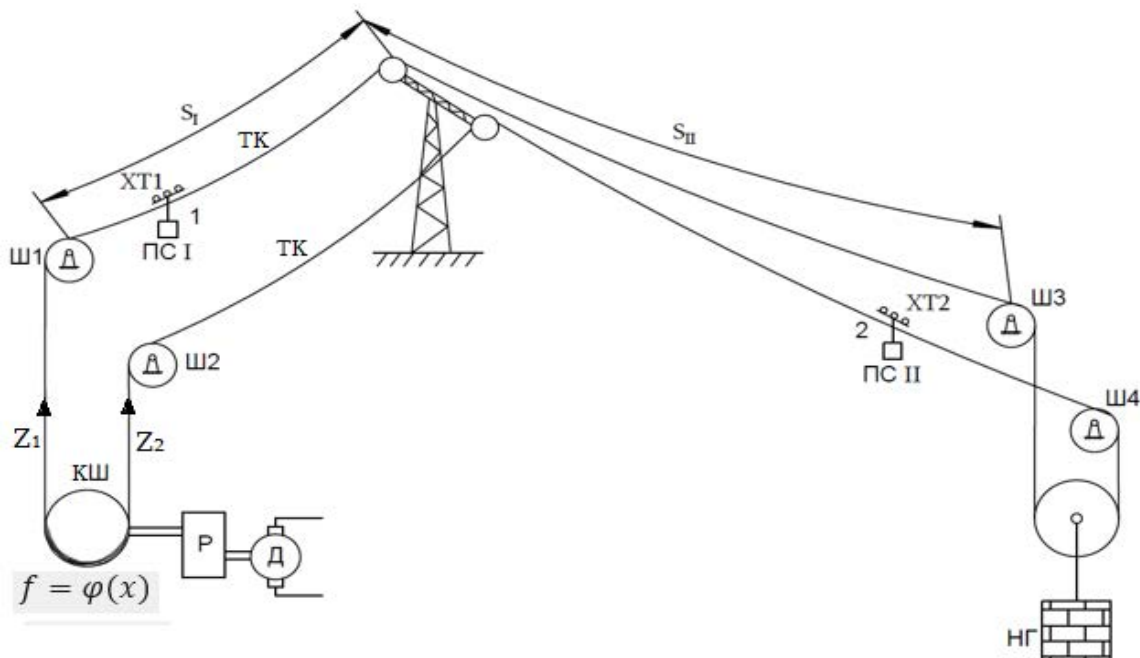


Рис. 1. Типовая кинематическая схема МПКД с промежуточными опорами

Существующие РМПМЧ ЭП без опорных МПКД и дорог с промежуточными опорами не полноценно отражает динамические процессы проходящие в подвижной механической части, по скольку начальная расчетная модель составлена без учета фрикционной связи между канатоведущим шкивом и тяговым канатом [4]. При этом наиболее рациональным и надежным способом повышения коэффициента сцепления является футерование обвода (ручья) шкива вязкоупругим материалом (износоустойчивая резина, обеспечивающая $\mu=0,22$ и работоспособность при температуре от $+40$ до -25 °C) [5].

Цель работы. Целью работы является исследование динамических процессов, проходящих в электромеханической части электропривода МПКД, определение недостатков существующих РМПМЧ электроприводов и разработка усовершенствованной РМПМЧ электроприводов, учитывающей фрикционную связь между канатоведущим шкивом и тяговым канатом.

Результаты исследования. Однако для управления движением машин и механизмов с электрическим приводом важно знать те характеристики трения, которые выступают как

нагрузка, влияя на показатели движения [6]. При этом, одной из важнейших характеристик трения является зависимость силы трения F_c от скорости проскальзывания v_{vk} , иногда называемой кинематической характеристикой трения. В электроприводе зачастую удобней пользоваться зависимостью момента силы трения M_c от угловой скорости проскальзывания $\omega_{ск}$, представляющих приведенные к валу электродвигателя величины F_c и v_{vk} . Сила трения зависит от коэффициента трения f и определяется, как

$$F_c = Pf, \quad (1)$$

где P — сила нормального давления [6].

На канатоведущем шкиве сила нормального давления P определяется натяжением тягового каната с обеих сторон Z_I и Z_{II} (Рис. 1), которые в функции траектории перемещения подвесных сосудов постоянно меняются [7]. Для момента начала движения натяжение ТК определяются:

$$\begin{aligned} Z_I &= Z_{НГ I} / 2 - Z_{CI} - Z_{KS1I} + Z_{KS2I}; \\ Z_{II} &= Z_{НГ II} / 2 + Z_{CII} - Z_{KS1II} + Z_{KS2II}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $Z_{НГ I}$ и $Z_{НГ II}$ — соответственно, натяжение тягового каната весом натяжного груза, I и II

пролета; Z_{CI} – натяжение тягового каната I пролета вызванного весом ходовой тележки ХТ1 и подвешенного сосуда ПС1; Z_{CII} – натяжение тягового каната II пролета вызванное весом ходовой тележки ХТ2 и подвешенного сосуда ПС2; Z_{KS1I} и Z_{KS2I} – соответственно, натяжение тягового каната I пролета вызванное весом тягового каната участков S1 и S2; Z_{KS1II} и Z_{KS2II} – соответственно, натяжение тягового каната II пролета вызванного весом тягового каната участков S1 и S2.

Следовательно, сила нормального давления на канатопроводящий шкив постоянно меняется. В месте с этим, для МПКД с небольшим перепадом высот изменяется и знак натяжения. Кроме того, в МПКД с промежуточными опорами при переходе подвесных сосудов на опоры с качком изменяются знак натяжения каната и структура расчетной модели подвижной механической части (РМПМЧ) электропривода.

Для МПКД с профилем (рис.1), после перехода первого подвешенного сосуда ПС1 на промежуточную опору структура расчетной модели подвижной механической части электропривода изменяется и из трехмассовой переходит двухмассовую. Соответственно, натяжения ТК определяются:

$$Z_I = Z_{HTI}/2 + Z_{CI} - Z_{KS1I} + Z_{KS2I};$$

$$Z_{II} = Z_{HTII}/2 + Z_{CII} - Z_{KS1II} + Z_{KS2II}. \quad (3)$$

После перехода второго подвешенного сосуда ПСII на промежуточную опору структура РМПМЧ электропривода из двухмассовой с расщепленными массами переходит в трехмассовую изменяется знак натяжения ТК от подвешенного сосуда. Соответственно, натяжения ТК пролетов определяются:

$$Z_I = Z_{HTI}/2 + Z_{CI} - Z_{KS1I} + Z_{KS2I};$$

$$Z_{II} = Z_{HTII}/2 - Z_{CII} - Z_{KS1II} + Z_{KS2II}. \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) Z_{HTI} , Z_{HTII} , Z_{KS1I} , Z_{KS2I} , Z_{KS1II} , Z_{KS2II} в процессе движения остаются неизменными, а Z_{CII} и Z_{CI} изменяются в функции перемещения подвесных сосудов.

Траектория движения подвесных сосудов безопорных МПКД представляет собой квадратную параболу. Следовательно, при перемещении подвесных сосудов натяжение тяговых канатов, вызванное подвесными сосудами в результате изменения угла наклона, меняется. При этом, натяжение вызванное первым ПС1 и вторым ПСII подвесными сосудами определяются по формулам [8]:

Натяжение ТК первым подвесным сосудом

$$Z_{CI} = \begin{cases} \frac{P_{CI} \left[\lg \beta_I + (S_1 - 2x) \left(P_{CI} / S_1 + \frac{q+q_1}{\cos \beta_I} \right) / 2\Sigma H_I \right]}{\sqrt{\left[\lg \beta_I + (S_1 - 2x) \left(P_{CI} / S_1 + \frac{q+q_1}{\cos \beta_I} \right) / 2\Sigma H_I \right]^2 - 1}} & \text{при } x = 0 \div l_I; \\ \frac{P_{CI} \left[\lg \beta_{II} + (S_2 + S_I - 2x) \left(P_{CI} / S_2 + \frac{q+q_1}{\cos \beta_{II}} \right) / 2\Sigma H_{II} \right]}{\sqrt{\left[\lg \beta_{II} + (S_2 + S_I - 2x) \left(P_{CI} / S_2 + \frac{q+q_1}{\cos \beta_{II}} \right) / 2\Sigma H_{II} \right]^2 - 1}} & \text{при } x = l_I \div l_{II}. \end{cases} \quad (5)$$

Натяжение ТК вторым подвесным сосудом

$$Z_{CII} = \begin{cases} \frac{P_{CI} \left[\lg \beta_{II} + (2x - 2S_I - S_2) \left(P_{CI} / S_{II} + \frac{q+q_1}{\cos \beta_I} \right) / 2\Sigma H_{II} \right]}{\sqrt{\left[\lg \beta_{II} + (2x - 2S_I - S_2) \left(P_{CI} / S_{II} + \frac{q+q_1}{\cos \beta_I} \right) / 2\Sigma H_{II} \right]^2 - 1}} & \text{при } x = 0 \div S_{II}; \\ \frac{P_{CI} \left[\lg \beta_I + (2x - S_I - 2S_{II}) \left(P_{CI} / S_I + \frac{q+q_1}{\cos \beta_I} \right) / 2\Sigma H_I \right]}{\sqrt{\left[\lg \beta_I + (2x - S_I - 2S_{II}) \left(P_{CI} / S_I + \frac{q+q_1}{\cos \beta_I} \right) / 2\Sigma H_I \right]^2 - 1}} & \text{при } x = S_{II} \div S_{II} + S_I. \end{cases} \quad (6)$$

где x – путь перемещения сосудов; β_I и β_{II} – соответственно, угол наклона трасы первого и второго пролета; P_{CI} и P_{C2} – соответственно, вес первого и второго подвешенного сосудов; S_I и S_{II} – соответственно, расстояние от проводной станции до промежуточной опоры и от промежуточной опоры до натяжной станции;

По формулам (3) и (4) построены кривые изменения натяжения ТК (рис. 2). При этом принято: $P_{C2} = 2P_{C1}$, $S_{II} = 2S_I$.

На основе типовой кинематической схемы (рис.3), для МПКД с промежуточными опорами, разработана усовершенствованная РМПМЧ электропривода учитывающая, изменяющийся в процессе перемещения, трения между канатопроводящим шкивом и тяговым канатом.

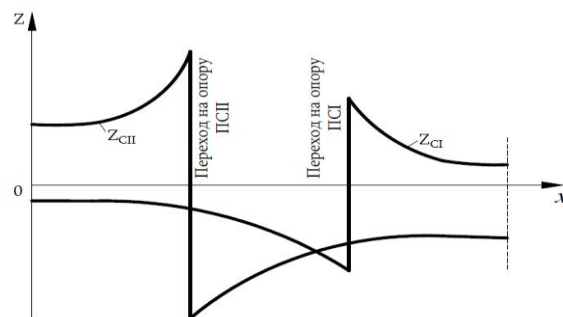


Рис. 2. Кривые изменения натяжения ТК от подвесных сосудов

В разработанной РМПМЧ учитываются все инерционные элементы, основные упругие фрикционные связи между массами. Распределенные массы и упругости тягового каната заменены эквивалентными сосредоточенными. Моменты инерции, коэффициенты жесткости и трения модели (рис. 3), приведенные к валу двигателя, определяется

$$\begin{aligned}
 J_1 &= J_d + J_p + J_{кш}; \\
 J_2 &= J_{ХТ1} + J_{ПС1} + \Delta J_{ПС1} + J_{шнс}/2 + \\
 &\quad + J_{ТК(0-1)}/2 + J_{ТК(1-2)}/2; \\
 J_3 &= J_{ХТ2} + J_{ПС2} + \Delta J_{ПС2} + J_{шнс}/2 + \\
 &\quad + J_{ТК(0-2)}/2 + J_{ТК(1-2)}/2; \\
 c_{12} &= c_0 \rho / L_{(0-2)}; \\
 c_{23} &= c_0 \rho / L_{(1-2)}; \\
 c_{13} &= c_0 \rho / L_{(0-1)}; \\
 f &= \varphi(Z_I, Z_{II}).
 \end{aligned} \quad (7)$$

где $J_{ТК(0-1)}$, $J_{ТК(1-2)}$, $J_{ТК(0-2)}$, $J_{ТК(1-2)}$ – приведенные к валу двигателя суммарные моменты инерции участков тягового каната, кг.м²; $J_{шнс}$, $J_{шнс}$ – приведенные к валу двигателя суммарные моменты инерции шкивов приводной станции и шкивов натяжной станции, кг.м²; $L_{(0-1)}$, $L_{(0-2)}$ и $L_{(1-2)}$ – длина участков тягового каната 0-1, 0-2 и 1-2, м; c_{12} , c_{23} и c_{13} – приведенные коэффициенты жесткости, обусловленные длиной участков тягового каната 0-1, 1-2 и 0-2, Н.м/рад; f – коэффициент трения.

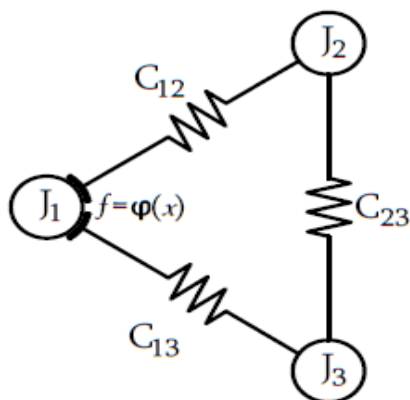


Рис. 3. Усовершенствованная РМПМЧ электропривода МПКД

Так как при движении расстояния между подвесными сосудами и станциями $L_{(0-1)}$, $L_{(0-2)}$ меняются, соответственно меняются и зависящие от них параметры расчетной модели в функции перемещения.

Выводы

1. Показано, что задача повышения электродинамических показателей электроприводов маятниковых подвесных канатных дорог (МПКД) и точности управления перемещением подвесных сосудов может быть эффективно решена только на основе усовершенствования системы управления с учетом всех особенностей кинематической схемы. При этом основное значение придается расчетным моделям подвижной механической части (РМПМЧ) электропривода МПКД.

2. Доказано, что существующие РМПМЧ электроприводов без опорных МПКД и дорог с промежуточными опорами не полноценно отражают динамические процессы, проходящие в подвижной механической части, т.к. начальная расчетная модель составлена без учета фрикционной связи между канатоведущим шкивом и тяговым канатом.

3. Доказано, что трение тягового каната и канатоведущего шкива изменяется в функции перемещения подвесных сосудов. Вследствие, создаются, так называемые, фрикционные автоколебания, существенно влияющие на динамические процессы и показатели управления.

4. На основе проведенных исследований для безопорных МПКД и дорог с промежуточными опорами разработана усовершенствованная РМПМЧ электроприводов, учитывающая изменяющиеся в процессе перемещения коэффициенты трения между канатоведущим шкивом и тяговым канатом.

Литература

1. Чунашвили Б.М., Кобаля М.И., Тугуши М.А. Оптимизация систем управления позиционных электроприводов маятниковых подвесных канатных дорог/Научно-технич. журнал «Электроинформ». Львов: ЕКОинформ, 2009. с. 481-482.
2. Чунашвили Б.М., Кобаля М.И., Петросян А.М., Церетели К.О. Результаты исследований динамических процессов системы управления асинхронного частотного электропривода маятниковых подвесных канатных дорог с промежуточными опорами//Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика», №3/2012(19), Кременчук. 2012. с. 452-453.
3. Чунашвили Б. Расчетная модель подвижной механической части электроприводов маятниковых подвесных канатных дорог с промежуточными опорами // Georgian Engineering News. –Тбилиси, 2004.–№ 2. – С. 154 –158.
4. Чунашвили Б., Петросян А.и др. Исследование электродинамических процессов электропривода маятниковых подвесных канатных дорог и составление расчетной модели подвижной механической части //Энергия. #3 (91)/2020. Серия: Современные проблемы энергетики и пути их решения“. с. 64.
5. <https://www.doppelmayr.com/ru/produkcija/majtnikovye-kanatnye-dorogi/>

6. Клепиков В.Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография/В.Б. Клепиков. Х.:Изд-во «Підручник НТУ «ХПІ»». 2014. 408 с.
7. Чунашвили Б.М. Диаграмма нагрузки электроприводов маятниковых подвесных канатных дорог// Вестник Национального технического университета «ХПИ». Харьков. 2002. № 12. с. 85–86.
8. Чунашвили Б.М. Энергоэффективные системы управления электроприводов маятниковых подвесных канатных дорог/Дисс. на соиск. доктора техн. наук: 05.14.01. Тбилиси. 2003. 304 с.

Сведения об авторах

Чунашвили Бадури Михайлович – доктор техн. наук, профессор, Грузинский технический университет, начальник департамента «Технологий электропотребления», г.Тбилиси, Грузия; Тел.: +995 595 29 00 44, e-mail: btchunashvili@yahoo.com, b.chunashvili@gtu.ge

Петросян Александр Михайлович – Академический доктор, асоциированный профессор, Грузинский технический университет, г.Тбилиси, Грузия; Тел.: +995 591 26 00 36, e-mail: a.petrosyan@gtu.ge

Гургенадзе Реваз Георгиевич – докторант, Грузинский технический университет, г.Тбилиси, Грузия; Тел.: +995 596 12 14 95, e-mail: revazgurgenadze@gmail.com

Булбулашвили Георгий Александрович - докторант, Грузинский технический университет, г.Тбилиси, Грузия; Тел.: +995 598 71 95 16, e-mail: giorgi2368@gmail.com

Maia Tugushi, Madona Loria, Gocha Gogitidze

Electrohydraulic Systems, Method of their Perfection by Means of Electrohydraulic effect

Summary. To increase the efficiency of power transmissions and reduce the waste of electricity, electrohydraulic drives/gears are widely used. It is used in high power installations. To improve system features, on basis of the results received through experimental research the perspective of using electrohydraulic effect in propulsion devices was determined. This should result in increase of efficiency of electrohydraulic system.

Keywords: *Electrohydraulic Effect, Piston Movement, High Efficiency.*

Introduction. Electrohydraulic gears are generally used in modern power plants during wide range power and load fluctuations. This gives universal opportunity to convert mechanical characteristic of driving engine in accordance with load. It is also easy to control and protect engine and executing sections/components from overloads. Electrohydraulic propulsion device (electric engine, pump, and hydraulic transmission system) in comparison with electromechanical gears is distinguished for reliable operation during fluctuation of number of revolutions from 1-4 rpm to 2500 rpm, by high power value transferred to unit of mass of propulsion device.

In addition to the above-mentioned positive features/properties electrohydraulic propulsion devices have several negative sides. For example, when transferring energy on long distance, large pressure losses are observed on unit length of power line; due to the fact that numerous transmit rings efficiency is low; viscosity of power liquid is dependent on temperature fluctuations, etc.

In spite of the above-mentioned negative sides electrohydraulic gears are widely used in power plants of ports and ships. It is important for these devices to develop certain moment (ship's steering gear, anchor and mooring equipment, crane drives, etc.) during practically indefinite range of load variations.

Main text.

For the effective operation of power plants, perfect work of all rings is important and the aim is to increase efficiency. From this viewpoint it is interesting to apply electrohydraulic effect in propulsion devices [1,6].

Since XVIII century mechanical damage of the surrounding objects resulting from the electrical discharge in water became the object of study of scientists (T. Lane, J. Priestly 1767–1769). The effect received by high voltage pulses in water was called electrohydraulic effect (EHE) and the research works of many scientists were dedicated to this effect (Fedorov I.V. – 1932, Frungel P. – 1948, Yutkin L.A. – since 1950, etc.). Primarily it was thought that mechanical effect on the surroundings during power discharge took place only on liquid dielectrics, however in liquids having ionic conductivity it is spread only on short distance and is characterized by excessive production of gas and steam [2].

The research has shown that mechanical effect of the liquid on the objects that are placed near to electric discharge channel, are insignificant and practically not seen in the liquids of ionic conductivity. However, the effect in liquid dielectrics is very different [5]. Mechanical effect on the objects placed around discharge channel is determined by pressure value of gaseous cavity created around discharge zone. In order to increase pressure, it is necessary to create adequate conditions to increase hydraulic pulses.

Three general modes of electrohydraulic discharge are known:

- hard mode of operation with the following parameters – $U \geq 50kV, C \leq 0,1\mu F$;
- moderate mode of operation with the following parameters: – $20kV \leq U < 50kV, 0,1\mu F \leq C \leq 1,0\mu F$;
- mild mode of operation with the following parameters: – $U \leq 20kV, C \geq 1\mu F$

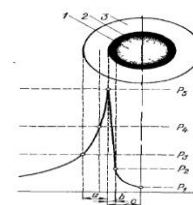


Fig. 1. Structure of electric discharge channel in liquid:
1 – central part of discharge channel; 2-surface jacket of discharge channel/skinning jacket; 3 – steam-gaseous jacket of the channel

The area of spreading of streamers resulting from the EHE is dependent on the properties of the liquid and the parameters of high voltage pulse. Discharge also results in creation of cavitation that causes sharp fluctuation of ambient pressure due to its expansion and compression. The electrohydraulic blow (EHB) may be observed as a result of the given phenomena.

The scheme of pressure spread in the discharge channel is determined [3], it is shown in figure 1. Different values of received pressure correspond to different values of air jacket thickness created during discharge.

The values of the pressure correspond to the changes of steam-gaseous jacket thickness: jacket thickness from $a = 0.001$ to 0.1 mm corresponds to the pressure from $P_3 = 5 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ to $P_5 = 2 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$; Jacket

thickness from $b = 10^{-5}$ to 10^{-3} mm corresponds to the pressure from $P_5 = 2 \cdot 10^{10}$ Pa to $P_2 = 2 \cdot 10^8$ Pa; In the radius of the discharge channel from $c = 0,5$ to 5 mm corresponds to the pressure from $P_5 = 2 \cdot 10^{10}$ Pa to $P_1 = 0$ –და $2 \cdot 10^6$ Pa.

As it can be seen from the figures maximum pressure can be received near to the surface jacket of the discharge channel and its widespread is dependent on the properties of the liquid. Pressure value can be determined by the following formula [4]:

$$p = p_0 + B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\alpha - 1 \right] \quad (1)$$

Where, p – pressure received in the discharge channel; p_0 – atmospheric pressure ($p_0 = 10^5$ Pa); B – liquid characteristics is constant, for water $B = 3,05 \cdot 10^{-8}$ Pa; ρ – density of compressed liquid received by the effect of plasma channel during discharge; ρ_0 – density of liquid in normal conditions; α – the constant of the liquid and its value for water is 7,15.

For scientist it is interesting how effective the usage of the possibly received pressure is for shifting or moving the object. The experiments were held during non-standard mode of operation with the following parameters: $U < 2kV$, $C \leq 20,0 \mu F$.

Experiment was held in laboratory (fig.2) using polypropylene cylinder. Discharge took place under 2 kV voltage, using condenser of 20 microfarads capacity with duration of $10^{-3} \dots 10^{-4}$ s. The value of condenser energy was up to 40 J. As a result of electrohydraulic blow piston moved on 55 mm.

The value of strength acting on piston (resultant from the force of electrohydraulic blow and friction force) is approximately up to 1650 N ($F = 0,015 \text{ kg} \times 0,055 \text{ m} \times 2 / 10^{-6} \text{ s}^2 = 1650 \text{ N}$), that corresponds to the force necessary for lifting of the weight of 160 kg.

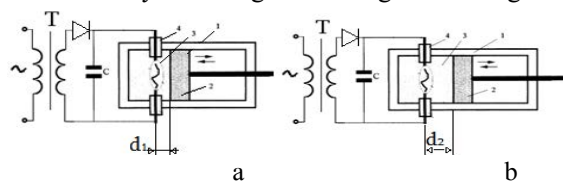


Fig. 2. Effect of piston movement resulting from electrohydraulic blow. 1-discharge chamber; 2-piston; 3- plasma channel; 4-electrodes; a-before discharge; b-after discharge

System efficiency is 127%. This is very high value, it is understandable that with load power this value will be reduced but efficiency effect will be higher than efficiency of the existent propulsion devices

The received results assure that if electrohydraulic effect is combined with high voltage (up to 40 kV) it will be possible to receive real force that will ensure propelling of the propulsion device.

Conclusions:

1. It is important to develop technologies clean from ecological point of view and from this viewpoint it is interesting to apply electrohydraulic effect to propulsion devices.

2. The possibility to receive real propulsion force with high efficiency was documented as a result of the experiments.

3. The experiment should be continued with electrohydraulic effect in mild mode of operation with parameters - $U \leq 20kV$, $C \geq 1 \mu F$. When desired results are received the observations should be made in moderate mode of operation and hard mode of operation.

References

1. Tugushi M., Loria M., Gogitidze G., Sikharulidze L. Creation of Energy Efficient Marine Transport Facilities by Using Electrohydraulic Blow Drives on the Sample of the Ship Stabilizers, *Applied Mechanics Reviews, Issue 6 (2), (November). Volume 70. The American Society of Mechanical Engineers, 2018. pp. 1200-1207.*
2. Юткин Л.А. Эл.гидравлический эффект и некоторые возможности его применения. Л.: ЛДНТП. 1959.
3. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение. 1986. 253 с.
4. Суркаев А.Л. Исследование высоко-энергетических импульсных процессов в конденсированных средах на основе электрического взрыва проводников/Дисс. на соиск.ученой степени д.т.н., Волгоград. 2017.
5. Бекаев А.А., Соколов В.К. и др. «Использование эффекта Л. А. Юткина в электрогидравлических устройствах», Материалы международной н.-т. конференции «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», секция7 «технологии и оборудо-вание механосборочного производства», 2010. с.27.
6. Тугуши М., Карасев Б., Гогитидзе Г. Повышение энергоэффективности морского транспорта с помощью альтернативных источников энергии//материалы международной н. конференции «Наука и устойчивое развитие морской технологии». Варна. 2015. с. 83-86.

About of Authors

Maia Tugushi, Candidate of Technical Sciences/PhD, associated professor Batumi State Maritime Academy, Batumi, Georgia, m.tugushi@bsma.edu.ge

Madona Loria, PhD, assistant professor Shota Rustaveli State University, Batumi, Georgia, madona.loria@bsu.edu.ge;

Gocha Gogitidze, PhD, associated professor Batumi State Maritime Academy, Batumi, Georgia, g.gogitidze@bsma.edu.ge;

ელექტრომომხმარების ტექნოლოგიები

Electrical energy consumption technologies

Sergey Shevchenko, Dmytro Danylchenko, Stanislav Dryvetskyi

Calculation of probability disconnected overhead lines 6-35 kV from thunderstorm activity

Summary. *In the work, a calculation was made of the number of line disconnections as a result of a direct lightning strike, taking into account the likelihood of a dangerous lightning current, as well as disconnections from induced overvoltages, taking into account the increase in the dielectric strength of the wire-wire gap for different classes of rated voltages and different types of wires. Based on the results obtained, we can conclude that the value of the number of thunderstorm connections for unprotected wires is approximately two times of the same indicator for stolen wires. I will order the transfer of the stolen wires for the advancement of the reliability of the power supply.*

Keywords: *power line, overhead power line with shielded wires, self-supporting insulated wire, overhead power line, lightning protection, number of lightning disconnections, lightning current.*

Introduction. The quality of power supply for most consumers directly depends on the reliability of the 6-35 kV overhead distribution lines (OHL), the length of which in Ukraine exceeds 0.3 million km. Among the causes of accidents and violations at 6-35 kV overhead lines associated with damage to insulators, supports, wires, accompanied by single-phase ground faults, arc overvoltages, short circuits and automatic shutdowns, one of the main ones are lightning effects. Due to the low level of impulse strength of linear insulation, overhead lines 6-35 kV are the most susceptible to lightning outages, since almost all overvoltages from direct lightning strikes and a significant part of induced overvoltages lead to insulation overlaps, with a high probability turning into a power arc of industrial frequency voltage. To improve the efficiency, technical level and safety of distribution networks, it is necessary to use new scientifically based technical solutions and technologies. However, the current standards did not provide for any special protection against lightning overvoltages of overhead lines with bare wires up to 20 kV, except for cases of protection of individual points of overhead lines with weakened insulation or with increased reliability requirements. This state of the issue of lightning protection of distribution overhead lines was a consequence of the historically established recognition of the inevitability of their lightning emergency outages and damage due to the lack of effective and economically available technical means. However, with the beginning of the massive use of protected wires on distribution overhead lines, it became necessary to take mandatory technical measures for their lightning protection.

Analysis of publications. A feature of the problem of lightning protection of protected overhead lines (VLZ) is that in the absence of special measures, with a thunderstorm overlap of the line insulator, accompanied by a breakdown of the solid insulation of the wire, the

power-frequency arc formed with a high probability does not have the ability to move along the wire (as with bare wires) and burns in the place of insulation breakdown until the line is disconnected [1,3]. This can lead to deterioration of the wire insulation, damage to the line insulator and to wire burnout, which is confirmed by the experience of operating lines with insulated wires. Since on a line with bare wires, the arc, under the influence of electrodynamic forces, is able to move one of its ends along the wire, the factor of wire damage due to the thermal effect of the arc was insignificant and did not in any way affect the formation of the concept of lightning protection of overhead lines. In the case of VLZ, the prevention of wire burnout becomes the main condition determining the need for the mandatory use of certain lightning protection measures [2].

It should be noted that protected wires significantly increase the dielectric strength of the air gaps. The magnitude of the increase depends on the thickness of the wire insulation, as shown in [4].

Purpose of the article. Determination, by calculation, of the number of line disconnections as a result of a direct lightning strike, taking into account the likelihood of a dangerous lightning current, as well as disconnections from induced overvoltages, taking into account the increase in the dielectric strength of the wire-wire gap.

Presenting main material.

Lightning surges on high-voltage lines (HV) occur as a result of a direct lightning strike in the overhead line (in resistance, in the lightning protection cable, in the phase wire) and as a result of the applied voltage when lightning strikes objects near the overhead line (trees, structures). Thus, on linear isolation there are overvoltages leading to so-called overlapping of isolation on air (overlapping of isolation). Overlapping insulation can lead to a stable force arc - a stable short circuit (short circuit) phase to ground. A number of techniques set the

probability of installing a power arc (stable short circuit) slightly less than 1 with a pulsed overlap of the insulation of 110 kV overhead lines in networks with grounded neutral. As a result, the relay protection and automation of the substation (RZiA PS) is activated, which disconnects the short circuit on the overhead line. The line is de-energized and consumers are short of electricity. [5]

Experience shows that lightning shutdowns of the transmission line average 10 ÷ 20% of the total number of automatic shutdowns for all reasons. As the rated voltage class increases, the number of lightning failures decreases, but their share (in relation to outages for all reasons) increases against the background of increasing the overall reliability of the transmission line. It is important to ensure the consistency of electricity supply to the consumer, to increase the lightning resistance of overhead lines, ie to increase the resistance of overhead lines to lightning surges.

The lightning resistance of the overhead line, as a rule, is calculated only for the first pulse of the lightning discharge, as the probability of insulation overlap under the influence of subsequent pulses is an order of magnitude greater than under the influence of the first pulse. Accounting for subsequent pulses in the assessment of lightning resistance is justified only in some special cases with high inductance of supports (multi-circuit OHL on single-post supports, large transitions of OHL through water obstacles, etc.).

To calculate the lightning resistance of the transmission line, the distribution of lightning currents obtained from the registrations on the transmission line must be used. This will determine the maximum probability of lightning current, which will lead to insulation breakdown. The parameters of the logarithmically normal law of current distribution depending on the height of the supports h_s are selected as follows:

at $h_s \leq 20\text{m}$

$$\bar{I} = 20 \text{ kA}, \quad (1)$$

$$\sigma_{lg} I = 0, 39, \quad (2)$$

at $h_s > 20\text{m}$

$$\bar{I} = 20 + 0,32 \cdot (h_s - 20) \text{ kA}, \quad (3)$$

$$\sigma_{lg} I = 0,39 - 0,0028 \cdot (h_s - 20). \quad (4)$$

The probability of lightning current amplitude exceeding I_i is calculated using the obtained parameters by the formula:

$$P_{li} = 1 - \frac{lg_e}{\sqrt{2\pi}\sigma_{lgI}} \int_{I_{min}}^{I_i} \frac{1}{I} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{lg I - lg \bar{I}}{\sigma_{lgI}} \right)^2 \right] dI \quad (5)$$

where $\bar{I}$ is the value of the amplitude of the lightning current, the probability of exceeding which is equal to 0,5.

Given that the height of the supports for the voltage class 6 kV is less than 20 m, and the height of the supports for lines with a voltage of 35 kV is higher than 20 m, we will calculate according to formulas (1)-(4). The calculations were performed for the normative

values of the parameters, and for the values obtained during the experiment for the wire type SIP 3 1 * 50 - 20 and the wire brand AS 50/8.

The calculation of the probability according to experimental data for the amplitude of the lightning current on a line with a voltage of 35 kV with a shielded wire is equal to $P = 0.76$.

The calculation of the probability according to the standard, for the amplitude of the lightning current on a line with a voltage of 35 kV with uninsulated wire is equal to $P = 0.78$.

The probability calculation according to experimental data for the amplitude of the lightning current on a line with a voltage of 6 kV with a shielded wire is equal to $P = 0.74$.

The calculation of the probability according to the standard for the amplitude of the lightning current on a line with a voltage of 6 kV with uninsulated wire is equal to $P = 0.89$.

Suspension of lightning protection cables, which is the main lightning protection measure on lines of voltage classes 110 kV and above, is not very effective for lines of 6-35 kV, which is caused by low impulse insulation strength of 6-35 kV. As a result, the probability of reverse overlap with lightning strikes in the support or in the cable would be, at normal values of the resistance of the grounding of the supports, is quite significant. Therefore, 6-35 kV lines are built, as a rule, without cables. Exceptions are only particularly responsible 35 kV lines on metal poles.

Despite the lack of cables, 6-35 kV lines have a number of features that create more favorable conditions for their lightning protection. First, these lines are less susceptible to direct lightning strikes due to their relatively small height and length. Often they are partially protected from direct lightning strikes by objects located near the line: buildings, tall trees, higher voltage lines, etc. [6]

Secondly, the presence of isolated or grounded through the arc-quenching reactor neutral in 6-35 kV networks facilitates the fight against the effects of pulsed insulation overlaps, helps to extinguish the arc of single-phase circuit to ground. It can be assumed that cases of lightning insulation of only one of the phases of the line do not cause its disconnection. The arc generated by a single-phase overlap goes out, and the danger for 6-35 kV lines is only the overlap between the phases or simultaneous overlaps of several phases to ground. At interphase overlappings there is a high probability of attenuation of an arc because the gradient of working voltage along an overlapping way on these lines is small.

Third, 6-35 kV lines are often built on wooden poles. In this case, the length of the path of lightning insulation increases due to the impulse strength of the traverse tree and the support post. The probability of overlap and the probability of transition of the pulse overlap in the arc of short circuit decreases. However, these advantages of wooden supports can not be fully

realized due to the possibility of splitting wooden parts with direct lightning strikes. To combat the splitting of the traverse and support struts in some cases have to bypass the wooden parts of the supports current-carrying metal descents.

Unlike lines of higher voltage class, lines of 6-35 kV on metal supports are often disconnected due to the influence of induced overvoltages, which can cause 35 kV insulation overlap, five times more than the number of overvoltages dangerous for the 110 kV network. The reason for this is also the low impulse strength of the insulation of 6-35 kV lines on metal supports.

Determination of the number of emergency shutdowns of the 6-35 kV transmission line.

For 6-35 kV lines, the total number of lightning outages per year is equal to:

$$\Sigma = n_{dir} + n_{ind} \quad (6)$$

where n_{dir} and n_{ind} - specific (100 km and 100 thunderstorm hours) the number of thunderstorm disconnections from direct lightning strikes and due to induced overvoltages, respectively.

These values are determined by the formulas:

$$n_{dir} = n \cdot n_{dir} [P_{n3} P_d \Sigma + (P_{n2} - P_{n3}) P_d] \cdot (1 - P_{AR}); \quad (7)$$

$$n_{ind} = [n_{ind3} P_d \Sigma + (n_{ind2} - n_{ind3}) P_d] (1 - P_{AR}), \quad (8)$$

where P_{n2} and P_{n3} are the probabilities of two-phase and three-phase overlaps of OHL insulation.

$$P_{n2} = \exp \left[-0,04 \frac{U_{\phi 50\%}^+}{Z_{e2} (1 - k_{12})} \right]; \quad (9)$$

$$P_{n3} = \exp \left[-0,04 \frac{U_{\phi 50\%}^+}{Z_{e3} (1 - k_{12-3})} \right], \quad (10)$$

$Z_{e2} = Z_{th} \parallel 0,5 Z_{st} \parallel R_{eo}$ - equivalent resistance at the point of impact when overlapping one phase;

$thZ_{e3} = Z \parallel R_{si} \parallel [Z_{st} (1 + k_{12}) / 4]$ - equivalent resistance at overlapping of two phases;

U_{f50} - pulsed 50% bit voltage of the phase insulation on the support;

k_{12} - is the coefficient of connection between the affected phase and the most distant from it the neighboring phase;

k_{12-3} - is the coupling coefficient of two previously overlapped phases connected in parallel with the third phase.

Cases of two-phase and three-phase overlapping are characterized by various possibilities of transition of pulse overlapping in short circuit. For a two-phase overlap, this probability P_d can be approximated by the formula:

$$P_d \approx 1,6 U_{work} / I_{ovl} - 0,06, \quad (11)$$

where I_{ovl} is the total path length of the pulse overlap, cm;

U_{work} - the effective value of the operating voltage along the path of overlap, kV.

The calculated probability of installation of the arc is taken equal to 0.1, if according to the calculation it is less than this value. If the calculation of P_d is more than one, it is taken equal to 1.0. Thus, the range of probabilities P_d is limited to the interval $0.1 \leq P_d \leq 1.0$. It is assumed that the calculated value of P_d occurs when burning only one arc, and in the presence of arcs at adjacent intervals (with other sources of operating voltage) their extinction are independent events. The probability of installing at least one arc in three-phase overlap can be estimated by the formula:

$$P_{d\Sigma} = 2P_d(1 - P_d) + P_{d2} = P_d(2 - P_d) \quad (12)$$

Following the installation of the arc comes into action AR, which is likely to eliminate the consequences of storm surges. According to the operating experience, for 6-10 kV lines $P_{AR} \approx 0.54$, and for 35 kV lines - $P_{AR} \approx 0.7$.

The value of N_{ind2} and N_{ind3} - specific numbers of two-phase and three-phase overlaps is determined by the formulas:

$$N_{ind2} = \frac{936 h_{av}}{U_{ind2}} \exp \left(-\frac{U_{ind2}}{260} \right); \quad (13)$$

$$N_{ind3} = \frac{936 h_{cp}}{U_{ind2}} \exp \left(-\frac{U_{ind3}}{260} \right); \quad (14)$$

$$U_{ind2} = U_{50}^+ \frac{R_{si} + 0,5 Z_{st}}{(1 - k_{12}) 0,5 Z_{st}}; \quad (15)$$

$$U_{ind3} = U_{50}^+ \frac{R_{si} + Z_{st} \frac{1 + k_{12}}{4}}{(1 - k_{12}) Z_{st} \frac{1 + k_{12}}{4}} \quad (16)$$

$h_{av} = h_s - \frac{2}{3} f$ - the average height of the suspension of the upper wire; h_s - the height of its suspension; f - sagging. [7]

For example, consider the calculation of the specific number (per 100 km and 100 thunderstorm hours) of 35 kV line outages with uninsulated wire on metal supports (type of intermediate support P 35-2).

Calculations by this method show that n_{σ} have values:

- for 6-10 kV OHL on wooden supports - in the range from 2 to 6;
- for 6-10 kV OHL on reinforced concrete pylons - in the range from 10 to 30;
- for 20-35 kV OHL on wooden supports - in the range from 5 to 15.

For example, consider the calculation of the specific number (per 100 km and 100 thunderstorm hours) of 35 kV line outages with protected wire on metal supports (type of intermediate support P35-2).

Calculations by these formulas show that n_{σ} have values:

- for 6-10 kV OHL on wooden supports - in the range from 0.75 to 3;

- for 6-10 kV OHL on reinforced concrete poles
- in the range from 5 to 15;
- for 20-35 kV OHL on wooden supports - in the range from 2 to 8. [9]

Conclusions

1. The values of the probabilities of lightning currents that exceed the current that causes a voltage on the wire greater than the test voltage of the interfacial gap.

2. Calculations of the number of lightning disconnections of lines of voltage class 35 kV with uninsulated and protected wires. A comparison of the results of the calculations shows that the value of lightning outages for unprotected wires differs approximately twice from the same figure for protected wires. Which indicates the advantages of using shielded wires to increase the reliability of electricity supply to consumers.

References

1. Requirements for the design of overhead power lines with voltage from 6 kV to 35 kV with wires with a protective coating. Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine. 2013. 24 p.
2. Plan of development of electric networks of UES of Ukraine for the period till 2020 [Electronic resource]: plan [approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of October 29, 2014. № 680]. Access mode: http://www.dut.edu.ua/uploads/l_1346_52334568.pdf.
3. Requirements for the design of overhead power transmission lines with voltage from 6 kV to 35 kV with wires with a protective coating - Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine. 2013. 24 p.
3. Shevchenko S.Yu. Lightning strikes on overhead lines with shielded wires. / Shevchenko SY, Danilchenko DO, Dryvetsky SI // Sciences of Europe. Prague, Czech Republic. 2017. V.1. No 19 (19). pp. 52-57.
4. Sergey S. Defeat of overhead lines transmission networks with protected wires from lightning strike / S.Sergey, D.Dmitriy//Applied Physics (YSF). 2015. International Young Scientists Forum on. IEEE. 2015. pp. 1- 4.
5. Shevchenko S., Danylchenko D., Dryvetskyi S., Minakova K. Influence of Direct Lightning Strikes and Lightning Strikes Near Power Lines with Protected and Non-Insulated Wires. 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). p. 17-21.
6. Shilin, A.N. Calculation of reliability of overhead power lines taking into account the influence of weather conditions/ Shilin AN, Doronina OI // Electro. Electrical engineering, electric power, electrical industry. 2014. № 4. p. 18-22.
7. RD 153-34.3-35.125-99 Recommendations for protection of electrical networks from lightning and internal overvoltage 6 - 1150 kV.
8. Rahul N. Nandeshwar. Lightening And Lightening Protection of Overhead Transmission Line. / Rahul N. Nandeshwar // Department of Electrical Engineering Indian Institute of Science. Bangalore. 2014. 186 p.
9. Xiong X. Short-Term Reliability Evaluation of Transmission System Using Lightning Strike Probability Prediction / Xiong, X., Wang, J. and Weng, S., Qing Yang.//Journal of Power and Energy Engineering. №2. 2014. pp. 647-655.

About the Authors

Sergey Shevchenko, Doctor of Science, Head of Electric Power Transmission Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, Sergii.Shevchenko@khpi.edu.ua

Dmytro Danylchenko, PhD, Associate Professor of Electric Power Transmission Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, Dmytro.Danylchenko@khpi.edu.ua

Stanislav Dryvetskyi, PhD, Assistant of Electric Power Transmission Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, Stanislav.Dryvetskyi@khpi.edu.ua

Serhii Shevchenko, Dmytro Danylchenko, Oleksii Pirotti, Kseniia Minakova

Overview of selection methods for surge arresters 6-750 kV

Summary. The article focuses on the correct choice of equipment overvoltage protection devices using a surge arrester. Regulatory documents on the selection of surge arresters in different countries and the methods recommended by leading manufacturers of surge arresters are considered. The main parameters for the selection of surge arresters are considered. The main parameter of the surge arrester is considered in detail - the maximum long-term permissible operating voltage. Special attention is paid to the selection of surge arresters for switching and lightning overvoltage. The choice of an overvoltage arrester based on the explosion hazard condition and mechanical characteristics is also considered.

Keywords: surge arrester, electrical networks, overvoltage, switching overvoltage, lightning overvoltage.

Introduction. Overvoltage protection of 6-750 kV electrical installations has an important role in the operation of electric power facilities. Currently, the main method of protecting electrical equipment from overvoltage in electrical networks 6-750 kV is the use of nonlinear surge arresters (SA).

Currently, the use of OPN regulated by the following documents:

1. In Ukraine:
 - SOU-N EE 40.12-00100227-47 "Non-linear surge arresters with voltage 110-750 kV. Guidelines for selection and application" [1];
 - SOU-N MEV 40.1 "Non-linear overvoltage limiters with voltage of 6-35 kV. Guidelines for selection and use in distribution facilities" [2].
2. In Russia:
 - "Guidelines for the use of limiters in 110-750 kV electrical networks" [3];
 - "Guidelines for the use of non-linear overvoltage limiters in 6-35 kV electrical networks" [4]
3. The international standards:
 - IEC 60099-5 Surge arresters. Part 5. Recommendations for selection and application [5].
4. The development of manufacturing companies:
 - "Guidelines for the selection of non-linear surge arresters manufactured by the company" Tavrida Electric "for electrical networks 6-35 kV" [6];
 - "Hinrichsen Volker." Siemens. Metal oxide limiters. Fundamentals [7].
 - Selection, testing and application of metal oxide surge arresters in medium voltage networks. - Kyiv: ABB Ukraine Representative Office [8].
 - Exlim. Technical information. Guide to the selection of high-voltage surge arresters manufactured by ABB [9].
 - Characteristics, selection and placement of surge arresters (110-220) kV: Textbook / G.M. Imanov, F.H. Khalilov, A.I. Tadzhibaev. - St. Petersburg: PEIPK Mintopenergo RF, 1997 [10].

The main task when choosing SA is to limit overvoltages to a safe level for the protected electrical equipment and at the same time ensure the resistance of the arresters to dangerous types of overvoltages. SA for electrical networks of 6-750 kV, presented on the Ukrainian market, are produced by various factories (both

domestic and foreign) based on their own technical solutions, therefore, arresters of various manufacturers designed for one voltage class may differ in characteristics, which must be considered when choosing them.

Electric networks of Ukraine 6-35 kV operate mainly with an isolated or grounded through an arc-quenching reactor neutral, therefore the operating conditions of SA in these networks differ from the operating conditions in 110-750 kV networks by large values and durations of switching and quasi-stationary overvoltages. In this regard, a review of the methods for selecting the main characteristics of SA will be carried out for two types of networks: 6-35 kV and 110 - 750 kV.

Selection of the highest continuous operating voltage of the SA. The main characteristic of the SA is the highest long-term permissible operating voltage of the arrester U_{mov} . This is the highest value of the operating voltage of the power frequency, which can be applied continuously to the arrester during the entire period of its operation, and does not lead to damage or thermal instability of the SA [1]. The basis for choosing this voltage is the highest long-term permissible operating voltage of the electrical network U_{mv} (line voltage).

In the instructions [2, 4, 8], the choice of the highest long-term allowable voltage of 6-35 kV arresters is carried out based on the conditions for the duration of the existence of a single-phase earth fault:

- in networks that allow an unlimited long-term existence of a single-phase earth fault, $U_{mvo} \geq U_{mv}$;
- in networks where the duration of a single-phase earth fault is limited by the time t , $U_{mvo} \geq U_{mv} / K_t$, where K_t - coefficient equal to the ratio of the voltage increase allowed by the manufacturer during the time t to the maximum long-term allowable operating voltage of the SA. The method for determining K_t is indicated in [2, 4, 8].

Additionally, in [2], the specification of the highest long-term permissible operating voltage of the SA is carried out in case of single-phase arc earth faults and in the presence of quasi-stationary overvoltages in the network.

For voltage classes 6-35 kV, according to [5], a surge arrester with a voltage U_{mov} should be chosen not less than 5% higher than the highest voltage level of the network U_{mv} (line voltage).

According to [6], the long-term operating voltage of a 6-35 kV arrester is determined by the formula:

$$U_{mov} \geq \frac{K_0 \cdot U_{mv}}{T(t)}, \quad (1)$$

where K_0 is a coefficient that, depending on the characteristics of the electrical network and the conditions of its operation, can take values from 1 to 1.1; $T(t)$ is the multiplicity characterizing the arrester's ability to withstand voltage increases with a frequency of 50 Hz and a duration of t .

The exact values of the quantities K_0 and $T(t)$ the methods for finding them are defined in [6].

For voltage classes 110-750 kV, according to [3], in all cases, to increase reliability, SA with a phase voltage U_{mov} is chosen at least 2-5% higher than the highest voltage level of the network U_{mv} (phase voltage).

If the stable existence of higher harmonics is possible, the methodological guidelines of RAO UES [3] and the standard [1] on the choice of 110-750 kV SA recommend proceeding as follows [1, 3]:

- if the amplitudes of the voltages of the fundamental frequency and harmonics are measured, then the highest level of the mains voltage at the place of the SA installation in normal mode is taken equal to their sum [3];

- if the amplitude of the harmonic is unknown, then the highest voltage level of the network at the place of installation of the SA in normal mode is taken equal to [1, 3]:

$$U_{mov} \geq \frac{1,1 \cdot U_{mv}}{\sqrt{3}}. \quad (2)$$

In [1], the coefficient of the level of the long-term allowable voltage of the SA was introduced, which depends on the limiting length of the connected line and is:

- * 1.05 - at the maximum length of the line connected to the substation, less than half of the limit for voltage classes 110-330 kV;

- * 1.1 - with the maximum length of the line connected to the substation, greater than or equal to half the limit for voltage classes 110-330 kV;

- * 1.05 - for voltage classes 500-750 kV.

The lengths of the limiting lines for Ukraine are indicated in [1] based on the existing data of the NPC "Ukrenerg".

$$U_{mov} \geq \frac{1,05 \cdot U_{mv}}{\sqrt{3}}. \quad (3)$$

In some other methods, the long-term permissible operating voltage of the SA is determined equal to or greater (it is not specified how much) the maximum operating voltage of the network, see, for example, [9].

It is important to increase the maximum long-term admissible operating voltage of the arrester in circuits with neutral grounding. Therefore, in [1] it is indicated that for voltage classes 110-220 kV in the mode when part of the transformers at the outdoor switchgear operates with an earthed neutral, the coefficient of the level of the long-term permissible operating voltage of the SA is 1.1.

If the U_{mov} level because of the choice of the SA was adopted insufficient, this will lead to the loss of its thermal stability and emergency damage.

Selection of SA for switching overvoltages. The next criterion for choosing an arrester is its reliable operation at switching overvoltages. When selecting, consideration must be given to the matching of the residual voltages during switching impulses with the rated test voltages.

Thus, in the methodological instructions of RAO UES [3], to determine the residual voltage of 110-750 kV SA, the ratio of the test and residual voltages of switching impulses is also used, which is characterized by a coefficient of 1.15-1.2, and for equipment with a service life of over 10 years - coefficient 1.3-1.4. If this condition is not met, it is necessary to choose an SA with the same U_{mov} value, but of a higher energy capacity class, since with an increase in energy intensity for the same nominal voltages, the level of the remaining voltage decreases.

The test voltage with a switching impulse is standardized by GOST 1516.3 [12] for electrical equipment of 330 kV and above. For voltage classes 110 – 220 kV according to [3], when calculating a certain effective test voltage of a switching pulse, one should be guided by the formula:

$$U_{SP} = \sqrt{2} \cdot 1,35 \cdot 0,9 \cdot U_{n50}, \quad (4)$$

where U_{SP} - one-minute test voltage of industrial frequency 50 Hz; coefficients 1.35 and 0.9 are impulse coefficients, taking into account the strengthening of the insulation with a shorter than the test impulse, and the cumulative coefficient, taking into account the multiple effects of overvoltages and the possible aging of the insulation, respectively.

In the recommendations [1], the ratio of the test and remaining voltages of switching impulses is given only for classes 330-750 kV and is characterized by a factor of 1.15. It should be noted that the values of the test voltages by the switching impulse in [1] are taken for level a according to GOST 1516.3 [12].

The recommendations [4] indicate that the value of the residual voltage on the 6-35 kV arrester at the rated current of switching overvoltages should be no more than the withstand voltage of the insulation of the protected electrical equipment. Withstanding voltage by isolation of

switching pulses is determined by the formula (4), in which for the isolation of power transformers the pulse factor and the cumulative factor are 1.35 and 0.9, respectively, and for the isolation of apparatus – 1.1 and 1.0, respectively. In [2], the protective level of the SA at switching overvoltages (according to [2, 4], this residual voltage on the arrester at the rated current of switching overvoltages) is also determined by the formula (4), only the impulse and cumulative factors are: for the insulation of power transformers – 1.3 and 0.85, respectively; for the isolation of apparatus – 1.1 and 0.9, respectively. For 35 kV networks, [2] additionally takes into account the coordination protective interval (the ratio of the protective insulation level and the residual voltage), which is characterized by a factor of 1.15 at switching overvoltages.

When considering switching overvoltages, it is also necessary to check the selected SA for energy absorption (dissipation). The IEC standard [5] recommends 2 types of checking the SA to absorb the energy of switching overvoltages. The first of them corresponds to checking the arrester by the discharge of the connected line, the charge of which has been preserved, for example, because of automatic reclosure (AR). The energy that is absorbed by the SA is calculated in this case by the formula:

$$W = 2U_{ps} (U_c - U_{ps}) \frac{T_w}{Z}, \quad (5)$$

where U_{ps} – residual voltage at switching impulse;
 U_c – overvoltage amplitude; Z – line impedance;
 T_w – time the overvoltage wave travels along the line.

In [7, 9], a multiplier 3 is additionally introduced into formula (5) (to take into account, for example, an unlikely but possible threefold AR actuation), in [1], a multiplier 2 is additionally introduced into formula (5) (to take into account a possible double AR).

To unify the procedure for determining the absorbed energy from a line discharge, IEC introduces the concept of a line discharge class corresponding to the nominal line voltage.

If banks of capacitors with a capacity of C are used in networks, the IEC standard [5] recommends an additional check on the energy capacity W , which is found by the formula:

$$W = \frac{1}{2} C [(3U_0)^2 - (\sqrt{2} U_r)^2], \quad (6)$$

Where U_0 – amplitude of the highest continuous operating voltage phase-to-ground; U_r – SA rated voltage.

Similar requirements for assessing the energy intensity of an SA are given in [6, 7, 9, 10,]. In the guidelines of RAO UES [3], formula (5) is not given, and formula (6) is given with a gross error.

In [2,4], the calculation of the energy intensity of 6–35 kV SA is recommended to be carried out at arc

overvoltages of a single-phase earth fault. The choice of the maximum current carrying capacity of the arrester is determined depending on the magnitude of the capacitive earth fault current and the operating mode of the network.

Selection of SA for lightning overvoltage. The basis for determining lightning overvoltages is the selection of the rated lightning discharge current of 8/20 μ s. According to the recommendations of IEC [5], the maximum current amplitude for the range of rated line voltages less than 142 kV is 5 kA; less than 360 kV – 10 kA; more than 360 kV - 20kA. In the methodological instructions of RAO UES [3], the levels of the rated discharge current of 5-10 kA previously adopted in the USSR have been preserved.

According to the recommendations [2,4,6], when installing a 6-35 kV SA to protect against lightning overvoltages, its rated discharge current is assumed to be 10 kA in cases of: lightning activity more than 50 lightning hours per year; in networks with overhead lines (OL) on wooden supports; in lightning protection schemes for motors and generators connected to OL; in areas with a degree of atmospheric pollution IV (according to GOST 9920), as well as when the surge arrester is installed at a distance of less than 1000 m from the sea. In other cases, a discharge current of 5 kA is assumed.

One of the parameters characterizing the operation of a SA during lightning overvoltage is its residual voltage during a lightning current impulse with a waveform of 8/20 μ s and rated amplitudes of –5, 10, 20 kA, depending on the voltage class of the arrester.

Checking the residual voltage of the selected 6-35 kV SA in [6] is carried out based on the conditions of compliance, that is, it should be less than or equal to the residual voltage of the valve arrester. In [2, 4] it is indicated that the residual voltage of the SA during lightning overvoltages should not be higher than the residual voltage of the valve arrester of group III or group IV. For 35 kV networks, [2] additionally takes into account the coordination protective interval (the ratio of the protective insulation level and the residual voltage), which is characterized by a coefficient of 1.3 in case of lightning overvoltages.

In the methodological recommendations [7] for the selection of 110-750 kV SA for lightning overvoltages, the ratio of test and residual lightning impulse voltages is used, determined by a factor of 1.15.

In the standard [1], the residual voltage of an SA during lightning overvoltages was determined by two criteria:

1. The residual voltage on the SA during a lightning impulse should be less than 90% of the residual voltage of the replaced RV with the same impulse [11];

2. The ratio of test and residual voltages during lightning impulses is characterized by a factor of 1.4 - for voltage classes 110-500 kV; 1.3 - for a voltage class of 750 kV.

The lesser of the two calculated values is taken as the permissible residual voltage on the arrester during a lightning impulse.

The international IEC standard [5] proposes to estimate the energy absorbed by the SA during lightning overvoltages using the formula:

$$W = [2U_f - NU_{pl} \cdot (1 + \ln(2U_f / U_{pl}))] \frac{U_{pl} T_l}{Z}, \quad (7)$$

where

U_{pl} – residual voltage across the arrester during a lightning impulse; U_f – voltage of overlapping line insulation of negative polarity; Z – line impedance; N – the number of lines connected to the SA; T_l – the duration of the current during a lightning strike, taking into account the first and subsequent strikes.

In the standard [1], formula (7) is used for the case of connecting one line (the most difficult option is a dead-end substation).

The second aspect when choosing an arrester for lightning overvoltage is to determine the permissible distance of the SA installation to the protected equipment.

To protect electrical equipment from lightning overvoltages 35-750 kV [3] and [11], it is required to determine the permissible distance from the SA to the protected electrical equipment according to the formula:

$$L_{SA} = \frac{L_{VA} \cdot (U_{iv} - U_{SA})}{U_{iv} - U_{VA}}, \quad (8)$$

where L_{SA} – distance from the surge arrester to the protected electrical equipment; L_{RV} – distance from the arrester to the protected electrical equipment; U_{iv} – test voltage of the protected equipment at full lightning impulse; U_{SA} , U_{VA} – residual voltage across the SA (VA) at a lightning current of 5 kA - for voltage classes 110-220 kV; 10 kA - for voltage classes 330 kV and above.

The standard [1] also uses formula (8), but only for the case of determining the permissible distance from the SA to the protected equipment, if the equipment insulation corresponds to level b (protection using a valve arrester (VA)) according to GOST 1516.3 [12]. In the case of using electrical equipment (UEE) with insulation level a (protection using an SA) at 330-750 kV outdoor switchgear, it is recommended to calculate the permissible distance according to the formula:

$$L_{SA} = \frac{L_{VA} \cdot (U'_{iv} - U_{SA})}{U_{iv} - U_{VA}}, \quad (9)$$

Where U'_{iv} – the test voltage of the protected equipment with insulation level a according to GOST 1516.3 [12]; U_{VA} – test voltage of the protected equipment with insulation level b according to GOST 1516.3 [12].

Thus, in the standard [1], for the first time, the greatest protective distance from the surge arrester to electrical equipment of 330-750 kV voltage classes with a reduced insulation level is introduced.

In [2], when determining the permissible distance from a 6-35 kV SA to electrical equipment, 4 cases should be considered:

- 1) replacement of VA with SA during reconstruction;
- 2) replacement of a SA with an arrester with a different remaining voltage during reconstruction;
- 3) design of new substations according to standard designs;
- 4) design of a new substation, which, according to the scheme and arrangement of electrical equipment, does not correspond to standard projects.

In cases 1) and 3), it is necessary to be guided by the recommendations of the EIR [11].

In case 2), the permissible distance should be specified using the mean:

$$\Delta L \leq \frac{0,7 \times (U_{res,1} - U_{res,2}) \times V}{2 \times a}, \quad (10)$$

where ΔL – the difference between the distances to the protected electrical equipment from the SA1, which is being replaced, and the SA2, which is installed; $U_{res,1}$ – residual voltage on SA1; $U_{res,2}$ – residual voltage on SA2; V – the speed of propagation of the electromagnetic wave; a – the average steepness of thunderstorm waves.

In case 4), it is necessary to carry out special calculations of the substation lightning protection, which will make it possible to determine the installation locations of the SA.

Selection of SA according to explosion safety conditions. When choosing an SA according to the conditions of explosion safety, the magnitude of the actuation current of the anti-explosive device is normalized, at which there is no explosive destruction of the SA cover when it is internally damaged. So, according to [3], when choosing 110-750 kV limiters with anti-explosive device actuation currents up to 40 kA, its value should be 15-20% higher than the value of the current (single-phase or three-phase) short circuit. For SA with anti-explosive device triggering currents above 40 kA and the behavior of the tire as specified in the TC when burning along its arc surface, the introduction of a safety factor is not required.

In [5,7,9] it is said that the choice of an SA according to the conditions of explosion safety must ensure that there is no explosive destruction of the SA when short-circuit currents flow in the middle of its body.

In [1], in addition to the requirements of [3] for explosion safety, requirements for an SA, depending on its design, are given in accordance with IEC 60099-4 [13]. Therefore, for "design A" surge arresters, the values of the anti-explosive device actuation current are normalized, at

which there is no explosive destruction of the arrester cover in the event of its internal damage. For "design B" SA, the maximum short-circuit withstand current determined by the manufacturer must be greater than the maximum short-circuit current at the outdoor switchgear for which the SA is selected.

The actuation current of the pressure relief device of 6-35 kV SA, according to [2, 4], is chosen at least 10% higher than the value of the two-phase or three-phase (the largest of them) short-circuit current at the place of the SA installation.

Selection of SA based on mechanical characteristics. According to [1,2], 110-750 kV SA of supporting design of location category 1 must withstand mechanical loads in case of ice with an ice wall thickness of up to 20 mm and wind at a speed of 15 m/s, and without ice - at a speed of 30 m/s (according to at the request of the customer with a wind speed of 40 m/s) and when tensioning the wires in the horizontal direction according to GOST 16357 [14]. In [1], the loads from the tension of wires are taken as for newly developed arresters according to [14], and in [2] - as for arresters of location category I, developed before 1983 according to [14].

The calculation of the bending moment of a 110-750 kV SA from wind force and wire tension is carried out according to the formula [1, 13]:

$$M = \frac{1,29}{2} \cdot V^2 \cdot H \cdot (d_m + 2 \cdot d_{ice}) \cdot 0,8 \cdot \frac{H}{2} + H \cdot P_{ten} \quad (11)$$

where V – the wind speed; H – the height of the SA; P_{ten} – tension force of wires; d_m – the outer diameter of the insulating part of the arrester; d_{ice} – ice wall thickness.

According to [6], 6-35 kV SA must withstand mechanical loads in accordance with GOST 16357 [14]. Similar requirements are in [2], however, in the absence of ice, the wind speed is increased to 40 m/s.

According to [1], the seismic resistance of a 110-750 kV SA is determined on the MSK-64 scale depending on the regions of Ukraine and varies from 6 (for example, the Kiev region) to 9 (for example, the Autonomous Republic of Crimea) points.

According to [2], when installing a 110-750 kV SA in areas with increased seismic hazard (more than 7 points according to MSK-64); it is necessary to contact the SA manufacturer to select the most suitable SA design.

Conclusions. In Ukraine and in other countries, methods for the selection and application of 6-750 kV SA have been developed, thanks to which it is possible to select arresters for replacing arresters at substations, as well as for newly built substations, directly by design organizations, without resorting to the help of manufacturers.

The choice is made according to the following main parameters:

- rated continuous operating voltage of the SA;
- rated discharge current;
- the level of the remaining voltage at the rated current of the switching overvoltage;
- the level of the remaining voltage at the rated current of lightning overvoltage;
- determination of the permissible protective distance from the SA to the protected equipment;
- compliance with explosion safety conditions;
- characteristics of mechanical resistance.

For the further development of methods for selecting SA, it is necessary to switch to statistical methods for calculating overvoltages.

References

1. SOU-N EE 40.12-00100227-47: 2011 Non-linear overvoltage limiters with a voltage of 110-750 kV. Guidelines for selection and application.
2. SOU-N MEV 40.1 Non-linear surge arresters with voltage 6-35 kV. Guidelines for selection and use in distribution systems
3. Guidelines for the use of surge arresters in 110–750 kV electrical networks. Approved by the Department of Development Strategy and Scientific and Technical Policy of RAO UES of Russia on September 30, 1999. - M.: "S. PRINT", 2000. 68 p.
4. Guidelines for the use of nonlinear surge arresters in electrical networks 6-35 kV. Approved by the Department of Development Strategy and Scientific and Technical Policy of RAO UES of Russia on April 27, 2001. M.: "S. PRINT", 2001. 73 p.
5. IEC 60099-5: 2000 Surge arresters. Part 5. Recommendations for selection and application.
6. Methodical instructions on the choice of non-linear surge arresters manufactured by Tavrida Electric Ukraine for 6-35 kV electrical networks. Approved by the order of the State Department of Electricity of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine dated 02.08.2001 № 4. - Sevastopol: Research Center "ECOSI-Hydrophysics". 2002. 40 p.
7. Hinrichsen Volker. Siemens. Metal oxide restraints. The basics. AO Siemens, 2000. 111 p.
8. Selection, testing and application of metal oxide surge arresters in medium voltage networks. Kiev: Representative office of ABB Ukraine. 52 p.
9. Exlim. Technical information. Selection guide for high voltage surge arresters from ABB. - ZAO ABB UETM, 1996. 24 p.
10. Characteristics, selection and placement of surge arresters (110-220) kV: textbook / GM Imanov, F. Kh. Khalilov, AI Tadjibaev. - St. Petersburg: PEIPK of the Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation, 1997. 42 p.
11. Rules for electrical installations. 3rd ed., Rev. and add. Kh.: Fort Publishing House. 2010.
12. GOST 1516.3-96 "AC electrical equipment for voltages from 1 to 750 kV. Requirements for dielectric

strength of insulation ". It was put into effect as a state standard of Ukraine by order of the State Standard of Ukraine dated 12.03.1999 No. 104 from 2000-01-01. - Kiev: Gosstandart, 2000 . 50 p.

13. IEC 60099-4 (2009) Surge arresters. Part 4. Oxide-metal arresters without spark gaps for overvoltage protection in AC systems.

14. GOST 16357-83 AC valve arresters for rated voltages from 3.8 to 600 kV. General technical conditions.

About the Authors

Serhii Shevchenko, Doctor of Science, Head of Electric Power Transmission Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, sergii.shevchenko@khpi.edu.ua

Dmytro Danylchenko, PhD, Associate Professor of Electric Power Transmission Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, Dmytro.Danylchenko@khpi.edu.ua

Oleksii Pirotti, PhD, Associate Professor of Electric Power Transmission Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, oleksii.pirotti@khpi.edu.ua

Kseniia Minakova, PhD, Associate Professor of Physics Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, kseniia.minakova@khpi.edu.ua

Олег Шутенко, Сергей Пономаренко

Прогнозирование значений показателей трансформаторных масел с учетом особенностей старения на длительных интервалах эксплуатации

Аннотация. Обучена и протестирована система адаптивного нейро-нечеткого вывода для прогнозирования значений показателей качества трансформаторных масел. Обоснована необходимость учета особенностей старения трансформаторных масел в условиях длительной эксплуатации при решении задач прогноза.

Ключевые слова: трансформаторное масло, прогнозирование, старение, нагрузка трансформаторов, корреляция.

Oleg Shutenko, Serhii Ponomarenko

Prediction of transformer oils' values, taking into account the peculiarities of ageing at long operating intervals

Abstract. An adaptive neuro-fuzzy inference system has been trained and tested to predict the quality of transformer oils. The need to take into account the ageing features of transformer oils in long-term use into account when solving forecast tasks has been substantiated.

Keywords: transformer oil, forecasting, ageing, transformer load, correlation.

Введение. Для оптимальной, экономично обоснованной эксплуатации силовых трансформаторов на протяжении всего срока службы требуется переход от традиционного обслуживания и диагностики по сроку службы к обслуживанию по состоянию. Такой переход позволяет не только снизить затраты на техническое обслуживание, но также предотвращает аварийные повреждения и, таким образом, продлить срок службы трансформаторов [1]. Однако, практическая реализация стратегии обслуживания и диагностики оборудования электрических сетей по их функциональному состоянию требует наличия математических моделей, позволяющих не только выполнять оценку состояния оборудования по текущим результатам испытаний (задача диагностики), но и прогнозировать его состояние в будущем (задача прогноза).

В настоящее время вопросам прогнозирования значений показателей масел посвящено достаточно большое количество публикаций. Для прогнозирования возраста образцов трансформаторного масла, находящихся в эксплуатации, предложено использовать две нейронные сети – модель искусственной нейронной сети (ANN) и модель системы адаптивного нейро-нечеткого вывода (ANFIS) [2]. В обеих моделях в качестве входных параметров используются шесть показателей трансформаторного масла такие как влагосодержание, удельное сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь масла, межфазное натяжение и температура вспышки, а в качестве целевого параметра – возраст. В модели ANN используется многослойная сеть обратной связи, использующая алгоритм обратного распространения, а модель ANFIS основана на модели Sugeno. В [3] представлен новый подход к

расчету индекса здоровья силовых трансформаторов, основанный на статистическом ядре общей регрессии нейронных сетей (GRNN). Для обучения предложенной модели были использованы результаты шести важных испытаний (общий объем растворенного горючего газа (TDCG), напряжение пробоя, кислотность, влажность, содержание фурана и значения тангенса угла диэлектрических потерь). В работе [4] для прогнозирования возраста изоляционного масла предлагается модель оценки старения, использующая гибридную классификационную модель за счет слияния нейронной сети (NN) и сети глубокого убеждения (DBN). Алгоритм обучения как NN, так и DBN заменен модифицированным алгоритмом льва (LA), названным случайно модифицированным алгоритмом льва (RM-LA) для уменьшения разницы в погрешности между предсказанными и фактическими результатами. В [5] представлен новый подход к оценке состояния трансформатора, основанный на экспериментальных моделях, модели прогнозирования и концепции моделирования неопределенности в рамках байесовской системы фильтрации частиц. Также был реализован анализ чувствительности, который позволил оценить влияние погрешностей измерения нагрузки и температуры на срок службы трансформатора. В [6] представлен гибридный метод разработки более принципиального подхода к определению ожидаемого срока службы трансформаторов. Подход построен на экономическом анализе эксплуатационных характеристик трансформаторов в сочетании с техническими вопросами, включенными в процесс принятия решения. В этом методе сначала оценивается срок службы трансформатора с помощью гибридного метода, основанного на алгоритме Монте-Карло и

ANN. В [7] исследовано влияние нагрузки, влажности и температуры окружающей среды на диэлектрические свойства трансформатора, а именно на электрическую прочность, влажность и степень полимеризации бумажной изоляции. Для точной оценки остаточного ресурса трансформаторов использовалась методика, называемая мультирегрессионным анализом. В работе [8] для прогнозирования значений показателей трансформаторных масел используются модели регрессии и классификации, основанные на машинном обучении, учитывающие корреляционные зависимости между показателями масла. Для эффективного внедрения технического обслуживания в [9] была разработана модель обслуживания на основе условий. Модель обслуживания на основе условий прогнозирует текущее состояние трансформатора с помощью параметров онлайн-мониторинга, за которыми следуют автономные диагностические измерения, критерии оценки и решение о техническом обслуживании. Выполненный анализ показывает, что, несмотря на большой объем исследований, особенности старения масел в условиях длительной эксплуатации учитываются не в полном объеме. Данное обстоятельство и послужило причиной для подготовки данной статьи.

Анализ особенностей старения масла в условиях длительной эксплуатации. Достоверность и точность модели прогноза будет во многом определяться тем, насколько адекватно она учитывает особенности старения масел в условиях длительной эксплуатации и насколько полно модель использует наиболее значимые факторы, влияющие на интенсивность старения.

Приведенные в [10] результаты исследований показывают, что характер зависимостей показателей трансформаторных масел от продолжительности эксплуатации имеет детерминированный не случайный характер. Это позволяет использовать длительность эксплуатации в качестве предиктора для прогнозирования значений показателей. Однако, как показано в [11], скорость дрейфа показателей масла не является постоянной на всем интервале эксплуатации. Т.е. зависимости показателей масла от длительности эксплуатации являются нелинейными. В качестве примера на рис. 1 приведены зависимости содержания в масле органических кислот от длительности эксплуатации, полученные для 249 трансформаторов с номинальным напряжением 110 кВ.

На рис. 1 выделены два характерных участка: индукционный период и период самоускорения. В первый, индукционный период содержание органических кислот практически не изменяется (горизонтальные участки кривых на рисунке), поскольку в этот период идет образование первичных продуктов окисления – гидроперекисей.

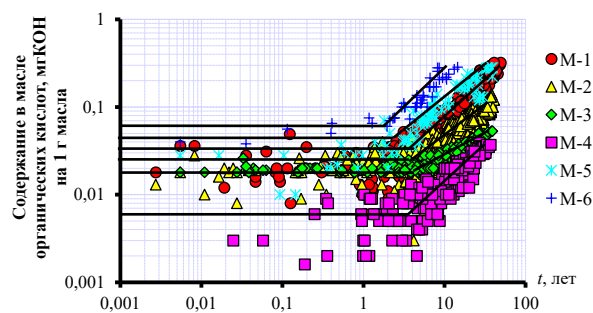


Рис. 1. Зависимости содержания в масле органических кислот от длительности эксплуатации

После окончания индукционного периода наблюдается рост содержания органических кислот (наклонные линии на рисунке). В этот период происходит распад образовавшихся во время индукционного периода гидроперекисей на радикалы, а также образование вторичных продуктов превращения перекисей – спиртов и кислот [12]. Отсутствие на анализируемых зависимостях периода самоторможения обусловлено тем, что данный период наступает при более глубокой степени окисления масла, которая не достигается в условиях реальной эксплуатации.

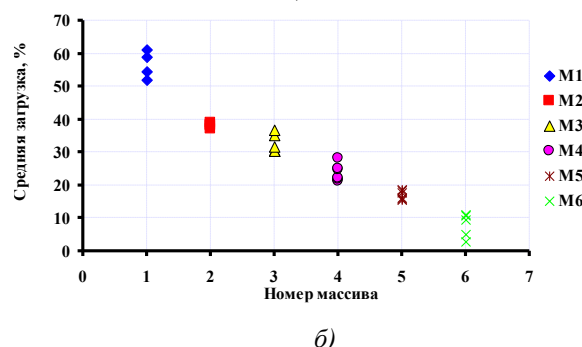
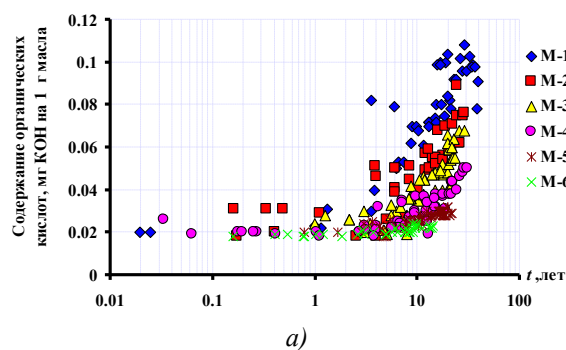


Рис. 2. Корреляционная зависимость между средней загрузкой трансформаторов и содержанием в масле органических кислот: а) зависимость содержания в масле органических кислот от длительности эксплуатации для однородных массивов M1-M6; б) распределение трансформаторов по коэффициентам загрузки в однородных массивах

Нелинейный характер зависимостей показателей масел накладывает существенные ограничения на использование регрессионных моделей для прогнозирования значений показателей, поскольку возникают объективные сложности при выборе функциональной зависимости показателя. Как видно из рис. 1 старение масла в анализируемых трансформаторах протекает с разной скоростью (разным цветом выделены 6 массивов данных с близкими состояниями старения). Выполненные в работе [13] исследования показывают, что одним из факторов, влияющих на интенсивность старения масел, является нагрузка трансформаторов, от значения которой зависит рабочая температура масел. На рис. 2 приведены зависимости содержания в масле органических кислот от длительности эксплуатации для 6 массивов данного показателя с одинаковой скоростью окисления (рис. 2, а) и значения средней загрузки трансформаторов, составляющих данные подмножества (рис. 2, б).

Как видно из рис. 2, существует функциональная связь между нагрузкой трансформаторов и скоростью старения масел, что также позволяет использовать данный параметр в качестве предиктора прогноза.

В некоторых случаях может возникнуть необходимость выполнить прогноз одного из показателей по значениям другого. В этом случае для решения задачи прогноза целесообразно использовать не только значения длительности эксплуатации и коэффициентов загрузки трансформаторов, но и наличие корреляционных связей между показателями [14]. В табл. 1 приведены результаты корреляционного анализа между показателями трансформаторных масел.

Таблица 1

Показатели масла	n	$\Gamma_{\text{набл.}}$	$\Gamma_{\text{крит}}$	$\Gamma_{\text{ниж}}$	$\Gamma_{\text{верх}}$
Гвсп-КОН	3703	-0.105	0.195	-0.137	-0.168
Гвсп-Упр	3701	-0.011	0.195	-0.044	0.021
Гвсп- $\text{tg}\delta$ при 90°C	570	-0.087	0.195	-0.168	-0.005
Гвсп-Цвет масла	2104	-0.086	0.195	-0.129	-0.044
Гвсп-РВВ	1191	-0.043	0.195	-0.100	0.014
Гвсп-Влагосодержание	1635	-0.108	0.195	-0.156	-0.06
КОН-Упр	3745	-0.316	0.195	-0.345	-0.287
КОН- $\text{tg}\delta$ при 90°C	570	0.296	0.195	0.219	0.369
КОН-Цвет масла	2108	0.556	0.195	0.526	0.585
КОН-РВВ	1191	0.578	0.195	0.539	0.615
КОН-Влагосодержание	1635	0.215	0.195	0.168	0.261
Упр- $\text{tg}\delta$ при 90°C	570	-0.111	0.195	-0.191	-0.029
Упр-Цвет масла	2118	-0.225	0.195	-0.265	-0.184
Упр-РВВ	1191	0.093	0.195	0.037	0.150

Упр-Влагосодержание	1649	-0.064	0.195	-0.112	-0.016
$\text{tg}\delta$ при 90°C-Цвет масла	509	0.298	0.195	0.217	0.375
$\text{tg}\delta$ при 90°C-РВВ	562	0.168	0.195	0.086	0.247
$\text{tg}\delta$ при 90°C-Влагосодержание	553	0.110	0.195	0.027	0.192
Цвет масла-РВВ	580	0.311	0.195	0.236	0.383
Цвет масла-Влагосодержание	1267	0.033	0.195	-0.022	0.088
РВВ-Влагосодержание	661	0.405	0.195	0.339	0.467

Здесь n – объем выборочных значений; $\Gamma_{\text{набл.}}$ – расчетное значение коэффициента парной корреляции; $\Gamma_{\text{крит}}$ – критическое значение коэффициента парной корреляции при заданном уровне значимости $\alpha = 0.95$ и степенью свободы $f = n - 2$; $\Gamma_{\text{ниж}}$, $\Gamma_{\text{верх}}$ – нижняя и верхняя границы доверительного интервала; Гвсп – температура вспышки масел; КОН – содержание в масле органических кислот; Упр – пробивное напряжение масел; $\text{tg}\delta$ при 90°C – тангенс угла диэлектрических потерь масла, измеренный при температуре 90°C; РВВ – содержание в масле водорастворимых кислот.

Анализируя данные табл. 1 легко увидеть, что наиболее коррелированными оказались показатели, которые характеризуют степень окисления масла. Так, кислотное число масла имеет значимую статистическую связь практически со всеми показателями, за исключением температуры вспышки масла. Содержание водорастворимых кислот имеет значимую связь с цветом масла и влагосодержанием. Цвет масла значимо взаимосвязан с пробивным напряжением и тангенсом угла диэлектрических потерь масла. В тоже время не выявлено значимой статистической связи между температурой вспышки масла и другими показателями. Также не выявлено значимой связи между тангенсом угла диэлектрических потерь масла и пробивным напряжением. Наличие значимой корреляционной связи между отдельными показателями масел может быть использовано при решении задач прогноза.

Обучение нечеткой нейронной сети для прогнозирования значений показателей трансформаторных масел. В качестве примера рассмотрим процедуру обучения системы ANFIS для прогнозирования значения цвета трансформаторных масел. Топология нечеткой нейронной сети для прогнозирования цвета трансформаторного масла приведена на рис. 3. Как видно, прогнозирование цвета трансформаторных масел выполняется по трем предикторам: длительность эксплуатации, среднее значение коэффициента загрузки трансформаторов и содержание в масле органических кислот. Для обучения использовались

результаты периодических испытаний состояния трансформаторных масел для 25 трансформаторов напряжением 110 кВ.

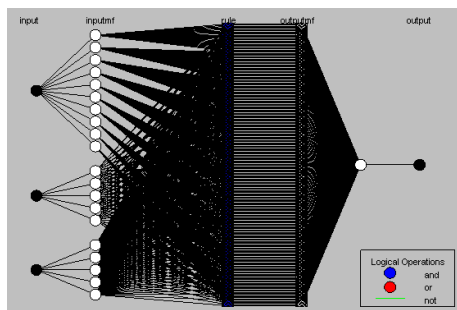


Рис. 3. Топология нечеткой нейронной сети

Максимальное значение срока эксплуатации составило 35 лет. Общий объем выборочных значений составил 378 значений. У созданной сети всего 20 входов – 10 входов по длительности эксплуатации им по 5 входов по значениям коэффициента загрузки и кислотного числа. Большее число входов по параметру длительность эксплуатации обусловлено необходимостью учета нелинейного характера зависимостей показателей масла от продолжительности эксплуатации.

В качестве функции принадлежности для каждой входной переменной использовались трапециевидные функции. Это позволило обеспечить максимальную степень принадлежности внутри каждого интервала и ее снижение по краям. Для выходного параметра (цвета масла) тип функции принадлежности был задан как constanta. Количество циклов обучения созданной сети составило 100 эпох. На рис. 4 показана зависимость ошибки обучения от количества циклов обучения. Ошибка обучения составила 0,272 ЦЧ.

Далее сеть была протестирована на независимой выборке, т.е. на данных, которые не использовались в процесс обучения. Объем проверочной выборки оставил 70 значений. На рис. 5 приведены фактические и спрогнозированные значения цвета трансформаторного масла.

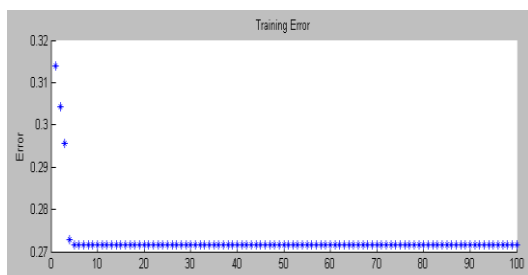


Рис. 4. Зависимость ошибки обучения нечеткой нейронной сети от количества циклов обучения

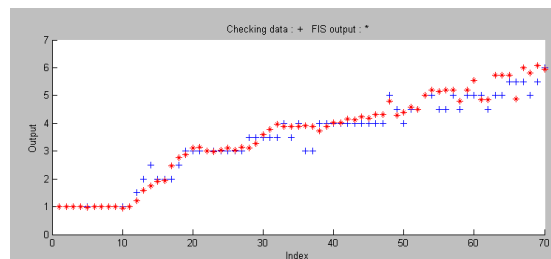


Рис. 5. Фактические (+) и спрогнозированные (*) значения цвета трансформаторного масла

Среднеквадратическая погрешность прогноза составила 0,352, что, по мнению авторов, является вполне приемлемым результатом. На рис. 6 приведена динамика изменения ошибки прогноза при проверке на независимой выборке. Поскольку при подаче на вход сети данные в проверочной выборке были ранжированы по мере возрастания срока эксплуатации, то фактически кривая на рис. 6 отражает динамику изменения погрешности прогноза от длительности эксплуатации.

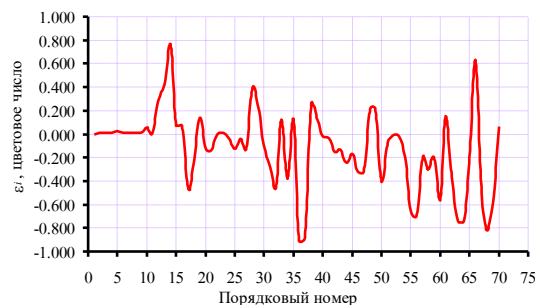


Рис. 6. Динамика изменения ошибки прогноза при проверке сети на независимой выборке

Анализируя зависимость на рис. 6 легко увидеть, что зависимость имеет случайный, стохастический характер. Т.е. обученная система ANFIS адекватно учитывает нелинейный характер зависимостей показателей масла от длительности эксплуатации. При этом для индукционного периода цвета трансформаторного масла (до 10 лет эксплуатации в трансформаторах с низкой нагрузкой) значения погрешности прогноза имеют минимальные значения.

Таким образом, нейронные сети нечеткого вывода позволяют достаточно точно прогнозировать значения показателей трансформаторного масла, учитывая при этом как корреляционные связи между показателями, так и влияния продолжительности эксплуатации и значения коэффициента загрузки трансформаторов.

Выводы. Полученные в работе результаты свидетельствуют о том, что обеспечение максимальной достоверности прогноза возможно за счет учета как физических особенностей процессов старения масел в условиях длительной эксплуатации (нелинейный характер зависимостей

показателей масел от продолжительности эксплуатации), так и факторов, влияющих на интенсивность старения масла (длительность эксплуатации, средние значения коэффициентов загрузки трансформаторов). Кроме того, для решения задач прогноза можно использовать наличие значимой корреляционной связи между отдельными показателями масел. Приведенный в работе пример обучения системы адаптивного нейро-нечеткого вывода (ANFIS) для прогнозирования значения цвета трансформаторных масел по значениям продолжительности эксплуатации, средним значениям коэффициентов загрузки трансформаторов и содержанию в масле органических кислот показал, что учет данных факторов позволяет получить адекватную модель прогноза, даже при использовании стандартных нейро-нечетких сетей.

Литература

1. Balamurugan S. and Ananthanarayanan R. "Condition Monitoring Techniques of Dielectrics in Liquid Immersed Power Transformers - A Review," 2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Portland, OR, 2018, pp. 1-7, DOI: 10.1109/IAS.2018.8544650.
2. Ansari M. and Shimi S. "Development of ANN and AFIS Models for Age Prediction of in-Service Transformer Oil samples", International Journal for Innovative Research in Science & Technology, vol. 2, no. 7, pp. 1-5, 2015.
3. Islam M., Lee G. and Hettiwatte S. "Application of a general regression neural network for health index calculation of power transformers", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 93, pp. 308-315, 2017. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.06.008
4. Singh H. and Singh J. "Enhanced optimal trained hybrid classifiers for aging assessment of power transformer insulation oil", World Journal of Engineering, vol. 17, no. 3, pp. 407-426, 2020. DOI: 10.1108/wje-11-2019-0339
5. Aizpurua J., McArthur S., Stewart B., Lambert B., Cross J. and Catterson V. "Adaptive Power Transformer Lifetime Predictions Through Machine Learning and Uncertainty Modeling in Nuclear Power Plants", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 6, pp. 4726-4737, 2019. DOI: 10.1109/tie.2018.2860532
6. Zareian Jahromi M., Mehrabanjahromi M., Tajdinian M. and Allahbakhshi M. "A Novel method to estimate Economic Replacing Time of Transformer Using Monte Carlo Algorithm and ANN", IJUM Engineering Journal, vol. 19, no. 2, pp. 54-67, 2018. DOI: 10.31436/ijumej.v19i2.793
7. Ranga C. and Chandel A. "Multi-Regression Based Health Assessment of Power Transformers in Consideration of Ambient Conditions", in 14th IndiaDoble Power Forum, 2016, pp. 1-8.
8. Bhatia N.K. ., El-Hag A.H. and. Shaban K.B, "Machine Learning-based Regression and Classification Models for Oil Assessment of Power Transformers," 2020 IEEE International Conference on Informatics, IoT, and Enabling Technologies (ICIoT), Doha, Qatar, 2020, pp. 400-403, DOI: 10.1109/ICIoT48696.2020.9089647.
9. Murugan R. and Ramasamy R. "Failure analysis of power transformer for effective maintenance planning in electric utilities", Engineering Failure Analysis, vol. 55, pp. 182-192, 2015. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.06.002
10. Бондаренко В.Е. Повышение эффективности эксплуатационного измерительного контроля трансформаторных масел. [Монография] / В.Е. Бондаренко, П.Ф. Щапов, О.В. Шутенко. Харків: НТУ «ХПИ», 2007. 452 с.
11. Шутенко О.В. Особенности дрейфа показателей качества трансформаторного масла в течении длительной эксплуатации / О.В. Шутенко // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПИ». 2007. № 4. С. 26 – 30.
12. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло М., Энергоатомиздат 1983 г. – 296 с.
13. Шутенко О.В. Исследование влияния режимов работы трансформаторов на интенсивность старения масла / О. В. Шутенко // Енергетика та електрифікація. Київ. 2008. №8. С. 54–59.
14. Шутенко О.В. Комплексный корреляционный анализ показателей качества трансформаторного масла / О.В. Шутенко // Вісник НТУ «ХПИ». Харків: НТУ «ХПИ». 2008. №45. С. 156 – 167.

Литература (транслитерация)

1. S. Balamurugan and R. Ananthanarayanan, "Condition Monitoring Techniques of Dielectrics in Liquid Immersed Power Transformers - A Review," 2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Portland, OR, 2018, pp. 1-7, DOI: 10.1109/IAS.2018.8544650.
2. M. Ansari and S. Shimi, "Development of ANN and AFIS Models for Age Prediction of in-Service Transformer Oil samples", International Journal for Innovative Research in Science & Technology, vol. 2, no. 7, pp. 1-5, 2015.
3. M. Islam, G. Lee and S. Hettiwatte, "Application of a general regression neural network for health index calculation of power transformers", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 93, pp. 308-315, 2017. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.06.008

4. H. Singh and J. Singh, "Enhanced optimal trained hybrid classifiers for aging assessment of power transformer insulation oil", World Journal of Engineering, vol. 17, no. 3, pp. 407-426, 2020. DOI: 10.1108/wje-11-2019-0339
5. J. Aizpurua, S. McArthur, B. Stewart, B. Lambert, J. Cross and V. Catterson, "Adaptive Power Transformer Lifetime Predictions Through Machine Learning and Uncertainty Modeling in Nuclear Power Plants", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 6, pp. 4726-4737, 2019. DOI: 10.1109/tic.2018.2860532
6. M. Zareian Jahromi, M. Mehrabanjahromi, M. Tajdinian and M. Allahbakhshi, "A Novel method to estimate Economic Replacing Time of Transformer Using Monte Carlo Algorithm and ANN", IIUM Engineering Journal, vol. 19, no. 2, pp. 54-67, 2018. DOI: 10.31436/iiumej.v19i2.793
7. C. Ranga and A. Chandel, "Multi-Regression Based Health Assessment of Power Transformers in Consideration of Ambient Conditions", in 14th IndiaDoble Power Forum, 2016, pp. 1-8.
8. N. K. Bhatia, A. H. El-Hag and K. B. Shaban, "Machine Learning-based Regression and Classification Models for Oil Assessment of Power Transformers," 2020 IEEE International Conference on Informatics, IoT, and Enabling Technologies (ICIoT), Doha, Qatar, 2020, pp. 400-403, DOI: 10.1109/ICIoT48696.2020.9089647.
9. R. Murugan and R. Ramasamy, "Failure analysis of power transformer for effective maintenance planning in electric utilities", Engineering Failure Analysis, vol. 55, pp. 182-192, 2015. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.06.002
10. Bondarenko V.E. Povyshenie effektivnosti ekspluatatsionnogo izmeritel'nogo kontrolya transformatornyh masel. [Monografiya] [Increased efficiency of operational measuring control of transformer oils. [Monograph]] / V.E. Bondarenko, P.F. Shchapov, O.V. Shutenko – Kharkiv: NTU «KhPI» 2007. – 452 p.
11. Shutenko O.V. Osobennosti drejfa pokazatelej kachestva transformatornogo masla v techenii dlitel'noj ekspluatatsii [Features of the drift of transformer oil quality indicators during long-term operation] / O.V. Shutenko // Integrovani tekhnologii ta energoberezhennia. – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2007. – № 4. – pp. 26-30.
12. Lipshtejn R.A., SHahnovich M.I. Transformatornoe maslo [Transformer oil] M., Energoatomizdat 1983 g. – 296 p
13. Shutenko O.V. Issledovanie vliyanija rezhimov raboty transformatorov na intensivnost' starenia masla [Study of the influence of transformer operating modes on oil aging intensity] / O. V. Shutenko // Energetika ta elektrifikaciia. – Kyiv. – 2008 – №8. – pp. 54-59.
14. Shutenko O.V. Kompleksnyj korrelyacionnyj analiz pokazatelej kachestva transformatornogo masla [Comprehensive correlation analysis of transformer oil quality indicators] / O.V. Shutenko // Visnyk NTU «KhPI». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2008. – №45. – pp. 156-167.

Сведения об авторах

Олег Шутенко, к.т.н., доцент, кафедра «Передача электрической энергии», Национальный Технический Университет «Харьковский Политехнический Институт», Харьков, Украина, o.v.shutenko@gmail.com
Сергей Пономаренко, аспирант, кафедра «Передача электрической энергии», Национальный Технический Университет «Харьковский Политехнический Институт», Харьков, Украина, ponomarenkserhii@gmail.com

Бадур Чунашвили, Мамука Кобалия, Александр Петросян,
Теимураз Гамрекелашвили, Натиа Ртвеладзе

Исследование электромагнитных процессов, проходящих в одножильных и трехжильных кабельных линиях в направлении определения потерь мощности

Аннотация. В работе проведены исследования причин, возникновения электромагнитных процессов, проходящих в одножильных и трехжильных кабельных линиях сетей среднего напряжения (6-35кВ) г. Тбилиси. На основе анализа полученных результатов установлено, что электромагнитные процессы и вызываемые ими потери мощности в одножильных и трехжильных кабелях обусловлены одинаковыми и отличающимися друг от друга факторами. При этом, доказано, что в одножильных кабелях доминируют потери, вызванные ёмкостными токами в изоляции между жилами и защитной оболочкой. Так же, значительное влияние на рост потерь оказывают токи в оболочке, создаваемые в жилах кабеля током нагрузки. В трехжильных кабелях доминируют ёмкостные потери в изоляции между жилами фаз и потери в защитной оболочке, возникшие в результате асимметрий токов нагрузки. Установлено, что величина возникающих в изоляции кабелей потерь, вызванных ёмкостными высокочастотными гармониками токов нагрузки, намного больше в одножильных, чем в трехжильных кабельных линиях.

Ключевые слова: одножильные и трехжильные кабели, электромагнитные процессы, потери мощности в изоляции, защитная оболочка, высокочастотные гармоники.

Badur Tchunashvili, Mamuka Kobalia, Alexander Petrosyan,
Teimuraz Gamrekelashvili, Natia Rtveladze

Research of electromagnetic processes in single-wire and three-wire cable lines in the direction of determining power loss

Annotation. In this work, research has been carried out on the causes, occurrence of electromagnetic processes occurring in single-wire and three-wire cable lines of medium voltage networks (6-35 kV) in Tbilisi. Based on the analysis of the results obtained, it has been established that electromagnetic processes and the power losses caused by them in single-wire and three-wire cables are due to the same and differing factors from each other. At the same time, it has been proven that in single-phase cables, losses caused by capacitive currents in the insulation between the cores and the protective sheath dominate. Also, the currents in the sheath created in the cable cores by the load current have a significant effect on the growth of losses. In three-wire cables, capacitive losses in the insulation between the phase conductors and losses in the protective sheath, which arise as a result of load current asymmetries, dominate. It has been established that the value of the losses occurring in the insulation of cables, caused by capacitive high-frequency harmonics of load currents, is much higher in single-wire than in three-wire cable lines.

Key words: single-phase and three-phase cables, electromagnetic processes, power losses in insulation, protective sheath, high-frequency harmonic.

Введение. В настоящее время, в условиях создавшегося энергетического и экономического кризиса в мире, одной из основных актуальных задач является повышение энергоэффективности сетей среднего напряжения, непосредственно связанной с потерями электроэнергии в элементах сети электроснабжения [1]. В число этих элементов входят и кабельные линии среднего напряжения. Примечательно, что в г. Нью-Йорк мощность емкостного тока достигла 28 МВА, и это при передаваемой мощности в 98 МВА [2]. При этом, рабочая емкость кабеля оказалась приблизительно равной 0,27 Фарад на километр.

Постановка задачи.

Потери энергии, имеющие место в кабельных сетях систем электроснабжения, значительно влияют на энергетические показатели сети и ее

энергоэффективность. В тоже время, потери, сопровождаемые выделением тепла, в кабельной сети вызывают интенсивный износ кабелей и их преждевременный выход из строя. К примеру, в 2019 году, из общего количества 1082 произошедших аварий в кабельной сети электроснабжения среднего напряжения (6 – 35кВ) г. Тбилиси, 982 (90,7%) аварии приходят на кабели, вышедших из строя в результате износа кабельной сети длиной в 1930 км [3]. Соответственно, из 2,902584535,290 кВт.ч пропущенной через кабельную сеть среднего напряжения годовые потери электроэнергии составили 252524854.5 кВт.ч (8,7%) [4], что значительно ухудшило экономическое состояние компании [5].

Следовательно, в вопросе понижения потерь в кабельных линиях, особое значение приобретает изучение и выявления причин их возникновения.

Внедрение новых мощных электро-технологических установок в промышленных предприятиях и замена в городах старых построек современными многоэтажными зданиями и сооружениями, в 20 раз, а в некоторых случаях в 50 раз увеличило расчётные удельные нагрузки отдельных участков городов и производств [6]. Соответственно, значительно увеличилось установленная мощность силовых трансформаторов напряжением 6-35кВ и расчётные сечения кабельных линий сетей системы электроснабжения [6]. В связи с этим, в некоторых случаях, возникла необходимость замены трехжильных кабельных линий на одножильные кабели и устройство новой архитектуры сети [7]. Исходя из выше сказанного, для улучшения энергетических показателей сетей электроснабжения и повышения их энергоэффективности, необходимо исследовать текущие электромагнитные процессы (ЭМП) в трёх и одножильных кабельных линиях, определить вызванные ЭМП потери электроэнергии и мощности в каждой из них и установить их влияние на энергетические показатели.

Цель работы.

Целью работы является исследование электромагнитных процессов проходящих в одножильных и трехжильных кабельных линиях сети электроснабжения, выявление причин возникновения потерь мощности в обоих случаях, анализ полученных результатов и определение степени влияния возникающих потерь мощности в вышеупомянутых типах кабельных линий на ухудшение энергетических показателей сети.

Материалы исследования.

Существующие, в кабельных сетях системы электроснабжения напряжением 6-35кВ, потери активной и реактивной мощности, по причине своего возникновения и его масштабу, включают в себя составляющие разных видов. Каждая из них определена конкретными принципами электроэнергетики, и зависит от различных факторов. В кабельной сети по природе своего возникновения, существуют потери активной и реактивной мощности, которые зависят от тока нагрузки, проходящего в жилах кабеля (т.н. потери нагрузки) и потери, которые не зависят от тока нагрузки (т.н. потери холостого хода) [8].

Потери активной мощности и энергии, возникающие, в кабельных сетях зависят от напряжения сети, частоты, от действующего значения, проходящего в нём тока нагрузки и коэффициента искажения формы кривой тока.

Потери активной мощности и энергии, возникающие, в трёх одножильных кабельных линиях, представляют сумму потерь трёх фаз (Рис.1).

$$\Delta P_{\text{каб.сет}} = \Delta P_{\text{кабА}} + \Delta P_{\text{кабВ}} + \Delta P_{\text{кабС}} \quad (1)$$

Потери для одножильного кабеля с металлическим защитным кожухом (для фазы А) определяются следующим выражением:

$$\Delta P_{\text{кабА}} = \Delta P_{\text{жилаА}} + \Delta P_{\text{изоляция}} + \Delta P_{\text{оболА}} ; \quad (2)$$

$$\Delta W_{\text{кабА}} = \Delta W_{\text{жилаА}} + \Delta W_{\text{изоляция}} + \Delta W_{\text{оболА}},$$

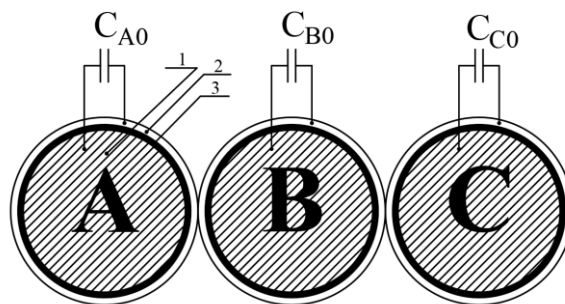


Рис. 1. Конструктивная схема одножильных кабелей:

1 - жила кабеля; 2 - защитная оболочка кабеля;

3 - изоляция жилы кабеля

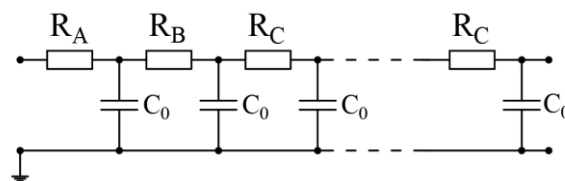


Рис. 2. Расчетная электрическая схема однофазного кабеля

где $\Delta P_{\text{жилаА}}$, $\Delta W_{\text{жилаА}}$ – соответственно, потери мощности и энергии, сопровождаемые выделением тепла, в результате нагрева жилы при прохождении тока нагрузки в активном сопротивлении R_0 (Рис. 2.) жилы кабеля 1 (Рис. 1.), кВт, кВт.ч; $\Delta P_{\text{изоляция}}$, $\Delta W_{\text{изоляция}}$ – соответственно, это потери мощности и энергии, сопровождаемые нагревом изоляции кабеля 3, возникших под влиянием ёмкостного тока в ёмкостях C_{AB} , C_{AC} , C_{BC} между жилами кабеля и оболочкой 2, кВт, кВт.ч; $\Delta P_{\text{оболА}}$, $\Delta W_{\text{оболА}}$ – соответственно, потери мощности и энергии, сопровождаемые нагревом защитной оболочки, обусловленные током в оболочке, созданным ЭДС индуктированной током нагрузки в жиле кабеля кВт, кВт.ч.

Следует отметить, что потери, вызванные, ёмкостными токами в изоляции кабеля существенно зависят на коэффициент искажения формы кривой тока [9], проходящего в кабеле. Соответственно, потери мощности в изоляции и оболочке представляют сумму потерь, возникших в результате воздействия гармоник высшего порядка при прохождении тока в кабеле:

$$\Delta P_{\text{изол}} = \sum_1^n \Delta P_{\text{изолн}} ; \quad (3)$$

$$\Delta P_{\text{обол}} = \sum_1^n \Delta P_{\text{оболн}} ,$$

В некоторых случаях (при сильно искажённом высоком значении тока нагрузки), эффект влияния спектральных параметров гармоник высшего порядка, вызванного нелинейным током нагрузки, во много раз превышает потери, возникшие под воздействием иных факторов [10].

Потери активной мощности и энергии, возникающие в трехжильных кабелях, отличаются от потерь в одножильных кабелях, и состоят из трёх компонентов. Следовательно, в трехжильных кабеле, потери активной мощности и энергии определяются:

$$\Delta P_{\text{каб.трех}} = \Delta P_{\text{жилА}} + \Delta P_{\text{жилВ}} + \Delta P_{\text{жилС}} + \Delta P_{\text{изолАВ}} + \Delta P_{\text{изолВС}} + \Delta P_{\text{изолСА}} + \Delta P_{\text{обол}} , \quad (4)$$

$$\Delta W_{\text{каб}} = \Delta W_{\text{жилА}} + \Delta W_{\text{жилВ}} + \Delta W_{\text{жилС}} + \Delta W_{\text{изолАВ}} + \Delta W_{\text{изолВС}} + \Delta W_{\text{изолСА}} + \Delta W_{\text{обол}} .$$

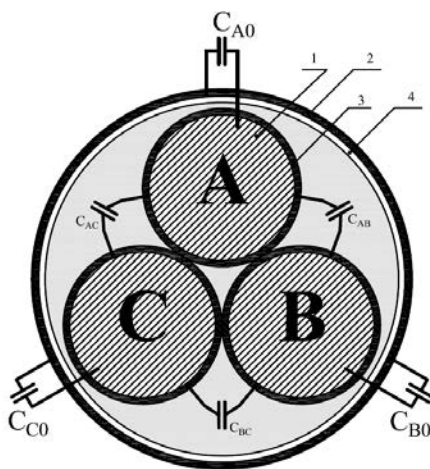


Рис. 3. Конструктивная схема трехжильного кабеля:
1 - жила кабеля; 2 - защитная оболочка кабеля;
3, 4 - изоляция жил кабеля.

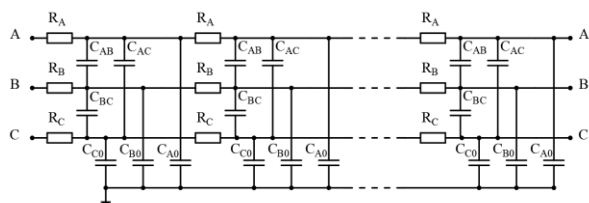


Рис. 4. Расчетная электрическая схема трехжильного кабеля

где $\Delta P_{\text{жилА}}$, $\Delta P_{\text{жилВ}}$, $\Delta P_{\text{жилС}}$, $\Delta W_{\text{жилА}}$, $\Delta W_{\text{жилВ}}$, $\Delta W_{\text{жилС}}$ – соответственно, это потери мощности и

энергии, сопровождаемые выделением тепла, в результате нагрева жилы при прохождении тока нагрузки в активном сопротивлении R_A , R_B , R_C (Рис. 4.) А, В и С жилах кабеля (Рис.3.) кВт, кВт.ч; $\Delta P_{\text{изолАВ}}$, $\Delta P_{\text{изолВС}}$, $\Delta P_{\text{изолСА}}$, $\Delta W_{\text{изолАВ}}$ + $\Delta W_{\text{изолВС}}$ + $\Delta W_{\text{изолСА}}$ – соответственно, потери мощности и энергии, сопровождаемые нагревом межфазной изоляции, возникающим под влиянием ёмкостного тока в ёмкостях C_{AB} , C_{AC} , C_{BC} (Рис.4.) между жилами кабеля, кВт, кВт.ч; $\Delta P_{\text{обол}}$, $\Delta W_{\text{обол}}$ – мощность и энергия, сопровождаемые выделением тепла, при прохождении токов, в результате возникновения ЭДС при асимметрии тока нагрузки в защитной оболочке кабеля, кВт, кВт.ч.

В свою очередь, потери мощности и энергии $\Delta P_{\text{изолАВ}}$, $\Delta P_{\text{изолВС}}$, $\Delta P_{\text{изолСА}}$, $\Delta W_{\text{изолАВ}}$, $\Delta W_{\text{изолВС}}$, $\Delta W_{\text{изолСА}}$, затраченные на нагрев изоляции между жилами в трехжильных кабелях представляют сумму потерь, вызванных гармониками высшего порядка при прохождении в кабеле тока нагрузки и определяются выражением (3).

Для сетей с тремя одножильными (Рис. 1) и с трехжильными кабелями (Рис. 3), с учетом их конструктивных особенностей, составлены расчетные схемы электрических параметров Рис. 2 и Рис.4. Был проведен расчет параметров расчетных схем. На основе полученных результатов была проведена количественная оценка параметров расчетных схем одножильных и трехжильных кабельных сетей. В результате, было выявлено, что ёмкость, существующая, между жилой и оболочкой одножильного кабеля значительно превышает суммарную ёмкость, существующую между жилами, а так же жилами и оболочкой трехжильного кабеля.

Следовательно, можно предположить, что потери холостого хода в сети с тремя одножильными кабелями на много больше, чем с трехжильными. В связи с этим, при низком числе годовых часов использования максимальной нагрузки кабельной сети, и особенно в сетях выполненных двойной радиальной или магистральной схемой, питающих двухтрансформаторные подстанции (т.к. коэффициент нагрузки каждого трансформатора в порядке 0,7) целесообразно применять трехжильные кабели, так как потери мощности и энергии в сети одножильных кабелями больше, что приводит к снижению энергетических показателей и ухудшению энергоэффективности сети.

Выводы

1. На основе анализа результатов проведенных исследований электромагнитных процессов проходящих в кабельных линиях сетей среднего напряжения (6-35 кВ) г. Тбилиси, установлено, что потери мощности в одножильных

кабелях вызваны, как одинаковыми, так и отличающимися друг от друга факторами;

2. Доказано, что в одножильных кабелях доминируют потери в изоляции между проводниками и защитной оболочкой, вызванные ёмкостными токами, а также потери в оболочке, вызванные емкостными токами, возникающими в результате протекания в кабеле тока нагрузки. При этом, в трехжильных кабелях доминируют ёмкостные потери в изоляции между жилами фаз и потери в защитной оболочке, возникающие в результате асимметрий токов нагрузки.

3. Установлено, что потери, возникающие в изоляции одножильных кабелей, вызванные ёмкостными высокочастотными гармоническими составляющими напряжения сети, значительно превышают потери в трехжильных кабелях.

Литература

1. Артемов А.И. Электроснабжение промышленных предприятий в примерах и задачах / Под общей редакцией С.И. Гамазина, Б.И. Кудрина, С.А. Цырука М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 745 с. ISBN 978-5-383-00420-3
2. <https://www.google.com/search?client=opera&q=емкость+кабельной+линии&sourceid=opera&ie=UTF-8&oe=UTF-8>
3. Аварии и технологические нарушения за период с 01.01.2019 г. по 31.12.2019 г. на объектах АО «Теласи». Краткий отчет инцидентов и

прерываний на период 2019 год. Отдел анализа и развития сети г. Тбилиси. 2020.

4. Расчет технических потерь электроэнергии в распределительной сети электроснабжения среднего (6-35 кВ) напряжения г. Тбилиси, 2020.
5. Аудиторное заключение годового финансового расчета АО «Теласи» 2019 года. г. Тбилиси. 2020.
6. Кудрин Б. И. Проектирование системы электроремонта на промышленных предприятиях: «Организация обслуживания и ремонта электрооборудования промышленных предприятий» М.: 2002
7. Киреева Э. А. Электроснабжение и электрооборудование цехов промышленных предприятий.: учебное пособие. Москва. 2011. 368с. CD-1110
8. Максимов Б.К. Статическое электричество в промышленности и защита от него / Б.К. Максимов, А.А. Обух. М.: Энергоатомиздат. 2002.
9. Сети электроснабжения. Методы и средства обеспечения качества энергии / Куско А., Томпсон М./пер. с англ./ Рабодзея А.Н. М.: издатель. дом «Додека – XXI», 2011. 336 с. : ил.
10. Инструкция по эксплуатации силовых кабельных линий. Часть 1. Кабельные линии напряжением до 35 кВ АО «Кодекс», 2020.

Сведения об авторах

Чунашвили Бадури Михайлович – докт. технич. наук, профессор, Грузинский технический университет, начальник департамента «Технологий электропотребления», г.Тбилиси, Грузия; Тел.: +995 595 29 00 44, e-mail: btchunashvili@yahoo.com, b.chunashvili@gtu.ge

Кобаля Мамука Игоревич – канд. технич. наук, профессор, Грузинский технический университет, г.Тбилиси, Грузия; Тел.: +995 599 45 90 92, e-mail: mamuka.kobalia@yahoo.com

Петросян Александр Михайлович – Академический доктор, асоциированный профессор, Грузинский технический университет, г. Тбилиси, Грузия; Тел.: +995 591 26 00 36, e-mail: a.petrosyan@gtu.ge

Гамрекелашвили Теимураз Гивиевич – Академический доктор, АО «Теласи», начальник производственно – технической службы, г. Тбилиси, Грузия; +995 599 53 72 72, e-mail: t.gamrekelashvili@telasi.ge

Ртвеладзе Натиа Онисевна – Докторант, Грузинский технический университет, г.Тбилиси, Грузия; e-mail: +995 599 15 46 00, e-mail: natia.rtveldadze@gmail.com

Малхаз Кврившвили, Константин Церетели, Теймураз Гамрекелашвили

Исследование перенапряжения возникших при однофазных коротких замыканиях в распределительной сети 6-10 кВ

Аннотация. На основе результатов компьютерного моделирования по программе EMTP переходных процессов при однофазных коротких замыканиях показана необходимость изменения режима нейтрали сети на основе данных емкостных токов на отдельных секциях городских подстанций. Показано, что: переходный процесс имеет колебательный характер и возникает неустойчивый ферорезонанс. Необходимо осуществить мероприятия для ограничения перенапряжения.

Ключевые слова: однофазное короткое замыкание, перенапряжения, режим нейтрали, электромагнитные переходные процессы.

Malkhaz Kvrivishvili, Konstantin Tsereteli, Teimuraz Gamrekashvili

Research of overvoltage arised during single-phase short circuits in 6-10 kv distribution network

Summary. Based on the results of computer simulation of transient processes in single-phase short circuits, it is shown that it is necessary to change the mode of the neutral of the network based on the data of capacitive currents in individual sections of the city substation. Conclusions: the transient process has an oscillatory character and an unstable ferorezonance arises. It is necessary to take measures to limit overvoltage.

Key words: single-phase short circuit, overvoltage, neutral mode, electromagnetic transients.

Введение. Повышение надёжности распределительной сети 6-10 кВ значительной степени зависит от переходных процессов происходящих в ней при однофазных коротких замыканиях [1],[2]. Критический режим сети, который определяет влияет её надёжность и устойчивость, режим однофазного короткого замыкания. Этот режим особенно значителен в случае работы сети с изолированной нейтралью. но он также достаточно значителен при других режимах работы сети. исследование работы сети в переходных режимах особенно удобно и доступно моделированием сети при математическим программным обеспечением. Компьютерное моделирование сети даёт возможность изучить переходный режим работы сети без вмешательства в её реальную работу.

Особенно удобно использовать программу EMTR (ElectroMagneticTransientsProgram) [4]. Эта программа универсальная система для изучения как электромагнитных так и электромеханических процессов в процессе их исследования. EMTR особенно удобна для изучения коммутационных и атмосферных перенапряжения, координации изоляции а так же для моделирования систем релейной защиты.

При моделировании переходных процессов использовались параметры взятые из технической базы АО «Теласи» и из [6,7].

При однофазных коротких замыканиях для расчета кратности перенапряжения пользовались формулой:

$$K_{\text{пер}} = U_m / U_{Fmfx},$$

где U_m – максимальное значение напряжения в переходном режиме определяется из амплитудных значений в фазах В и С, при коротком замыкании фазы А на землю, U_{Fmfx} - амплитудное значение рабочего фазного напряжения (в сетях 6 кВ принимается 5,15кВ).

I. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ РЕЖИМОВ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

Для проведения расчётных исследований однофазного короткого замыкания на ПС «Дидубе» и «Багеби» значения ёмкостных токов взяты по результатам натурных экспериментов:

ПС «Дидубе» -- 1+3 секция - -----22,07 А;
2+4 секция ----- 53,10 А.

ПС «Багеби» - 1+3 секция - -----45,51 А;
2+4 секция ----- 61,92А..

Расчёты для этих сетей выполняется исходя из реализации компенсации ёмкостных токов. При расчёте необходимо учитывать случаи потери компенсации путём расстройство компенсации на 15-20 %

Уровень расстройство компенсации определяется путём отношения реактивного тока однофазного короткого замыкания к ёмкостному току. В то же время в расчётах переходного процесса принято что компенсационная катушка настроена в режиме, , которая близко к резонансному. Расчётные режимы компьютерного моделирования во время исследования переходных процессов в режиме исследования перенапряжения:

1. ПС «Дидубе» ёмкостный ток 1+3 секция - -----22,07 А, нейтраль сети изолирована.

2. ПС «Дидубе» емкостный ток 2+4 секции емкостный, который получен отключением фидера (максимальный емкостный ток – $I_C = 42,48$ А). Ток настройки катушки – 53,10 А. Растройка компенсации – 25%.

3. ПС «Багеби» - 1+3 секция. Расчётные параметры:

Емкостный ток, полученный отключением фидера с максимальным током $I_C = 36,40$ А. Ток настройки катушки – $I = 45,51$ А.

II. ИССЛЕДОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

При однофазном коротком замыкании моделирование переходных процессов выполнено по Петерсену [3], который обеспечивает уровень максимально возможных перенапряжений. Исследовалось зажигание и погашение дуги в первом и повторном пробое в максимум фазного напряжения, когда заряд нейтрали не успевал разрядиться в безтоковых паузах. Считается, что нейтраль изолирована или заземлен дугогасительной катушкой. Во время расчёта принималось во внимание естественная несимметрия сети.

В таблице представлены кратности неограниченных перенапряжений при однофазном коротком замыкании, полученные в результате расчетных исследований.

сеть		I_C , А	$I_{дуг}$, А	$K_{пер.}$ о.е.
ПС «Дидубе» 6 кв	1+3 с	22,07	-	3,26
	2+4 с	42,48	53,10	3,13
ПС «Багеби» 6 кв	1+3 с	36,41	45,51	3,09
	2+4 с	49,54	61,92	3,17

Фидер, который отключается при однофазном коротком замыкании $\Delta I = 9,1$ А, расстройка катушки 20%.

4. ПС «Багеби» - 2+4 секция. Расчётные параметры:

Емкостный ток, полученный отключением фидера с максимальным током $I_C = 49,54$ А. Ток настройки катушки – $I = 61,32$ А.

Фидер, который отключается при однофазном коротком замыкании $\Delta I = 12,38$ А, расстройка катушки 20%.

Ниже приведены осциллограммы, где показаны изменения фазного напряжения и напряжения нейтрали в режиме однофазного короткого замыкания

.Программа расчёта электромагнитных переходных процессов показала, что из-за колебательного характера переходного процесса, который вызван перезарядкой на фазных емкостях в момент зажигания и гашения дуги, наибольшие перенапряжения может достичь $3,09 \div 3,26 U_{fmax}$.

Следует отметить также, что установка токоограничивающих реакторов на вводах приводит к увеличению перенапряжения,

Нужно отметить также, что характер электромагнитного переходного процесса и уровни перенапряжения в значительной степени зависят от величины емкостных токов однофазных коротких замыканий от моментов возникновения и гашения дуги, от число повторных пробоев на поврежденных фазах, от точек пробоя и текущей состояния изоляции, от продолжительности переходной дуги и ещё от многих факторов. Компьютерное моделирование и расчёты перенапряжения указывают на необходимость ограничения перенапряжения на уровне $2,4-2,6 U_{fmax}$.

Одним из оптимальных методов эффективного ограничения перенапряжения и обеспечения правильного действия защиты является включение в нейтраль резистора.

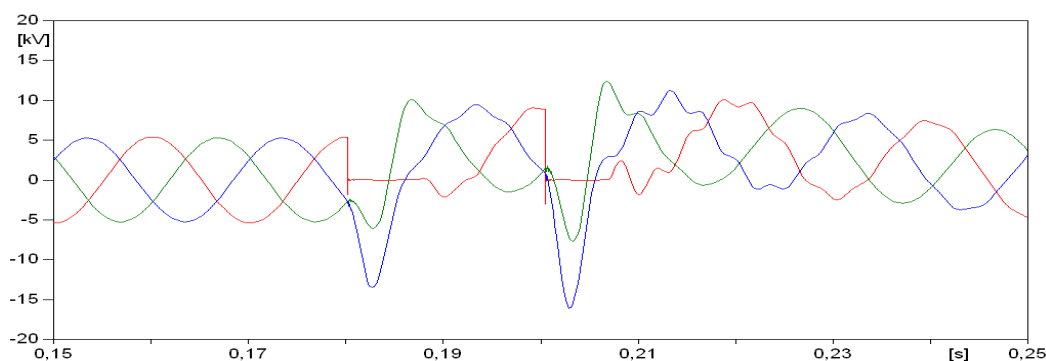


Рис. 1. Изменения напряжения при однофазном коротком замыкании на ПС «Дидубе» 1+3 с, Нейтраль изолирована, $K_{пер} = 3,26$.

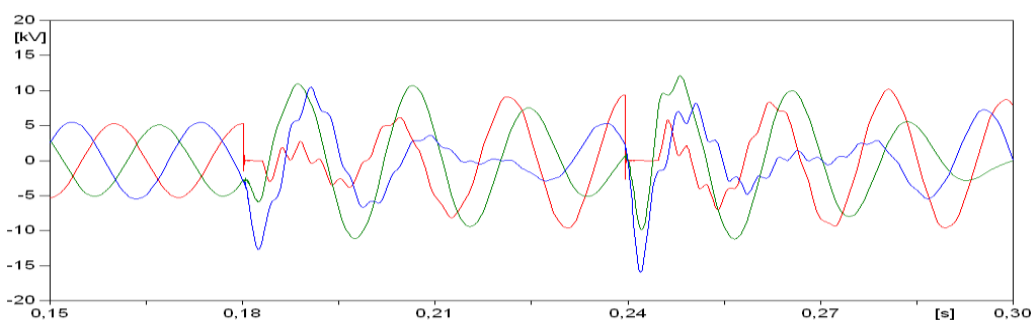


Рис. 2. Изменения напряжения однофазном коротком замыкании на ПС «Дидубе» 2+4 с, Нейтраль заземлена дугогасящей катушкой (расстрои компенсации 20%), $K_{пер} = 3,13$.

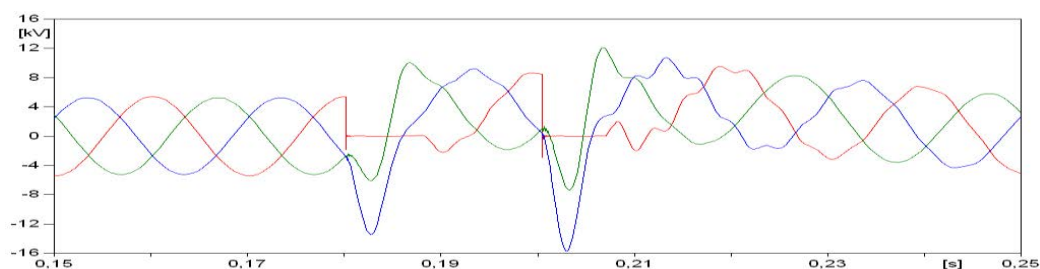


Рис. 3. Изменения напряжения однофазном коротком замыкании на ПС «Багеби» 1+3 с, Нейтраль заземлена резистором $R=1000$ Ом, $K_{пер} = 3,07$.

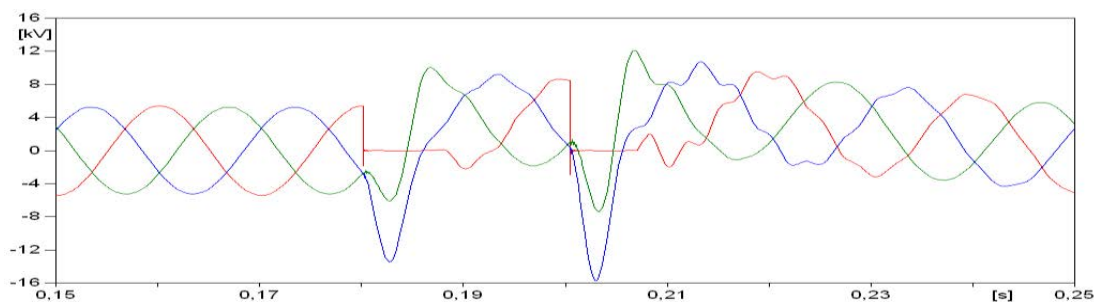


Рис. 4. Изменения напряжения однофазном коротком замыкании на ПС «Дидубе» 1+3 с, Нейтраль заземлена резистором $R=200$ Ом, $K_{пер} = 2,58$.

Выводы. Выполнены компьютерные моделирования с помощью EMRT компьютерного обеспечения на конкретных секциях подстанции «Дидубе» и «Багеби» и показано что необходимо изменить режимы нейтралей сети. Исследование электромагнитных переходных процессов показало что максимум перенапряжения в результате первого зажигания и гашения дуги достигает $2,4 \cdot U_{fmax}$. следующее зажигание дуги при ненулевых значениях напряжения нейтрали вызывает увеличение перенапряжения на неповрежденных фазах до $3,09 \cdot U_{fmax}$ и надо принимать специальные меры для ограничения перенапряжения.

Литература

- [1] Лихачев Ф.А. Замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией ёмкостных токов. М.: Энергия, 1971.
- [2] Шуцкий В.И. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок. /В.И.Шуцкий, В.О.Шуцкий, В.О.Жидков, Ю.Н.Ильин.-М.: Энергоиздат, 1986.- 152с.
- [3] Шуин В.А., Сарбаева О.А., Чутрова Е.С., Токровые защиты от замыканий на землю. Исследование динамических режимов Функционирования//Новости электротехники, №2(62), С36-40.
- [4] EMRT-TV, ElektroMagnetic Transients program. <http://www.emtp.com/>

References (transliterated)

1. Likhachov F.A. Earth fault in networks with isolated neutral and with compensation of capacitive currents), Moscow: Energiya, 1971.
2. Shutsky V.I. Protective shunting of single-phase damage to electrical installations. / V.I.Shutsky, V.O.Shutsky, V.O. Zhidkov, Yu.N. Ilyin.-M. : Energoizdat, 1986.- 152 p.
3. Shuin V.A. , Sarbaeva O.A., Chutrova E.S., Current protection against earth faults. Investigation of dynamic modes of Functioning // Electrical Engineering News, no. 2 (62), S36-40.
4. EMRT-TV, ElektroMagnetic Transients program. <http://www.emtp.com/>

Сведения об авторах

Кврившвили Малхаз Меликович – академический доктор, приглашенный асоц. профессор, Грузинский Технический Университет, Email: malkhaz.kvrivishvili@telasi.ge, г.Тбилиси, Грузия.

Церетели Константин Отарович – к.т.н., профессор, Грузинский Технический Университет, Email: tseretelik@gmail.com, г.Тбилиси, Грузия.

Гамреклашвили Теймураз Гивинвич - академический доктор, начальник производственно технической службы АО «Теласи»г.Тбилиси, Грузия, t.gamrekelashvili@telasi.ge

Олег Шутенко, Алексей Кулик

Распознавание перегревов, которые сопровождаются разрядами с высокой плотностью энергии, по результатам анализа растворенных в масле газов

Аннотация. Приведены результаты комплексного анализа содержания газов в масле 101 трансформатора с перегревами, которые сопровождаются разрядами с высокой плотностью энергии. Определены значения процентного содержания газов и значения отношений газов для каждого вида дефектов. Построены номограммы и графические области дефектов. Выполнен сравнительный анализ результатов диагностики анализируемых трансформаторов с использованием 9 известных методик.

Ключевые слова: маслonaполненные трансформаторы, диагностика, анализ растворенных в масле газов (АРГ), комбинированные дефекты.

Oleg Shutenko, Oleksii Kulyk

Recognition of overheating accompanied by high energy density discharges based on analysis of gases dissolved in oil

Abstract. The results of a comprehensive analysis of the gas content in oil are presented for 101 transformers with overheating, which are accompanied by high energy density discharges. Values of the gas percentage and gas ratio for each type of defect have been determined. Nomograms and graphical defect areas have been constructed. A comparative analysis of the diagnostic results of the analysed transformers was carried out using 9 known methods.

Keywords: oil-filled transformers, diagnostics, analysis of gases dissolved in oil (DGA), combined defects.

Введение. Эксплуатационная надежность высоковольтных силовых трансформаторов во многом определяется как точностью измерительных средств контроля и квалификацией оперативного персонала, так и достоверностью методов, используемых для принятия решений. При диагностике трансформаторов с использованием анализа растворенных в масле газов (АРГ) принципиально важным является не только своевременно выявить развивающийся дефект (желательно на ранней стадии, когда не произошла деградация бумажной изоляции трансформаторов), но и достоверно распознать его тип. Очевидно, что ошибочное определение типа дефекта или отказ от распознавания могут привести к серьезному экономическому ущербу, вызванному как недоотпуском энергии потребителям, так и необходимостью ремонта или замены трансформатора. Особенно это касается быстро развивающихся дефектов, связанных с внутренними короткими замыканиями. В связи с этим усовершенствование процедуры распознавания типа дефекта по результатам анализа растворенных в масле газов является актуальной и практически значимой задачей.

Критерии и нормы, регламентируемые в большинстве известных стандартах и методиках [1-6] по интерпретации результатов АРГ позволяют распознавать дефекты электрического и термического типа. В тоже время в условиях реальной эксплуатации трансформаторов достаточно часто встречаются так называемые комбинированные дефекты, т.е. перегревы которые переходят в разряды или разряды, которые сопровождаются нагреванием. Очевидно, что для

таких дефектов значения диагностических критериев, используемых для распознавания типа дефекта (значения отношений газов, значения процентного содержания газов, значения отношений концентраций газов к газу с максимальным содержанием), будут отличаться от аналогичных значений, полученных для трансформаторов с дефектами электрического или термического типа. Однако в большинстве действующих стандартов и методик [1-6] фактически отсутствуют значения критериев для распознавания комбинированных дефектов. Исключение составляет [6], в котором для распознавания комбинированных дефектов регламентированы следующие значения отношений: $C_2H_2/C_2H_4 \geq 0.1$ и $CH_4/H_2 > 0.5$ или $C_2H_2/C_2H_4 < 0.1$ и $CH_4/H_2 \leq 0.5$. В некоторых графических методах интерпретации, например, треугольники и пятиугольники Дюваля и квадрат ETRA [7, 8] выделены области, соответствующие перегревам и разрядам. В тоже время квадрат ETRA позволяет распознавать только комбинированные дефекты с температурой нагрева выше $700^\circ C$, а треугольник Дюваля выявляет наличие комбинированных дефектов, но не позволяет оценить температуру нагрева и интенсивность разрядов. Таким образом, использование критериев, регламентированных действующими стандартами, не всегда позволяет достоверно распознать тип комбинированного дефекта. Выполненный литературный анализ показал, что вопросам повышения достоверности распознавания типа дефекта посвящено достаточно большое число публикаций. Но при этом основной акцент исследований связан с использованием более

совершенного математического аппарата [9-12]. В тоже время вопросы комплексного анализа значений диагностических критериев, используемых для распознавания типа дефекта, в оборудовании с разным состоянием освещены недостаточно. В связи с этим в данной работе выполнен анализ значений критериев, используемых для интерпретации результатов АРГ, в трансформаторах с перегревами, которые сопровождаются разрядами с высокой плотностью энергии (ВПЭ).

Анализ содержания газа в трансформаторах с перегревами, которые сопровождаются разрядами с ВПЭ. Для повышения надежности распознавания дефектов маслонаполненного оборудования по результатам АРГ предлагается использовать метод диагностики по расстоянию до эталона [13]. В этом методе решение о типе дефекта принимается по значению минимального расстояния от диагностируемого объекта до эталонного множества:

$X \in D_i$, если $l_i < l_k$ ($k = 1, 2, \dots, n; k \neq i$), (1)
где: D_i – диагноз (тип дефекта); n – количество возможных диагнозов; l – значение диагностического расстояния.

Значение диагностического расстояния определяется как:

$$l^2(x, y) = \sum_{j=1}^N (x_j - y_j)^2, \quad (2)$$

где: x – значения координат эталонного множества;
 y – значения координат диагностируемого объекта;

N – размерность диагностического пространства (число координат).

В качестве диагностических координат можно использовать как значения отношений газов, так и значения процентного содержания газов, а также значения отношений газов к газу с максимальным содержанием. Одновременный учет трех критериев позволяет нивелировать возможные различия в определении типа дефекта, которые бы имели место при использовании только одного из критериев.

Для определения численных значений диагностических координат были использованы результаты АРГ по 101 высоковольтному трансформатору. В этих трансформаторах был обнаружен перегрев, который сопровождался разрядами высокой плотности энергии. Поскольку анализируемые трансформаторы представляют собой набор образцов с четко установленным диагнозом, это позволило сгруппировать результаты АРГ по типу выявленного дефекта и выполнить оценку значений диагностических критериев, используемых для распознавания типа дефекта по результатам АРГ. По аналогии с [14, 15] для каждого типа дефекта были рассчитаны значения процентного содержания каждого из пяти газов в пробах масла и значения отношений газов, используемых известными стандартами для распознавания типа дефекта. Диапазоны значений процентного содержания газов с указанием типа дефекта и объемом выборочных значений (N) приведены в таблице 1, а значения отношений газов приведены в таблице 2.

Таблица 1

№	Тип дефекта, объем выборки	Содержание газов, %				
		H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
1	Перегревы с температурой менее 300°C и разряды с ВПЭ. N=5	10-23	14-24	22-35	10-22	12-28
2	Перегревы с температурой менее 300°C, переходящие в дугу. N=8	10-30	7-15	25-45	3-21	9-32
3	Перегревы в диапазоне температур 300-500°C и разряды с ВПЭ. N=8	0.6-24	30-50	0-5	6-28	20-38
4	Перегревы в диапазоне температур 300-500°C переходящие в дугу. N=10	10-28	20-45	0.06-20	21-29	12-20
5	Перегревы в диапазоне температур 500-700°C и разряды с ВПЭ. N=5	0-0.1	20-25	10-11	33-37	30-33
6	Перегревы в диапазоне температур 500-700°C переходящие в дугу. N=15	5-11	20-30	13-21	30-35	10-20
7	Перегревы с температурой выше 700°C и разряды с ВПЭ. N=24	1.4-26	7-33	0.5-10	28-53	10-39
8	Перегревы с температурой выше 700°C, переходящие в дугу. N=26	20-33	6-26	0.9-8.0	26-40	12-30

Таблица 2

№	Значения отношений газов					
	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_6}{CH_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{CH_4}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$
1	1.01-1.4	1.2-2.295	0.382-0.941	0.53-1.868	0.42-0.999	1.061-2.131
2	0.258-0.92	2.32-4.22	0.102-0.739	0.64-3.58	0.218-0.981	1.32-4.813
3	1.7-3.1	0.03-0.098	2.2-9.8	0.49-0.72	6-13.5	1.1-3.6
4	1.09-2.22	0.06-0.9	2.22-12	0.4-0.9	1-7.8	0.45-0.9

5	—	0.44-0.5	1.4-1.55	1.3-1.66	2.8-3.1	0.84-0.95
6	2.2-3.4	0.49-0.95	1.5-2.5	0.39-0.8	0.65-1.15	0.36-0.543
7	1.04-1.81	0.08-1.191	4.58-12.95	0.23-5.36	1.57-7.3	0.22-0.95
8	0.2-0.98	0.14-1.15	4.1-12.95	0.49-4.3	2.5-9.5	0.34-0.98

Примечание. Для снижения погрешности полученных результатов расчет выполнялся только при условии, если значения концентраций газов, составляющих данное отношение, превышали следующие значения: H₂=50, CH₄=C₂H₆=C₂H₄=15 и C₂H₂=3 мкл/л.

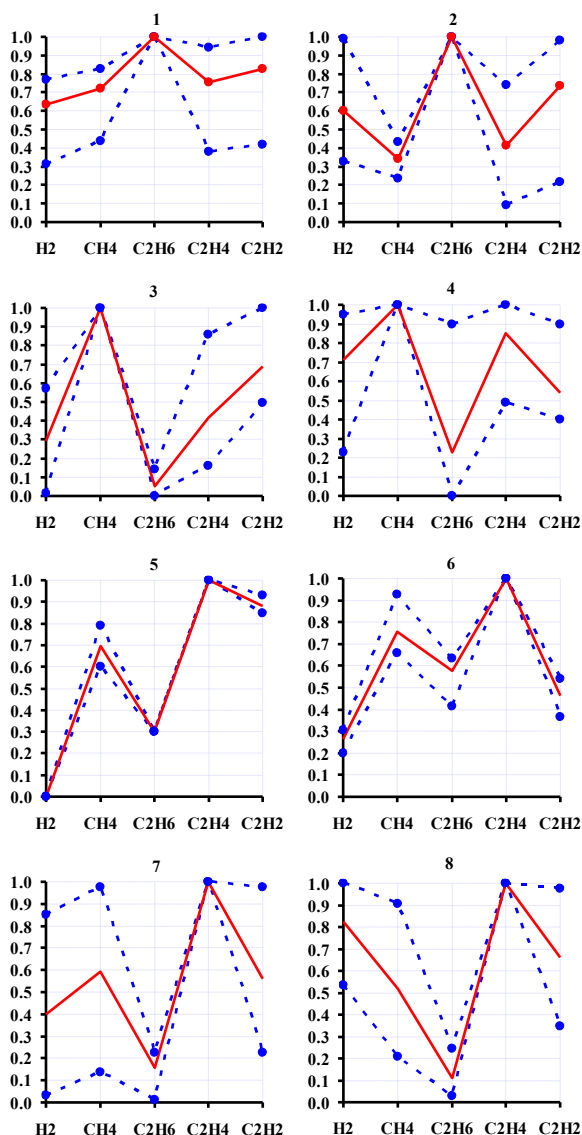
Как видно из табл. 1, несмотря на то, что в анализируемых трансформаторах перегревы сопровождаются разрядами с ВПЭ, газы с максимальным содержанием изменяются в зависимости от температуры перегрева. Для удобства анализа в табл. 1 они выделены жирным шрифтом. Так для низкотемпературных перегревов (менее 300°C) газом с максимальным содержанием является этан, для перегревов в диапазоне высоких температур (выше 700°C) – этилен. При перегревах в диапазоне средних температур (300-700°C) газами с максимальным содержанием являются метан и этилен. Для удобства дальнейшего анализа, и учитывая, что максимальное содержание этилена имеет место при температурах 500-600°C [5], диапазон температур 300-700°C был разбит на два: перегрев с температурой 300-500°C, для которого газом с максимальным содержанием является метан, и перегрев с температурой 500-700°C, для которого газом с максимальным содержанием является этилен. Анализируя результаты из табл. 1, следует отметить, что для всех анализируемых дефектов, значения процентного содержания газов с максимальной концентрацией составляют 20-50%. При этом процентное содержание характерных газов имеет значения незначительно меньшие, чем для процентного содержания газа с максимальной концентрацией. Т.е. при возникновении комбинированных дефектов с разрядами высокой энергии наблюдается выравнивание процентного содержания для характерных газов. Данное обстоятельство, наряду с высоким процентным содержанием ацетилена, может рассматриваться как диагностический признак, который можно использовать для распознавания перегревов, которые сопровождаются разрядами с ВПЭ.

Анализируя значения отношений газов из табл. 2, следует отметить, что при развитии комбинированных дефектов с разрядами высокой энергии, отношение CH_4/H_2 может принимать значения характерные как для электрических разрядов ($0.1 < \text{CH}_4/\text{H}_2 < 1$), так и для дефектов термического типа ($\text{CH}_4/\text{H}_2 > 1$). Значение отношения $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4 > 1$ наблюдаются как для низкотемпературных перегревов (№1-2), которые сопровождаются разрядами с ВПЭ, так и для некоторых проб масел из трансформаторов с высокотемпературными перегревами и разрядами (№7-8). Данное обстоятельство свидетельствует о невысокой диагностической ценности данного отношения при распознавании комбинированных дефектов. Согласно большинству известных стандартов значения отношения $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ используются для оценки температуры прогнозируемого перегрева ($1 < \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ – для низкотемпературных перегревов, $1 < \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 < 4$ – для перегревов в диапазоне средних температур и

$4 < \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ – для высокотемпературных перегревов). Однако, как видно из таблицы 2, для перегревов в диапазоне средних температур, которые сопровождаются разрядами с ВПЭ (№3-4) в некоторых из анализируемых трансформаторов (5 из 8 трансформаторов для дефекта №3 и 7 трансформаторов из 10 для дефекта №4) значение данного отношения больше характерны для высокотемпературных перегревов. Таким образом, для оценки температуры прогнозируемых комбинированных дефектов следует учитывать не только значение отношения $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$, но и процентное содержание газов. Значения отношений $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$ и $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_6$ и $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ в действующих стандартах и методиках используются для оценки плотности энергии электрических разрядов. Анализируя значения данных отношений из табл. 2 легко увидеть, что минимальные значения данных отношений наблюдаются для тех отношений газов, для которых газ, имеющий максимальное содержание для данного типа дефекта, находится в знаменателе отношения. Например, для низкотемпературных перегревов с максимальным содержанием этана, минимальное значение из трех анализируемых отношений наблюдается для отношения $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_6$ и т.д. Таким образом, для комбинированных дефектов с разрядами с ВПЭ, значения отношений газов, характеризующие плотность энергии электрических разрядов, зависят от температуры перегрева (от того какой газ имеет максимальное содержание).

В некоторых стандартах по интерпретации результатов АРГ [5,6], для распознавания типа дефекта помимо отношений газов, рекомендуется использовать номограммы (графические образы) дефектов. В [16] предложено использовать не эталонные номограммы, а эталонные области, которые строятся по результатам АРГ оборудования с одинаковым типом дефекта. В качестве границ эталонных областей используются максимальные и минимальные значения координат. Графические области по результатам АРГ для 8 проанализированных дефектов приведены на рис. 1 На рисунке сплошной линией обозначен центр области, совпадающий с номограммой дефекта; пунктирными линиями обозначены нижняя и верхняя границы области дефекта. Номер номограммы соответствует номеру дефекта из табл. 1.

Анализируя номограммы, приведенные на рисунке следует отметить, что из 8 приведенных номограмм в [4, 5] регламентированы только 2, соответствующие перегревам в диапазоне средних температур, переходящих в дугу (№4) и высокотемпературным перегревам, переходящих в дугу (№3). Следует отметить, что ни в одном из известных стандартов не регламентированы номограммы дефектов, для которых газом с максимальным содержанием является этан (№1-2).



რის. 1. Графические области и номограммы дефектов построенные по результатам АРГ трансформаторов с перегревами, которые сопровождаются разрядами с ВПЭ

Номограммы, имеющие некоторую схожесть с номограммами №1-2, получены в работах [14, 15]. Эти номограммы построены по результатам АРГ трансформаторов с перегревами, которые сопровождаются разрядами с низкой плотностью энергии, для которых газами с максимальным содержанием являются водород и ацетилен. Сравнивая номограммы №4, №6 и №7 легко увидеть внешнюю схожесть, что может привести к

ошибочным выводам при оценке температуры прогнозируемых дефектов. Таким образом, использование только номограмм дефектов для распознавания типа дефекта, даже при наличии сходных эталонных номограмм, без учета значений отношений газов и их процентного содержания может привести к постановке ошибочного диагноза.

Оценка достоверности распознавания перегревов, которые сопровождаются разрядами с ВПЭ с использованием известных стандартов и методик. Для оценки достоверности распознавания существующих методов применительно к анализируемым дефектам было выполнено сопоставление реальных диагнозов (таблица 1) с диагнозами, поставленными с помощью наиболее известных стандартов и методик. В процессе анализа определялась статистика правильных диагнозов, частично правильных диагнозов (правильно определен тип дефекта, но ошибочно оценена его интенсивность). Также фиксировалась статистика отказов от распознавания, т.е. случаев, когда анализируемый метод не позволяет установить диагноз. Результаты анализа приведены в таблице 3. В столбце 1 в числителе приведен процент правильных диагнозов, в знаменателе частично правильных диагнозов. В числителе столбца 2, приведен процент ошибочных диагнозов, а в знаменателе процент отказов от распознавания. Под римскими номерами зашифрованы следующие стандарты и методы: I – IEC 60599 [1]; II – СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 (Украина) [5]; III – СТО 34.01-23-003-2019 (РФ) [6]; IV – Метод Дорненбурга [2]; V – Метод Роджерса [3]; VI – Треугольник Дюваля [7]; VII – Метод номограмм [5]; VIII – Квадрат ETRA [8]; IX – Метод MSS [4].

Из таблицы видно, что наибольшее число правильных диагнозов (78%) были поставлены с использованием значений отношений газов, регламентируемых в стандарте [6]. Это обусловлено тем, что только в данном стандарте рекомендуются отношения газов для распознавания комбинированных дефектов. Примерно одинаковое число правильных и частично правильных диагнозов обеспечивает использование треугольника Дюваля (37 и 52% соответственно) и метода номограмм (34 и 45% соответственно). Наибольшее число ошибочных диагнозов было получено с использованием квадрата ETRA (63%) и методики Роджерса (47%). А наибольшее число отказов от распознавания имело место при использовании методики Дорненбурга (89%) и стандарта IEC 60599 (81%).

Таблица 3

№	Методы																	
	I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII		IX	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	-	100	-	100	-	100	-	-	-	100	-	-	-	-	-	100	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	-	100
2	-	-	-	38	75	-	-	-	-	-	-	38	-	-	-	100	-	-
	-	100	-	63	-	25	-	100	25	75	63	-	-	100	-	-	-	100
3	-	-	-	13	100	-	-	-	-	38	-	63	-	-	-	38	-	-
	-	100	-	88	-	-	-	100	63	-	38	-	-	100	63	-	50	50
4	-	-	-	30	100	-	-	-	-	90	10	-	100	-	-	80	-	50
	-	100	-	70	-	-	-	100	10	-	90	-	-	-	20	-	40	10
5	-	-	-	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-	67
	-	100	-	-	-	-	-	100	100	-	100	-	-	100	-	-	-	33
6	-	-	-	100	100	-	-	-	-	67	100	-	-	-	93	7	-	100
	-	100	-	-	-	-	-	100	-	33	-	-	100	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	100	-	-	4	-	79	42	13	100	-	-	92	-	42
	-	100	-	100	-	-	-	96	17	4	46	-	-	-	8	-	42	17
8	-	-	-	-	42	-	-	-	-	-	42	-	-	-	-	46	8	8
	54	46	15	85	54	4	38	62	65	35	58	-	-	100	54	-	-	85
Σ	-	5	-	30	78	5	-	1	-	46	37	11	34	-	14	63	2	34
	14	81	4	66	14	3	10	89	32	21	52	-	15	51	23	-	18	45

Выводы На основании выполненных исследований установлено, что в трансформаторах с перегревами, которые сопровождаются разрядами с ВПЭ значения отношений газов и их процентное содержание отличается от значений данных критериев регламентированных действующими стандартами, что не всегда позволяет установить правильный диагноз. Полученные в работе значения отношений газов, их процентного содержание, а также построенные графические области и номограммы, соответствующие перегревам, которые сопровождаются разрядами с ВПЭ, можно рассматривать как диагностическую схему, позволяющую распознавать тип дефекта с одновременным использованием трех критериев, что позволяет существенно повысить достоверность распознавания что в свою очередь значительно повышает эксплуатационную надежность силовых трансформаторов.

Литература

1. IEC Publication 60599, Mineral oil-filled electrical equipment in service - Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis, 2015
2. E. Dornenburg, and W. Strittmater, Monitoring Oil Cooling Transformers by Gas Analysis, Brown Boveri Review, vol. 61, pp. 238-274, 1974.
3. R. R. Rogers, "IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient Faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis", IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 13, no. 5, pp. 349-354, 1978.
4. Mjller, R.; Schliesing, H.; Soldner, K.: Die Beurteilung des Betriebszustandes von

Transformatoren durch Gasanalyse. Elektrizitätswirtschaft, no. 76, pp. 345-349, 1977.

5. СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006: Діагностика маслonaповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі. – Київ. – 2007.
6. СТО 34.01-23-003-2019 Методические указания по техническому диагностированию развивающихся дефектов маслonaполненного высоковольтного электрооборудования по результатам анализа газов, растворенных в минеральном трансформаторном масле, ПАО «Россети», 2019.
7. M. Duval, "A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 18, no. 3, pp. 8-17, 2002.
8. Committee on Special, «Conservation and Control of Oil-insulated Components by Diagnosis of Gas in Oil» // Electrical Cooperative Research Association. – 1980. – Publication № 36. – № 1.
9. G. Gomes et al. A Stairway Statistical Neural Model for DGA Analysis. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Santo André São Paulo, Brasil, 2020.
10. S. Kim et al., "A Semi-Supervised Autoencoder With an Auxiliary Task (SAAT) for Power Transformer Fault Diagnosis Using Dissolved Gas Analysis", IEEE Access, vol. 8, pp. 178295-178310, 2020.
11. R. Bankar and P. Desai, "Dissolved Gas Analysis in Power Transformer using Artificial Neural Network", International Journal of Modern Trends in Engineering and Research, vol. 3, no. 4 (Special Issue of ICRTET'2016), 2016, pp. 322-326, 2016.

12. S. Li, G. Wu, B. Gao, C. Hao, D. Xin and X. Yin, "Interpretation of DGA for transformer fault diagnosis with complementary SaE-ELM and arctangent transform," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 23, no. 1, pp. 586-595, 2016.
13. Биргер И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с;
14. Oleg Shutenko Analysis of gas composition in oil-filled faulty equipment with acetylene as the key gas // Energetika – 2019. – Vol 65, No 1 – pp 21-38.
15. Oleg Shutenko, Oleksii Kulyk Analysis of Gas Content in Oil-Filled Equipment with Low Energy Density Discharges // International Journal on Electrical Engineering and Informatics - Volume 12, Number 2, June 2020.– pp. 258-277.
16. O. Shutenko, I. Jakovenko Fault Diagnosis of Power Transformer Using Method of Graphic Images / 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017), October 17-20, 2017, Lviv, Ukraine, pp. 66-69.
- rezul'tatam analiza gazov, rastvorenykh v mineral'nom transformatornom masle, PAO «Rosseti», 2019.
7. M. Duval, "A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 18, no. 3, pp. 8-17, 2002.
8. Committee on Special, «Conservation and Control of Oil-insulated Components by Diagnosis of Gas in Oil» // Electrical Cooperative Research Association. – 1980. – Publication № 36. – № 1.
9. G. Gomes et al. A Stairway Statistical Neural Model for DGA Analysis. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Santo André, São Paulo, Brasil, 2020.
10. S. Kim et al., "A Semi-Supervised Autoencoder with an Auxiliary Task (SAAT) for Power Transformer Fault Diagnosis Using Dissolved Gas Analysis", IEEE Access, vol. 8, pp. 178295-178310, 2020.
11. R. Bankar and P. Desai, "Dissolved Gas Analysis in Power Transformer using Artificial Neural Network", International Journal of Modern Trends in Engineering and Research, vol. 3, no. 4 (Special Issue of ICRTET'2016), 2016, pp. 322-326, 2016.
12. S. Li, G. Wu, B. Gao, C. Hao, D. Xin and X. Yin, "Interpretation of DGA for transformer fault diagnosis with complementary SaE-ELM and arctangent transform," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 23, no. 1, pp. 586-595, 2016.
13. Birger I.A. Tekhnicheskaya diagnostika / I.A. Birger – М.: Mashinostroenie, 1978. – 240 с;
14. Oleg Shutenko Analysis of gas composition in oil-filled faulty equipment with acetylene as the key gas // Energetika – 2019. – Vol 65, No 1 – pp 21-38.
15. Oleg Shutenko, Oleksii Kulyk Analysis of Gas Content in Oil-Filled Equipment with Low Energy Density Discharges // International Journal on Electrical Engineering and Informatics - Volume 12, Number 2, June 2020.– pp. 258-277.
16. O. Shutenko, I. Jakovenko Fault Diagnosis of Power Transformer Using Method of Graphic Images / 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017), October 17-20, 2017, Lviv, Ukraine pp. 66-69.

Литература (транслитерация)

1. IEC Publication 60599, Mineral oil-filled electrical equipment in service - Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis, 2015
2. E. Dornenburg, and W. Strittmater, Monitoring Oil Cooling Transformers by Gas Analysis, Brown Boveri Review, vol. 61, pp. 238-274, 1974.
3. R. R. Rogers, "IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient Faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis", IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 13, no. 5, pp. 349-354, 1978.
4. Mjller, R.; Schliesing, H.; Soldner, K.: Die Beurteilung des Betriebszustandes von Transformatoren durch Gasanalyse. Elektrizitätswirtschaft, no. 76, pp. 345-349, 1977.
5. SOU-N EE 46.501:2006: Diagnostika maslonapovnenogo transformatornogo obladnannya za rezul'tatami hromatografichnogo analizu vil'nih gaziv, vidibranih iz gazovogo rele, i gaziv, rozchinenih u izolyacijnomu masli .– Kyiv. – 2007.
6. STO 34.01-23-003-2019 Metodicheskie ukazaniya po tekhnicheskomu diagnostirovaniyu razvivayushchihysya defektov maslonapolnennogo vysokovol'nogo elektrooborudovaniya po

Сведения об авторах

Олег Шутенко, к.т.н., доцент, кафедра «Передача электрической энергии», Национальный Технический Университет «Харьковский Политехнический Институт», Харьков, Украина, o.v.shutenko@gmail.com

Алексей Кулик, аспирант, кафедра «Передача электрической энергии», Национальный Технический Университет «Харьковский Политехнический Институт», Харьков, Украина, kulyk.olekciy@ukr.net

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

Евгений Сокол, Владимир Замаруев, Владимир Ивахно, Сергей Кривошеев, Богдан Стысло

Использование мультikonверторных систем для повышения эффективности преобразователей электрической энергии

Аннотация. Показаны характерные особенности независимых, модульных и кооперативных преобразователей, входящих в множество мультikonверторных систем. Приведены примеры применения кооперативных преобразователей с частотным разделением рабочего диапазона. Показана целесообразность применения кооперативных преобразователей в силовых активных фильтрах.

Ключевые слова: кооперативные преобразователи; силовые активные фильтры; ЭМС; гармоники; мощность потерь.

Yevgen Sokol, Volodymyr Zamaruiev, Volodymyr Ivakhno, Serhii Kryvosheiev, Bohdan Styslo

Use of multiconverter system to improve the efficiency of electrical energy converters

Summary. The characteristic features of independent, modular and cooperative converters included in set of multiconverter systems are shown. Examples of application of cooperative converters with frequency division of the working range are given. The expediency of using cooperative converters in power active filters is shown.

Keywords: cooperative converter; power active filters; EMC; harmonics; power of losses.

Введение. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии прочно заняли свое место как в сфере промышленности, так и в бытовой аппаратуре. Преимущества, которые предоставляет оборудование с преобразователями, отводят на второй план отрицательные явления, появляющиеся при их подключении к сети: ухудшение гармонического состава потребляемого тока, появление помех коммуникационному и прочему оборудованию, возникновение резонансных явлений с участием конденсаторов пассивных корректоров коэффициента мощности и паразитных параметров линии электропередач и т.д. [1]. Подключение нескольких независимых преобразователей с мощностью, соизмеримой с сетью питания, может привести к их взаимному влиянию и нарушению устойчивости системы в целом [2]. Устранение негативного влияния преобразователей может быть уменьшено или устранено за счет улучшения их параметров. Любой преобразователь может быть охарактеризован несколькими параметрами: энергией потерь, надежностью, массой, объемом, ценой [3]. К характеристическим параметрам часто добавляются эксплуатационные качества, параметры электромагнитной совместимости и др. Разработка современной преобразовательной системы является поиском компромисса, обеспечивающего приемлемые, для конкретного случая, значения характеристических параметров преобразователя. При этом изменяемыми величинами являются: используемые компоненты, топология преобразователя, способы и алгоритмы управления, модульность преобразователя. Если появление более

эффективных новых компонентов, как и новых схемных решений преобразователей достаточно редкое явление, то использование базовых схем преобразователей в новых модульных схемах с новыми подходами к управлению ими дает широкое поле деятельности для разработчиков.

Понятие мультikonверторная система (МКС), использованное в [2] для описания системы электро-снабжения, может быть применено к преобразователю, выполняющему заданные функции и состоящему из нескольких преобразователей, по факту, являющемуся МКС. Каждый преобразователь в такой системе может быть оптимизирован в соответствии с одним из критериев качества для выполнения подфункции целевой функции МКС. В результате можно получить многокритериальное поле решений для оптимизации всей системы.

В результате разработки и исследования МКС и модульных преобразователей, в научно-технической литературе стали применяться термины «кооперативные преобразователи» [4] и «кооперативное управление» [5]. Все указанные термины, в настоящее время, не являются общепринятыми и нуждаются в уточнении определения и классификационных признаков.

Цель работы. Целью работы является определение классификационных признаков модульных и кооперативных преобразователей. Указание области применимости кооперативных преобразователей с частотным разделением рабочего диапазона, целесообразности их применения.

Мультиконверторные системы.

Типовая структура МКС, состоящей из независимых преобразователей приведена на рис. 1.



Рис. 1. Типовая структура МКС

Преобразователи, их реализация, как и их нагрузки независимы друг от друга. Для повышения эффективности работы системы рекомендуется использовать согласованное (кооперативное) управление преобразователями [4]. Для чего используется общая для нескольких преобразователей система управления (СУ) верхнего уровня (Рис. 2), которая контролирует параметры преобразователей и/или нагрузок системы для достижения заданного результата: обеспечения динамических характеристик, регулирование потоков энергии и т.д. Один из вариантов реализации кооперативного управления приведен в [5].

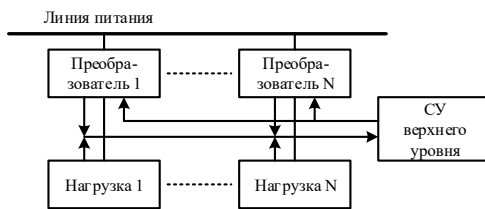


Рис. 2. Согласованное управление МКС

Дальнейшим развитием МКС является применение модульных МКС, в которых преобразовательные модули идентичны по конструкции и работают на общую нагрузку. Обычно это применяется для увеличения установленной мощности преобразователя [6].

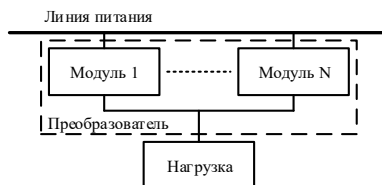


Рис. 3. Модульная МКС

Одним из первых примеров успешного использования нескольких модулей является создание многопульсных (в терминах авторов статьи – многофазных) выпрямителей [7]. Последовательное соединение нескольких идентичных по конструкции модулей дало синергетический результат – повышение электромагнитной совместимости преобразователя. Это связано с тем, что при идентичности конструкции, модули могут отличаться исполнением отдельных частей (Рис. 4, а), в данном случае – фазосдвигающих

трансформаторов. Такой подход позволил при идентичности конструкции модулей получить различный фазный сдвиг напряжения, поступающего на вход выпрямителя модуля.

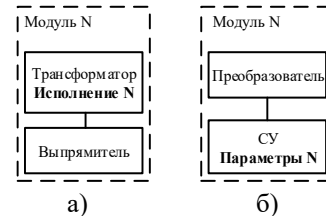


Рис. 4. Модуль с изменяемой частью: а) – силовой части модуля; б) – системы управления модуля

Решение [7] является классическим много-пульсным неуправляемым выпрямителем, равномерная загрузка модулей которого определяется пассивными компонентами схемы. Появление в составе единичного модуля собственной системы управления, при сохранении полной идентичности модулей, приводит к необходимости использования согласованного управления идентичными модулями [6] (Рис. 5). Согласованное управление, как правило, выравнивает токовую нагрузку модулей при их параллельном соединении и напряжение на модулях – при последовательном.

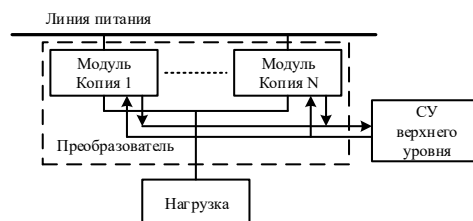


Рис. 5. Согласованное управление МКС с идентичными модулями

В модульных преобразователях с собственными системами управления модулями, отличающихся заданным фазным сдвигом друг относительно друга или другим фиксированным параметром (Рис. 4, б), система верхнего уровня корректирует их управляющие сигналы (Рис. 6), не влияя на фиксированный параметр. Это относится к преобразователям, использующим технологию интерливинга [8], выпрямителям с электронным сдвигом фаз и ШИМ [9, 10].

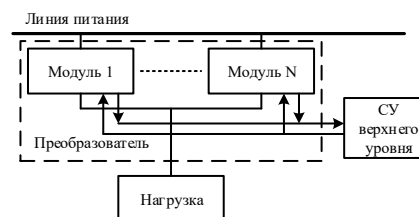


Рис. 6. Согласованное управление МКС с модулями, отличающимися параметрами СУ

В системе с интерливингом [11] система верхнего уровня выполняет все функции управления преобразователями модулей за исключением формирования сигналов обратных связей.

Рассмотренные модульные решения МКС имеют идентичные конструкции модулей и их систем управления, отличающихся исполнением отдельных элементов и/или фиксированным параметром системы управления. Все модули работают в одном частотном диапазоне и предназначены для решения общей задачи (имеют общую целевую функцию). Согласованное управление, как правило, используется для симметрирования режимов модулей и улучшения их динамических характеристик.

Мультиконверторные системы с кооперативными преобразователями.

Необходимость обеспечения качества электрической энергии привела к распространению силовых активных фильтров (САФ). Исследовалась их установка как независимых преобразователей [12], компенсирующих гармоники в различных точках линии питания, так и модульных преобразователей с кооперативным управлением для повышения установленной мощности САФ в одной точке линии [6].

Необходимость повышения эффективности работы САФ привела исследователей к идее разграничить его частотный диапазон на несколько поддиапазонов. Это соответствует разделению целевой функции САФ на несколько подфункций, которые выполняются отдельными преобразователями САФ, что существенно отличает данное решение от модульных преобразователей (Рис. 7).



Рис. 7. МКС с кооперативными преобразователями

Один из первых кооперативных преобразователей, используемых для обеспечения качества электрической энергии, был основан на комбинации тиристорного компенсатора реактивной мощности и САФ на IGBT [13]. В [14] предложено в системах с распределенной генерацией энергии использовать кооперативные преобразователи, один из которых обеспечивает формирование низкочастотного потока энергии от системы распределенной генерации, а второй – компенсацию нежелательных гармоник тока. В обоих случаях требуется согласованное управление преобразователями. В [15] введен термин «кооперативный преобразователь» – «компромиссное решение, в котором различные преобразователи работают вместе для достижения общей цели или для улучшения показателей системы в целом. Это не вопрос распараллеливания преобразователей, а скорее вопрос настройки каждого преобразователя для

оптимального достижения определенной частичной цели». Приведены примеры кооперативных преобразователей, рассмотрены задачи, которые могут быть решены при их использовании. Одной из задач, стоящих при разработке САФ, является снижение потерь в преобразователях САФ. Работа одного преобразователя во всем диапазоне компенсируемых гармоник от 5й до 49й [1] требует использования частоты преобразования более 12 кГц. Применение мощных IGBT с такой частотой переключения приводит к значительным динамическим потерям, снизить которые возможно при использовании в САФ высокочастотных MOSFET или SiC транзисторов. Однако эти приборы существенно уступают IGBT в мощности. В [16] рассмотрена параллельное включение инверторов на IGBT и SiC транзисторах. Решение [16] позволяет использовать мощные IGBT с частотой переключения 10кГц та маломощные SiC транзисторы с частотой переключения 100кГц.

В [17] рассмотрен вопрос целесообразности применения кооперативных преобразователей в САФ. Показано, что для компенсации искажений тока, вызываемых би и 12-пульсными выпрямителями, можно использовать высокочастотный и низкочастотный кооперативные преобразователи (Рис. 8).

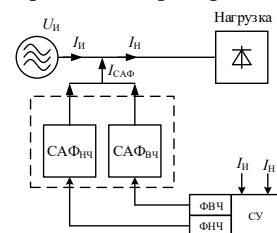


Рис. 8. Система с высокочастотным и низкочастотным кооперативными САФ

Первый из них подавляет 5-13 гармоники, работая с частотой преобразования 6500 Hz, а второй – 17-49 гармоники при частоте преобразования 24500 Гц. Особенностью кооперативных САФ является неперекрывающиеся рабочие диапазоны частот [18].

Общий ток, подлежащий подавлению в случае 6-пульсного выпрямителя, и токи кооперативных САФ приведены на рис. 9.

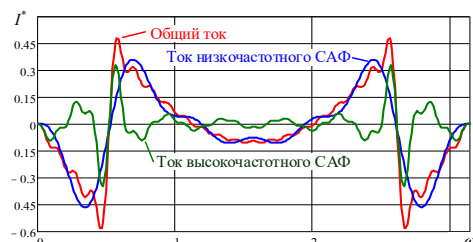


Рис. 9. Общий ток, подлежащий подавлению, и токи кооперативных САФ

В случае использования одностипных IGBT снижение мощности потерь составляет 24-10% для

систем с би и 12-пульсным выпрямителем соответственно.

В [19] рассмотрено применение кооперативных преобразователей для работы в составе батарейной системы накопления электрической энергии (БСНЭЭ). Поскольку аккумуляторные батареи являются низкочастотными устройствами, что связано с протеканием электрохимических процессов, то в состав БСНЭЭ, кроме аккумуляторов, входят и конденсаторные накопители энергии, компенсирующие высокочастотные пульсации тока контактной сети. БСНЭЭ предназначена для компенсации пульсаций мощности в контактной сети железной дороги постоянного тока [20]. Структурная схема подключения БСНЭЭ совместно с согласующими преобразователями приведена на рис. 10.

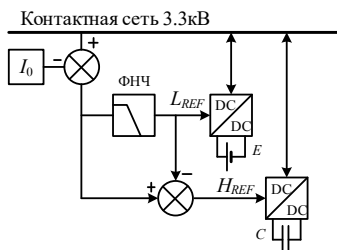


Рис. 10. Структурная схема подключения БСНЭЭ к контактной сети

Из рисунка видно, что сигнал управления согласующими преобразователями проходит частотное разделение и преобразователи работают каждый в своем частотном диапазоне. Мгновенные значения токов в системе приведены на рис. 11.



Рис. 11. Мгновенные значения токов в системе БСНЭЭ

Применение кооперативных преобразователей в системе БСНЭЭ позволяет продлить срок службы аккумуляторных батарей накопителя энергии за счет исключения неблагоприятных для них высокочастотных процессов заряда/разряда. За счет выделения только высокочастотных составляющих тока, компенсируемых емкостными накопителями энергии, их емкость может быть минимизирована.

Заклучение

Модульные преобразователи МКС имеют идентичные конструкции модулей и их систем управления, которые могут отличаться исполнением отдельных элементов и/или фиксированным параметром системы управления. Все модули работают в одном частотном диапазоне и предназначены для решения общей задачи (имеют общую целевую функцию).

В модульных преобразователях согласованное управление, как правило, используется для симметрирования режимов модулей и улучшения их динамических характеристик.

Кооперативные преобразователи работают вместе для достижения общей цели или для улучшения показателей системы в целом. Как правило работа кооперативных преобразователей происходит в разных частотных диапазонах. Выбор схемы, элементной базы, частоты преобразования, рабочего диапазона частот позволяют оптимизировать каждый преобразователь для достижения определенной частичной цели.

Использование кооперативных преобразователей в составе силовых активных фильтров, позволяет сократить суммарную мощность потерь в системе активной фильтрации.

Применение идеологии кооперативных преобразователей с частотным разделением рабочих диапазонов в составе батарейной системы накопления электрической энергии позволяет оптимизировать частотный диапазон протекающих через накопители токов и, следовательно, их зарядо-разрядные характеристики и, как следствие, продлить срок эксплуатации.

Литература

1. "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems," in *IEEE Std 519-1992*, pp.1-112, 9 April 1993. doi: 10.1109/IEEESTD.1993.114370.
2. A. Emadi and M. Ehsani, "Multi-converter power electronic systems: definition and applications," *2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.01CH37230)*, Vancouver, BC, 2001. pp. 1230-1236. vol.2, doi: 10.1109/PESC.2001.954287.
3. J. W. Kolar, "Future Challenges for Research and Teaching in Power Electronics," Presentation held at the *14th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM 2014)*, Brasov, Romania, May 22-24, 2014.
4. S. Nakamura, M. Iwasa and M. Nakahara, "Cooperative control of power system with battery and solar cell for a satellite," *2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Nagasaki, 2012. pp. 1-5, doi: 10.1109/ICRERA.2012.6477284.

5. T. Sakurai, K. Goto, I. Matori, A. Watanabe, T. Kawai and T. Nakao, "Cooperative Control Scheme for an HVDC System Connected to an Isolated BWR Nuclear Power Plant," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 6, pp. 1894-1902, June 1983. doi: 10.1109/TPAS.1983.317799.
6. Wang, Y., Chen, G., & Xu, Q. "Simplified multi-modular shunt active power filter system and its modelling," *IET Power Electronics*, 8(6), pp. 967-976, 2015. doi:10.1049/iet-pel.2014.0572
7. O. K. Marti and T. A. Taylor, "Wave shape of 30- and 60-phase rectifier groups," in *Electrical Engineering*, vol. 59, no. 4, pp. 218-226, April 1940, doi: 10.1109/EE.1940.6434872.
8. D. J. Perreault and J. G. Kassakian, "Distributed interleaving of paralleled power converters," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 44, no. 8, pp. 728-734, Aug. 1997, doi: 10.1109/81.611269.
9. Sokol, Y. I., Zamaruiev, V. V., Ivakhno, V. V., & Voitovych, Y. S. "Electronic Phase Shifting in Multipulse Rectifier," *Electrical, Control and Communication Engineering*, 12(1), pp. 5-10. 2017. doi: 10.1515/ecce-2017-0001.
10. E. Sokol, V. Zamaruiev, V. Ivakhno, Y. Voitovych, O. Butova and V. Makarov, "18-Pulse Rectifier with Electronic Phase Shifting and Pulse Width Modulation," *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, 2018, pp. 290-294, doi: 10.1109/IEPS.2018.8559530.
11. H. Behjati, A. Davoudi and F. Lewis, "Modular DC-DC Converters on Graphs: Cooperative Control," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 12, pp. 6725-6741, Dec. 2014. doi: 10.1109/TPEL.2014.2303192.
12. S. Leng, I. Chung and D. A. Cartes, "Distributed operation of multiple shunt active power filters considering power quality improvement capacity," *The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, Hefei, 2010, pp. 543-548, doi: 10.1109/PEDG.2010.5545917.
13. J. Dixon, Y. del Valle, M. Orchard, M. Ortuzar, L. Moran and C. Maffrand, "A full compensating system for general loads, based on a combination of thyristor binary compensator, and a PWM-IGBT active power filter," *IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No. 37243)*, Denver, CO, USA, 2001, pp. 1150-1155 vol.2, doi: 10.1109/IECON.2001.975942.
14. S.A. S. Hasari, A.R. Akhijahani and A. Salemnia, "Power loss reduction and power quality improvement in distribution systems using a modified converter of distributed generation resources," *2015 20th Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC)*, Zahedan, 2015, pp. 239-245, doi: 10.1109/EPDC.2015.7330503.
15. E. Romero-Cadaval and M. I. Milang-Montero, "Cooperative converters in power electronic systems," *2010 12th Biennial Baltic Electronics Conference*, Tallinn, 2010, pp. 51-60. doi: 10.1109/BEC.2010.5630917.
16. J. Endres and A. Ackva, "A parallel three-phase converter system for ripple current compensation and passive filter reduction," *2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, Geneva, 2015, pp. 1-9, doi: 10.1109/EPE.2015.7309135.
17. V. Zamaruiev, V. Ivakhno, B. Styslo "Using cooperative converters in active power line conditioners," Presentation held at the *IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS 2020)*, Istanbul, Turkey, September 7 – 11, 2020.
18. V.V. Zamaruiev, "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, doi: 10.1109/ELNANO.2013.6552048.
19. Стисло, Б.О. Особливості застосування накопичувачів електричної енергії в системі електропостачання залізниці / Б. О. Стисло // Вісник НТУ «ХП», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХП». 2018. № 9 (1285). С. 76-82. doi:10.20998/2413-4295.2018.09.11.
20. Сиченко В.Г., Косарев Є.М., Губський П.В., Замаруєв В.В., Івахно В.В., Стисло Б.О. Дослідження режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму. Електрифікація транспорту. 2016. № 11. С. 61-70. doi: 10.15802/etr.v0i11.83718.

References (transliterated)

1. "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems," in *IEEE Std 519-1992*, pp.1-112, 9 April 1993. doi: 10.1109/IEEESTD.1993.114370.
2. A. Emadi and M. Ehsani, "Multi-converter power electronic systems: definition and applications," *2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 01CH37230)*, Vancouver, BC, 2001, pp. 1230-1236 vol.2, doi: 10.1109/PESC.2001.954287.
3. J. W. Kolar, "Future Challenges for Research and Teaching in Power Electronics," Presentation held at the *14th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM 2014)*, Brasov, Romania, May 22-24, 2014.
4. S. Nakamura, M. Iwasa and M. Nakahara, "Cooperative control of power system with battery and solar cell for a satellite," *2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Nagasaki, 2012, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICRERA.2012.6477284.

5. T. Sakurai, K. Goto, I. Matori, A. Watanabe, T. Kawai and T. Nakao, "Cooperative Control Scheme for an HVDC System Connected to an Isolated BWR Nuclear Power Plant," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 6, pp. 1894-1902, June 1983. doi: 10.1109/TPAS.1983.317799.
6. Wang, Y., Chen, G., & Xu, Q. "Simplified multi-modular shunt active power filter system and its modelling," *IET Power Electronics*, 8(6), pp. 967-976, 2015. doi:10.1049/iet-pel. 2014.0572
7. O. K. Marti and T. A. Taylor, "Wave shape of 30- and 60-phase rectifier groups," in *Electrical Engineering*, vol. 59, no. 4, 218-226, April 1940, doi: 10.1109/EE.1940.6434872.
8. D. J. Perreault and J. G. Kassakian, "Distributed interleaving of paralleled power converters," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 44, no. 8, pp. 728-734, Aug. 1997, doi: 10.1109/81.611269.
9. Sokol, Y. I., Zamaruev, V. V., Ivakhno, V. V., & Voitovych, Y. S. "Electronic Phase Shifting in Multipulse Rectifier," *Electrical, Control and Communication Engineering*, 12(1), pp. 5-10. 2017. doi: 10.1515/ecce-2017-0001.
10. E. Sokol, V. Zamaruev, V. Ivakhno, Y. Voitovych, O. Butova and V. Makarov, "18-Pulse Rectifier with Electronic Phase Shifting and Pulse Width Modulation," *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, 2018, pp. 290-294, doi: 10.1109/IEPS.2018.8559530.
11. H. Behjati, A. Davoudi and F. Lewis, "Modular DC-DC Converters on Graphs: Cooperative Control," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 12, pp. 6725-6741, Dec. 2014, doi: 10.1109/TPEL.2014.2303192.
12. S. Leng, I. Chung and D. A. Cartes, "Distributed operation of multiple shunt active power filters considering power quality improvement capacity," *The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, Hefei, 2010, pp. 543-548, doi: 10.1109/PEDG.2010.5545917.
13. J. Dixon, Y. del Valle, M. Orchard, M. Ortizar, L. Moran and C. Maffrand, "A full compensating system for general loads, based on a combination of thyristor binary compensator, and a PWM-IGBT active power filter," *IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No.37243)*, Denver, CO, USA, 2001, pp. 1150-1155 vol.2, doi: 10.1109/IECON.2001.975942.
14. S. A. S. Hasari, A. R. Akhijahani and A. Salemnia, "Power loss reduction and power quality improvement in distribution systems using a modified converter of distributed generation resources," *2015 20th Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC)*, Zahedan, 2015, pp. 239-245, doi: 10.1109/EPDC.2015.7330503.
15. E. Romero-Cadaval and M. I. Milang-Montero, "Cooperative converters in power electronic systems," *2010 12th Biennial Baltic Electronics Conference*, Tallinn, 2010, pp. 51-60, doi: 10.1109/BEC.2010.5630917.
16. J. Endres and A. Ackva, "A parallel three-phase converter system for ripple current compensation and passive filter reduction," *2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, Geneva, 2015, pp. 1-9, doi: 10.1109/EPE.2015.7309135.
17. V. Zamaruev, V. Ivakhno, B. Styslo "Using cooperative converters in active power line conditioners," Presentation held at the *IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS 2020)*, Istanbul, Turkey, September 7 – 11, 2020.
18. V. V. Zamaruev, "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, doi: 10.1109/ELNANO.2013.6552048.
19. Стисло, Б. О. Особливості застосування накопичувачів електричної енергії в системі електропостачання залізниці / Б. О. Стисло // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 9 (1285). – С. 76-82. – doi:10.20998/2413-4295.2018.09.11.
20. V. Sychenko, E. Kosarjev, P. Gubskiy, V. Zamaruev, V. Ivakhno, B. Styslo "Research the voltage mode of system DC traction power supply," *Electrification of transport*. – 2016. – № 11. – pp. 61-70. (in Ukrainian). doi: 10.15802/etr.v0i11.83718

Сведения об авторах

Евгений Сокол, д.т.н., профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Украины, ректор НТУ «ХПИ» (Харьков, Украина)

Владимир Замаруев, к.т.н., профессор, НТУ «ХПИ» (Харьков, Украина), volodymyr.zamaruev@khpі.edu.ua

Владимир Ивахно, к.т.н., профессор, НТУ «ХПИ» (Харьков, Украина),

Сергей Кривошеев, к.т.н., профессор, НТУ «ХПИ» (Харьков, Украина),

Богдан Стысло, к.т.н., доцент, НТУ «ХПИ» (Харьков, Украина).

Владимир Замаруев, Владимир Ивахно, Богдан Стысло

Определение энергетической эффективности систем постоянного тока

Аннотация. Снижение мощности потерь в современных системах постоянного тока, таких как: линии постоянного тока и вставки постоянного тока в системах с возобновляемыми источниками энергии, система электроснабжения транспорта и др. требует наличия инструментов, которые позволяют определять причины появления потерь и устанавливать их вклад в суммарные потери на системном уровне. Для систем переменного тока используются коэффициенты мощности, гармонических искажений и др. Их определение неприменимо к системам постоянного тока. Авторы предлагают унифицировать понятие этих коэффициентов. Используемый подход базируется на существующем определении коэффициентов. Рассмотрено использование коэффициента гармонических искажений тока для анализа мощности потерь, вызванной протеканием токов определенных частотных диапазонов.

Ключевые слова: коэффициент мощности; линия постоянного тока; теория мощности; нелинейная нагрузка; коэффициент гармонических искажений; колебания мощности.

Volodymyr Zamaruiev, Volodymyr Ivakhno, Bohdan Styslo

Determination of the energy efficiency of DC systems

Summary. Reducing the power of losses in modern DC systems, such as: DC lines and DC links in systems with renewable energy sources, transport supply, etc. requires tools that can determine the causes of losses and determine their contribution. For AC systems, power factors and THD are used. Their current definition does not apply to DC systems. The authors propose to unify the concept of these coefficients. The used approach is based on the existing definition of power factor and its constituents, such as THD, distortion power etc., expanding its applicability to DC systems. The use of the harmonic current distortion factor for the analysis of power of losses caused by the flow of currents of certain frequency ranges is considered.

Keywords: power factor, DC power line, power theory, nonlinear load, THD, ripple power.

Введение. Повышенное внимание к проблемам энергосбережения неразрывно связано с необходимостью анализа параметров потребляемой электроэнергии. Основная часть электрической энергии с середины 19-го века стала производиться и потребляться на переменном токе, что привело к исследованиям и последующим описаниям свойств систем переменного тока, в том числе с нелинейной нагрузкой. В 1897 г. было опубликовано первое издание книги Штейнмеца (С. Р. Steinmetz) [1]. Принимая во внимание цели данной статьи, отметим, что в [1] введено понятие активной мощности для цепей переменного тока $P = UI \cos(\phi)$, различных составляющих тока и напряжения (энергетическая составляющая, безваттная составляющая), понятия коэффициента мощности и полной мощности. Автор рассматривает системы с несинусоидальным током и напряжением, определяет основную (первую) и высшие гармоники, приводит причины их появления, указывает, что высшие гармоники тока при синусоидальном напряжении не передают активной мощности, но могут вызывать резонанс. явления в системе, дополнительные потери и т. д. С тех пор, как правило, появление очередной теории мощности стало ответом на запросы практики. К тридцатым годам 20 - го века, в ответ на распространение ртутных выпрямителей, были разработаны теории мощности Будяну (С. I. Budcanu) [2] и Фризе (S. Fryze) [3]. Теория Будяну оперирует с разложением сигнала в частотной области (анализ Фурье), а теория Фризе - во временной

области, выделяя активные и реактивные компоненты тока источника (синфазные и квадратурные компоненты тока). Анализ и сравнение основных теорий мощности проводилось, например, в [3, 4], в [3] автор призывает не прекращать дискуссии об их достоинствах и недостатках.

Работа всех потребителей, подключенных к источникам переменного напряжения, должна соответствовать действующим нормам [5, 6]. При этом возникают задачи, связанные с учетом потребляемой энергии, снижением потерь в системах электроснабжения, повышением качества электроэнергии, управлением полупроводниковыми преобразователями и т.д. Для управления силовыми активными фильтрами широко используются алгоритмы, основанные на идеях теории Фризе: весь ток, который не является активным - реактивный. Задача снижения потерь в системах предполагает анализ их причин их возникновения, повышение качества электроэнергии предполагает нормирование параметров токов и напряжений, что решается с использованием результатов гармонического анализа рассматриваемых величин. Стандарт [7] учитывает частотные компоненты с периодом больше, чем у основной частоты (включая компоненты постоянного тока), что связано с влиянием пульсаций потребляемой мощности на потери в системе. Суммарные гармонические искажения тока или напряжения широко используются для расчета мощности искажения, вызывающей дополнительные потери в ЛЭП и т.д.

Системы постоянного тока, как более простые для понимания и маломощные системы, во многом ушли в тень теоретического развития систем переменного тока. С развитием преобразовательной техники стало возможным вернуться к созданию мощных систем постоянного тока – высоковольтных линий электропередачи постоянного тока (HVDC) [8], в которых масштабирование постоянного напряжения осуществляется с помощью электронных трансформаторов [9]. В настоящее время широко используются железные дороги постоянного тока, линии постоянного тока разрабатываются в рамках проектов интеллектуальных сетей (Smart Grid) [10], изолированных и микро-сетей (Mikro Grid) [11], сетевых структур будущих возобновляемых источников электроэнергии (FREEDM) [12]. Особенностью перечисленных систем постоянного тока является неравномерный график энергопотребления во времени, подключение нагрузок с переменными параметрами, возврат энергии в сеть. Без возможности анализа процессов в подобных системах энергоснабжения невозможно разработать комплекс мероприятий по повышению энергоэффективности системы, использующей постоянный ток.

Однако для систем постоянного тока не разработаны инструменты для определения энергоэффективности потребителя электроэнергии (соответствующие коэффициенты и параметры не определены). Коэффициент мощности систем постоянного тока часто принимают за единицу [13]. Тот факт, что ряд определений [7] может быть применен к системам постоянного тока, интуитивно понятен, однако рекомендации о возможности и способах использования аналогичных параметров (таких как: мощность искажения тока, коэффициент мощности, и др.) для систем постоянного тока, если они существуют, широко не известны.

Цель работы. Цель данной статьи – показать возможности расширения применения инструментов, разработанных для систем переменного тока, для анализа энергетических показателей в системах постоянного тока; дать определение терминам: мощность искажения тока, коэффициент мощности, коэффициент гармонических искажений (*THD*) для системе постоянного тока и показать их сходство и отличия от определений систем переменного тока; произвести модификацию существующих формул, например, из [7], для использования в системах постоянного тока; показать использование полученных инструментов для определения энергоэффективности потребителя, подключенного к источнику постоянного напряжения.

Особенности систем постоянного тока. С формальной точки зрения, система постоянного тока представляет собой однофазную систему с нулевой частотой основной гармоники напряжения. Как и для систем переменного тока, в данном случае для

определения составляющих мощности возможен анализ как в частотной, так и во временной областях. Воспользуемся анализом в частотной области.

Активная и реактивная мощность в системах постоянного тока. При переходе от переменного синусоидального к постоянному току необходимо учитывать, что амплитудные, средние и действующие значения токов и напряжений равны. Для идеальных систем постоянного тока (Рис. 1, а, б) мгновенные значения тока и напряжения равны амплитудным и их частота ω_0 равна нулю $\omega_0=0$:

$$i_0(t) = I_0, \quad (1)$$

$$u_0(t) = U_0. \quad (2)$$

С другой стороны,

$$i(t) = I_0 \cos(\omega_0 t + \phi), \quad (3)$$

$$u(t) = U_0 \cos(\omega_0 t). \quad (4)$$

Понятно, что с учетом (1), (2) и $\omega_0=0$, угол фазного сдвига в этом случае равен нулю ($\phi=0$), что также соответствует физическим представлениям о процессах в системе. Поскольку амплитуда и действующие значения как постоянного напряжения, так и тока, равны, в дальнейшем символы U_0 и I_0 обозначают действующие (среднеквадратичные) значения постоянного напряжения и тока. Точно так же символы U_n и I_n обозначают действующие значения напряжения и тока n -й гармоники.

Применим указанные параметры системы в стандартных методах измерения мощности в синусоидальных, несинусоидальных симметричных и несимметричных системах [7]. Реактивная мощность Q на основной частоте отсутствует.

$$Q = U_0 I_0 \sin(\phi) = 0. \quad (5)$$

Активная мощность вычисляется, как и принято для систем постоянного тока:

$$P = U_0 I_0 \cos(\phi) = U_0 I_0 \quad (6)$$

Коэффициент мощности в системах постоянного тока. Для идеальных (Рис. 1, а, б) систем постоянного тока полная мощность, с учетом (5), равна

$$S = P + jQ = P, \quad (7)$$

и коэффициент мощности равен единице.

$$PF = P/S = 1, \quad (8)$$

Формула (8) и предыдущие рассуждения соответствуют классическому представлению систем постоянного тока с постоянной нагрузкой.

Современные системы, как упоминалось ранее, могут иметь неравномерный график энергопотребления во времени, который определяется переменной нагрузкой. Такие системы, как правило, соответствуют рис. 1, в.

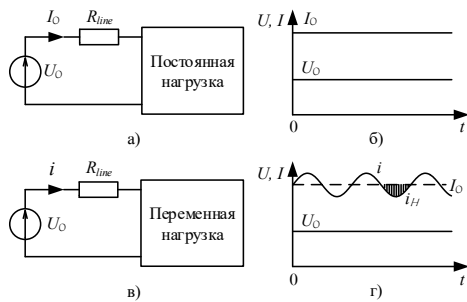


Рис.1. Система постоянного тока: а) – идеальная система; б) – ток и напряжение идеальной системы; в) – реальная система постоянного тока; г) – реальное напряжение и ток с гармоническими составляющими

Мгновенное значение тока в системе включает постоянную i_0 и переменную (гармоническую) $i_H(t)$ составляющие тока (рис. 1, г)

$$i(t) = i_0 + i_H(t), \quad (9)$$

где

$$i_H(t) = \sqrt{2} \sum_{n \neq 0} I_n \cos(n\omega_n t + \varphi_n) \quad (10)$$

На практике, ток нагрузки в системе постоянного тока часто имеет значительную переменную составляющую. Например, мгновенные значения токов и напряжений на входе переменной нагрузки (подвижного состава железной дороги постоянного тока [14]) приведены на рис 2. Напряжение на выходе тяговой подстанции (источник постоянного напряжения), может считаться неизменным $U_0 = \text{const}$.

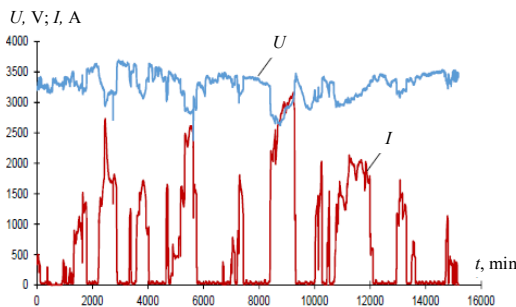


Рис. 2. Мгновенные значения токов и напряжений на входе переменной нагрузки

Рассматриваемые системы являются простейшими. В общем случае, полная мощность [4, 7] включает в себя полные мощности основной гармоники S_0 и неосновных гармоник S_N

$$S^2 = (U_0 I_0)^2 + (U_0 I_H)^2 + (U_H I_0)^2 + (U_H I_H)^2 = S_0^2 + S_N^2 \quad (11)$$

Для рассматриваемой реальной системы, напряжение источника энергии может считаться постоянным ($U_0 = \text{const}$), следовательно, суммарное напряжение гармоник и, соответственно, напряжение каждой из них равны нулю ($U_H = 0$, $U_n = 0$). При постоянстве напряжения источника энергии гармоники тока с ненулевой частотой I_H не участвуют в передаче

активной мощности [1]. Активная мощность гармоник P_H равна нулю

$$P_H = \sum_{n \neq 0} U_n I_n \cos(\varphi_n) = 0. \quad (12)$$

Учтем в (11) $U_0 = \text{const}$, (5), (6) и (12). В этом случае полная мощность находится из выражения

$$S^2 = S_0^2 + S_N^2 = (U_0 I_0)^2 + (U_0 I_H)^2 = P_0^2 + D_I^2, \quad (13)$$

где D_I – мощность искажения тока

$$D_I = U_0 I_H. \quad (14)$$

Полная мощность в системе постоянного тока включает мощность основной гармоники (постоянного тока) и мощность искажений, как показано на рис. 3,б.

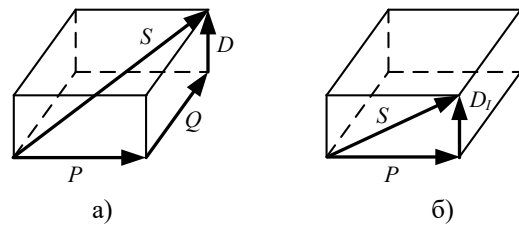


Рис.3. Трехмерное представление полной мощности.

а) – полная мощность по Будяну [4]; б) – полная мощность системы постоянного тока

Коэффициент мощности в системе постоянного тока определяется по формуле

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P_0}{\sqrt{P_0^2 + D_I^2}} = 1 / \sqrt{1 + (D_I / P_0)^2} \quad (15)$$

Для идеальной системы $PF_0 = 1$ (8), но для реальной – $PF_0 \leq 1$ (15).

Коэффициент гармонических искажений в системах постоянного тока. Поскольку в рассматриваемых системах напряжение источника питания постоянно, то, в дальнейшем, рассматриваем коэффициент гармонических искажений тока (THD_{I_0} – коэффициент гармонических искажений тока в системах постоянного тока). Как известно, коэффициент гармонических искажений тока THD_I определяет относительное значение действующего тока гармоник; нормирующим фактором является основная гармоника тока. Поскольку в системе постоянного тока основной гармоникой является гармоника с нулевой частотой, то справедливо соотношение

$$THD_{I_0} = \frac{I_H}{I_0} = \sqrt{\sum_{n \neq 0} I_n^2} / I_0 \quad (16)$$

При использовании (16), выражения (14) и (15) могут быть представлены в виде (17) и (18):

$$D_I = U_0 THD_{I_0}. \quad (17)$$

$$PF_0 = 1 / \sqrt{1 + (THD_{I_0})^2} \quad (18)$$

В силовой электронике коэффициент THD выполняет две функции:
 - определяет параметры качества электроэнергии;
 - определяет энергетические показатели системы.

Поскольку THD_{I0} является интегральным показателем, то для однозначного определения параметров качества совместно с коэффициентом гармонических искажений целесообразно использовать характеристики спектральной плотности описываемых величин.

При определении энергетических показателей системы, THD_{I0} используется не только для упрощения и придания большей наглядности получаемым выражениям, но и однозначно определяет относительную мощность потерь P_{RH}^* в активном сопротивлении R_{line} подводящей линии (рис. 1), вызванную гармониками тока. Нормирующий фактор – мощность потерь (P_{R0}), вызываемых основной гармоникой тока (I_0):

$$P_{RH}^* = \frac{P_{RH}}{P_{R0}} = \frac{I_H^2 R_{line}}{I_0^2 R_{line}} = THD_{I0}^2 \quad (19)$$

Спектральный состав тока в системе всегда может быть определен, например, при помощи дискретного преобразования Фурье. В реальных условиях для получения спектра целесообразно использовать алгоритмы быстрого преобразования Фурье. Спектральный состав фрагмента тока, приведенного на рис. 2, показан на рис. 4 [15]. Особенностью системы [16] является использование кооперативных преобразователей [17], работающих каждый в своем частотном диапазоне df_1 , df_2 , df_3 . Это позволяет оптимизировать структуру, используемую элементную базу и рабочую частоту каждого из преобразователей для улучшения электромагнитной совместимости и снижения мощности потерь.

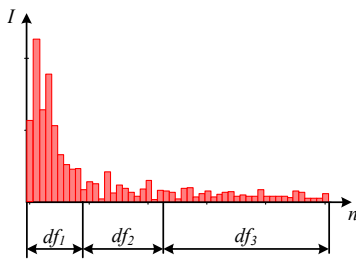


Рис. 4 Спектральный состав тока

Для разработки системы требуются данные о токах, соответствующих требуемым частотным диапазонам. Знание коэффициента гармонических искажений тока THD_I в каждом частотном диапазоне делает возможным учет как параметров качества, так и энергетических характеристик, связанных с данным током. С учетом (16) можно получить:

$$THD_{I0}^2 = \sum_{n \neq 0} \frac{I_n^2}{I_0^2} = \sum_{n=1}^k \frac{I_n^2}{I_0^2} + \sum_{n=k+1}^m \frac{I_n^2}{I_0^2} + \sum_{n=m+1}^{\infty} \frac{I_n^2}{I_0^2} = THD_{Idf1}^2 + THD_{Idf2}^2 + THD_{Idf3}^2 \quad (20)$$

т.е. для получения общего коэффициента гармонических искажений тока значения коэффициентов в каждом частотном диапазоне квадратично суммируются.

Для сигналов, носящих стохастический характер, для вычисления THD_{I0} используется спектральная плотность тока.

Определение энергетической эффективности системы постоянного тока. Гармонический состав тока определяется путем анализа спектрограммы, полученной из измерений тока, например, когда подвижной состав проходит заданный участок, или путем применения преобразования Фурье к текущим данным. Временной интервал измерения определяется гармоникой с минимальной частотой.

Известное значение мощности искажения или THD_{I0} позволяет определить мощность потерь в системе питания постоянного тока.

Например, классическая железная дорога постоянного тока имеет импульсное потребление тока (рис. 2). В первом приближении ток нагрузки «подвижного состава» можно заменить меандром (рис. 5,а). При этом эффективные значения постоянной составляющей (I_0) и высших гармоник (I_H) равны между собой, $THD_I = 1$, амплитуды гармоник тока подчиняются закону $1/n$ (рис. 5,б). Спектральные составы меандра тока и реального потребляемого тока (рис. 4) близки, что подтверждает эквивалентность замены.

В расчетах используется методика, основанная на [7], с учетом ее адаптации для систем постоянного тока. Коэффициент мощности (18) системы равен 0,707 ($PF_0 = 0,707$). Используя (19) со значением $THD_{I0} = 1$, находим, что увеличение потерь в линии, вызванное присутствием высших гармоник, составляет 100%.

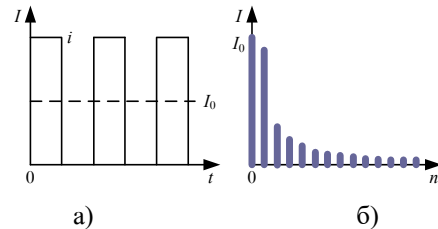


Рис. 5. а) – Эквивалентный ток нагрузки “подвижной состав”; б) – Спектральный состав эквивалентного тока (действующее значение)

Чтобы определить необходимое и достаточное количество гармоник, которые должны быть подавлены для обеспечения заданного уровня потерь в линии, необходимо определить относительную мощность потерь для заданного частотного диапазона токов. Среднеквадратичный ток первых двух гармоник

составляет 95% от общего тока гармоник, $THD_{I1,3} = 0,95$. Относительная мощность потерь от этих гармоник в сопротивлении линии составляет 90% (рис. 6). Компенсация первых четырех гармоник позволяет снизить потери в линии от высших гармоник на 95%. Оставшиеся высшие гармоники не оказывают значительного влияния на энергоэффективность системы и могут быть подавлены, например, пассивными фильтрами для обеспечения электромагнитной совместимости объекта.

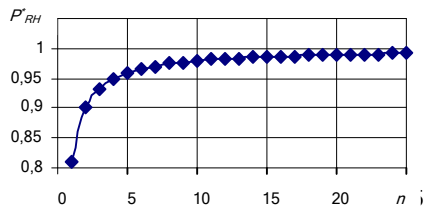


Рис. 6. Относительная мощность потерь, определяемая протеканием n первых гармоник

Известные значения THD_I в разных частотных диапазонах позволяют оценить установленную мощность силовых активных фильтров и принять решение о целесообразности установки накопителей электроэнергии. Возможность определения спектральной плотности мощности искажения позволяет выбрать подходящую структуру гибридного или силового активного фильтра с кооперативными преобразователями.

Рассмотрим применение предложенной методики к реальному объекту [14]. Исходные данные тока по результатам измерений в k точках ($k=380$) представлены на рис. 7 а. Среднее значение тока составляет 647А, амплитудное – 3160А. Спектральная плотность $S(p)$ для p гармоник ($p=20$) потребляемого тока для приведена на рис. 7, б.

Применяя (19) и (20) с учетом данных рис. 7, б, можно показать, что суммарный коэффициент гармонических искажений равен $THD_{I0} = 0,953$, относительная мощность потерь в активном сопротивлении линии, вызываемая переменной составляющей тока – 90% от мощности потерь, вызываемых протеканием постоянного тока.

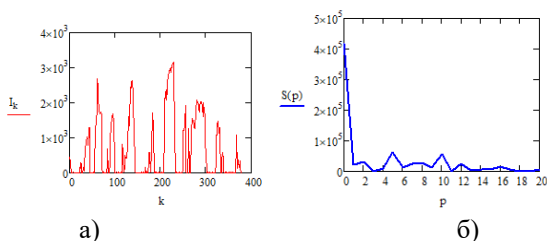


Рис. 7. а) - исходные данные тока I_k ; б) - спектральная плотность потребляемого тока

Вклад отдельных гармоник в общие потери: 1–10я гармоники вызывают 63% потерь, 11–20я гармоники –

17%, а высшие – 10%. Номера гармоник могут быть связаны с реальной частотой через период дискретизации сигнала тока. Представленный краткий анализ свидетельствует о возможной целесообразности подавления гармоник тока в частотном диапазоне до 10й, например, средствами активной фильтрации

Заключение. В настоящее время для систем постоянного тока нет определений таких терминов и понятий, как: мощность искажения, коэффициент мощности, коэффициент гармонических искажений, которые широко используются в системах переменного тока для определения их энергоэффективности и системного анализа причин появления мощности потерь. Предлагаемый подход позволяет использовать стандартные определения и методики измерения мощности, разработанные для систем переменного тока в системах постоянного тока.

При использовании стандартизованных методов измерения мощности, в качестве основной гармонической составляющей необходимо использовать среднее значение нулевой гармоники напряжения или тока. Частота и фазовый сдвиг основных гармоник тока и напряжения равны нулю.

Реактивная мощность основной гармоники (мощность сдвига) в системах постоянного тока равна нулю.

Полная мощность включает мощность постоянного тока и мощность искажений. Коэффициент мощности в реальной системе постоянного тока с пульсациями мощности меньше единицы.

Активная мощность высших гармоник в рассматриваемых системах постоянного тока отсутствует.

Коэффициент гармонических искажений тока (THD_I) однозначно определяет относительную мощность потерь в сопротивлении R_{line} питающей линии, вызванную гармониками тока.

Использование коэффициентов гармонических искажений тока, полученных для отдельных частотных диапазонов, позволяет оценить вклад соответствующих токов в существующую мощность потерь, получить характеристики требуемых активных фильтров.

Литература

1. С. P.Steinmetz, E. J. Berg "Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena." The W.J. Johnston Company. NY. 1897.

2. C. I. Budeanu "Puissances Reactives et Fictives," Institut national roumain pour l'étude de l'aménagement et de l'utilisation des sources d'énergie, Bucarest. 1927.
3. S. Fryze, "Active, reactive and apparent powers in circuits with nonsinusoidal voltages and currents," *Przegląd Elektrotechniczny*, z. 7, pp. 193-203, z. 8, pp. 225-234. 1931. z. 22. pp. 673-676. 1932.
4. L. S. Czarnecki "Power theories and meta-theory of powers in electrical circuits," *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 87 NR 8/2011 pp. 198-201.
5. A. E. Emanuel "Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow," Wiley-IEEE Press, 2010.
6. CENELEC EN 50160, "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, (July 2010)
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. doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459
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. doi: 10.1109/IEEESTD.2010.5439063
9. J. Arrillaga, Y. H. Liu, N. R. Watson "Flexible Power Transmission: The HVDC Options," Wiley, 2007.
10. J.W. Kolar, G. Ortiz "Intelligent Solid State Transformers (SSTs). A Key Building Block of Future Smart Grid Systems," The 19th Conference of China Power Supply Society (CPSSC 2011), Shanghai, China, November 18-21, 2011. Conference lecture.
11. "Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks (Power Systems)," Editors: Ryszard Strzelecki, Grzegorz Benysek, Springer, 2010. doi: 10.1007/978-1-84800-318-7
12. "Microgrid Architectures, Control and Protection Methods Power Systems)," Editors: Mahdavi Tabatabaei N., Kabalci E., Bizon N., Springer, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-23723-3
13. L. Sun, D. Lubkeman and M. Baran, "Residential DC House Cost Benefit Analysis," 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Denver, CO, 2018, pp. 1-9. doi: 10.1109/TDC.2018.8440231
14. T. Gonen "Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design," 3rd ed. – CRC Press Book, 2014. doi: 10.1201/b17055
15. Сиченко В.Г., Косарев Є.М., Губський П.В., Замаруєв В.В., Івахно В.В., Стисло Б.О. Дослідження режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму. Електрифікація транспорту. 2016. № 11. С. 61–70. doi: 10.15802/etr.v0i11.83718.
16. 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. doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100524
17. E. Romero-Cadaval and M.I. Milang-Montero, "Cooperative converters in power electronic systems," 2010 12th Biennial Baltic Electronics Conference, Tallinn, 2010. pp. 51-60. doi: 10.1109/BEC.2010.5630917

References (transliterated)

1. C. P. Steinmetz, E. J. Berg "Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena." The W.J. Johnston Company, NY. 1897.
2. C. I. Budeanu "Reactive and Fictive Powers," Romanian Institute of Energy, Bucharest., 1927. (in French)
3. S. Fryze, "Active, reactive and apparent powers in circuits with nonsinusoidal voltages and currents," *Electrical Review*, v. 7, pp. 193-203, v. 8, pp. 225-234, 1931, v. 22, pp. 673-676, 1932.
4. L. S. Czarnecki "Power theories and meta-theory of powers in electrical circuits," *Electrical Review*, R. 87 NR 8/2011 pp. 198-201.
5. A. E. Emanuel "Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow," Wiley-IEEE Press. 2010.
6. CENELEC EN 50160, "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, (July 2010)
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. doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459
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. doi: 10.1109/IEEESTD.2010.5439063
9. J. Arrillaga, Y. H. Liu, N. R. Watson "Flexible Power Transmission: The HVDC Options," Wiley, 2007.
10. J.W. Kolar, G. Ortiz "Intelligent Solid State Transformers (SSTs). A Key Building Block of Future Smart Grid Systems," The 19th Conference of China Power Supply Society (CPSSC 2011), Shanghai, China, November 18-21, 2011. Conference lecture.
11. "Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks (Power Systems)," Editors: Ryszard Strzelecki, Grzegorz Benysek, Springer, 2010. doi: 10.1007/978-1-84800-318-7
12. "Microgrid Architectures, Control and Protection Methods Power Systems)," Editors: Mahdavi Tabatabaei N., Kabalci E., Bizon N., Springer, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-23723-3
13. L. Sun, D. Lubkeman and M. Baran, "Residential DC House Cost Benefit Analysis," 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Denver, CO, 2018, pp. 1-9. doi: 10.1109/TDC.2018.8440231

14. T. Gonen "Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design," 3rd ed. – CRC Press Book, 2014. doi: 10.1201/b17055
15. V. Sychenko, E. Kosarjev, P. Gubskiy, V. Zamaruev, V. Ivakhno, B. Styslo "Research the voltage mode of system DC traction power supply," Electrification of transport. 2016. № 11. pp. 61-70. (in Ukrainian). doi: 10.15802/etr.v0i11.83718
16. E. Sokol, V. Zamaruev, 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. doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100524
17. E. Romero-Cadaval and M. I. Milanés-Montero, "Cooperative converters in power electronic systems," 2010 12th Biennial Baltic Electronics Conference, Tallinn, 2010, pp. 51-60. doi: 10.1109/BEC.2010.5630917

Сведения об авторах

Владимир Замаруев, к.т.н., профессор, НТУ «ХПИ» (Харьков, Украина), volodymyr.zamaruev@khpі.edu.ua

Владимир Ивахно, к.т.н., профессор, НТУ «ХПИ» (Харьков, Украина),

Богдан Стысло, к.т.н., доцент, НТУ «ХПИ» (Харьков, Украина).

ენერგოეფექტიანობა და განახლებადი ენერგიის წყაროები
ენერგო-რესურსების დამზოგავი ტექნოლოგიები ენერგეტიკაში

Energy efficiency and renewable energy sources
Energy Saving technologies in Power Engineering

Оксана Довгалиук, Роман Бондаренко, Иван Яковенко

Разработка мероприятий по повышению эффективности эксплуатации автономных
осветительных комплексов для автодорог Украины

Аннотация. Выполнен анализ конструктивных особенностей и функционирования автономных осветительных комплексов для автодорог Украины, которые используют в работе возобновляемые источники энергии и системы накопления энергии. Выявлены недостатки в их работе и определены причины их возникновения, с учетом которых разработаны мероприятия по повышению эффективности эксплуатации автономных осветительных комплексов для автодорог, позволяющие использовать готовые современные технические средства.

Ключевые слова: автономный осветительный комплекс, солнечная панель, аккумуляторная батарея, ветрогенератор, электромеханический преобразователь.

Oksana Dovgalyuk, Roman Bondarenko, Ivan Yakovenko

Development of measures to increase the efficiency of autonomous lighting complexes operation
for Ukrainian highways

Abstract. The analysis of design features and operation of autonomous lighting complexes for Ukrainian highways, which use renewable energy sources and energy storage systems, was performed. Shortcomings in their work have been identified and the reasons for their occurrence have been identified, taking into account which measures have been developed to improve the efficiency of the operation of autonomous lighting complexes for highways, allowing the use of ready-made modern technical means.

Keywords: autonomous lighting complex, solar panel, storage battery, wind generator, electromechanical converter.

Введение. Сегодня одной из устойчивых тенденций развития энергетики является активное использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Одним из перспективных направлений применения автономных ВИЭ является питание электрических установок небольшой мощности, для которых отсутствует возможность подключения к централизованным сетям энергоснабжающей организации или стоимость подключения является очень высокой из-за сложности в согласовании документации, получении разрешений и т.д. Ярким примером таких потребителей являются автономные осветительные комплексы (АОК), установленные на нерегулируемых пешеходных переходах на автомобильных дорогах.

Освещение нерегулируемых пешеходных переходов имеет очень важное значение для обеспечения безопасности на дорогах. Исследования показывают, что 32% дорожно-транспортных происшествий (ДТП) с наездом на пешехода возникает в дневное время, а 68% в ночное [1]. Во многих странах мира вопросу применения АОК для нерегулируемых пешеходных переходов уделяется много внимания при проектировании, реализации, эксплуатации. Статистика показывает, что установка

осветительных приборов на пешеходных переходах резко уменьшает количество ДТП и существенно повышает безопасность как пешеходов, так и водителей.

Согласно [2] все пешеходные переходы должны быть освещены в соответствии с установленными нормативами. Однако проектные и строительные организации часто сталкиваются с вопросом присоединения к электрическим сетям осветительного оборудования пешеходного перехода в условиях значительной удаленности объекта от источника питания. Поскольку вариант строительства кабельной или воздушной линии для подключения нескольких светодиодных светильников является очень дорогим, то проекты с использованием солнечных панелей для питания таких нагрузок активно создаются и реализуются в Украине. Солнечные панели устанавливаются на опорах освещения и в течение дня заряжают аккумуляторы. В темное время суток аккумуляторы питают светильник и мигающий сигнальный светофор.

В 2019 г. на дорогах Украины было построено несколько сотен таких объектов, но было обнаружено, что они работают нестабильно. В

осенние и зимние месяцы в периоды с переходов ни работало вообще или работало не на полную мощность.

Таким образом, вопрос повышения эффективности эксплуатации АОК для автодорог Украины является весьма актуальным и своевременным.

Большое количество ученых в мире занималась вопросами использования ВИЭ для освещения автодорог. Так, внимание уделялось анализу различных типов ВИЭ для электро-снабжения систем освещения улиц [3], возможности обеспечения автономного освещения различных единиц городской инфраструктуры от ВИЭ и анализу их преимуществ [4]. Много работ посвящено вопросам исследования надежности и эффективности систем уличного освещения, использующих в качестве источника питания ВИЭ [5], особенностям применения интеллектуальных систем управления для уличного освещения с интегрированными ресурсами солнечной энергии [6], использованию «умных систем» для решения задач энергосбережения при работе уличного освещения с ВИЭ [7], а также созданию систем солнечного светодиодного интеллектуального освещения, основанного на Интернете вещей и использовании суперконденсаторов [8].

Следует отметить, что при активном внедрении в эксплуатацию АОК на сегодняшний день анализа недостатков в работе функционирующих таких установок проведено не было, в то время как эти исследования дали бы возможность определить основные пути устранения выявленных недостатков и повышения эффективности работы исследуемых осветительных комплексов.

Цель работы. Целью проведенного исследования является выявление и анализ проблем функционирования АОК для автодорог Украины и разработка мероприятий по повышению эффективности их эксплуатации.

Анализ особенностей функционирования АОК для автодорог Украины. Для определения причин нестабильной работы АОК были проанализированы особенности проектирования, монтажа и эксплуатации таких объектов для автодорог Украины. Для этого на основе информации о принятых проектных решениях для АОК, эксплуатируемых на автодорогах Украины, представленной в [9], в соответствии с выбранными комплектами оборудования и уровнями инсоляции были определены сроки автономной работы исследуемых установок в соответствии с выражением:

$$t_{АОКр} = \frac{U_{AK} \cdot C_{AK} \cdot N \cdot K_{\Pi} \cdot K_{ГР} \cdot K_{ДЕ}}{P_H}, \quad (1)$$

где $t_{АОКр}$ – расчетное время работы АОК; U_{AK} – напряжение одной аккумуляторной батареи; C_{AK} –

минимальной инсоляцией, освещение пешеходных емкостей аккумулятора; N – количество аккумуляторных батарей; K_{Π} – КПД преобразователя; $K_{ГР}$ – коэффициент глубины разряда; $K_{ДЕ}$ – коэффициент доступной емкости, который зависит от режима разряда и температуры; P_H – мощность нагрузки.

Осветительный комплекс должен обеспечить автономную работу установки без подзарядки не менее трех суток в соответствии с нормативными документами при условии правильного выбора оборудования. Средняя продолжительность работы АОК в сутки в течение указанного периода определяется при этом по выражению:

$$t_{АОКсут} = \frac{t_{АОКр}}{N_{сут}}, \quad (2)$$

где $t_{АОКсут}$ – средняя продолжительность работы АОК в сутки; $N_{сут}$ – нормированное количество суток автономной работы АОК без подзарядки, которое согласно [10] составляет $N_{сут} = 3$ суток.

Для обеспечения требуемых условий безопасности на автомобильных дорогах в Харьковской области в соответствии с техническими требованиями и нормативами по освещенности было установлено по одному АОК с каждой стороны пешеходного перехода. Освещение было обеспечено с использованием светильников мощностью 29 Вт со световым потоком 3200 лм и рабочим напряжением 220-240 В. Объекты были построены и введены в эксплуатацию в октябре 2019 года.

Результаты расчета показали, что сроки автономной работы большинства АОК, смонтированных с использованием оборудования в соответствии с заявленными проектными решениями и представленными спецификациями, при условии полного заряда аккумуляторных батарей и температуре воздуха $+20^{\circ}\text{C}$ составляет $t_{АОКр} \leq 21,07$ ч. Средняя продолжительность работы в сутки в течение указанного периода для исследуемых АОК составляет $t_{АОКдоб} \leq 7$ ч.

Таким образом, в соответствии с расчетом, АОК заявленной комплектации могут обеспечивать автономную работу без подзарядки в течение трех суток, работая по 7 часов в сутки. Это действительно правильный комплект оборудования для летнего периода, поскольку продолжительность темного времени суток не превышает 7 часов. Однако такой комплект не способен обеспечить стабильную работу для зимнего периода, так как продолжительность ночного времени для него составляет более 10 часов, что показано на рис. 1 [11].

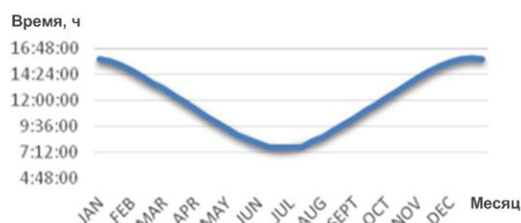


Рис. 1. Продолжительность темного времени суток для города Харьков (Украина)

Следует отметить также, что уровень инсоляции в Украине является минимальным в зимний период (рис. 2) [12], а температура воздуха при этом достаточно низкой. Эти природные факторы не позволяют заряжать аккумулятор до 100% емкости в зимний период, а холодная температура окружающей среды увеличивает уровень разряда.



Рис. 2. Уровень среднемесячной солнечной инсоляции для города Харьков (Украина)

При наблюдении за функционированием исследуемых АОК было замечено, что в зимний период при минимальной инсоляции светильники вообще не работают на всех объектах, в то время как мигающие светофоры продолжали работать. Освещение пешеходных переходов возобновлялось и работало в нормальном режиме в дни с ясной погодой.

Таким образом, проведенный анализ показал, что исследуемые АОК не способны сами себя обеспечить энергией в нужном объеме и нормально функционировать при низком уровне инсоляции и низкой температуре окружающей среды.

Разработка мероприятий для повышения эффективности функционирования АОК для автодорог. Для обеспечения требуемых условий безопасности пешеходов и водителей необходимо разработать мероприятия по устранению выявленных недостатков в работе исследуемых АОК для автодорог с целью повышения эффективности их работы.

Поскольку мощность источников питания недостаточна для нормальной работы исследуемых АОК, следует предусмотреть установку дополнительных источников энергии или вообще найти новое решение. Перечень предлагаемых вариантов повышения эффективности функционирования АОК для автодорог предполагает использование готовых технических решений, использующих современные средства и технологии: установка дополнительных солнечных

панелей; замена существующих солнечных панелей на более мощные; установка ветрогенератора с горизонтальной или вертикальной осью вращения; установка систем генерации энергии с электромеханическим преобразователем.

В качестве критерия для оценки достаточности разработанных мероприятий целесообразно использовать знак результирующей мощности АОК за расчетный период времени:

$$P_{рез} = \sum_{t=0}^T (P_{гент} - P_{нагрт}), \quad (3)$$

где $P_{гент}$ – мощность, вырабатываемая АОК в момент времени t ; $P_{нагрт}$ – мощность нагрузки осветительного комплекса в момент времени t ; T – длительность расчетного периода.

Положительный знак результирующей мощности АОК за расчетный период времени говорит о наличии остатка вырабатываемой мощности после покрытия необходимой нагрузки, что свидетельствует о достаточном объеме выработанной энергии для обеспечения надежной и стабильной работы исследуемой установки. Отрицательный же знак результирующей мощности за расчетный период времени указывает на наличие дефицита вырабатываемой мощности для покрытия необходимой нагрузки, что свидетельствует о недостаточном объеме выработанной энергии и приводит к нестабильной работе АОК.

Первый вариант предусматривает установку дополнительных солнечных панелей, поскольку существующая комплектация АОК не обеспечивает полный заряд аккумулятора. Расчеты показали, что для обеспечения стабильной работы исследуемого АОК требуется установка четырех солнечных панелей вместо двух предусмотренных или увеличение мощности одной панели с 175 Вт до 350 Вт. Однако это приведет к увеличению массы и парусности объекта, что требует проверки опоры на механическую прочность. Значение результирующей мощности АОК при его комплектации согласно заявленному проектному решению представлено на рис. 3, а после установки дополнительных солнечных панелей – на рис. 4.

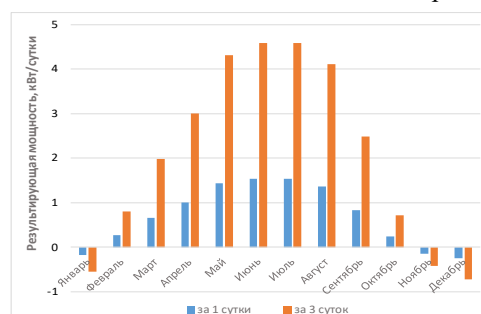


Рис. 3. Результирующая мощность АОК с комплектацией согласно заявленному проектному решению

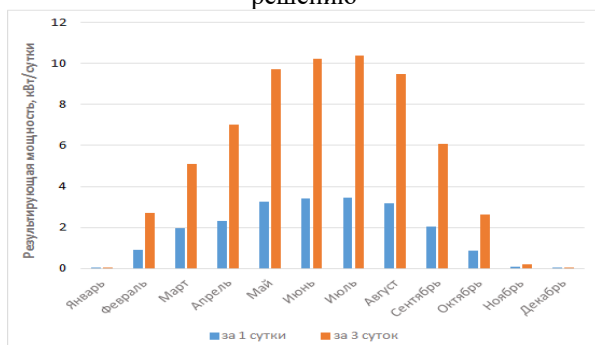


Рис. 4. Результирующая мощность АОК с дополнительными солнечными панелями

Для второго варианта предусматривается установка ветрогенератора с горизонтальной или вертикальной осью вращения на действующие АОК, в результате чего создается гибридная система генерации энергии, позволяющая увеличить установленную мощность для заряда аккумулятора. Такой источник возобновляемой энергии будет более уместным и эффективным в дни со слабой инсоляцией. Для определения наилучшего варианта комплектации АОК необходимо рассчитать оптимальную величину мощности и габариты ветрогенератора [13, 14]. Значение результирующей мощности АОК при установке ветрогенератора с горизонтальной осью вращения представлено на рис. 5, а при установке ветрогенератора с вертикальной осью вращения – на рис. 6.

Использование ветрогенератора с вертикальной осью для исследуемых АОК имеет меньшую эффективность, чем применение ветрогенератора с горизонтальной осью, однако его использование позволяет улучшить работу исследуемой системы. В то же время ветрогенераторы с вертикальной осью могут работать не только от прямого потока воздуха, но и от потока воздуха при движении транспортных средств, проезжающих мимо АОК.

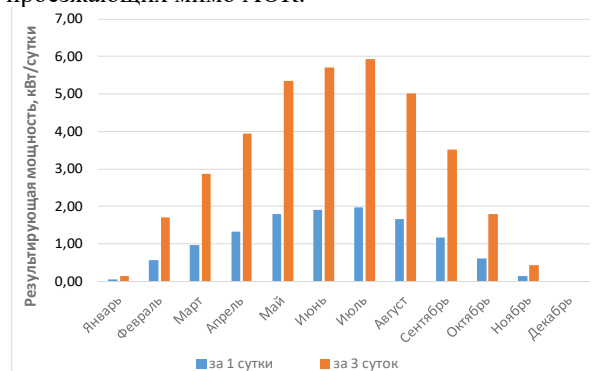


Рис. 5. Результирующая мощность АОК с солнечными панелями и ветрогенератором с горизонтальной осью вращения

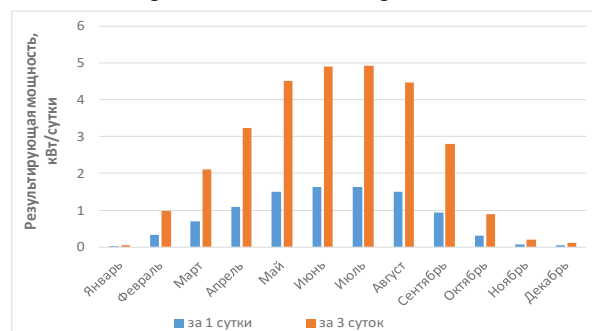


Рис. 6. Результирующая мощность АОК с солнечными панелями и ветрогенератором с вертикальной осью вращения

Еще одним мероприятием по повышению эффективности работы исследуемых АОК для автодорог является установка систем преобразования кинетической энергии проезжающего автотранспорта в электрическую. Такие системы набирают большую популярность во многих странах мира, обеспечивая электроэнергией много придорожных объектов [15]. Такая система генерации электрической энергии дополнительно повышает безопасность движения при установке у пешеходных переходов, заставляя транспортные средства снижать скорость по принципу «лежащего полицейского». Дополнительная установка электромеханического преобразователя для питания АОК пешеходного перехода обеспечит повышение эффективности его функционирования, о чем свидетельствуют результаты расчета, представленные на рис. 7.

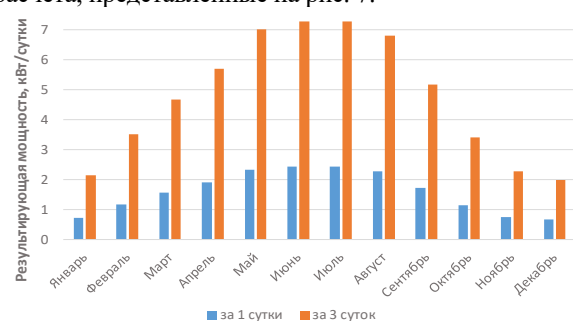


Рис. 7. Результирующая мощность АОК с солнечными панелями и электромеханическим преобразователем

Анализ результатов расчета по применению различных мероприятий по улучшению работы АОК для пешеходных переходов, представленных на рис. 3-7, показывает, что наиболее эффективным мероприятием обеспечения бесперебойной работы является применение системы генерации электрической энергии с электромеханическим

преобразователем. Однако следует отметить, что установка такой системы является очень дорогостоящим мероприятием по сравнению с установкой дополнительного ветрогенератора или солнечной панели.

Таким образом, предложенные мероприятия повышения эффективности работы АОК для автодорог Украины позволяют использовать готовые технические средства для решения исследуемой проблемы. Следует отметить, что стоимость рассматриваемых мероприятий значительно отличается между собой, что необходимо учитывать при обосновании выбора конкретного решения для практического применения.

Выводы. Анализ особенностей проектирования и эксплуатации АОК для автодорог Украины показал, что данные системы имеют недостатки в работе, связанные с нестабильностью работы при низкой температуре и невысоком уровне инсоляции. Причинами нестабильной работы АОК является недостаточная точность учета фактических климатических условий эксплуатации объектов при формировании проектных решений.

Для устранения данного недостатка для эксплуатируемых АОК необходима разработка и внедрение мероприятий по повышению эффективности их функционирования. Доказана недостаточность использования только солнечных панелей для питания АОК, расположенных в регионах с нестабильным уровнем инсоляции. Целесообразно применение гибридных систем питания АОК, в которых кроме солнечных панелей используются дополнительные источники питания (ветрогенераторы, системы с электромеханическими преобразователями и другие).

Обоснование выбора оптимального варианта мероприятий по повышению эффективности работы АОК для автодорог требует учета реальных технических и климатических условий эксплуатации комплексов, а также возможностей современных технических средств и стоимости всех их составляющих.

Литература

1. Єфименко Р.В., Попович Н.І., Беленчук О.В. Аналіз причин виникнення ДТП і розробка заходів із підвищення безпеки дорожнього руху / Науково-виробничий журнал, 2015, №6 (248), с. 34-35.
2. ДБН В.2.5-28: 2018 «Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення», Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2018.
3. Kumar N.M., Singh A.K., Kumar Reddy K.V. Fossil Fuel to Solar Power: A Sustainable Technical Design for Street Lighting in Fugar City, Nigeria / Department of Electrical & Electronics Engineering, Bharat Institute of Engineering & Technology, 2016, vol. 93, pp. 956-966.
4. Чумакевич В.О., Атаманюк В.В., Пулеко І.В., Дубовський А.М. Обґрунтування можливості освітлення парків в місцях постійної дислокації за допомогою сонячних батарей у Львівській області / Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного. 2015. Т. 13. №. 2. с. 102 – 105.
5. Fashina A.A., Azeko S.T., Asare J., Ani C.J., Anye V.C., Rwenyagila E., Dandogbessi B.S., Oladele O., Dyeris M. A study on the reliability and performance of solar powered street lighting systems / International Journal of Scientific World, 2017. Vol. 5(2). pp. 110-116.
6. Baburajan S., Osman A., AlZarooni F.A. Solar Powered LED Street Lighting System / IJSER, 2016, №. 1088967, pp. 1-8.
7. Fujii Y., Yoshiura N., Takita A., Ohta N. Smart street light system with energy saving function based on the sensor network / 4th International Conference on Future Energy Systems (e-Energy'13), Berkeley, California, United states. 2013. pp. 271-272.
8. Yang Z., Zhang X., Wang Ch. Solar LED Intelligent Lighting Systems Based on Internet of Things and New Energy Storage System / Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 687-691. pp. 3281-3284.
9. The Official Resource on Public Purchasing in Ukraine, ProZorro, 2020. [Online]. Available: <https://prozorro.gov.ua/tender/UA-2019-07-09-000721-b>.
10. ДСТУ EN 60598-1: 2017 «Світильники. Частина 1. Загальні вимоги та випробування» (EN 60598-1:2015; AC:2015; AC:2016; AC:2017, IDT; IEC 60598-1:2014, MOD; COR1:2015; COR2:2015; COR3:2017, IDT), Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019.
11. Ukrainian Hydrometeorological Center, "Current weather in Kharkiv", Information server, 2020. [Online]. Available: <https://meteo.gov.ua/en/34300/current/ukraine>.
12. National Aeronautics and Space Administration, "NASA Prediction of Worldwide Energy Resources", NASA POWER, 2020. [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/>.
13. Півняк Г.Г., Шкрабець Ф.П., Нойберггер Н., Циленков Д.В. Основи вітроенергетики: підручник, Дніпропетровськ: Національний гірничий університет. 2015. 335 с.
14. Fedak W., Anweiler S., Gancarski W., Ulbrich R. Determination of the number of vertical axis wind turbine blades based on power spectrum / International Conference Energy on Environment and Material Systems (EEMS 2017), Polanica-Zdrój, Poland. 2017. Vol. 19. pp. 1-6.

15. Del Castillo-García G., Blanco-Fernandez E., Pascual-Muñoz P., Castro-Fresno D. Energy harvesting from vehicular traffic over speed bumps: A review / Proceedings of Institution of Civil Engineers: Energy. 2018. Vol. 171. no.2, pp.58-69.

Литература (транслитерация)

1. Efimenko R.V., Popovich N.I., Belenchuk O.V. Analiz prichin viniknennyya DTP i rozrobka zahodiv iz pidvishchennyya bezpeki dorozhn'ogo ruhu / Naukovo-virobnichij zhurnal, 2015, №6 (248), s. 34-35.
2. DBN B.2.5-28: 2018 «Inzhenerne obladnannya budinkiv i sporud. Prirodne i shtuchne osvittlennya», Kyiv: Ministerstvo regional'nogo rozvitku, budivnictva ta zhitlovo-komunal'nogo gospodarstva Ukrainy, 2018.
3. Kumar N.M., Singh A.K., Kumar Reddy K.V. Fossil Fuel to Solar Power: A Sustainable Technical Design for Street Lighting in Fagar City, Nigeria / Department of Electrical & Electronics Engineering, Bharat Institute of Engineering & Technology, 2016, vol. 93, pp. 956-966.
4. CHumakevich V.O., Atamanyuk V.V., Puleko I.V., Dubovskij A.M. Obgruntuvannya mozhlivosti osvittlennya parkiv v misyach postynoyi dyslokatsiyi za dopomogoyu sonyachnih batorej u L'vivskij oblasti / Nacional'na akademiya suhoputnih vijs'k imeni get'mana Petra Sagajdachnogo, 2015, t. 13, №. 2, s. 102 – 105.
5. Fashina A.A., Azeko S.T., Asare J., Ani C.J., Anye V.C., Rwenyagila E., Dandogbessi B.S., Oladele O., Dyeris M. A study on the reliability and performance of solar powered street lighting systems / International Journal of Scientific World, 2017, vol. 5(2), pp. 110-116.
6. Baburajan S., Osman A., AlZarooni F.A. Solar Powered LED Street Lighting System / IJSER, 2016, №. I088967, pp. 1-8.
7. Fujii Y., Yoshiura N., Takita A., Ohta N. Smart street light system with energy saving function based on the sensor network / 4th International Conference on Future Energy Systems (e-Energy'13), Berkeley, California, United states, 2013, pp. 271-272.
8. Yang Z., Zhang X., Wang Ch. Solar LED Intelligent Lighting Systems Based on Internet of Things and New Energy Storage System / Applied Mechanics and Materials, 2014, vol. 687-691, pp. 3281-3284.
9. The Official Resource on Public Purchasing in Ukraine, ProZorro, 2020. [Online]. Available: <https://prozorro.gov.ua/tender/UA-2019-07-09-000721-b>.
10. DSTU EN 60598-1: 2017 «Svityl'nyky. Chastyna 1. Zahal'ni vymohy ta vyprovuvannya» (EN 60598-1:2015; AS:2015; AS:2016; AS:2017, IDT; IEC 60598-1:2014, MOD; COR1:2015; COR2:2015; COR3:2017, IDT), Kyiv: DP «UkrNDNTS», 2019.
11. Ukrainian Hydrometeorological Center, "Current weather in Kharkiv", Information server, 2020. [Online]. Available: <https://meteo.gov.ua/en/34300/current/ukraine>.
12. National Aeronautics and Space Administration, "NASA Prediction of Worldwide Energy Resources", NASA POWER, 2020. [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/>.
13. Pivnyak H.H., Shkrabets' F.P., Noyberher N., Tsyplenkov D.V. Osnovy vitroenerhetyky: pidruchnyk, Dnipropetrovs'k: Natsional'nyy hirnychyy universytet, 2015, 335 s.
14. Fedak W., Anweiler S., Gancarski W., Ulbrich R. Determination of the number of vertical axis wind turbine blades based on power spectrum / International Conference Energy on Environment and Material Systems (EEMS 2017), Polanica-Zdrój, Poland, 2017, vol. 19, pp. 1-6.
15. Del Castillo-García G., Blanco-Fernandez E., Pascual-Muñoz P., Castro-Fresno D. Energy harvesting from vehicular traffic over speed bumps: A review / Proceedings of Institution of Civil Engineers: Energy, 2018, vol. 171, no. 2, pp. 58-69.

Сведения об авторах

Оксана Довгалоук, к.т.н., доцент, профессор кафедры «Передача электрической энергии», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, Dovgalyuk_O@khpi.edu.ua

Роман Бондаренко, аспирант кафедры «Передача электрической энергии», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, elektrotehnika245@ukr.net

Иван Яковенко, аспирант кафедры «Передача электрической энергии», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, i.c.jakovenko@gmail.com

Roman Zaitsev, Mykhaylo Kirichenko, Liliia Zaitseva

Boost-up direct current converter for solar station

Summary. *In the article the circuit design solution of DC-DC regulated resonant converter has been proposed for using with hybrid photovoltaic modules which has cooling equipment and solar concentrators in order to maximize electric power generating by such module. By using computer simulation based on multiple iterations algorithm we significantly increase the accuracy of determining the resonance circuit optimal parameters for build up DC-DC converters to work in a wide range of electric powers. Based on optimal values of the resonance LLC scheme parameters, achieved by numerical calculation it can be show high values of electrical energy transformation efficiency for photovoltaic energy station equipped with high efficiency hybrid photovoltaic modules. Implementation of microprocessor-based control into design of DC-DC back-boost converters create a new possibility to build control algorithms for increase reliability and conversion efficiency, rapid and precision stabilization of maximum power point, implementation network monitoring of photovoltaic modules, converters itself and the whole photovoltaic station parameters.*

Keywords: *photovoltaic module, solar energy, buck-boost converter, circuit design, power take-off system.*

Introduction. Solving the problem of photovoltaic power plants economy competitiveness in comparison with energy produced by carbon-based sources is a prerequisite for solar energy using in growing scale.

In order to find the decision of this task, it has been developed the design of hybrid photovoltaic module (PVM) based on single-crystal silicon solar cells with a cooling equipment in order to maximize electric power generating by such module. Using the modules with a cooling equipment in a photovoltaic station design leads to below the solar cells (SC) operating temperature [1, 2] which allows to maximize the amount of electricity generated by station and also to increase solar cells lifetime, while equipped modules by solar radiation concentration systems, allows to achieve practically twice increase the power which produced by photovoltaic modules. Assembling of such photovoltaic modules on the tracker, a solar radiation monitoring device, will allow increase the electrical power produced by the photovoltaic station minimum on the 30%.

At the same time, development power take-off system on the base of classic elements for conversion direct current produced by a PVM into industrial frequency electricity leads to new problem. The most important component of the power take-off system is the DC-DC back-boost converter, needed to increase the amplitude of produced by the PVM voltage for ensure their minimal losses during transmission and conversion [3,4]. Since the electrical power produced by the PVM depends from the solar power daytime change, the optimization of DC-DC converter and the power take-off system design solutions should be carried out taking into account the entire range of converted electrical power. The basic principles of schematic design choice when creating an optimized DC-DC converter with the function of maximum PVM power take-off are to achieve the highest conversion efficiency, ensuring a long operational time and economic ratio of the technical characteristics to the components cost, taking into account a wide range of operating temperatures [5].

Finding out the optimal design of all parts which compose the system to transform energy from PVM into

industrial frequency electrical energy should maximize photovoltaic power plants efficiency and give the possibility to reach their competitiveness onto world market by complex of energy and economic parameters.

Based on the above mentioned main schematic design principles, it was analyzed and selected schematic designs for DC-DC converter, which will allow to optimize its technical characteristics and increase efficiency [6-8]. The buck boost pulse DC converter is a series connection of the step-down and step-up converters. It is possible to use a common throttle and filter capacitors. In order to increase the efficiency in the buck-boost converter, a bridge circuit with synchronous rectification is often used [9]. The efficiency of the up and down pulse converters takes the maximum value (more than 99%) when the input voltage is equal to the output. Thus, for the step-down converter the efficiency in our case [2] will be maximal at an input voltage of 23 V, and for the step-up converter at an input voltage of 42 V (the minimum and maximum voltage corresponds to the PVM maximum power point take-off [2]). The greater the difference between the input and output voltage, the lower the efficiency. Using step-down converter will be maximally effective at the highest and a step-down converter at the lowest ambient temperature. The serial connection of the step-up and step-down converters allows you to select an input voltage level at which the converter efficiency is greater than 99%, for example a rated input voltage is about 30 V. In this case, the efficiency at the edge of the converter input voltage range will be smaller, but the high efficiency values range will expand. Another advantage is the maximum ripple current in the throttle when using the topology of buck boost pulse DC converter described in [10,11], which allows to using throttle with a smaller overall size [9].

Choice of schematic design solution. An example of efficiency dependence for up-, down- pulse controller and buck boost pulse DC converters is shown on Figure 1, and the topology of buck boost pulse DC converter is shown on Figure 2.

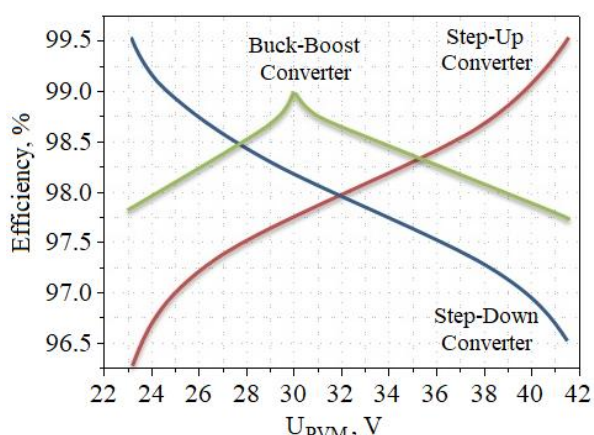


Fig. 1. The dependence of the converter efficiency from input voltage

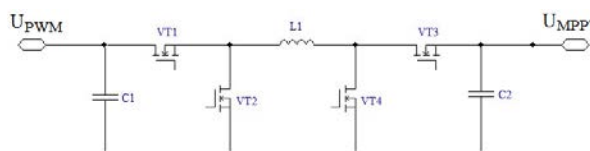


Fig. 2. Basic topology of buck boost pulse DC converter

The buck boost pulse DC converter is built using only one inductor and a set of VT1 - VT4 transistors for up and down stages. In this case, to efficiency increase and reduce the load on the passive components in each of operating modes, we need use only its own cascade; the second must be disabled. This is achieved by using 100% duty cycle for VT1 transistor (VT2 off) while using the step-up cascade, and 100% duty cycle for VT3 transistor (VT4 off) when the step-down cascade is active. The buck boost pulse DC converter topology can also be designed by multiphase [12]. The variant of topology, presented on the Figure 2, is the most optimal for PVM maximum power take-off function implementation without galvanic isolation of the input and output circuits.

Taking into account the implementation of galvanic isolation, the most optimal solution [13, 14] is the bridge resonance converter topology (BRC), which is shown on Figure 3. Typically, most of modern resonant converters have resonant LLC link structure (serial connection of two inductors and capacitance) [15] and working in zero-voltage switching mode [16, 17] (when used as MOSFET transistors). One of the inductors is represented by the throttle L1, the other by the throttle L2. In practice, the throttle L1 is the sum of transformer TR1 and external throttle (may be absent) inductances and the throttle L2 is the inductance of the transformer TR1 magnetization. Resonant capacitance is represented by capacitor C1. Transistor conductivity losses are proportional to the transformer primary current square, so, despite the larger transistors number in the BRC topology, the transistor conductivity losses are two times lower: the total resistance of the transistor open channel is twice as large

and the primary transformer current square is four times less in the BRC topology. At the input voltage from 23 V to 42 V and input power up to 300 W, the most perspective between topologies still BRC. However, in case of multiphase mode implementation, this choice is not so obvious. One from BRC drawback's is the lack of specialized circuits (PWM controllers) for transistor control, but this is not a disadvantage when implementing digital control system. Significant reactive current in a low-load resonant converter is also not a disadvantage in the unregulated resonant converter design, but in the regulated one is a significant obstacle [18]. Thus, when choosing between a non-resonant and a resonant converter for systems with an input voltage from 23 V to 42 V and a maximum power up 300 W, we should consider the necessity of converter transmission ratio tuning.

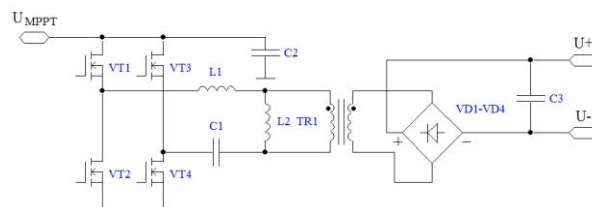


Fig. 3. Basic topology of bridge resonant LLC converter

The implementation of maximum power take-off function is usually due to using two-phase two-transistor backflow converter (TTBC) or adjustable resonant LLC converter [19]. The TTBC variant topology is shown on Figure 4. This topology of a single-stroke converter is interesting because it has a higher efficiency than the classical backflow converter due to transformer inductance energy recuperation [20]. Multiphase variant of this topology eliminates another negative property of backflow inverters - the high value of output pulsations. The TTBC topology unambiguously loses by efficiency to the resonant LLC converter, but provides a better implementation of PVM maximum power take-off algorithm due to the almost complete absence of load parameters (600 V -700 V DC inverter) influence on converter's input parameters. That is, the output DC power supply does not affect the PVM maximum power tracking mode. This feature applies to all backflow converters. Another advantage of this topology is the ability to work on to the short circuited output without high-speed protective circuits using due to unused energy recuperation back into the input circuit [19]. The disadvantages of this topology include the number of phases to reduce the output pulsations and rejection from electrolytic capacitors using, the presence of upper arm transistors control circuit (drivers), as well as the transformers overall dimensions and cost.

In addition, using of adjustable resonant LLC converter allows to obtain higher efficiency values (Figure 5) [21], the disadvantages of controlled conversion include a narrow regulation range and low efficiency at low load when implementing a wider regulation range.

However, single cascade using, in comparison with the multi-cascade TTBC scheme, reduces the number of elements and the cost of the converter [22]. At in-series TTBC cascades connection, the total efficiency will be equal to each cascade efficiency product, which means that converter efficiency will be lesser than each of its cascade's efficiency.

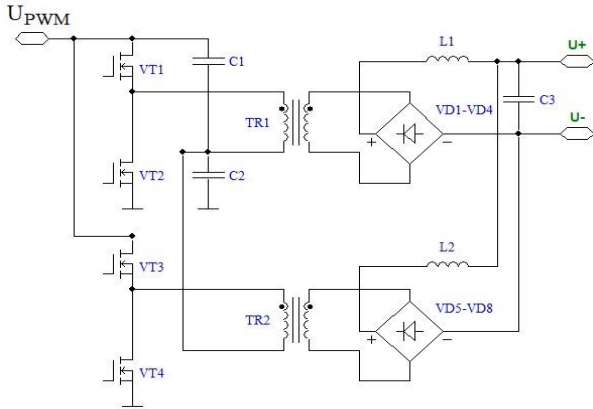


Fig. 4. Basic topology of a two-phase two-transistor backflow converter

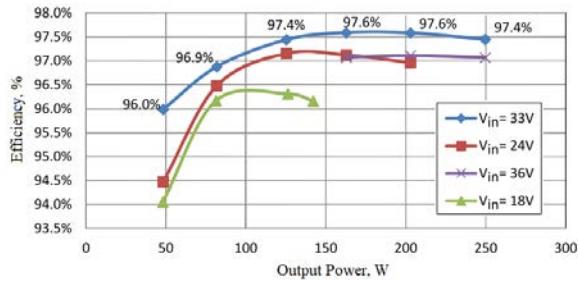


Fig. 5. The dependence of bridge resonant LLC converter efficiency from output power at different input voltages

Thus, the best circuit design for single-stage converter with the PVM maximum power take-off function and galvanic isolation, in terms of efficiency in a wide input parameters range to the components cost ratio, provides the using of bridge resonant LLC converter topology. However, this topology is most demanding for the correct choice of resonance link parameters and converter operating modes [23].

The proposed scheme design ensures the maximally effective converter operation in wide diapason of operating parameters, and also easy of transistors control system realization, including possibility of specialized integrated circuits using. The high efficiency value minimizes the difficulty with converter cooling. For housing, it is easy to use standard sealed solution from aluminum alloy. Converter operation parameters - maximal values of input power and voltage, was chosen in order to corresponds to single PVM parameters, which allow to using significantly cheap transistors and

electronic components of common design, and minimize power components heating.

DC-DC back-boost scheme design and parameters calculation.

Coefficient of conversion for tunable scheme of bridge converter:

$$G = K \cdot n, \quad (1)$$

where K is the coefficient of conversion for resonance LLC scheme; n is ratio of turns number in secondary and primary windings of the TR1 transformer [24].

Because resonance converter reaches maximum of their efficiency at $K = 1$, we can obtain n in terms of maximization converter efficiency at their standart operation regime:

$$n = \frac{U_{in, nom}}{U_{out, nom}} = \frac{30}{630} = \frac{1}{21}, \quad (2)$$

In this $U_{in, nom}$ is the nominal voltage value which goes into the converter; $U_{out, nom}$ is the nominal voltage value which goes out from the converter.

Coefficient of conversion for resonance LLC scheme will reach their maximum K_{max} in case minimum of input voltage ($U_{in, min}$) and maximum of output ($U_{out, max}$), so the minimum of K_{min} we will have in case of inverse situation with values of working parameters:

$$K_{max} = n \cdot \frac{U_{out, max}}{U_{in, min}} = \frac{1}{21} \cdot \frac{700}{23} \approx 1,45; \quad (3)$$

$$K_{min} = n \cdot \frac{U_{out, min}}{U_{in, max}} = \frac{1}{21} \cdot \frac{600}{42} \approx 0,68. \quad (4)$$

In order to obtain the main resonance LLC scheme parameters, we build up the equivalent scheme of our resonance scheme [24, 25]. Coefficient of conversion for such equivalent scheme, can be calculated as follows:

$$K = \left| \frac{U_{in}}{U_{out}} \right| = \frac{F_x^2 (m-1)}{\sqrt{(mF_x^2 - 1) + F_x^2 (F_x^2 - 1)^2 (m-1)^2 Q^2}}, \quad (5)$$

In this $Q = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}}{R_{ac}}$ is the quality factor;

$R_{ac} = \frac{8}{\pi^2} n^{-2} \frac{U_{out}}{I_{out}}$ is value of resistor which serves as a

load; U_{in} is voltage value which goes into the converter; U_{out} is voltage value which goes out from the converter;

I_{out} is current on the output converter contacts; $F_x = \frac{f_s}{f_r}$ is

transistors switching frequency (normalized); f_s – is transistors in converter switching frequency;

$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$ is scheme resonance frequency; L_r is

resonance inductance; C_r is resonance capacitance;

$m = \frac{L_r + L_m}{L_r}$ is ratio of the total inductance on the circuit

input to the resonance inductance; L_m is transformer magnetization inductance.

Minimal value of resistor which serves as a load $R_{ac.min}$ we will have with minimal voltage value which goes out from the converter and maximal power ($P_{in.max}$) produced by converter and also when converter efficiency will reach their maximal value up to 98%:

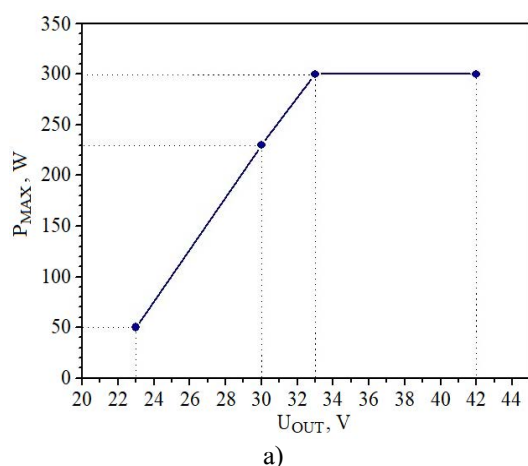
$$R_{ac.min} = \frac{8}{\pi^2} n^2 \frac{U_{out.min}^2}{P_{in.max} \cdot \eta} = \frac{8}{3.14^2} \cdot 0.047619^2 \cdot \frac{600^2}{300 \cdot 0.98} \approx 2.25 \Omega \quad (6)$$

Carried out the correct calculations of the resonance scheme parameters will lead us to optimal converter parameters. For this calculation we use the new algorithm which by the numerous iterations give us the possibility to precision calculate the LLC resonance scheme working parameters [25]. On the base of combination, the preliminary calculation which completed by computer simulation was implemented the possibility to give precision calculation results and minimize the time for such type calculations.

Maximal value of voltage which goes into the converter corresponds to module maximum heating at power of illumination 200 W/m^2 , in this case minimum of power onto converter input ($P_{in.min}$) does not exceed:

$$P_{in.min}(23V) \leq 23V \cdot I_{in.nom} \cdot \frac{200 \text{ W/m}^2}{1000} = 37.6 \text{ W} \quad (8)$$

Based on the wide range of operation parameters in DC-DC back-boost converter design, the feature of resonant converter tuning also the dependence of efficiency from LLC circuit parameters, we can define the influence of voltage which goes into the converter on the values of maximum electrical power generated by converter which give the possibility to predict the maximal value of converter efficiency and choose the most effective type of connection to solar module. The specified dependence of the maximal electric power from voltage which goes into the converter has shown on Figure 6, a.



a)

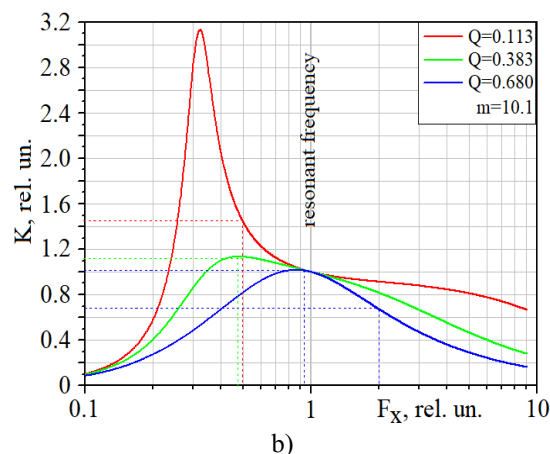


Fig. 6. The dependence of DC-DC converter maximum output power from input voltage (a) and the dependence of LLC circuit transmission coefficient from normalized frequency at given figure of quality values (b)

From [26] well known that for maximal value of output current we should have the maximal Q. In the other hand the output current maximal values correspond to minimal voltage which goes out from the converter and maximum electric power, generated by converter. The calculated value of resistor which serves as a load $R_{ac.min} = 2.25 \Omega$ matches to maximal value of Q for LLC scheme, and the maximal coefficient of conversion for resonance scheme $K_{max} = 1.45$ needs to input electric power value up to 50 W and voltage which goes out from the converter up to 700 V. Based on the formulae for R_{ac} , the minimum of resistor which serves as a load value $R_{ac.min}$ can be calculated in case of voltage which goes into the converter reaches up to 23 V:

$$R_{ac.min}(23V) = \frac{8}{3.14^2} \cdot 0.047619^2 \cdot \frac{600^2}{50 \cdot 0.98} \approx 13.5 \Omega \quad (8)$$

Using the above mentioned algorithm we build diagram and calculate values of resonance scheme parameters for 100 kHz resonance frequency which shown on Figure 6, b and presented in Table 1.

Table 1

U_{in}, V	P_{in}, W	K_{max}	K	$R_{ac,max}, \Omega$	Q_{max}	F_x
23	50	1,45	3,13	13,5	0,113	0,33
30	230	1,11	1,134	3,995*	0,383*	0,48*
33	300	1,01	1,026	2,25	0,68	0,86
42	300	0,79	1,026	2,25	0,68	0,972

*Presented $R_{ac.min}$ matches to maximal voltage which goes out from the converter and K_{max} .

Taking into account the resonance capacitance of $0.94 \mu\text{F}$ at 110.7 kHz frequency we calculate the resonance inductance - $L_r = 2.2 \mu\text{H}$ and having $m = 10.1$ calculate the transformer magnetization inductance - $L_m = 20 \mu\text{H}$.

DC-DC converter making. The functional and principal electric scheme of the DC-DC converter shows

on Figure 7. Voltage from PVM goes to the converter input and digital microcontroller MC installed to optimize the parameters of converter and for control of transistors switching. The signal from MC goes to VT1 – VT4 transistors gates through Dr.1 – Dr.4 drivers. According to bridge scheme we have a simultaneous transistor switching on every bridge part. Microcontroller and driver powering up by specialized DC converter which ensure stabilizing and stepping-down of input voltage. Using of microcontroller ensures the continuous monitoring of current, generated by module by means of shunt resistance R3 and amplifier, and voltage outgoing from module by using divided scheme based on R1 – R2 resistors. At their G1 and G2 pins the microcontroller generate two impulses which are counter-phases and need to set up the frequency of transistors switching and establish the delay («dead») time for bridge diagonals switching [27]. Midpoint value of voltage on VT1 - VT2 transistors half-bridge using for implementing adaptive «dead» time principle needed to ensure maximal values of converter efficiency, goes on to microcontroller comparator pins from divided scheme based on R4 - R5 resistors. The VD1 rectifier connects with N3 winding of transformer connected in order to control the nominal voltage value which goes out from the converter and also it using in algorithmic detection of resonance LLC scheme operating mode to prevent changing their current flow regime into the capacitive. The necessity of such resonance scheme operating regimes control is valuable at converter start and in case of fast changes of voltage value which goes out from the converter – a DC network 600 –700 V.

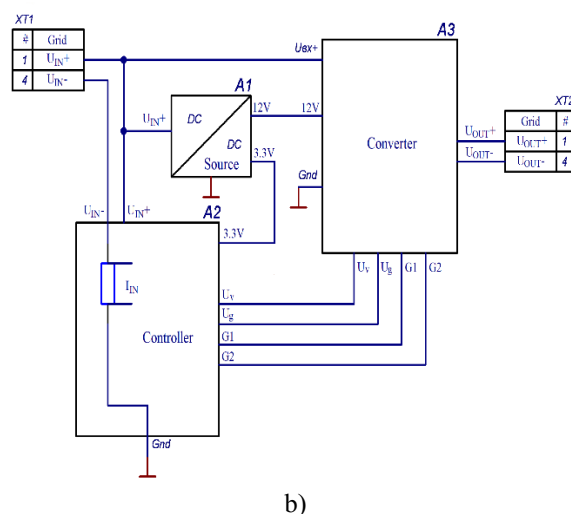
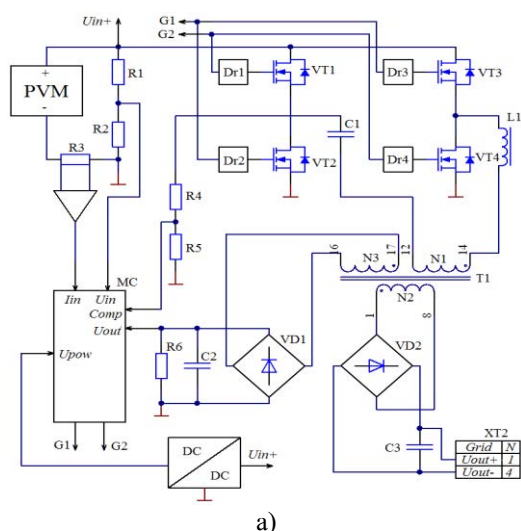
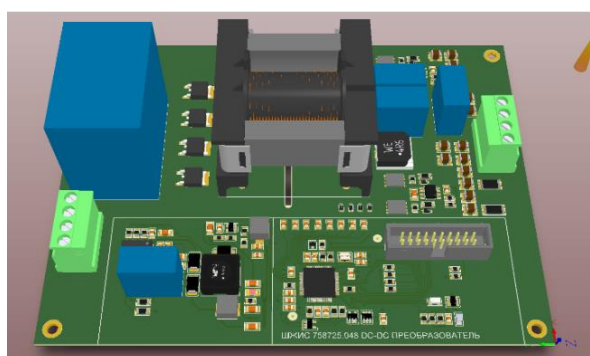


Fig. 7. Functional electric (a) and principal electric (b) circuit of the DC-DC converter

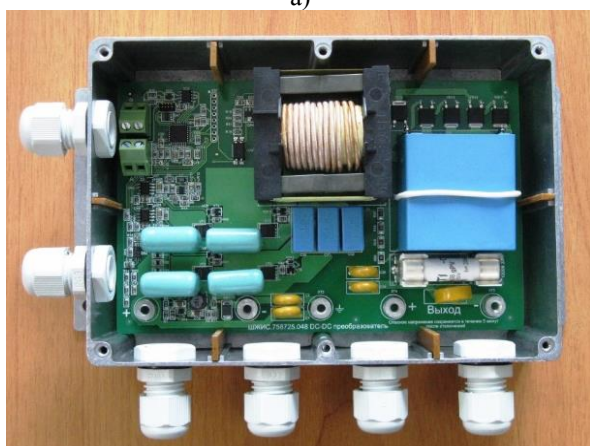
The resonance LLC scheme consists from choke, capacitor and a transformer - L1, C1, T1, respectively. The resonance inductance combines from L1 inductance and T1 scattering inductance. Voltage from transformer output needs to be rectifying by scheme on the base of VD2 diode C3 capacitor. After rectifier the DC voltage goes directly on to converter.

Hybrid module maximum power point searching and tracking ensured on the base of perturbation and Observation (P&O) algorithm by microcontroller [28, 29]. For implementing this algorithm, the microcontroller firstly calculates the PVM output power, and at second act it makes a small change of converter input resistance through the variation of transistors switching frequency, as a result the voltage on the converter input also changes, and MC carry out the power calculation - if it increases – the MC will continue to changing input voltage in established direction up to the moment when power began to decrease. Using of microcontroller allow to implement a P&O algorithm for searching and tracking the PVM maximum power point, and also to realize adaptive «dead» time, and continuous monitoring in order to finding the capacitive nature of the bridge load. Also implementing microcontroller in converter design will allow integrate it into monitoring network by using cable or wireless connection, like RS-485 or ZigBee protocols, in order to continuous monitoring of modules parameters, ensuring information about the failure, etc [30].

Figure 8 shows the DC-DC converter based on proposed schematic design for direct installation on photovoltaic modules, which allow to maximize the efficiency of electricity generation from solar irradiation.



a)



b)

Fig. 8. Circuit board 3D model (a) and manufactured (b) DC-DC converter

Conclusion. Presented design of regulated resonance converter represents a perspective scheme solution that will allow to obtain maximized efficiency electric energy generation a photovoltaic energy station equipped by hybrid photoenergy modules on the silicon solar cells base. Using the resonance transformation solution make easier the solving of finding out the best combination of back-boost converter parameters which based on resonance scheme in a wide range of input and output electric power. The application of computer simulation based on numerous iterations algorithm allow to establish the optimum resonance LLC scheme parameters values. Using of microcontroller allow to implement an effective algorithm for searching and tracking the hybrid modules maximum power point, and also to realize adaptive «dead» time, and continuous monitoring in order to finding the capacitive nature of the bridge load. Also implementing microcontroller in converter design will allow integrate it into monitoring network by using cable or wireless connection, like RS-485 or ZigBee protocols, in order to continuous monitoring of modules parameters and ensuring information about the failure.

References

1. M. Ghadiri, *et al.*, "Experimental investigation of a PVT system performance using nano ferrofluids", *Energy Conversion and Management*, vol. 103, pp. 468-476, 2015.
2. R.V. Zaitsev, *et al.*, "Hybrid solar generating module development for high-efficiency solar energy station", *Journal of nano- and electronic physics*, vol. 10, no. 6, pp. 06017, 2018.
3. C. Hamilton, *et al.*, "System architecture of a modular direct-DC PV charging station for plug-in electric vehicles", *36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2516-2520, November 2010.
4. R. Martánez, *et al.*, "Fractional DC/DC converter in solar-powered electrical generation systems", *2009 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*, pp. 1-6, September 2009.
5. R.V. Zaitsev, *et al.*, "Development of hybrid solar generating module for high-efficiency solar energy station", *First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering*, Kiyv, Ukraine, pp. 360-364, June 2017.
6. S.N. Singh, *et al.*, "Selection of non-isolated DC-DC converters for solar photovoltaic system", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 1230-1247, 2017.
7. N.H. Baharudin, *et al.*, "Topologies of DC-DC converter in solar PV applications", *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol.8, no. 2, pp. 368-374, 2017.
8. J. A. N. D. Ang, *et al.*, "Development of a DC-DC converter with Current Mode Control for multi-source renewable energy harvesting system", *2016 IEEE region 10 conference*, pp. 556-559, November 2016.
9. T.K. Mohapatra, *et al.*, "A novel non-isolated positive output voltage buck-boost converter", *World Journal of Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 201-211, 2019.
10. R. Tirumala, *et al.*, U.S. Patent No. 10,560,013, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
11. L. Callegaro, *et al.*, "A simple smooth transition technique for the noninverting buck-boost converter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 6, pp. 4906-4915, 2017.
12. S. Siouane, *et al.*, "Open-switch fault-tolerant operation of a two-stage buck/buck-boost converter with redundant synchronous switch for PV systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 5, pp. 3938-3947, 2018.
13. D. Vinnikov, *et al.*, "Comparison of performance of phase-shift and asymmetrical Pulsewidth modulation techniques for the novel galvanically isolated buck-boost DC-DC converter for photovoltaic applications", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 2, pp. 624-637, 2016.
14. L. Jun-Young, *et al.*, "An Isolated DC/DC Converter Using High-Frequency Unregulated Resonant Converter for Fuel Cell Applications", *IEEE*

- Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 7, pp. 2926-2934, 2011.
15. K. Jin, *et al.*, "Hybrid full-bridge three-level LLC resonant converter-A novel DC-DC converter suitable for fuel-cell power system", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1492-1503, 2006.
 16. H.S. Choi, *et al.*, "Design consideration of half-bridge LLC resonant converter", *Journal of Power Electronics*, vol. 7, no. 1, pp. 13-20, 2007.
 17. E.S. Glitz, *et al.*, "LLC converters: Beyond datasheets for MOSFET power loss estimation", *2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 464-468, March 2018.
 18. B. Yang, *et al.*, "LLC resonant converter for front end DC/DC conversion", *Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, vol. 2, pp. 1108-1112, March 2002.
 19. J.M. Kwon, *et al.*, "Three-phase photovoltaic system with three-level boosting MPPT control", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 5, pp. 2319-2327, 2008.
 20. K. Kumar, *et al.*, "Analysis of high voltage-gain hybrid DC-DC power converter with RBFN based MPPT for renewable photovoltaic applications", *2017 IEEE Conference on Energy Conversion*, pp. 294-299, October 2017.
 21. S. Tian, *et al.*, "Equivalent circuit modeling of LLC resonant converter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Early Access, 2020.
 22. H. Wang, *et al.*, "A PWM LLC type resonant converter adapted to wide output range in PEV charging applications", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 5, pp. 3791-3801, 2017.
 23. J. Ma, *et al.*, "Investigation on optimal parameter selection for LLC half-bridge resonant converter based on FHA", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 26, no. 2, pp. 895-905, 2018.
 24. C. Cecati, *et al.*, "DC nanogrid for renewable sources with modular DC/DC LLC converter building block", *IET Power Electronics*, vol. 10, no. 5, pp. 536-544, 2016.
 25. X. He, *et al.*, "Resonance Parameter of Variable Mode LLC Converter for Auxiliary Converter", *2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia*, pp. 1-6, May 2019.
 26. P. Han, *et al.*, "Research on High Efficiency LLC DC-DC Converter Based on SiC MosFet", *2018 International Power Electronics Conference*, pp. 2714-2717, May 2018.
 27. M.G. Khrypunov, *et al.*, "Amplitude-time Characteristics of Switching in Thin Films of Cadmium Telluride", *Journal of nano- and electronic physics*, vol. 10, no. 1, pp. 01016, 2018.
 28. P.C. Pasc, *et al.*, "SCADA system for solar MPPT controller monitoring", *Procedia Technology*, vol. 22, pp. 803-807, 2016.
 29. R.V. Zaitsev, *et al.*, "Hybrid Solar Generating Module", *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering*, pp. 112-115, October 2017.
 30. L. Yan, *et al.*, "Monitoring and fault diagnosis system of wind-solar hybrid power station based on ZigBee and BP neural network", *Australian Journal of Mechanical Engineering*, vol. 16, pp. 54-60, 2018.

About the Authors

Roman Zaitsev, Doctor of Science, Head of Materials for Electronics and Solar Cells Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, roman.zaitsev@khpi.edu.ua
Mykhailo Kirichenko, PhD, Senior Researcher of Materials for Electronics and Solar Cells Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, mykhailo.kirichenko@khpi.edu.ua
Liliia Zaitseva, PhD, Associate Professor of Natural Science Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, liliia.zaitseva@khpi.edu.ua

Ксения Минакова, Роман Зайцев

Оптимизация базовой модели солнечного коллектора для комбинированных фотоэнергетических систем

Аннотация: В статье предложена основа общей модели теплового обмена солнечного коллектора и рассмотрены наиболее важные параметры для процессов теплоотдачи, таких как коэффициент тепловой конвекции воды, скорость и мощности потока воды, которые в основном определяются параметрами системы и скоростью потока жидкости, а также основываются на экспериментальных исследованиях таких систем. В рассматриваемой модели предлагается учитывать турбулентацию потока жидкости, а также выбрать наиболее эффективный режим движения жидкости, а, следовательно, и скорость потока жидкости для переноса тепла. Определены наиболее оптимальные значения градиента температур на основе аналитики скорости потока жидкости и величины отбираемой мощности.

Ключевые слова: солнечный коллектор, отводимая мощность, скорость потока воды, градиент температур, теплообмен.

Kseniia Minakova, Roman Zaitsev

Optimization the Solar Collector Base Model for PVT System

Summary. The paper proposes a framework of general model of the thermal exchange of the solar collector and review the most important parameters for the heat-transfer processes, such as the coefficient of thermal convection of the water, the water flow rate and water flow power, which mainly are determined by system parameters and fluid flow rates, and based on experimental studies systems. In the model under consideration, it is proposed to take into account that turbulence of the fluid flow, as well as to choose the most effective mode of fluid motion, and, consequently, the fluid flow rate for heat transfer. It identified the optimum values of the temperature gradient based on analytics of fluid flow rate and magnitude of power withdrawn.

Keywords: solar collector, PVT system, power withdrawn, water flow rate, temperature gradient, heat transfer.

Введение. Генерирование тепловой энергии из солнечной вызывает большой интерес среди исследователей. Электрическая эффективность η солнечных элементов низкая, поэтому большая часть падающего солнечного света теряется в виде тепла. Температура солнечного элемента увеличивается из-за этого тепла, что приводит к снижению η фотоэлектрической системы [1]. Следовательно, отвод тепловой энергии, возникающей и связанной с солнечным элементом, является необходимым для достижения максимальной эффективности. Создание комбинированных фотоэнергетических систем (КФС), которые преобразует падающее излучение в электричество и тепло одновременно, набирает популярность [2,3]. Охлаждая поверхность солнечной батареи с помощью воды в качестве охлаждающей жидкости, систему можно значительно улучшить [4]:

$$\eta = \eta_0 [1 - \beta_0 (T_c - T_0)] \quad (1)$$

где η_0 – эффективность солнечных батарей при стандартных условиях; β_0 – температурный коэффициент эффективности (1/K); T_c и T_0 – температуры солнечного элемента (K) и охлаждающей жидкости (K), соответственно.

Охлаждающая жидкость в КФС далее используется для нагрева воды во вторичном контуре и дальнейшего ее использования в бытовых нуждах [5]. Современное человечество привыкло к наличию в

быту горячей воды, а КФС с охлаждением удовлетворяет потребность в электричестве и горячей воде одновременно.

Однако отсутствие хорошей согласованной модели является препятствием при широко-масштабной оптимизации таких систем. А создание такой обобщенной модели для учета всех необходимых параметров является актуальной задачей и на сегодняшний день.

Например, ранее в [6] были предприняты усилия в создании модели при адсорбционном охлаждении: применены инновационные адсорбирующие материалы и тепловые трубки, улучшена удельная мощность отбора тепла и достигнута эффективность равная 0,39. Численное же моделирование и оптимизация, проведенные в [7] позволили получить типичные значения для эффективности около 0,15, что не соответствовало экспериментальным результатам. Также проводились экспериментальные исследования двухступенчатых систем [8], различные разные циклы (например, непрерывное восстановление тепла, восстановление массы, тепловая волна, каскадный эффект), в [9] для таких систем рассчитали значение эффективности близкое к 0,5.

Дальнейшие исследования, как и предыдущие, рассматривали разрозненные экспериментальные результаты и описывали их в виде частных

физических моделей, не работающих в общем случае [10–12]. Поэтому целью данной работы было предложить основу общей модели теплового обмена солнечного коллектора, позволяющую в дальнейшем учитывать все необходимые параметры, включая параметры для разработки комбинированных систем.

Базовая модель теплообмена коллектора.

Уравнения Навье–Стокса являются основными для рассматриваемых процессов и описывают течение жидкости для различных вариаций и систем. Второй закон Ньютона описывает изменение скорости объекта при приложении силы. Уравнения Навье–Стокса эквивалентны закону Ньютона, когда многие объекты, такие как микроскопические частицы в воздухе или воде, рассматриваются как группа, то есть независимо друг от друга. Океанские течения, движение дыма, динамика ураганов или погодных условий, поток воздуха/жидкости при срабатывании детонирующего устройства, отвод тепла потоком воздуха/жидкости от нагретого объекта и многие другие интересные явления – все это примеры ситуаций, когда уравнения Навье–Стокса может быть применимо. Запишем уравнения энергии и уравнения Навье–Стокса в общем виде для рассматриваемой системы [13,14]:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u c_p T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v c_p T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w c_p T)}{\partial z} = \nabla(k \nabla T) \\ \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = \nabla(\mu \nabla u) - \frac{\partial P}{\partial x} \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = \nabla(\mu \nabla v) - \frac{\partial P}{\partial y} \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = \nabla(\mu \nabla w) - \frac{\partial P}{\partial z} - \rho g \end{cases} \quad (2),$$

где ρ – плотности жидкости (кг/м³); c_p – удельная теплоемкость (Дж/кг·К); T – температура (К); u, v, w – скорости (м/с); x, y, z – координаты (м); k – коэффициент теплопроводности, (Дж/м·К); P – давление, (Па).

Важными параметрами для процессов теплоотдачи являются коэффициент тепловой конвекции h_w воды и мощности потока воды N_{flow} , которые в основном определяются параметрами системы и скоростью потока жидкости. Формулы расчета h_w и N_{flow} следующие [15]:

$$\begin{aligned} h_w &= k_w Nu / D_h \\ N_{flow} &= f \cdot D_h \cdot l \cdot \frac{u_w^2}{2} \cdot \rho_w \cdot u_w \cdot n \end{aligned} \quad (3)$$

где $k_w = 0,599 \frac{Bm}{m \cdot K}$ – теплопроводность воды; Nu – число Нуссельта; $D_h = 10^{-2} m$ – диаметр трубы (м); f – коэффициент вязкого трения; $l=2m$ – длина трубы;

$\rho_w = 998,2 \frac{kg}{m^3}$ – плотность воды; u_w – скорость потока воды (м/с); $n = 8$ – количество труб в системе.

Так как в рассматриваемой системе внутренний диаметр трубы $D_h \geq 10^{-3} m$ – размеры системы можно рассматривать как макроскопические каналы, значения Nu и f можно найти, используя классические соотношения конвективного теплообмена в трубе [16,17].

$$\begin{cases} \text{Ламинарный поток, } Re \leq 2300: \\ Nu = 4,364, f = 64 / Re \\ \text{Переходный поток, } 2300 \leq Re \leq 10000, \\ \text{Турбулентный поток, } Re \geq 10000: \\ Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}, f = [1,14 + 2 \log(D_h / R_q)]^{-2} \end{cases} \quad (4)$$

где $Re = u_w D_h / \mu_w$ – число Рейнольдса;

$Pr = \mu_w / \alpha_w \approx 7$ – число Прандтля;

$\mu_w = 1,006 \cdot 10^{-6} m^2 / c$ – кинематическая вязкость воды;

$\alpha_w = 0,151 \cdot 10^{-6} m^2 / c$ – коэффициент

температуропроводности воды [18, 19];

$R_q = 3 \cdot 10^{-6} m$ – среднеквадратичный коэффициент шероховатости поверхности.

При малой скорости потока жидкости в трубе (число Рейнольдса $Re \leq 2300$) – режим движения жидкости ламинарный, а при высокой скорости ($Re \geq 10000$) – турбулентный. В диапазоне от $2300 \leq Re \leq 10000$ режим переходный от ламинарного к турбулентному [17]. Во всех случаях, даже когда поток в трубе турбулентный, в узком пристенном слое течение ламинарное.

В предложенной модели предлагается учитывать, что сильная турбулентизация всего потока, которая возникает уже и переходном режиме, обеспечивает хороший теплоперенос в пристенной зоне, а также отсутствие отложений на стенке. Пристенный ламинарный слой разрушают мощные вихри. Они образуются при закручивании потока в витых трубах и при срыве потока с выступов, впадин, ребер, всевозможных статических дефектов и неровностей, размещенных на гладких трубах. Эти же вихри предотвращают образование отложений. Поток постоянно сильно турбулизован во всем объеме – как в центральной зоне, так и в пристенном слое, т.е. мы можем рассматривать задачу в приближении турбулентного потока.

Коэффициент вязкого трения для систем переходного и турбулентного типов равен $f = 0,015$.

В дальнейшем, чтобы определить количество теплоты, которое отводится от поверхности используется закон Ньютона–Рихмана: количество тепла, отдаваемое единицей поверхности тела в единицу времени

$$Q = h_w S_{sc} (T_c - T_0), \quad (5)$$

где Q – отводимое количество теплоты (Вт)ж T_c и T_o – температуры поверхности солнечного коллектора (К) и охлаждающей жидкости (К) соответственно.

Значения чисел Рейнольдса и Нуссельта в зависимости от скорости потока воды для труб с внутренним диаметром $D_h = 10^{-2} \text{ м}$

Таблица 1

u_w , м/с	Re	Nu	Тип потока
0,1	994,04	4,364	Ламинарный поток
0,2	1988,07	4,364	Ламинарный поток
0,25	2485,09	26,06	Переходный поток
0,3	2982,11	30,16	Переходный поток
0,4	3976,14	37,96	Переходный поток
0,5	4970,18	45,38	Переходный поток
0,6	5964,21	52,5	Переходный поток
0,7	6958,25	59,4	Переходный поток
0,8	7952,29	66,09	Переходный поток
0,9	8946,32	72,62	Переходный поток
1	9940,36	79,01	Переходный поток
1,1	10934,39	85,27	Турбулентный поток

Необходимо определить эффективную площадь солнечного коллектора S_{sc} : примем ее за часть площади сегмента (θ – угол на который опирается сегмент) боковой поверхности цилиндра, умноженную на $n = 8$ – количество труб в системе:

$$S_{sc} = (\pi \frac{D_h \cdot \theta}{180} + D_h \cdot \sin(\theta)) \cdot n \approx 0,1 \text{ м}^2 \quad (6)$$

Нагрев теплоносителя в контуре циркуляции охлаждающей жидкости в солнечном коллекторе происходит за счет полезной энергии мощностью Q_{eff} , отводимой из солнечного коллектора в данный момент времени. Энергия Q_{eff} представляет собой разность количества солнечной энергии, поглощенной пластиной коллектора, и тепловыми потерями в окружающую среду. Уравнение (7) применимо для расчета почти всех существующих конструкций плоских солнечных коллекторов (ПСК) [10,11], имеет вид:

$$Q_{eff} = F_R S_C [I_T(\tau\alpha) - U_L(T_{c_{max}} - T_0)], \quad (7)$$

где Q_{eff} – полезная энергия, отводимая от коллектора в единицу времени, Вт; F_R – коэффициент отвода тепла из коллектора; $S_C = 2 \text{ м}^2$ – полная площадь солнечного коллектора, $I_T = 1000 \text{ Вт/м}^2$ – плотность потока суммарной солнечной радиации в плоскости коллектора; τ – пропускающая способность прозрачного покрытия коллектора по отношению к солнечному излучению; α – поглощательная способность пластины коллектора по отношению к солнечному излучению; U_L – полный коэффициент тепловых потерь коллектора (Вт/(м²·К)).

Апробация модели. Коэффициенты F_R , $(\tau\alpha)$ и U_L , зависящие от конструкции ПСК, расхода жидкости через коллектор и их размера,

определяются при стандартных испытаниях коллекторов [20], в которых поток суммарного солнечного излучения падает вертикально на поверхность солнечного коллектора. Для рассматриваемой системы параметры коллектора равны:

$$F_R(\tau\alpha) = 0,78 \quad (8)$$

$$F_R U_L = 7,62 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Таким образом, граничное значение эффективной энергии рассматриваемой нами системы не может превышать $Q_{eff} \leq 1483,8 \text{ Вт}$ при $T_{c_{max}} - T_0 = 5 \text{ К}$ (рис. 1.).

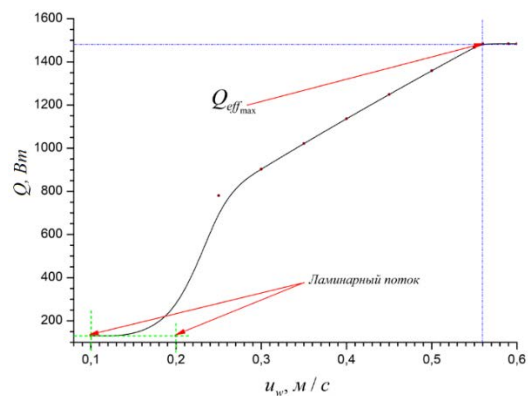


Рис. 1. Зависимость количества тепла Q , которое отводится от системы при протекании по ней охлаждающей жидкости $T = 293 \text{ К}$, от скорости потока жидкости u_w .

При скоростях до u_w до 0,2 м/с режим движения жидкости ламинарный и количество тепла, отдаваемое жидкости, слишком мало, а охлаждающая жидкость проходит, по трубам практически не нагреваясь. С ростом скорости в дальнейшем наблюдается резкий скачок количества тепла передаваемого жидкости, а соответственно и ее нагрев. При скоростях порядка 0,6 м/с количество тепла, которое отводит вода достигает максимального значения, то есть значения эффективной энергии, которую способна обеспечить рассматриваемая нами система с заданными параметрами, для нагрева потока воды на 5К за один ее проход по трубам данного солнечного коллектора (рис. 2).

Как можно видеть из зависимости, получаемая от коллектора мощность ограничена максимальным значением, обусловленным собственными тепловыми потерями системы. Также стоит отметить, что с ростом градиента температуры теплоносителя между входом и выходом, максимальное значение мощности снижается в связи с ростом указанных потерь. Исходя из модели можно видеть, что оптимальное значение скорости теплоносителя будет находиться в диапазоне скоростей от значения, соответствующего

переходу от ламинарного потока (0,2 м/с) к переходному режиму течения теплоносителя, до скоростей, соответствующих достижению максимальной отбираемой мощности (плато зависимости).

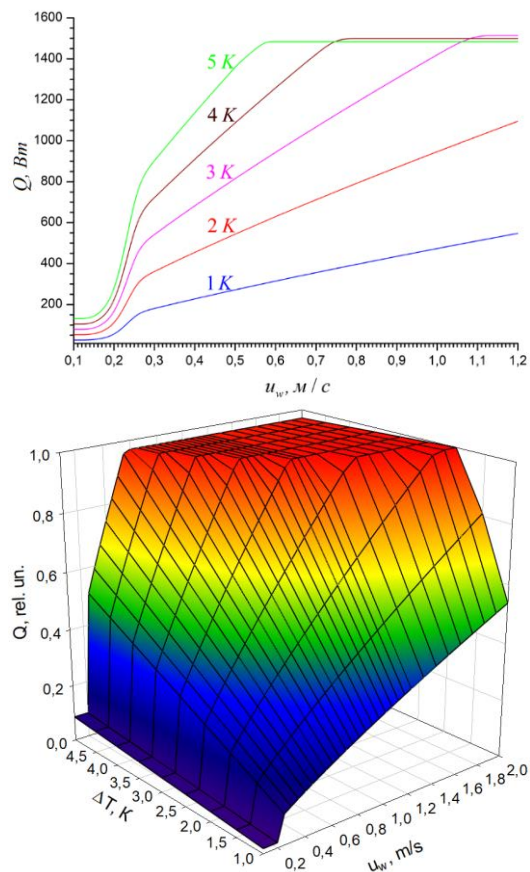


Рис.2. Зависимость количества тепла Q , которое отводится от системы при протекании по ней охлаждающей жидкости $T=293K$, от скорости потока жидкости u_w для различных градиентов температур $\Delta T=1,2,3,4,5K$

Также, исходя из рассчитанных зависимостей (рис. 2), можно предположить, что оптимальным значением разницы температур является $\Delta T=3K$, так как это минимальная разница температур, при которой достигается максимум отбираемой мощности. Однако, на практике, обеспечение больших скоростей протекания теплоносителя требует довольно больших затрат энергии на работу циркуляционного насоса (пропорционально квадрату скорости), что может приводить к снижению КПД системы в целом. В этом случае, более оптимальным может оказаться вариант с $\Delta T=5K$, при котором максимальная отбираемая мощность достигается уже при скорости протекания теплоносителя 0,5-0,6 м/с, не взирая на то, что сама величина указанной мощности немного снижается. Указанное снижение вырабатываемой мощности будет компенсировано

экономией энергии, потребляемой циркуляционным насосом.

Таким образом, можно заключить, что полученная физическая модель $Q(u_w, \Delta T)$ применима к классическим решениям тепловых коллекторов в общем виде. Однако, в реальных условиях эксплуатации, в зависимости от различных конструктивных особенностей коллектора, определение оптимальных параметров должно выполняться с учетом параметров конструкции.

Для апробации модели были проведены лабораторные исследования коллектора, фрагмент которого показан на рисунке 3, а, согласно его классической схеме подключения (рис. 3, б) [21].

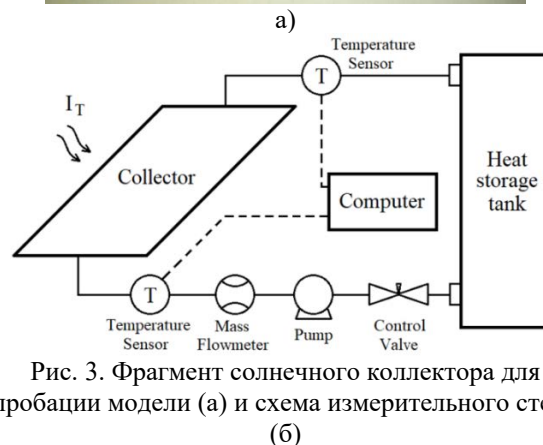
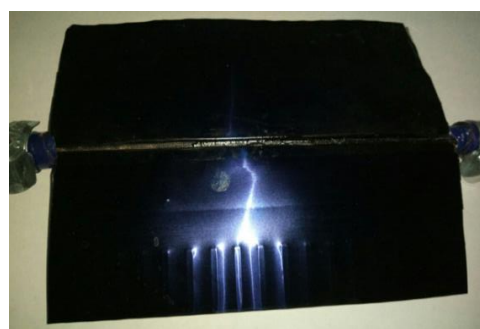


Рис. 3. Фрагмент солнечного коллектора для апробации модели (а) и схема измерительного стенда (б)

Исследования позволили провести сравнение результатов моделирования с натурными значениями. Различная разница температур для соответствия моделированию достигалась за счет принудительно изменяемой интенсивности светового потока. Экспериментальная зависимость $Q(u_w, \Delta T)$ приведена на рисунке 4,б в сравнении с теоретическими значениями в том же масштабе (рис 4,а).

Из приведенных зависимостей можно видеть довольно точное совпадение результатов лабораторных испытаний с предложенной моделью, при испытаниях также наблюдается характерно малый отбор мощности при ламинарном потоке при скоростях течения теплоносителя до 0,2 м/с, а также выход на максимальное значение при скоростях теплоносителя более 0,8 м/с и градиенте температур более 3-4 K, характерное пределу отбираемой

мощности. Указанное подтверждает соответствие модели физическому механизму работы коллектора и позволит в дальнейшем проводить моделирование реальных систем, в особенности PVT систем [22], где появляются дополнительные термоинтерфейсы, влияющие на тепловые потоки.

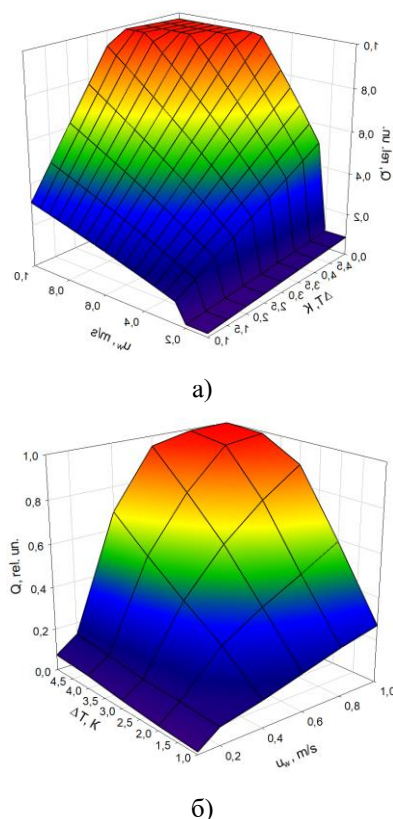


Рис. 4. Сравнение теоретической (а) и экспериментальной (б) зависимостей величины отбираемой коллектором мощности от скорости протекания теплоносителя и градиента температур между входом и выходом

На практике для реальной системы при постоянно интенсивности светового потока градиент температуры напрямую связан со скоростью протекания теплоносителя через параметры конструкции коллектора. Например, аналитическая зависимость $\Delta T(u_w)$ для проведенного в работе лабораторного испытания имеет следующий вид:

$$\Delta T = \begin{cases} 4,3 \text{ при } u_w < 0,2 \\ 5,31 \cdot e^{-1,05 u_w} \text{ при } u_w \geq 0,2 \end{cases} \quad (9)$$

Использование приведенной зависимости позволит провести замену переменных в предложенной модели и получить зависимость с одной переменной, которая будет характерна для определенной конструкции коллектора. В дальнейшем, при использовании такой модели, значительно упрощается задача оптимизации параметров коллектора, а также задача поиска

оптимальных скоростей протекания теплоносителя, в том числе для создания алгоритма интеллектуального управления скоростью теплоносителя.

Выводы. До настоящего времени не существует всеобъемлющей математической модели для прогнозирования тепловой и электрической эффективности PVT систем с использованием технологии жидкостного охлаждения. В этом исследовании разработана комплексная физическая модель, основанная на хорошо известной модели солнечного коллектора, с учетом дополнительных параметров. Посредством теоретического анализа расчетов на основе широко известных данных [20], были учтены дополнительные факторы влияния, такие как параметры исследуемой системы, градиент температур и скорость потока жидкости. Для этого были использованы основные уравнения гидродинамики и теплообмена.

В рассматриваемой модели для описания процессов отвода тепла и переноса теплоты, осуществляемых при принудительной циркуляции у поверхностей теплоносителя, подвергающейся воздействию большого числа факторов, в материальной среде в общем случае используют дифференциальные уравнения неразрывности (уравнения Навье–Стокса), движения и сохранения энергии. Дополнительно при моделировании в расчет были введены параметры системы, которые использовались для определения количества теплоты, отведенного от поверхности, с помощью закона Ньютона–Рихмана, а также для определения граничного значения отводимого тепла от поверхности коллектора для различных градиентов температур и скоростей потока жидкости.

Лабораторная апробация предложенной модели позволила подтвердить ее применимость классическим решениям солнечных коллекторов, а правильное определение параметров системы позволяет достичь необходимой точности вычислений. В последствии эта модель позволит перейти к исследованию и теоретическому обоснованию более сложных практических моделей – PVT систем, а также разрабатывать интеллектуальные алгоритмы управления скоростью теплоносителя с учетом условий эксплуатации.

Литература

1. R.V. Zaitsev, M.V. Kirichenko, G.S. Khrypunov, et. al., *Journal of nano- and electronic physics*, **11**(4), 04029 (2019).
2. A.L. Abdullah, S. Misha, N. Tamaldin, et. al., *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, **48**(2), 196 (2018).
3. R.V. Zaitsev, M.V. Kirichenko, G.S. Khrypunov, et al., *First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering*, 360, (Ukraine, Kyiv, 2017).
4. C. Good, J. Chen, Y. Dai, A.G. Hestnes, *Energy Procedia*, **70**, 683 (2015).

5. Y. Tian, C.Y. Zhao, *Appl. Energy* **104**, 538 (2013).
6. J.K. Patel, N. Mehta, J. Dabhi, *Materialstoday: Proceedings*, **4**(9), 10278 (2017).
7. N.M. Khattab, *Solar Energy*, **80**(7), 823 (2006).
8. B.B. Saha, A. Akisawa, T. Kashiwagi, *Renewable Energy*, **23**(1), 93 (2001).
9. R.Z. Wang, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **5**(1), 1 (2001).
10. M.J. Tierney, *Renewable Energy*, **32**(2), 183 (2007).
11. A.A. Hasan, D.Y. Goswami, *Journal of Solar Energy Engineering*, **125**(1), 55 (2003).
12. T. Sankarlal, A. Mani, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **33**(2), 223 (2006).
13. M.J. Huang, P.C. Eames, B. Norton, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **47**(12-13), 2715 (2004).
14. T. Ma, H. Yang, Y. Zhang, et. al., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **43**, 1273 (2015).
15. T. Cui, Y. Xuan, Q. Li, *Energy Conversion and Management*, **112**, 49 (2016).
16. Pipe Flow & Friction Factor Calculator, <https://www.pipeflow.com/>.
17. E.A.D. Saunders, *Heat exchangers: Selection, Design and Operation* (Longman Higher Education Division, 1988).
18. W.J. Parker, R.J. Jenkins, C.P. Butler, G. L. Abbott, *Journal of Applied Physics*, **32**, 1679 (1961).
19. Materials Thermal Properties Database, <https://thermtest.com>.
20. J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar Energy Thermal Process* (John Wiley & Sons Inc., 1974).
21. R.V. Zaitsev, M.V. Kirichenko, G.S. Khrypunov, *Journal of nano- and electronic physics*, **10**(6), 06017 (2018).
22. A.L. Abdulalah, S. Misha, N. Tamaldin, et. al., *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, **48**(2), 196 (2018).

Сведения об авторах

Ксения Минакова, Кандидат физико-математических наук, Доцент кафедры физики, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, ksenia.minakova@khpi.edu.ua

Роман Зайцев, Доктор технических наук, Заведующий кафедрой физического материаловедения для электроники и гелиоэнергетики, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, roman.zaitsev@khpi.edu.ua

Danylchenko Dmytro, Potryvai Andrii

Optimization of accumulation units in a mobile, autonomous cottage settlement as a part of maneuvering system

Summary. *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 power plant, autonomous settlement, neural network.*

Introduction. In the current realities of the development of the electricity industry, the need to use energy storage systems to compensate for peak loads and improve the interaction of renewable energy sources (RES) with the integrated energy system has become obvious. [1, 2].

However, the existing options are narrowly aimed at solving the problem and do not in any way try to make the solution universal, but the question of the independent use of energy storage systems (ESN) as an additional "active" element of distribution electric networks is not enough studied now [3].

The functional of the ESN can be much broader and act not only as a unit that increases the transmission capacity of RES and to improve the quality of electricity, but also as an element that ensures the autonomy of the nearby village.

"Ethereal village" is one of the projects expanding the possibilities of ESN in the united energy system of Ukraine (UES).

About Ethereal village. An analysis of existing proposals on the market for energy efficient technologies has shown the presence of fragmented solutions that, individually, do not give significant results, create discomfort from a technical, or design point of view. The combination of developments does not make it sufficiently effective, because all this is an attempt to improve construction technologies that are already outdated.

By combining advanced technologies in construction and energy, we achieved a decent result in terms of both design and technology. This is the main goal of the project.

The modern multi-layer structure of the wall will allow obtaining maximum efficiency of the power plants used in the village for generation and supply.

The roof area of each house is provided for at least 120 m², which is a useful surface for installing solar panels. That makes it possible to calculate the amount of generated energy.

The architectural features of the shape of the buildings dictate the use of a flat roof.

One of the main advantages of Ethereal village will be the system of networked solar panels from each house

and the ability of the network, in conjunction with the automation and the storage unit, to act not only as a power source for the village in the evening and in the night, but also as a full-value system to support the energy system. at times of maximum and minimum load.

The battery unit provides for the installation of an automatic control system based on a neural network. This means that the trained neural network is responsible for analyzing the current mode of operation of the UES and gives a command to perform a certain action: support of the UES during peak hours, the consumption of surplus electricity in the mode of minimum load. Moreover, be responsible for forecasting electricity generation.

The settlement planning with the size of 24 and 48 houses.

Purpose of the article. Analysis of the possibilities of the cottage village "Ethereal village" as a unit participating in the processes of optimizing the operation of the UES on the example of the Kharkov region. Selection and optimization of the battery pack to meet the project-specific requirements.

Formulation of the problem. The graphs of electrical loads of modern electric power systems (EPS) have a pronounced unevenness in the daily, weekly, seasonal and annual sections. Due to the simultaneity of the processes of generation and consumption of electricity, this leads to unevenness of the schedules of generating capacities, which is extremely undesirable from a technical and economic point of view. The possibilities of traditional methods of equalizing the power schedules, as well as the use of hydraulic stations to cover the variable part of the load curves, are limited. Therefore, in recent years, much attention has been paid to the use of energy storage: storage batteries, capacitive storage, and superconducting inductive storage.

Research in the field of improving these energy storage devices speaks about the real possibility of their application in large EPS. At the same time, however, questions arise that are required for their solution of the formulation of scientific research.

Needs. According to "Energorynok", during peak hours, consumption increases to 3.2 GW in summer and up to 6.7 GW in winter.

The main highly maneuverable sources in Ukraine are thermal power plants and hydroelectric power plants. Today, there is an insufficient share of the generation of hydroelectric power plants (10% instead of 16%), which negatively affects the controllability of the system.

Analysis of existing solutions. Now, in the world, the most promising are two solutions in the field of regulation of load schedules: installation of storage batteries in network nodes and installation of kinetic accumulators.

Both technologies, of course, are capable of positively affecting the UES load schedule, but they have certain disadvantages.

The kinetic energy storage system described in [4] is capable of solving the problem of minima and maxima, however, it acts as an operator of the available power and does not have the ability to provide its transfer from other sources (private power plants, for example), since it interacts only with the electrical network and does not have additional power sources, which makes the installation less useful in the long term and is not able to respond to unforeseen surges in the system.

Also, the weak point of this system is the existence of the probability of a weak charge in the hours of minimum and, as a consequence, the existence of the possibility of failure to fulfill its function.

Systems in which the main regulating element is a battery and electronics for automatic monitoring of the electrical network are distinguishing by high speed and accuracy. However, its functionality can be expanding in order to increase the utility of the installation.

The concept of an autonomous village interacting with the network is an excellent solution to this disadvantage. In addition to performing the function of regulating the load curve, by means of the output of the power accumulated during the hours of excess generation, the function of the output generated by private photovoltaic installations of energy appears in the event of a lack of accumulated.

Optimization of maneuvering ability. To achieve a competitive state of the "Ethereal village", the system must have significant advantages, since it is basing on already known principles.

Since there are different versions of the storage system, it is necessary to choose the optimal one for the established conditions: a high level of reliability, the ability to easily install automation, the ability to easily establish a connection with the network.

So for implementation in the project, three ways of placing battery blocks are presented:

- Placement of accumulating units at network nodes.
- Placement of battery blocks in each house and their subsequent connection to the network, with a union node, in which the controlling body is located.

- Placement of one battery block not far from the village with connection to all consumers of the village. The governing body is located in it.

Using the method described in [5], the calculation was carried out for each system according to the following parameters: probability of recovery, probability of untimely completion of repair, frequency of renewal, recovery rate, and average time of failure and flow of failures.

Since the most important is the failure-free operation of the system for a long period (up to 10 years), the most important parameters are the frequency of failure, and the probability of failure-free operation of the system, which are determined by formulas 1 and 2, respectively:

$$a_b(t) = S'(t) = -G'(t) \quad (1)$$

where

$S'(t)$ – the probability of product recovery over time "t";

$G'(t)$ – the probability that the product will not be repaired in time "t";

$$p(t) = p_{m=0} = \frac{\omega^0}{0!} e^{-\omega} = e^{-\omega} \quad (2)$$

where

P_m – probability of occurrence of failures over time "t";

ω – Failure rate in a Poisson stream of events

The calculations show that the most reliable configuration is the one that provides for the installation of a single battery unit near the village, due to the significantly smaller number of critical links.

Based on the need to provide uninterrupted power supply to the village, reliable communication with the UPS and ensure sufficient capacity for the generated energy, a single battery unit is selected.

The generating capacity of 48 private SPPs was determined for the conditions of the Kharkiv region by its own method, based on the experience of cooperation with the Altek Kharkiv company. Also for more accurate calculation losses on rectifier diodes, in wires, in inverter (ACRUX) and pollution were taken into account. For each month, empirical coefficients were obtained (data were obtained when observing the operation of private SPPs in Chuguev, Kharkov, Bakhmut and Izyum) to take into account the losses of the generating installation in non-nominal conditions (the effect of temperature, dustiness, reflection coefficients, etc.). The coefficient varies from 0.010 to 0.067 depending on the month.

The calculation results are listing in figure 1.

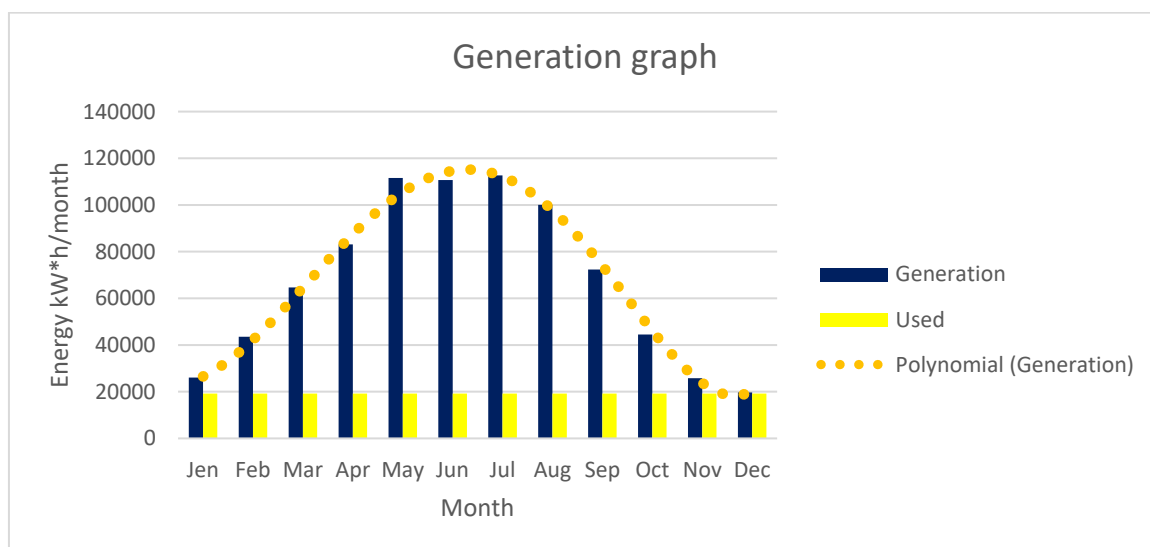


Figure 1. Annual schedule of the generation of a complex consisting of individual solar stations.

Of the proposals that have an appropriate level of reliability from the factory, the storage systems from Tesla clearly stand out on the market.

They are capable of storing up to $3\text{MW} \cdot \text{h}$ in themselves and have a maximum power output of 5.5 MW in 4:00, which is sufficient for Ethereal village [6].

However, it is necessary to use automation to establish interaction between private SES, energy storage unit and UES. Mandatory functions of automation are: feedback between components, autonomous decision-making on the disposition of available, incoming and outgoing electricity, forecasting the generation of a photovoltaic generating complex.

For autonomous maneuvering, a control unit will be responsible, which is basing on a neural network that analyzes input data from all solar modules, an electric power system and meteorological data. The functions of the management link are to forecast the generation and consumption of electricity in the cottage community and, depending on the needs of the UPS, compensation.

Implementation of the forecasting function is possible through two well-known types of neural networks: perceptron and decision tree.

A multilayer perceptron is a neural network consisting of layers, each of which consists of elements - neurons. Elements can be of three types: sensory, associative and reactive. It is called multilayer because it contains several layers of learners (A layer).

Decision tree is a decision support tool used in statistics and data analysis for programming models. Its main goal is to create a model that predicts the result of the target variable using the input variables.

After scikit-learn machine learning, a random event generator was launched to analyze the effectiveness and the operation of both systems was tested..

The decision tree turned out to be effective (determination coefficient 0.92) per perceptron (determination

coefficient 0.57) for its low resistance to "unpredictable noise". This is explained by the fact that the perceptron is more vulnerable to data that is very different from the general sample.

Based on the study, it was concluded that the forecasting system based on a decision tree is quite reliable and capable of accurately determining short- and medium-term generation and makes it possible to turn the system of individual solar stations "Ethereal village" into a full-fledged maneuverable unit.

Conclusion. Of course, one settlement of the Ethereal village format is not capable of acting as a full-fledged maneuverable unit, however, when a larger number of settlements of this type are located near a large consumer (a large or industrial city), the ability to influence the system increases significantly. This means that such a technology at this stage of development is not capable of acting as the main maneuverable unit, but is an excellent element of supporting the system at moments of minimum and maximum demand for electricity.

When analyzing various options for placing battery blocks, it was determined that the best results are shown by a system with a single battery (it is possible to install a redundant battery to increase reliability) from Tesla, since their Megapack stands out on the market for its reliability and capabilities, and it is also able to accumulate all the energy generated by private solar power plants and deliver it to the network, if necessary, at a sufficient speed.

It has been determined that the decision tree is better suited to perform the functions of forecasting generation, analyzing incoming data and controlling electricity, since it has a higher coefficient of determination and, as a result, is more adapted to atypical situations that can happen on the net.

References

1. Ribeiro P.F., Johnson B.K., Crow M.L., Arsoy A., Liu Y. Energy Storage Systems for Advanced Power Applications. Proceedings of the IEEE, 2001, no. 89, pp. 1744–1756. DOI: 10.1109/5.975900
2. Divya K., Ostergaard J. Battery Energy Storage Technology for Power Systems – An Overview. Electric Power Systems Research, 2009, no. 79, pp. 511–520. DOI: 10.1016/j.epsr.2008.09.017
3. Gusev Yu.P., Subbotin P.V. [The Impact of Battery Energy Storage Systems on the Throughout Efficiency of Electric Power Distribution Networks 6–10 kV]. Electrical Technology Russia, 2018, no. 1, pp. 13–18. (in Russ.)
4. Savchenko N., Shevchenko S., Analysis of efficiency of application of kinetic energy storage to adjust the consumer load schedule. Vistnyk of National technical university, 2019
5. Savonskii N., Reliability of electrical power systems, 2004, form of the Penza State University
6. Tesla Megapack datasheet
<https://www.tesla.com/megapack>
7. D. Danylchenko, S. Fedorchuk, A. Ivakhnov, O. Bulhakov 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), Kharkiv, Ukraine, 2020, pp. 519-525, doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250155.

About the Authors

Dmytro Danylchenko, PhD, Associate Professor of Electric Power Transmission Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine, Dmytro.Danylchenko@khpi.edu.ua

Potryvai Andrii, master student of Electric Power Transmission Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine, potryvay.andrew99@gmail.com

Liliia Zaitseva, Olga Vodoriz, Roman Zaitsev

ITO/polyimide/ Al_2O_3 thin film structure for capacitive transducers

Summary. *It has been developed and approbated prototypes of thin-film capacitor transducers based on Al/ITO/polyimide/ Al_2O_3 heterosystem for capacitive acoustic control in metal objects in the modes of simultaneous acoustic signal reception and generation by capacitive transducers and in certain modes of acoustic signal generating or receiving that can realize objects monitoring with sensitivity at the level of piezoelectric transducers. The developed prototype of thin film capacitive transducer for monitoring pipelines by longwave capacitive method allows increasing the maximum distance between the capacitive transducers up to 10 m. It has been engineered the thin film capacitive transducers which by using the polyamide film with 15 microns thickness of and alumina film with 1 micron thickness allow to increase the sensitivity of such method in 7-8 times. It is shown that using the magnetron sputtering technology, which provides high adhesion to polyimide substrate layers, made possible produce the capacitive transducers for objects with various shape. Proposed and patented: capacitor method for receiving acoustic signals in non-destructive control and transducer of ultrasonic acoustic wave's excitation and receiving.*

Keywords: *thin-film transducer, capacitive method, metal defectoscopy.*

Introduction. The need to simplify the control technology of metal products macrodefects in terms of industrial production has led to the further development of widely used acoustic methods [1]. They are based on piezoelectric devices that implement the acoustic method using special fluids to ensure the necessary acoustic contact. Considerable experience in the practical use of this method has identified areas in which it isn't effective [2, 3]. So it is impossible to use liquid for acoustic control of the products with the polluted surface struck by corrosion, or with coverings (paint, polymeric films and other insulating coverings), hot and cold products. Thus, for the needs of practical defectoscopy it is necessary to create devices that will allow to conduct liquid-free acoustic control [4, 5].

Formulation of a problem. Promising among the devices of liquid-free acoustic control can be means created on the basis of capacitive method of generation and reception of acoustic signals, which has a fundamentally different physical mechanism of acoustic signal generation in the control object, its surface is one of the plates of the capacitive composition and itself generates a signal without the need to use liquid to ensure acoustic contact. However, the existing capacitive compositions don't allow to obtain the necessary sensitivity of the method and the task is to find, create and study the latest capacitive transducers based on thin film layers, among which are very promising layers of polyimide, ITO [6, 7] (Indium Tin Oxide, mixed indium oxide and tin $(\text{In}_2\text{O}_3)_{0.9}(\text{SnO}_2)_{0.1}$) and Al_2O_3 alumina.

Methods of obtaining samples. The following key requirements for increasing the sensitivity and efficiency of capacitive transducers follow from the practice of using classical capacitive transducers for defectoscopy by the capacitive method, which are as follows:

- reducing the dielectric layer thickness;
- increasing the dielectric constant value of the layer.

From the view point of the requirements fulfillment, the possibility of using a polyamide film with a thickness of 15 to 125 μm as a dielectric layer and a base for

capacitive transducers, which is 10 times less than the thickness of classical dielectric layers, is quite relevant. When creating a capacitive converter with the Al/ITO/polyimide/ Al_2O_3 structure, a polyimide of the Upilex-S brand with a thickness of 15 μm was used, the surface of which was previously cleaned. On one of the polyimide sides by the method of non-reactive magnetron sputtering on direct current on VUP-5M vacuum plant in the following technological conditions the ITO layer was obtained: the discharge gap length - 70 mm; deposition time - 30 minutes; the initial residual pressure in the vacuum chamber was $3 \cdot 10^{-7}$ Pa and the working pressure in the process of target spraying - $1.5 \cdot 10^{-4}$ Pa; ITO target consisted of 90 Wt % In_2O_3 and 10 Wt % SnO_2 and pressed under a pressure of approximately 12 kg/cm²; the substrate temperature was 300 °C, the magnetron specific power was 0.28 W/cm². Current-conducting tracks made of aluminum on the ITO layer surface was created by the method of thermal resistive spraying on a VUP-4 vacuum unit in the following technological conditions: spraying was carried out through a suitable mask at a vacuum of $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, the substrate was heated to 110 °C, spraying time with tungsten evaporators was 120 s. On the other side of the polyimide film in similar technological conditions to the ITO layer was obtained a Al_2O_3 layer [8]. A schematic cross-sectional view of such a device is shown in Figure 1, a. According to the above technology, a prototype of a thin-film capacitive transducer for acoustic control of metal products was created, the physical configuration of which is shown in Figure 1, b.

Study of the crystal structure of thin-film capacitive transducers. To achieve the maximum quality of such structures it is necessary to control the parameters of the ITO layer: its crystal structure, which determines most of its properties, including mechanical, and its dependence on deposition conditions, as well as its electrical resistance, the values of which determine the possibility of using such a structure as a plate of a capacitive transducer.

Studies of the film layers crystal structure were carried out by the traditional X-ray diffraction method [9] on DRON-4 X-ray machine with automatic recording of the diffraction spectrum using a computer with continuous 2θ -scanning in the range of angles $2\theta = 20 - 75$ with Bragg-Brentano focusing (θ - 2θ) in cobalt anode radiation.

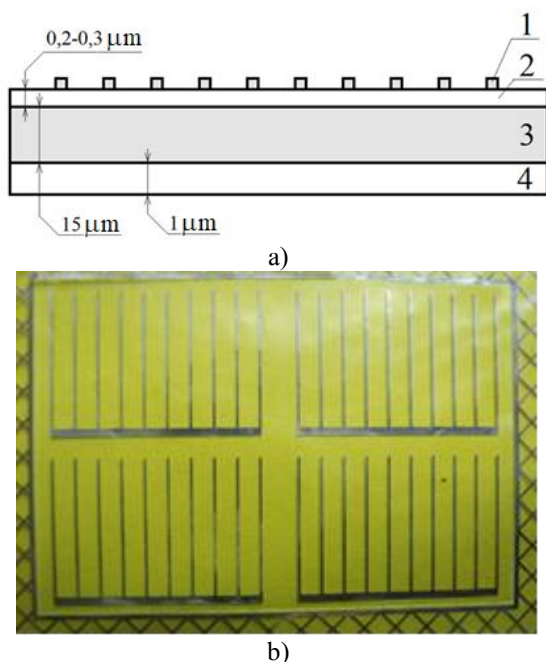


Fig. 1. A schematic cross-sectional view (a) and the physical configuration (b) the proposed thin-film capacitive transducer: 1 – aluminum current-conducting tracks; 2 - ITO layer with a thickness of 0.2 – 0.3 μm ; 3 - polyimide film with a thickness of 15 μm ; 4 - Al_2O_3 layer with a thickness of 1 μm

The surfaces of ITO and Al_2O_3 layers were also studied using a REM-100U scanning electron microscope. The obtained X-ray diffraction patterns and surface micrographs are shown in Fig. 2 and 3, for the ITO layer and the Al_2O_3 layer, respectively.

Analysis of X-ray diffractograms of ITO layers obtained by the nonreactive magnetron sputtering method (Fig. 2) showed that all layers have a crystal structure of In_2O_3 stable cubic modification. The latter is unequivocally evidenced by the presence of reflections from the planes (221), (222), (400), (411), (332), (431), (440), (611), (622). The results of the total integral intensity ratio calculations of all peaks observed on the diffraction pattern to the thickness of the ITO layer indicate the presence of a X-ray amorphous phase small amount in the samples. It was also experimentally found that at a substrate temperature of 300 $^{\circ}\text{C}$, the film growth occurs with a predominant orientation in the direction $\langle 111 \rangle$.

The structure analysis of the Al_2O_3 layer showed that all layers have a crystal structure of a stable rhombohedral modification of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ with lattice parameters $a = 4.759$

$\text{\AA}$, $c = 12.993 \text{ \AA}$. This is clearly evidenced by the presence of reflections from the planes (012), (104), (110), (113), (024) and (116) [10]. The X-ray diffractogram analysis shows that the Al_2O_3 layer has a stable crystal structure, and as a consequence, has stable electrical parameters that correspond to the structure.

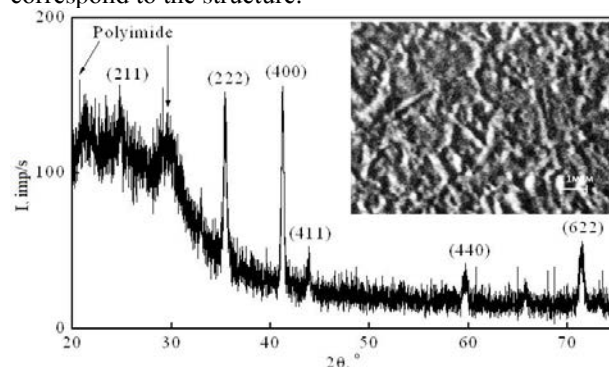


Fig. 2. X-ray diffractogram and micrograph of the ITO layer surface deposited on the polyimide film

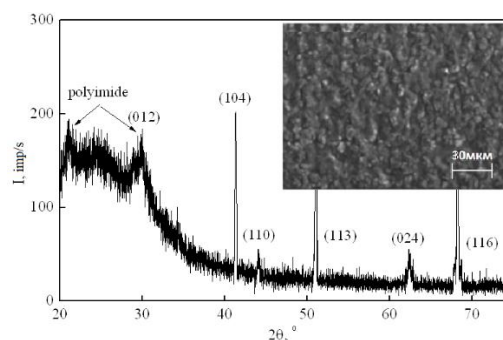


Fig. 3. X-ray diffractogram and micrograph of the Al_2O_3 layer surface deposited on the polyimide film

Electrical properties of thin-film capacitive transducer. As already mentioned, for the manufacture of thin-film capacitive converters based on the ITO/polyimide/ Al_2O_3 structure along with the layers crystal structure, it is also necessary to control the surface electrical resistance of the conductive layer, the values of which determine the possibility of using such a structure as a plate of the capacitive transducer without considerable losses of a useful signal, and the dielectric constant of the dielectric layer, which significantly affects the useful signal magnitude.

To control the surface electrical resistance of the ITO layer, the four-probe method was used [11], and the surface electrical resistance ($R_{\square}$) of the ITO layers determined by this method is equal to 8-15 Ω/m . E.m.f. Hall studies indicate that the obtained resistivity value is due to the main charge carriers concentration from about $8.3 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ and the main charge carriers mobility at the level of 44 $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$.

Studies of the polyamide film dielectric constant and the polyimide/ Al_2O_3 structure were performed for the excitation signals frequencies in the range of 10 - 10^7 Hz, which were generated by a GSS-20 signal generator type.

The capacitance of the capacitor structure was measured using an RLC-meter type E318, and the data are shown in Fig. 4.

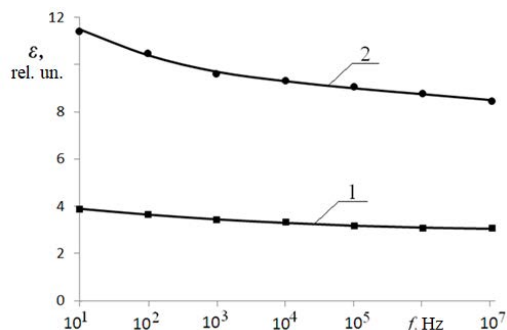


Fig. 4. Dependence of polyimide film dielectric constant (1) and polyimide/ Al_2O_3 structure of (2) on frequency of excitation signal

The study results show an increase in the dielectric constant of the polyimide/ Al_2O_3 structure, which is 8.5 – 11.5 rel. unit, relative to the polyimide film (3 – 3.5 rel. unit) approximately 3 times at frequencies of the excitation signal in the range of 10 Hz – 10 MHz [12]. This circumstance confirms the assumption about the possibility of increasing the layer dielectric constant by applying a Al_2O_3 thin layer on the polyimide film. A 3-fold increase in the dielectric constant will lead to an additional 3-fold increase in the sensitivity of the capacitive transducer based on such a layer.

Approbation of the device. To confirm the possibility of method sensitivity increasing due to the use of a capacitive transducer based on the $\text{Al}/\text{ITO}/\text{polyimide}/\text{Al}_2\text{O}_3$ structure in comparison with classical transducers, a series of samples from aluminum was studied at an oscillation frequency of 2.5 MHz. The received signals obtained oscillograms for transducers both types with the same magnitude of the excitation signal are shown in Fig. 5.

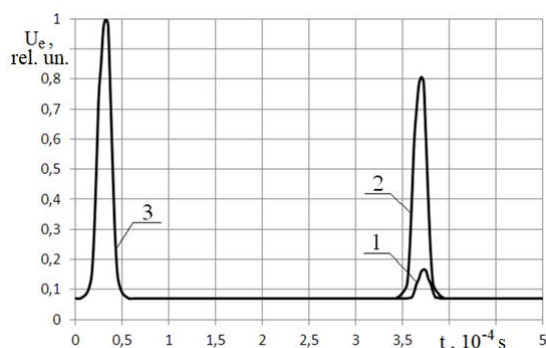


Fig. 5. Normalized oscillograms of the received signals from the classical capacitive transducer (1) and the proposed thin-film based on the $\text{Al}/\text{ITO}/\text{polyimide}/\text{Al}_2\text{O}_3$ structure (2) in comparison with the same excitation signal (3)

As can be seen from Fig. 5, the received signal value in the case of using a thin-film transducer increases by 7.6 times compared to the classical transducer, which correlates well with the dielectric constant dielectric layers measurements and taking into account thickness reduction of the dielectric layer. Thus, the increase in the capacitive method sensitivity in the case of the thin-film capacitive transducers use based on the $\text{Al}/\text{ITO}/\text{polyimide}/\text{Al}_2\text{O}_3$ structure is experimentally confirmed.

Conclusion. It is proposed to use as a dielectric layer in defectoscopy of metal products by capacitive method a thin polyimide film, the thickness of which is two orders of magnitude less than the thickness of classical dielectric layers, and is 15 μm , and the dielectric constant is 3-4 rel. units, which allows, respectively, to increase the sensitivity of the capacitive method by about 100 times.

ITO layers with a thickness of 0.2 – 0.3 μm (surface resistance was 8 – 15 Ω/m , the charge carriers concentration was $8.3 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, mobility was $44 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$) were obtained on polyimide films from Upilex at a substrate temperature of 300 $^{\circ}\text{C}$ and a magnetron specific power of 0.31 W/cm^2 .

It was found that the additional use of Al_2O_3 thin crystalline films deposited on a polyimide substrate, allows to increase the dielectric constant of the capacitive transducer layer from 3-4 rel. unit characteristic of polyimide, up to 8.5 – 11.5 rel. unit. The obtained growth in the dielectric constant value allows to increase the capacitive method sensitivity by at least 3 times.

A prototype of a thin-film capacitive transducer for acoustic control of metal products based on the $\text{Al}/\text{ITO}/\text{polyimide}/\text{Al}_2\text{O}_3$ structure was created.

An experimental study of the prototype was performed and it was found that the use of a thin-film capacitive transducer based on the $\text{Al}/\text{ITO}/\text{polyimide}/\text{Al}_2\text{O}_3$ structure increases the sensitivity of the capacitive method by 7.6 times.

References

1. Dwivedi S.K., Vishwakarma M., Soni A. Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review. *MaterialsToday: Proceedings*, 2018, Vol. 5, no. 2, pp. 3690-3698, doi:10.1016/j.matpr.2017.11.620.
2. Guo S., Shah L., Ranjan R., Walbridge S., Gerlich A. Effect of quality control parameter variations on the fatigue performance of aluminum friction stir welded joints. *International Journal of Fatigue*, 2019, Vol. 118, pp. 150-161, doi:10.1016/j.ijfatigue.2018.09.004.
3. Gorkunov B.M., Tupa I.V., Zaitseva L.V., Khrypunov G.S., Zaitsev R.V., Khrypunova A.L. Metal Defectoscopy by the Capacitive Acoustic Method: The Physical Base Development. *Journal of nano- and electronic physics*, 2018, Vol. 7, no. 1, pp. 01038.
4. Bondarenko O.G. Determination of the actual area of dry acoustic contact in the system "transducer-product" in low-frequency defectoscopy. *Methods and devices of quality control*, 2019, Vol. 43, no. 2, pp. 5-15, doi:10.31471/1993-9981-2019-2(43)-5-15.

5. Myatezh A.V., Malozyomov B.V. Defectoscopy of conductive structures. *International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering"*, Atlantis Press, 2019, pp. 435-440, doi:10.2991/aime-18.2018.83.
6. Sousa M.G., da Cunha A.F. Optimization of low temperature RF-magnetron sputtering of indium tin oxide films for solar cell applications. *Applied Surface Science*, 2019, Vol. 484, pp. 257-264, doi:10.1016/j.apsusc.2019.03.275.
7. Ykzjak G.D., Coşkun Ö.D. The effect of annealing on the structural, electrical, optical and electrochromic properties of indium-tin-oxide films deposited by RF magnetron sputtering technique. *Optik*, 2017, Vol. 142, pp. 320-326, doi:10.1016/j.ijleo.2017.06.016.
8. Khrypunov G., Sokol E., Kudii D., Khrypunov M. The optimization of technology ITO layers for thin-film solar cells. *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*, Ukraine, 2018, pp. 393-398, doi:10.1109/TCSET.2018.8336227.
9. XiaoHui C., Tao X., DongBing L., QingGuo Y., BinQiang L., Mu L., XiaoYa L., Jun L. Graphical method for analyzing wide-angle x-ray diffraction. *Review of Scientific Instruments*, 2018, Vol. 89, no. 1, pp. 013904, doi:10.1063/1.5003452.
10. Kumar S., Mote V.D., Prakash R., Kumar V. X-ray Analysis of α -Al₂O₃ Particles by Williamson–Hall Methods. *Materials Focus*, 2016, Vol. 5, no. 6, pp. 545-549, doi:10.1166/mat.2016.1345.
11. Troyan P., Zhidik Yu., Zhidik E. Investigation of temperature stability of ITO films characteristics. *IV International Young Researchers Conference "Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects"*, Russia, 2018, pp. 03010, doi:10.1051/mateconf/201814303010.
12. Acharya J., Wilt J., Liu B., Wu J. Probing the Dielectric Properties of Ultrathin Al/Al₂O₃/Al Trilayers Fabricated Using in Situ Sputtering and Atomic Layer Deposition. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, Vol. 10, no. 3, pp. 3112-3120, doi:10.1021/acsami.7b16506.

About the Authors

Liliia Zaitseva, PhD, Associate Professor of Natural Science Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, liliia.zaitseva@khpi.edu.ua

Olga Vodoriz, PhD, Senior Lecturer of Department of Physics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, olga.vodorez@gmail.com

Roman Zaitsev, Doctor of Science, Head of Materials for Electronics and Solar Cells Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, roman.zaitsev@khpi.edu.ua

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

Юрий Хуташвили, Арчил Прангишвили, Нугзар Иашвили

О новом подходе применения полупроводникового сенсора для обнаружения метана и моно оксида углерода

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.

Ключевые слова: Нагрев и охлаждение сенсора, новые параметры полупроводникового сенсора, линейный преобразователь сопротивления, испытательная камера

Iuri Khutashvili, Archil Prangishvili, Nugzar Iashvili

One approach to identifying two gases with a single semiconductor sensor

Abstract. The detection of methane (CH_4) by a semiconductor sensor in air is traditionally carried out when its sensor is heated, and carbon mono (CO) is subsequently cooled after heating. The present paper first investigated and experimentally confirmed the possibility of detecting and identifying both gases in air by a single semiconductor sensor when heating its sensor element using the example of a Figaro TGS2611 sensor. For this purpose, new parameters of sensor resistance behavior during its heating and cooling were introduced and measured.

Keywords: Sensor heating and cooling, new parameters of semiconductor sensor, linear resistance converter, test chamber.

Введение. Для полупроводниковых сенсоров обнаружения метана в воздухе жилого помещения, например, TGS2611, в [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].

Во всех известных методах обнаружения CH_4 и CO , в том числе для TGS3870, метан измеряют при высокой температуре в пределах $400-500^{\circ}C$, а оксид углерода – при низкой температуре в пределах $180-90^{\circ}C$. 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.

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.

Более глубокое изучение режима нагрева-охлаждения полупроводника сенсора, т.е. импульсного режима нагрева сенсора, было предпринято нами, 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 [5,6], предположили, что сорбированный в период паузы между импульсами нагрева в многослойную структуру пористого полупроводника сенсора моно оксид углерода CO тестируемого воздуха при высокой температуре (свыше $100^{\circ}C$) вступает в реакцию с молекулами H_2O пара сопутствующей влажности. В результате образуются CO_2 и H_2 [5,6], сопровождаемые падением сопротивления полу-

проводника сенсора. Одновременно под воздействием нарастающей температуры по мере продвижения фронта максимальной температуры (400°C и выше) от поверхности нагревателя к периферийным слоям полупроводник теряет влажность и интенсивность образования CO_2 и H_2 падает. Поэтому сопротивление полупроводника сенсора сначала достигает минимального значения R_{Min} под воздействием максимальной температуры и влажности, а затем по мере высушивания его слоёв сопротивление повышается до значения R_{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 «растянуть» 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 прилагаемому 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.

На рис.1 представлена осциллограмма сигнала напряжения на выходе линейного преобразователя сопротивления сенсора TGS2611-C00 при импульсном режиме нагрева мощностью 272 mW в загазованном 80 ppm CO воздухе при температуре $22,2^{\circ}\text{C}$ и влажности 34%.

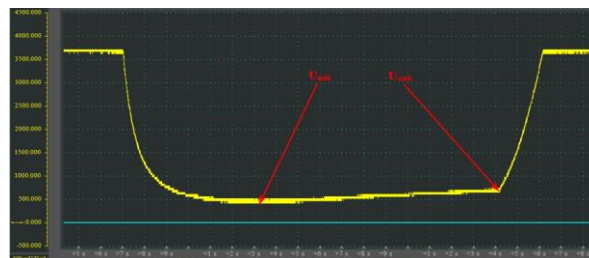


Рис. 1. Характеристика сигнала на выходе линейного преобразователя сопротивления сенсора TGS2611-C00 при импульсном режиме нагрева

Проведенные нами исследования также были направлены на поиск решения проблемы компенсации дрейфа сопротивления полупроводника сенсора при изменении температуры, влажности, атмосферного давления и временной чувствительности сенсора. Исходя из выше изложенного цель исследования заключалась в поиске наиболее приемлемых параметров измерения и идентификации метана и моно оксида 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;
- ΔU – разность сигналов $U_{\text{Stab}} - U_{\text{Min}}$, характеризующая рост сопротивления полупроводника сенсора при импульсе нагрева относительно его минимального сопротивления;
- β – отношение сигналов $U_{\text{Min}}/U_{\text{MinAir}}$, пропорциональное градиенту сопротивлений полупроводника сенсора в загазованном воздухе относительно его сопротивления в «чистом воздухе» ([1,2,7,8], только в сравнении с сопротивлением полупроводника в чистом воздухе);
- ΔT – скорость охлаждения полупроводника сенсора в загазованном воздухе;
- γ – коэффициент замедления скорости охлаждения полупроводника сенсора в загазованном воздухе в сравнении с скоростью охлаждения в чистом воздухе, равное $\Delta T/\Delta T_{\text{Air}}$.

Параметры R_{Min} и $\Delta R = R_{\text{Stab}} - R_{\text{Min}}$ тождественны параметрам U_{Min} и ΔU , 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. 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 моно оксидом углерода 30 ppm, 50 ppm, 100 ppm и 300 ppm). Это существенно усложняет схему измерения.

Экспериментальная база и процедура. Экспериментальные исследования проводились в ГТУ с использованием испытательной камеры (ёмкости), (рис. 2) 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 моно оксида углерода как раздельно, так и совместно.

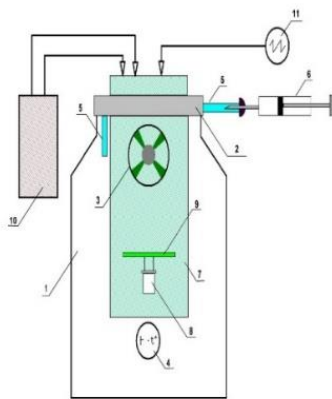


Рис. 2. Испытательная камера (ёмкость) разработки ГТУ:

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 сенсора; 10 - блок питания; 11 - цифровой осциллограф

Объём (5100 мл) ёмкости 1, выполненной из стекла, был измерен методом её заполнения водой (удельный вес при температуре 20°C равен **0,99823**) мерной колбой в 1000мл±0,8мл, 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 подкрышечного пространства (4 мл). В итоге объём воздуха для смешивания с ПГС составит 5034 мл.

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:

Испытательная ёмкость, разработки ГТУ, Линейный двух диапазонный преобразователь сопротивления полупроводника сенсора разработки ГТУ, Сенсоры TGS2611-C00, Цифровой осциллограф INSTRUSTAR - ISDS205A. Баллон ПГС содержания 95,5% метана, Баллон ПГС содержания 98% моно оксида углерода, Шприц 1 мл с ценой деления 0,02 мл, Шприц 5 мл с ценой деления 0,25 мл, Шприц 10 мл с ценой деления 0,5 мл и 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.

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 6 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 6, 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, кратко-временным разгерметизированием 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/SpectrumAnalyzer (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 $k_{CO} \cdot V_{CO}/(V_{Air} + V_{CO})$. При этом значение V_{Air} брали 5000 мл вместо 5034 мл. Табличные 20 ppm реально составляют 19,5 ppm, 40 ppm - 38,9 ppm, 60 ppm - 58,4 ppm, 80 ppm - 77,9 ppm, 100 ppm - 97,3 ppm, 150 ppm - 146 ppm, 200 ppm - 194,6 ppm, 300 ppm - 291,9 ppm, 400 ppm - 389,2 ppm.

Табличные значения объёмной концентрации с использованием ПГС (UN1954), содержащий основной компонент 95,5% метан и примеси

углеводородов. Их общее воздействие на сенсор TGS2611-C00 с некоторой долей допущения можно приравнять к 1,5% воздействию метана. Исходя из этого допущения эквивалентную концентрацию метана можно считать 97%. Используя уточнённую формулу $k_{CH4} \cdot V_{CH4}/(V_{Air} + V_{CH4})$ табличные значения реально составляют для метана: 20 ppm - 19,3 ppm, 40 ppm - 38,5 ppm, 60 ppm - 57,8 ppm, 80 ppm - 77,1 ppm, 100 ppm - 93,3 ppm, 150 ppm - 144,5 ppm, 200 ppm - 192,6 ppm, 400 ppm - 385,2 ppm, 600 ppm - 577,7 ppm, 800 ppm - 770,1 ppm, 1200 ppm - 1155 ppm, 1600 ppm - 1539 ppm, 2200 ppm - 2115 ppm, 3200 ppm - 3073 ppm.

Результаты проведённых экспериментов. В таблицах были зафиксированы Результаты экспериментов при пониженной мощности импульса нагрева 220 мВт, которая составляет 78,5% от номинальной (280 мВт $\pm$ 25 мВт) а результаты экспериментов при минимальной 260 мВт $\pm$ 2% от заявленной номинальной (280 мВт $\pm$ 25 мВт) мощности импульса нагрева. Исследования проводились с новыми сенсорами с малым и длительным (более 2 лет) временем хранения или незначительным временем работы, а также с сенсорами после четырёхлетнего периода эксплуатации.

Анализ результатов. При анализе результатов проведенных экспериментов были определены:

- Воздействие 100 ppm и 20 ppm моно оксида углерода и 100 ppm и 20 ppm метана на TGS2611-C00 при пониженной мощности импульса нагрева - 220 мВт $\pm$ 2% ;
- Воздействие 100 ppm и 20 ppm моно оксида углерода и 100 ppm и 20 ppm метана на TGS2611-C00 при минимальной заявленной мощности импульса нагрева - 260 мВт $\pm$ 2%;
- Воздействие 100 ppm и 20 ppm моно оксида углерода и 100 ppm и 20 метана на TGS2611-C00 при максимальной заявленной мощности импульса нагрева - 305 мВт $\pm$ 2%.

Под воздействием **СО** наблюдается рост параметра ΔU при повышении мощности нагрева от 220 мВт до 260 мВт. Дальнейшее увеличение мощности нагрева сенсора от 260 мВт до 300 мВт приводит к уменьшению значения этого параметра. При этом под воздействием метана параметр ΔU на порядок меньше и при росте концентрации его значение не увеличивается в отличие от **СО**, при котором этот параметр значительно растёт.

Параметр β 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 β по **СО** уменьшается до минимума. При дальнейшем

увеличении мощности нагрева β по СО увеличивается при очевидном уменьшении параметра β по метану согласно источнику [4].

Параметр γ 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 более стабильный от влияния окружающей среды, как видно из таблиц 22-29, является параметр β 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 β 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 ΔU . 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_{stab} . Основное снижение сопротивления полупроводника сенсора происходит за счет повышения его температуры. Уменьшение U_{stab} и связанное с этим снижение роста ΔU 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_{stab} незначительно отличается от $U_{\min}$. *Высокое значение ΔU 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 монооксидом 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 $\beta = U_{\min} / U_{\min \text{Air}}$ в условиях изменяющейся температуры и влажности при систематическом обновлении $U_{\min \text{Air}}$ 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 $\beta = U_{\min} / U_{\min \text{Air}}$ с задаваемыми уровнями β_{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 $U_{\min \text{Air}}$.

В разработанном детекторе газа сигнализацию уровней загазованности осуществляют сравнением параметра $\beta = U_{\min} / U_{\min \text{Air}}$ с задаваемыми уровнями β_{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 $U_{\min \text{Air}}$. Установления зависимости мощности нагрева сенсора от температуры тестируемого воздуха создаст возможность управляемого нагрева сенсора с целью стабилизации температурного режима его полупроводника.

Литература

1. TGS2611. Technical Information for Methane Gas Sensors. 02/2005.
2. TGS3870. Technical Information for Combination Methane and Carbon Monoxide Sensors. 12/2005.
3. JP2004309343A. Method for driving semiconductor gas sensor. 2004.

4. Cross sensitivity of TGS26XX sensors. November, 2008. Figaro Engineering Inc.
5. Chemist's Handbook. Edited by B.P. Nikolsky. Prod. "Chemistry," Leningrad. 1966. (in Russian)
6. EN50194-1. Alarm-only apparatus for the detection of combustible gases in domestic premises. Part 1.

Test methods and performance requirements7. EN50291-1. Gas detectors - Electrical apparatus for the detection of carbon monoxide in domestic premises. Part 1: Test methods and performance requirements.

Сведения об авторах

Арчил Прангишвили, Академик, Грузинский Технический Университет. Тбилиси, Грузия. a.prangishvili@gtu.ge;

Юрий Хуташвили, Грузинский Технический Университет. Главный специалист центра Автоматизаций. Тбилиси, Грузия. khutashvili@yandex.com;

Нугзар Иашвили, Директор центра Автоматизаций. Грузинский Технический Университет. Тбилиси, Грузия. n.iashvili@gtu.ge;

ლევან იმნაიშვილი, კახაბერ ქასოშვილი

ენერგოეფექტური საყოფაცხოვრებო გაზქურა

ანოტაცია. სამუშაოში დასაბუთებულია საყოფაცხოვრებო გაზქურის კამფორასა და ჭურჭლის ფსკერს შორის დაშორების მანძილის მართვის ეფექტურობა ჭურჭლის ფსკერზე არსებული ტემპერატურიდან გამომდინარე. შემოთავაზებულია მართვის თანამედროვე ტექნოლოგიებზე დაფუძნებული ენერგოეფექტური საყოფაცხოვრებო გაზქურის ფუნქციონირების სქემა.

საკვანძო სიტყვები: საყოფაცხოვრებო გაზქურა, გაზქურის ეფექტურობა.

Levan Imnaishvili, Kakhaber Kasoshvili

Energy efficient household gas stove

Summary. The effectiveness of the control of the distance between the burner of the household gas stove and the bottom of the dishes is justified in the work. Based on the bottom temperature of the dishes, a diagram of the functioning of the energy of an effective household gas stove is proposed, taking into account modern technology.

Keywords: Household gas stove. Ring. Plate efficiency.

შესავალი. ნაშრომში [1] გაკეთებულია დასკვნა, რომ საყოფაცხოვრებო გაზქურაში ბუნებრივი აირის წვის შედეგი არის ეფექტური, როცა ბუნებრივი აირის მინიმალური დანახარჯით მიიღწევა ჭურჭლის ფსკერის მაქსიმალური ტემპერატურა. ამის შედეგის მიღება შეიძლება კამფორაში ბუნებრივი აირის წნევიდან (ანუ წვის შედეგად წარმოქმნილი ალის სიმძლავრიდან) და გაზის შემადგენლობიდან გამომდინარე კამფორიდან ჭურჭლის გარკვეულ სიმაღლეზე განთავსებით.

იმავე ნაშრომში ნათქვამია, რომ ტექნიკური თვალსაზრისით შემოთავაზებული ხერხი შეიძლება განხორციელდეს ორი გზით: ვცვალოთ ჭურჭლის დაშორება კამფორიდან ან ვცვალოთ კამფორის დაშორება ჭურჭლის ფსკერიდან.

ეს უკანასკნელი განხორციელებულია პატენტში [2]-ში, როდესაც საყოფაცხოვრებო გაზქურის მოქმედების სქემაში გამოიყენება ბუნებრივი აირის წვის შედეგად მიღებული ალის სიმძლავრის და კამფორაში მიწოდებული ბუნებრივი აირის წნევის ურთიერთ-დამოკიდებულება. შედეგად, მეტია წნევა, მეტია ალის სიმძლავრე და პირიქით. აქედან გამომდინარე, იმავე მიდგომის [2] თანახმად, საკმარისია ვაკონტროლოთ კამფორაში ბუნებრივი აირის წნევა და მას შევუსაბამოდ მანძილი კამფორასა და ჭურჭლის ფსკერს შორის.

ამ მიდგომის ოპონირების მიზნით ვიტყვი, რომ ეს მეთოდი კარგად იმუშავებს, როცა ბუნებრივი აირის შემადგენლობა ყველა შემთხვევაში არის ერთი და იგივე, რაც პრაქტიკაში ასე არ არის. აქედან გამომდინარე, მეთოდის პრაქტიკაში რეალიზაციის შემთხვევაში, საჭირო გახდება გაზქურის მართვის მოწყობილობის ფუნქციონირების ალგორითმის მორგება კონკრეტულ სიტუაციაში ბუნებრივი აირის შემადგენლობაზე.

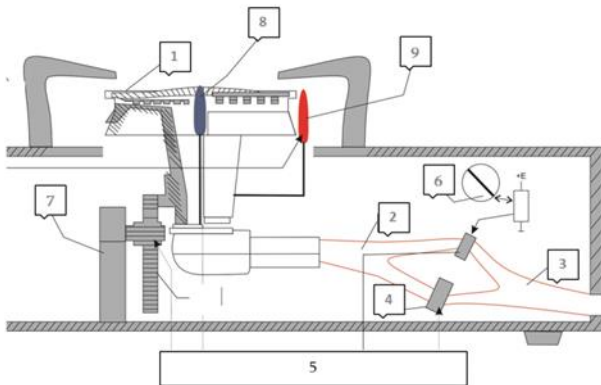
ვფიქრობთ, რომ ეს ხერხი ვერ მოგვცემს სასურველ შედეგს, რამდენადაც ბუნებრივი აირის წვის ალის სიმძლავრე და შესაბამისად, თბოგადაცემა არ არის დამოკიდებული მხოლოდ ბუნებრივი აირის წნევაზე კამფორაში. ბუნებრივი აირის წვის შედეგად მიღებული სითბოს თბოგადაცემა დამოკიდებულია ბუნებრივი აირის წნევასთან ერთად სხვა მაჩვენებლებზეც. ამიტომ მიზანშეწონილად მიგვაჩნია ჭურჭლის ფსკერიდან კამფორის დაშორების მანძილის ცვლა მოხდეს ბუნებრივი აირის წვის შედეგად ჭურჭლის ფსკერზე მიღებული ტემპერატურიდან გამომდინარე.

ენერგოეფექტური საყოფაცხოვრებო გაზქურის არქიტექტურა. როგორც ჩატარებული ექსპერიმენტები [1] გვიჩვენებს, საყოფაცხოვრებო გაზქურის ეფექტურობის მთავარი მაჩვენებელია ბუნებრივი აირის წვის პროცესში გამოყოფილი სითბოს უდანაკარგოდ გადაცემა სითბოს მიმღებზე. ბუნებრივი აირის წვის შედეგად მიღებული სითბოს თბოგადაცემა

დამოკიდებულია ბუნებრივი აირის წნევაზე, შემადგენლობაზე, წვის პროდუქტების გაფანტვის შესაძლებლობებზე, გარე ტემპერატურაზე და სხვა. ამდენად, ბუნებრივი აირის წვის პროცესში გამოყოფილი სითბოს უდანაკარგოდ გადაცემა სითბოს მიმღებზე შეიძლება განხორციელდეს ბუნებრივი აირის წვის შედეგად წარმოშობილ ალსა და სითბოს მიმღებს შორის ოპტიმალური მანძილის შენარჩუნებით.

ამ ამოცანის გადაწყვეტის მიზნით საკმარისი იქნება გაიზომოს ტემპერატურა ბუნებრივი აირის წვის შედეგად წარმოშობილ ალსა და ჭურჭლის ფსკერს შორის და მივაღწიოთ ალსა და ჭურჭლის ფსკერს შორის მანძილის ისეთ დარეგულირებას, როცა ეს ტემპერატურა იქნება მაქსიმალური.

ასეთი სქემით მომუშავე ინტელექტუალური გაზქურის სქემა ნაჩვენებია ნახ.1-ზე.



ნახ. 1. ინტელექტუალური გაზქურის სქემა

გაზქურა მოიცავს კამფორას 1. მის შესასვლელთან მიერთებულია გაზის მიმცვანი მილი 2. გაზის მკვებაჲ მილსა 3 და მიმცვან მილს 2 შორის განთავსებულია პროპოციული მოქმედების ორი ელექტროსარქველი 4. მათგან ერთი იმართება გაზქურის მართვის მოწყობილობით, ხოლო მეორე ელექტრონულად დაკავშირებულია გაზის ჩამკეტ სახელურთან 6 საჭიროების შემთხვევაში გაზქურის ხელით მართვისათვის.

კამფორა 1 ხისტად არის დაკავშირებული მის ამწევ მექანიზმთან 7, რომელიც აღჭურვილია ბიჯური ძრავით და კბილებიანი ვერტიკალურად მოძრავი მექანიზმით. კამფორის ცენტრში მოთავსებულია ტემპერატურის სენსორი 8. კამფორა ასევე

აღჭურვილია ტრადიციული ელექტრო სანთებელათი 9.

გაზქურის მართვა ხდება ორ რეჟიმში:

- სახელურის 6 საშუალებით ხდება საჭირო მოცულობის ბუნებრივი აირის მიწოდება კამფორაში

- პროგრამულად, როცა მომხმარებლის მიერ ხდება რამდენიმე პროგრამიდან ერთი პროგრამის არჩევა, მაგალითად, „წყლის სწრაფი ადუღება“. ამ რეჟიმში გაზქურამ ავტომატურად უნდა უზრუნველყოს ბუნებრივი აირის მაქსიმალური მოცულობის მიწოდება.

ბუნებრივი აირის მიმცვან მილში 2 მიწოდებული აირის მოცულობიდან გამომდინარე, ხდება მართვის მოწყობილობის 5 და კამფორის ამწევი მექანიზმის 7 საშუალებით კამფორის „უხეში“ გადაადგილება სავარაუდო მანძილზე. კამფორის „უხეში“ გადაადგილება არის წინასწარ განსაზღვრული და მართვის პროგრამაში „ჩადებული“. გადაადგილების შემდგომ გაიზომება ტემპერატურა და მართვის მოწყობილობა გადაადგილებს სანთურას ერთი დისკრეტით ზევით ან ქვევით. სავარაუდოდ დისკრეტი შეიძლება იყოს 1 მმ. გადაადგილების შემდგომ ხდება განმეორებით ტემპერატურის გაზომვა. განმეორებითი გაზომვის შედეგი შედარდება წინა გაზომვის შედეგს. თუ ტემპერატურა ნაკლებია, მაშინ სანთურის გადაადგილება მოხდება ორი ბიჯით ზევით და ა.შ. სანამ არ იქნება ნაპოვნი მაქსიმალური ტემპერატურის მნიშვნელობა.

გასაგებია, რომ თანამედროვე მიკრო-პროცესორული ტექნოლოგიები საშუალებას იძლევა განხორციელებული იქნას გაზქურის შემუშავებული სქემის მრავალი რეჟიმი მართვის მრავალი შესაბამისი ალგორითმით.

დასკვნები

- დასაბუთებულია, რომ სიზუსტის გაზრდის მიზნით უმჯობესია გაზქურაში ჭურჭლის ფსკერიდან კამფორის დამორების მანძილის ცვლა მოხდეს ბუნებრივი აირის წვის შედეგად ჭურჭლის ფსკერზე მიღებული ტემპერატურიდან გამომდინარე.

- შემოთავაზებულია ენერგოეფექტური საყოფაცხოვრებო გაზქურის კონსტრუქცია, სადაც ჭურჭლის ფსკერიდან კამფორის დამორების მანძილი იმართება ჭურჭლის ფსკერზე მიღებული ტემპერატურიდან გამომდინარე.

ლიტერატურა

1. კახაბერ ქასოშვილი. საყოფაცხოვრებო გაზქურების ენერგოეფექტურობის ამაღლების ხერხი. I საერთაშორისო სამეცნიერო - ტექნიკური კონფერენცია „ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები.“ თბილისი, საქართველო, 2019 წლის 7-11 ოქტომბერი. “ ენერგია“ გვერდი 121-123.
2. Gas stove. Patent #CN104566523A.

References (transliterated)

1. Kakhaber Kasoshvili, A way to increase the energy efficiency of household gasstoves. International Scientific and Technological Conference “Modern problem of power engineering and ways of solving them”, Tbilisi., Georgia. October 7-11. 2019. “ENERG”. 121-123 pp.
2. Gas stove. Patent #CN104566523A.

ინფორმაცია ავტორების შესახებ

ლევან იმნაიშვილი, ტექნ. მეცნ. დოქტორი, პროფესორი, კომპიუტერული ინჟინერიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, limn54@gmail.com
კახაბერ ქასოშვილი, დოქტორანტი, საგანმანათლებლო პროგრამა „ინფორმატიკა“, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, k.kasoshvili@gmail.com

მაგული ბედინეიშვილი, ლევან იმნაიშვილი, გოჩა ზედგინიძე

კომპიუტერის ენერგომომხმარების მონიტორინგი და მართვა

ანოტაცია. სამუშაოში შემოთავაზებულია კომპიუტერულ კლასებში მოთხოვნილი სიმძლავრის მონიტორინგის სისტემა, კომპიუტერების სამომხმარებლო პროგრამებით დატვირთვის ამოცანათა ანალიზი მოთხოვნილი სიმძლავრის მიხედვით და მისი შემცირების მეთოდები.

საკვანძო სიტყვები: კომპიუტერის ენერგომომხმარება, ენერგომომხმარების მონიტორინგი, კომპიუტერის ენერგომომხმარების მართვა.

Maguli Bedineishvili, Levan Imnaishvili, Gocha Zedginidze

Monitoring and management of computer power consumption

Summary. The paper proposes a system for monitoring the power consumption of a computer class, analysis of load tasks by computer programs for the required power and methods for its reduction.

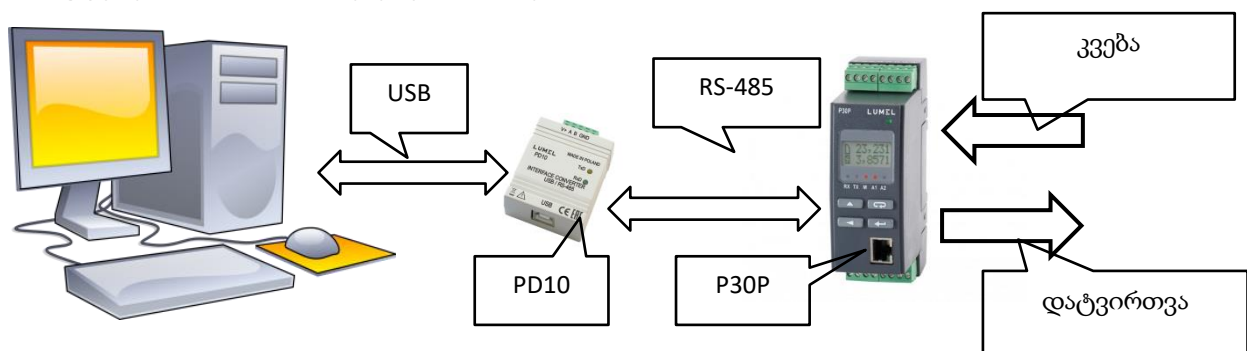
Keywords: Computer Power Consumption, Power Consumption Monitoring, Computer Power Consumption Management.

შესავალი. არ არის სადავო, რომ როგორც ყველა ენერგომომხმარებლის სიმძლავრეა შესამცირებელი, ასევე კომპიუტერისაც [1]. ბოლო ათეული წელია ამას დაემატა ასევე სმარტფონების მოხმარებაც, რამაც კიდევ უფრო დაამძიმა ისედაც მომატებული ენერგომომხმარება. აქვს თუ არა კომპიუტერების მიერ მოხმარებული ენერგიის პრობლემა ორგანიზაციებს და მით უფრო საგანმანათლებლო დაწესებულებებს? შეუძლიათ თუ არა მათ შეიტანონ თავიანთი წვლილი ენერგომომხმარების შემცირებაში? და კიდევ, რომელ დარგს განეკუთვნება ეს თემა – ენერგეტიკას თუ კომპიუტინგს? საბოლოო ჯამში ენერგეტიკოსებისა და კომპიუტინგის სპეციალისტების ერთობლივი ძალისხმევით საჭირო მოცემულ სამუშაოში დასმული პრობლემის უფრო ღრმად შესწავლისთვის.

სამუშაოს მიზანი. ერთ სივრცეში თავმოყრილი დიდი რაოდენობის კომპიუტერების ენერგომომხმარების

მონიტორინგის სისტემის შემუშავება. მონიტორინგის მონაცემებზე დაყრდნობით ენერგომომხმარების ანალიზი. კომპიუტერების სამომხმარებლო პროგრამებით დატვირთვის ამოცანათა ანალიზი მოთხოვნილი ენერგიის მიხედვით და მისი შემცირების მეთოდების შემუშავება.

კომპიუტერის ენერგომომხმარების მონიტორინგის სისტემის არქიტექტურა. სისტემის არქიტექტურა (ნახ.1) გადაწყვეტილია SCADA სისტემის სახით და განხორციელებულია ელექტროქსელის ანალიზატორის P30P [2] ბაზაზე. ხელსაწყო PD10 [2] წარმოადგენს USB/RS-485 აპარატურული ინტერფეისების კონვერტორს. პროგრამული უზრუნველყოფა განხორციელებულია SCADA პროგრამული პაკეტის Trace mode-ს [3] ბაზაზე, რომელიც უზრუნველყოფს გაზომილი სიდიდეების დაგროვებას მონაცემთა ბაზაში, მათი შემდგომი ანალიზის მიზნით.



ნახ. 1. კომპიუტერის ენერგომომხმარების მონიტორინგის SCADA სისტემის სტრუქტურა

განხორციელებული პროგრამული გარსის სამომხმარებლო ინტერფეისი ნაჩვენებია ნახ. 2-ზე, რომელიც უზრუნველყოფს მონაცემთა მიმდინარე მნიშვნელობების ასახვას.



ნახ. 2. SCADA სისტემის სამომხმარებლო ინტერფეისი

ექსპერიმენტების ჩატარებისათვის საჭირო ხდება დატვირთვაში ჩართული კომპიუტერების მოხმარებული სიმძლავრეების ცვლა. ამ მიზნით მათში ჩატვირთული იქნა AIDA64 უტილიტა [4], რომელიც საშუალებას იძლევა კომპიუტერის კომპონენტები აჩქარებული იქნან მათი შესაძლებლობების ზღვრულ მნიშვნელობებამდე. ცხადია, ამ რეჟიმში მოიხმარს კომპიუტერი მაქსიმალურ აქტიურ სიმძლავრეს.

ანალიზატორის P30P ფუნქციური შესაძლებლობები დიდი, მაგრამ ჩვენ ყურადღებას ვამახვილებთ ისეთ პარამეტრებზე, რომელიც დაკავშირებულია კომპიუტერის ენერგომომხმარებასთან: აქტიური (W), რეაქტიული (var), სრული (VA) სიმძლავრე, სიმძლავრის კოეფიციენტი (PF). ამასთან საკმაოდ მაღალია გაზომვების სიზუსტე. ცდომილება არის გაზომილი სიდიდის 0,5%.

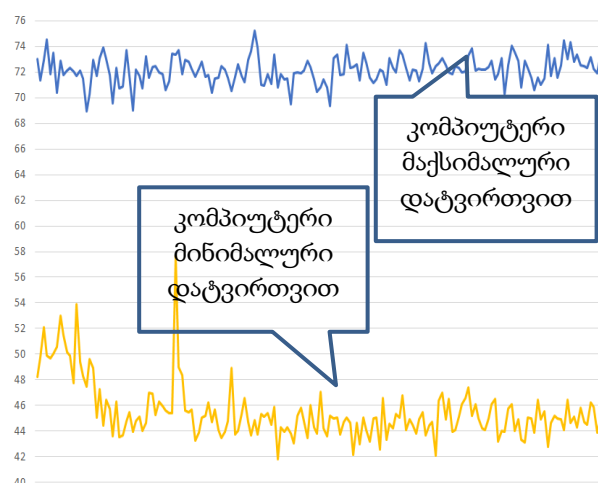
მონიტორინგის სისტემაში გამოყენებული ელექტროქსელის ანალიზატორი P30P უზრუნველყოფს ქსელის ანალიზს თუ მასში გატარებული დენი (220 V ძაბვის შემთხვევაში) არ აღემატება 5 A, ანუ მასში გატარებული აქტიური სიმძლავრე არ უნდა აღემატებოდეს 1100 W-ს.

ისმის კითხვა, ერთდროულად რამდენი კომპიუტერის მონიტორინგი შეიძლება განხორციელდეს ამ სქემით. ამ მიზნით უნდა ვიცოდეთ კომპიუტერის მაქსიმალური დატვირთვის აქტიური სიმძლავრე, რისთვისაც

იგივე SCADA სისტემით ჩავატარეთ ექსპერიმენტი.

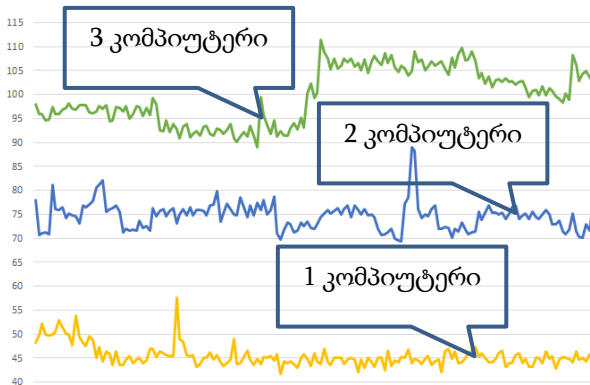
ექსპერიმენტის ჩატარების მიზნით დატვირთვის სახით კომპიუტერული კლასიდან არჩეული იქნა საშუალო პარამეტრების მქონე კომპიუტერი. კომპიუტერის მაქსიმალური დატვირთვა უზრუნველყოფილი იქნა AIDA64 უტილიტით. აღმოჩნდა, რომ აღებული კომპიუტერის მაქსიმალური მოხმარების აქტიური სიმძლავრეა 75 W. ამდენად, კლასის მიერ მოხმარებული სიმძლავრის პარამეტრების ანალიზის დროს, კლასში ჩვენ შეგვიძლია ჩავართოდ არაუმეტეს 14 ამ ტიპის კომპიუტერისა, რომელიც სრულებით საკმარისია დასკვნების გამოტანისათვის.

კომპიუტერის ენერგომომხმარების მონიტორინგი და ანალიზი. მნიშვნელოვანი სხვაობაა მაქსიმალურ დატვირთვაზე მომუშავე და დაუტვირთავი კომპიუტერის მოხმარებულ აქტიურ სიმძლავრეებს შორის (ნახ.3). აქტიური სიმძლავრეების პიკური მოთხოვნების თავიდან აცილების და მოთხოვნილი აქტიური სიმძლავრეების დროში გადანაწილების მიზნით წინასწარ უნდა იყოს ცნობილი კონკრეტულ სამუშაოებზე კომპიუტერული კლასების მოთხოვნილი აქტიური სიმძლავრეები. აქედან გამომდინარე დიდი რაოდენობის კომპიუტერების ერთდროულად მუშაობის პირობებში მიღწეული უნდა იქნას მათზე არათანაბარი ენერგოტევადი სამუშაოების წარმოება.

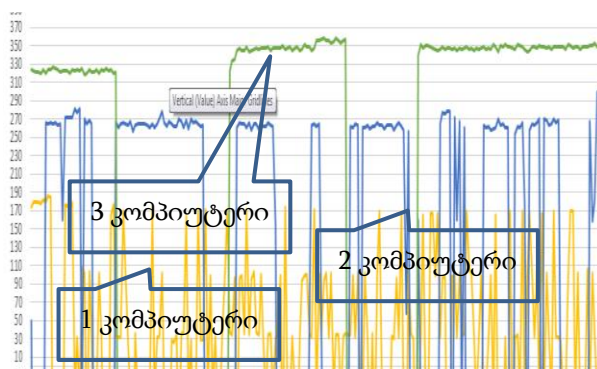


ნახ. 3. კომპიუტერის მიერ მოთხოვნილი აქტიური სიმძლავრეები დაუტვირთავ და დატვირთულ რეჟიმებში

ქსელში კომპიუტერების რაოდენობის ზრდასთან ერთად არითმეტიკული პროგრესიით მატულობს მათ მიერ მოთხოვნილი აქტიური სიმძლავრე. ნახ. 4-ზე მოტანილია ერთი, ორი და სამი დაუტვირთავი კომპიუტერის მიერ მოხმარებული სიმძლავრეები. რომელიმე კომპიუტერის დატვირთვის შემთხვევაში, კიდევ გაიზრდება საჭირო სიმძლავრის ჯამური მნიშვნელობა.



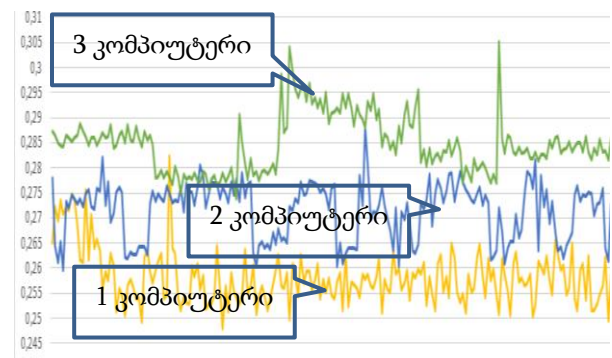
ნახ. 4. კომპიუტერის მიერ მოთხოვნილი აქტიური სიმძლავრეები დაუტვირთავ რეჟიმებში



ნახ. 5. ერთი, ორი, სამი კომპიუტერის მიერ მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრეები დაუტვირთავ რეჟიმებში

კომპიუტერების კვების ბლოკები იმპულსური მოწყობილობებია. ამდენად, მათი რეაქტიული სიმძლავრე ზოგადად უნდა იყოს აქტიურ სიმძლავრეზე მაღალი. როგორც ნახ. 5-დან ჩანს ეს ასეა, უფრო მეტიც – სამჯერ მაღალია. მიუხედავად კომპიუტერის კვების ბლოკზე დატანილი მარკირებისა – „PFC“, რაც მიუთითებს სიმძლავრის კოეფიციენტის PF აქტიურ კორექტირებაზე. ეს რომ ასე არაა, მიუთითებს ნახ. 6, რომელზეც მოტანილია

სიმძლავრის კოეფიციენტის PF მნიშვნელობები ქსელში ერთი, ორი და სამი კომპიუტერის ჩართვის შემთხვევაში. ნახ. 6-დან ჩანს, რომ სიმძლავრის კოეფიციენტების PF მნიშვნელობები არის ძალიან დაბალი. ნახ. 5-ის და ნახ. 6-ის გრაფიკების შედარებით შეიძლება ერთი საინტერესო დასკვნა გავაკეთოთ. რაც მეტი კომპიუტერია ჩართული ქსელში, მით მეტია მოხმარებული რეაქტიული სიმძლავრე, მაგრამ ამავე დროს მეტია სიმძლავრის კოეფიციენტის PF მნიშვნელობაც. მთავარი დასკვნა, რაც შეიძლება აქედან გავაკეთოთ არის შემდეგი: კომპიუტერული კლასი უნდა დავაკომპლექტოთ ისეთი კომპიუტერებით, რომელთა კვების ბლოკებს აქვთ მაღალი სიმძლავრის კოეფიციენტი PF. ზოგადად, ასეთი კვების ბლოკები სერტიფიცირებულია 80 PLUS [5] სერტიფიკატით, რომლის სიმძლავრის კოეფიციენტი PF აღწევს 0,9-ს.



ნახ. 6. ერთი, ორი, სამი კომპიუტერის სიმძლავრეების კოეფიციენტები დაუტვირთავ რეჟიმებში

მიღებული დასკვნა მეტყველებს იმაზე, რომ რეკომენდირებულია კომპიუტერულ კლასში კომპიუტერის კვების ბლოკის პერიოდული გადამოწმება სიმძლავრის კოეფიციენტის PF მნიშვნელობაზე.

დასკვნები

- შემოთავაზებულია კომპიუტერების ენერგომომხმარების პარამეტრების მონიტორინგის სისტემა;
- შემოთავაზებულია სისტემით ჩატარებულია კომპიუტერების მოთხოვნილი სიმძლავრის პარამეტრების ანალიზი;
- შემოთავაზებულია კომპიუტერების ფუნქციური დატვირთვის ორგანიზაციული მართვის მექანიზმი მოთხოვნილი სიმძლავრის შემცირების მიზნით.

ლიტერატურა

1. მუსელიანი თ., იმნაიშვილი ლ., ნაჭყებია შ., მუსელიანი გ., ჩხიკვაძე კ., იარალაშვილი დ. კომპიუტერული ტექნიკის დატვირთვის გავლენა ელექტროენერგიის ხარისხზე. //Georgian Engineering Nevs, # 4. 2011. გვ. 63-66.
2. <https://www.lumel.com.pl/en/>
3. <http://www.adastra.ru/>
4. <https://www.aida64.com/>
5. <https://www.plugloadsolutions.com/80PlusPowerSupplies.aspx>

References (transliterated)

1. Museliani T., Imnaishvili L., Nachkebia Sh., Museliani G., Chkhikvadze K., Iaralashvili D. Impact of computer equipment load on electricity quality. // Georgian Engineering Nevs, # 4. 2011. p. 63-66.
2. <https://www.lumel.com.pl/en/>
3. <http://www.adastra.ru/>
4. <https://www.aida64.com/>
5. <https://www.plugloadsolutions.com/80PlusPowerSupplies.aspx>

ინფორმაცია ავტორების შესახებ

მაგული ბედინეიშვილი, ინფორმატიკის აკადემიური დოქტორი, ასოცირებული პროფესორი, კომპიუტერული ინჟინერიის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, m.bedineishvili@gtu.ge.

ლევან იმნაიშვილი, ტექნ. მეცნ. დოქტორი, პროფესორი, კომპიუტერული ინჟინერიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, limn54@gmail.com.

გოჩა ზედგინიძე, აკადემიური დოქტორი, ასისტენტი, კომპიუტერული ინჟინერიის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, g.zedginidze@gtu.ge.

ლევან იმნაიშვილი, მაგული ბედინეიშვილი, გელა გოდერძიშვილი,
გოჩა ზედგინიძე, არჩილი ჭოველიძე

ლაბორატორიული ექსპერიმენტის დისტანციური ჩატარების ტექნოლოგია

ანოტაცია. სამუშაოში შემოთავაზებულია მიდგომა და ტექნოლოგია დისტანციურად ლაბორატორიული/ნატურული ექსპერიმენტის ჩატარებისთვის. შემოთავაზებული ტექნოლოგია გულისხმობს სტუდენტის კომპიუტერიდან დისტანციურ წვდომას ლაბორატორიული დანადგარის კომპიუტერში, დისტანციურ ვიდეოდაკვირვებას ლაბორატორიულ დანადგარზე და ინტერაქტივის განხორციელებას სტუდენტსა და ინსტრუქტორს შორის.

საკვანძო სიტყვები: კომპიუტერიზებული ლაბორატორიული ექსპერიმენტი, დისტანციური ლაბორატორიული ექსპერიმენტი.

Levan Imnaishvili, Maguli Bedineishvili, Gela Goderdzishvili, Gocha Zedginidze, Archili Tchovelidze

Technology of remote conduct of laboratory experiment

Annotation. The paper proposes an approach and technology for conducting remote laboratory / in-kind experiments. The proposed technology involves remote access from the student's computer to the lab machine computer, remote video surveillance on the lab machine, and interactive interaction between the student and the instructor.

Keywords: Computerized laboratory experiment, remote laboratory experiment.

შესავალი. მიმდინარე პანდემიის პირობებში ძალზედ აქტუალური გახდა საინჟინრო სწავლებაში ლაბორატორიული /ნატურული (შემდგომში, ლაბორატორიული) ექსპერიმენტის დისტანციური ჩატარების უზრუნველყოფა. მიუხედავად იმისა, რომ საკმაოდ კარგად ხერხდება სალექციო და პრაქტიკული სამუშაოების დისტანციურად ჩატარება, ლაბორატორიული სამუშაოები, რომელიც არის სტუდენტისათვის პრაქტიკული უნარების განვითარების ძირითადი საფუძველი, მოითხოვს სოლიდურ დანახარჯებს ლაბორატორიული ბაზის გადართმობის მიზნით.

ლაბორატორიული ექსპერიმენტის დისტანციურად ჩატარების იდეა ახალი არ არის [1,2]. ძირითადად, მისი გამოყენება ხდება დისტანციური სწავლების პროცესში [3]. ამ მიზნით ხდება ლაბორატორიული დანადგარის აღჭურვა სპეციალური აპარატურულ/პროგრამული საშუალებებით, რომელიც საშუალებას იძლევა სტუდენტმა დისტანციურად მართოს ფიზიკურ ექსპერიმენტზე მოქმედი ფაქტორები.

ლაბორატორიული ექსპერიმენტის დისტანციურად ჩატარების შესაძლებლობა ცვლის ლაბორატორიული მეცადინეობის წარმართვისადმი მიდგომას:

- აღარ არის საჭირო სტუდენტის ყოფნა ლაბორატორიულ სივრცეში;

- აღარ არის საჭირო მრავალი სამუშაო ადგილი ლაბორატორიული სამუშაოების ნაკადურად წარმართვისთვის;

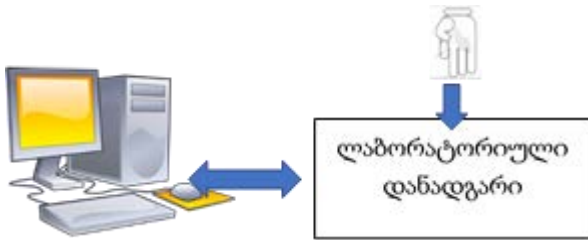
- სტუდენტს შეუძლია ლაბორატორიული სამუშაო შეასრულოს დღე-ღამის ნებისმიერ დროს;

- შესაძლებელი ხდება სტუდენტს მუშაობისათვის გამოეყოს მეტი დრო.

სამუშაოს მიზანი. უმაღლესი სასწავლებლების უმეტესობა ორიენტირებულია დასწრებულ სწავლებაზე და შესაბამისად არის ორგანიზებული მათი ლაბორატორიული სივრცეებიც, ანუ აღჭურვილობა მოითხოვს სტუდენტის ყოფნას ლაბორატორიულ საექსპერიმენტო დანადგართან. მოცემული სამუშაოს მიზანია, პირველ რიგში, პასუხი გაეცეს კითხვას: შესაძლებელია თუ არა არსებული აღჭურვილობის პირობებში დისტანციური ლაბორატორიული ექსპერიმენტის ჩატარება და მეორე, შემუშავებული იქნას შესაბამისი ტექნოლოგია.

მიდგომა ლაბორატორიული ექსპერიმენტის დისტანციურად ჩატარებისადმი.

შემოთავაზებული სამუშაო ეხება ლაბორატორიული ექსპერიმენტის ჩატარების მეთოდოლოგიას (შემდგომში, ლაბორატორიული სამუშაო) იმ დანადგარებზე, რომლებიც აღჭურვილნი არიან და იმართებიან კომპიუტერის საშუალებით. ასეთი დანადგარის [4] განზოგადოებული სტრუქტურა ნაჩვენებია ნახ. 1-ზე.



ნახ. 1. კომპიუტიზებული ლაბორატორიული დანადგარის სტრუქტურა

კომპიუტიზებული ლაბორატორიული დანადგარის (შემდგომში ლაბორატორიული სტენდი) გამოყენების განზოგადოებული არსი მდგომარეობს შემდეგში:

- ხდება ლაბორატორიული დანადგარის კონფიგურირება კომპიუტერის საშუალებით;
- ხდება ექსპერიმენტზე მოქმედი გარე ფაქტორების (საექსპერიმენტო სქემის აწყობა და მომართვა) მართვა კომპიუტერის საშუალებით;
- ხდება ლაბორატორიული დანადგარზე საექსპერიმენტო ტექნოლოგიური პროცესის წარმართვა და მართვა კომპიუტერის საშუალებით;
- ხდება საექსპერიმენტო ტექნოლოგიური პროცესის მონიტორინგი და ანათვლების აღება კომპიუტერის საშუალებით;
- ხდება ანათვლების დაგროვება ჩაშენებულ მონაცემთა ბაზაში და ანათვლების განზოგადოება პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენებით;
- სტუდენტის მიერ ხდება დასკვნების გამოტანა.

გარდა ამისა, ლაბორატორიული დანადგარი იძენს ისეთ თვისებებს, რომელიც კომპიუტერის გარეშე მას ვერ ექნებოდა, რამდენადაც ლაბორატორიულ დანადგართან წყვილში კომპიუტერის არსებობა იწვევს:

- დანადგარის ისეთი თვისებების გამოვლენას, რომელთანაც ადამიანის ფიზიკური შესაძლებლობები არის უძლური (მაგალითად, ძალიან სწრაფი პროცესები);
- სტუდენტის ისეთი უნარების გამომჟღავნებას, რომელიც აუცილებელია კომპიუტიზირებულ დანადგართან სამუშაოდ;
- დანადგართან მუშაობის გაადვილებას (პროცესის მონიტორინგი, ანათვლის აღების გაადვილება, მონაცემების დაგროვება, გათვლების წარმოება და სხვ.);
- ექსპერიმენტის ჩატარების სიზუსტის და უსაფრთხოების გაზრდას.

არსებულ რეალურ პირობებში გვაქვს ლაბორატორიული ექსპერიმენტის ჩატარების ცხრ. 1-ში მოტანილი ვარიანტები. ექსპერიმენტის ჩატარების ვარიანტს წარმოშობს არსებული აღჭურვილობის შესაძლებლობები და მეთოდური მითითებები. ცხრილი 1-დან ერთი რამ ცალსახად გამომდინარეობს, რომ ტექნოლოგიურ დანადგარზე საექსპერიმენტო სქემის აწყობა და მისი გამართვა ხდება „ხელით“, მაგალითად, [5,6] სტუდენტის მიერ მეთოდური მითითებების შესაბამისად ან ინსტრუქტორის მიერ.

რადგან, განვიხილავთ დისტანციური ლაბორატორიული ექსპერიმენტის ჩატარებას მხოლოდ კომპიუტიზებული ლაბორატორიული დანადგარის გამოყენებით, ცხრ. 1-დან უპრიანია გამოყენებული იქნას ვარიანტი 1, რამდენადაც „ხელით“ ჩასატარებელი მანიპულაციები არის მინიმალური. ამ თვალსაზრისით სხვა ვარიანტები არის უფრო კომპრომისული.

ლაბორატორიული ექსპერიმენტის მართვის ვარიანტები

ცხრილი 1

მანქანის დაგროვება და განზოგადოება	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით
მონიტორინგი და ანათვლების აღება	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით
სქემის აწყობა და გამართვა	ხელით	ხელით	ხელით	ხელით	ხელით	ხელით	ხელით	ხელით	ხელით	ხელით	ხელით	ხელით	ხელით	ხელით	ხელით	ხელით
ექსპერიმენტის მართვა	კომპიუტერით	ხელით	ხელით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით
ლაბორატორიული დანადგარის კონფიგურირება	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით	კომპიუტერით	ხელით
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

აქედან გამომდინარე, ცხრ. 1-ის პირველი ვარიანტისათვის შემუშავებულია ლაბორატორიული ექსპერიმენტის დისტანციურად ჩატარებისათვის შემდეგი მიდგომა:

• სტუდენტს უნდა ქონდეს დისტანციურად პირდაპირი წვდომა ლაბორატორიული დანადგარის კომპიუტერთან;

• ლაბორატორიაში მუდმივად უნდა იმყოფებოდეს ინსტრუქტორი, რომელიც ასრულებს სტუდენტის მითითებებს სტენდზე სქემის აწყობის და გამართვის მიზნით;

• სტუდენტსა და ინსტრუქტორს შორის უნდა იყოს დისტანციური აუდიო-ვიდეო ინტერაქტივის საშუალება;

• სტუდენტს უნდა ქონდეს ლაბორატორიულ დანადგარზე დისტანციურად ვიდეო დაკვირვების საშუალება.

შემოთავაზებული მიდგომით, დისტანციური ექსპერიმენტის ჩატარება გულისხმობს ცხრილი 1-ის მიხედვით „ხელით“ სამუშაოების შესრულებას ინსტრუქტორის მიერ, ხოლო ინტელექტუალური სამუშაოს შესრულებას სტუდენტის მიერ. ცხრ. 1-ის პირველი ვარიანტი მოითხოვს ინსტრუქტორისგან მინიმალურ ჩარევებს, ხოლო სხვა სამუშაოს ასრულებს სტუდენტი. მეორე ვარიანტი ითხოვს ინსტრუქტორისგან მეტ ძალისხმევას და ა.შ. ამდენად, დისტანციურად ლაბორატორიული ექსპერიმენტის ჩატარება შესაძლებელია 16-ვე ვარიანტის შემთხვევაში, შესაბამისი მეთოდური მითითების ფარგლებში, არსებული აღჭურვილობის შესაძლებლობებიდან, თუ მისი მოდიფიცირების სიღრმეიდან გამომდინარე.

ლაბორატორიული ექსპერიმენტის დისტანციურად ჩატარების ტექნოლოგიის და სისტემის არქიტექტურის დამუშავება. კომპიუტიზებულ ლაბორატორიულ დანადგარზე ექსპერიმენტის ჩატარება ზოგადად გულისხმობს ორი მოქმედების თანმიმდევრულ განხორციელებას:

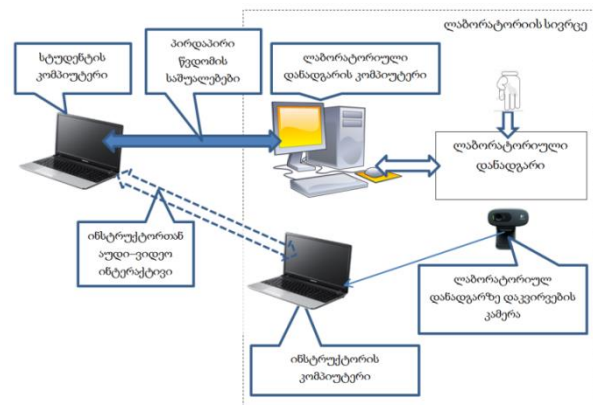
- ლაბორატორიული სქემის აწყობას ან მომართვას ექსპერიმენტის ჩატარებისათვის;
- ანათვლის აღებას.

თანამედროვე კომპიუტერული ლაბორატორიული სტენდები ძირითადად ორიენტირებული არიან მეორე მოქმედების ჩასატარებლად კომპიუტერის გამოყენებით, ხოლო პირველი მოქმედება ხორციელდება „ხელით“ უშუალოდ სტუდენტის მიერ და ხშირ შემთხვევაში ინსტრუქტორის მეთვალყურეობით. ამდენად, ლაბორატორიულ სტენდთან ურთიერთობა ხორციელდება კომპიუტერით და „ხელით“ (ნახ. 1).

დღეს უკვე არ წარმოადგენს სირთულეს, რომ განხორციელდეს დისტანციური წვდომა

ერთი კომპიუტერიდან მეორეზე (მაგალითად, [7]) წვდომად კომპიუტერში მუშაობის „შეგრძნებით“. შესაბამისად, შესაძლებელია სტუდენტი თავისი კომპიუტერიდან დისტანციურად დაშვებული იქნას ლაბორატორიული სტენდის კომპიუტერში. მაგრამ, რჩება პრობლემა, რაც დაკავშირებულია ლაბორატორიულ დანადგარზე სქემის აწყობასთან ან მის მომართვასთან.

ამ პრობლემის გადაწყვეტის მიზნით შემოთავაზებულია შემდეგი მიდგომა. ლაბორატორიულ სივრცეში ლაბორატორიულ დანადგარებთან იმყოფება ინსტრუქტორი, რომელიც სტუდენტის კარნახით ფიზიკურად ახორციელებს სქემის აწყობას ან მომართვას. ცხადია, ეს პროცესი ვერ განხორციელდება სტუდენტსა და ტექნიკურ პერსონალს შორის ინტერაქტივის გარეშე (ნახ. 2).



ნახ. 2. ლაბორატორიული ექსპერიმენტის დისტანციურად ჩატარების არქიტექტურა ინსტრუქტორის ჩარევით

ამდენად, ლაბორატორიულ სივრცეში რამდენიმე ლაბორატორიულ დანადგართან ერთად განთავსებული უნდა იყოს ინსტრუქტორის კომპიუტერი სტუდენტთან ინტერაქტიული კავშირისათვის. ინსტრუქტორის კომპიუტერთან მიერთებულია ასევე დამატებითი ვებ-კამერა, რომლის ხედვის არეშია ლაბორატორიული დანადგარები. ეს ვებ-კამერა საშუალებას აძლევს სტუდენტს ფიზიკურად დააკვირდეს ლაბორატორიულ დანადგარზე განვითარებულ მოვლენებს.

ცხადია, ინტერაქტივის განხორციელების პროგრამული გარსები უნდა არსებობდეს ორივე კომპიუტერზე. აქვე უნდა აღვნიშნოთ, რომ ინსტრუქტორის კომპიუტერზე უნდა არსებობდეს სპეციალური პროგრამული გარსი

სტუდენტების ლაბორატორიულ დანადგარებზე დაშვების მენეჯმენტისთვის.

სტუდენტის მიერ ტექნოლოგიური დანადგარის მართვა და ანათვლების აღება შეიძლება განხორციელდეს ორი გზით:

- როდესაც ტექნოლოგიური დანადგარის მართვის პროგრამა განთავსებულია ტექნოლოგიური დანადგარის კომპიუტერში და სტუდენტს მასზე აქვს დისტანციური პირდაპირი წვდომა;

- როდესაც ტექნოლოგიური დანადგარის მართვის პროგრამა განთავსებულია ტექნოლოგიური დანადგარის და სტუდენტის კომპიუტერებში, ხოლო ეს კომპიუტერები, თავის მხრივ, ქმნიან კომპიუტერულ ქსელს.

პირველი ვარიანტის განხორციელება უფრო მარტივია, ვიდრე მეორესი, მაგრამ ამ უკანასკნელის შემთხვევაში სტუდენტს რჩება განცდა, რომ ის უშუალოდ მუშაობს ტექნოლოგიურ დანადგარზე.

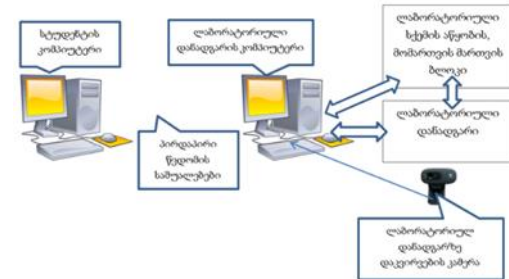
მეთოდური თვალსაზრისით, შემოთავაზებული ტექნოლოგიის ნაკლად უნდა ჩაითვალოს სტუდენტისა და ტექნოლოგიური დანადგარის რგოლში დამატებით ინსტრუქტორის არსებობა. გარდა ამისა, ეს დამატებითი დანახარჯებთანაცაა დაკავშირებული.

პრობლემის აღმოფხვრის მიზნით შემოთავაზებულია ტექნოლოგია, როდესაც სტუდენტი ტრადიციულ „ხელის“ ოპერაციებს ახორციელებს ავტომატიზებული მოწყობილობის დახმარებით. ამ მიზნით ტექნოლოგიურ დანადგარს ემატება მართვის მოწყობილობა შესაბამისი სენსორების და აქტუატორების ჩათვლით (ნახ.3). შესაბამისად, მართვა ხორციელდება ტექნოლოგიური დანადგარის კომპიუტერიდან. ამ შემთხვევაში პროგრამული უზრუნველყოფა უნდა შედგებოდეს ორი ნაწილისაგან:

- დანადგარის აწყობის/მომართვის მართვა;
- ტექნოლოგიური პროცესის მართვა და ანათვლების აღება.

როგორც ნახ. 3-დან ჩანს, ამ ვარიანტის განხორციელებას არ სჭირდება ინსტრუქტორთან ინტერაქტივი. ერთადერთი, რაც იქნება საჭირო – სტუდენტთა მენეჯმენტის პროგრამა. ამ ვარიანტის უპირატესობა კიდევ გამოიხატება იმაში, რომ სტუდენტს საშუალება ექნება მეტი

დრო გაატაროს დანადგართან, თუნდაც ღამის საათებში.



ნახ. 3. ლაბორატორიული ექსპერიმენტის დისტანციურად ჩატარების არქიტექტურა ინსტრუქტორის ჩარევის გარეშე

დასკვნები

- დასაბუთებულია კომპიუტიზებული ლაბორატორიული ექსპერიმენტის უპირატესობა ტრადიციულთან შედარებით.

- შემოთავაზებულია მიდგომა და ტექნოლოგია სტუდენტის პირდაპირი წვდომით კომპიუტიზებულ ლაბორატორიულ დანადგართან და ინსტრუქტორთან ინტერაქციით.

- შემოთავაზებულია ტექნოლოგია კომპიუტიზებული ლაბორატორიული დანადგარის სრული დისტანციური მართვით და ექსპერიმენტის განხორციელებით.

ლიტერატურა

1. Albu, M., Heydt, G. and Holbert, K. (2003). Embedding remote experimentation in power engineering education. IEEE Transactions on Power Systems: TPWRS-00168.
2. Barrero, F., Toral, S., and Gallardo, S. (2008). eDSPLab: remote laboratory for experiments on DSP applications. Internet Research 18, 1: 79-92
3. Javier García Zub a and Gustavo R. Alves (eds.). Using Remote Labs in Education. Two Little Ducks in Remote Experimentation. 2011, University of Deusto Bilbao.
4. Имнаишвили Л.Ш.,Бединишвили М.М., Годердзишвили Г.И., Иашвили Н.Г. Учебный Лабораторный Стенд Scada Систем/Материалы Международной научно-практической конференции «Наука, образование, инновации: апробация результатов исследований», 9 февраля 2017 г., г. Прага, Чехия.
5. იმნაიშვილი ლ., ბედინეიშვილი მ. SCADA სისტემები. მეთოდური მითითებები ლაბორატორიული სამუშაოების შესასრუ-

ლებლად. სტუ-ს ბიბლიოთეკა, კოდი CD – 3523, 2017.

6. გრიგალაშვილი ჯ. მეთოდური მითითებები Arduino - ს შესწავლისათვის. სტუ, 2016.
7. <https://www.teamviewer.com/>

References (transliterated)

1. Albu, M., Heydt, G. and Holbert, K. (2003). Embedding remote experimentation in power engineering education. IEEE Transactions on Power Systems: TPWRS-00168.
2. Barrero, F., Toral, S., and Gallardo, S. (2008). eDSPLab: remote laboratory for experiments on DSP applications. Internet Research 18, 1: 79-92
3. Javier García Zub̃a and Gustavo R. Alves (eds.). Using Remote Labs in Education. Two Little

Ducks in Remote Experimentation. 2011, University of Deusto Bilbao.

4. Imnaishvili L., Bedineishvili M., Goderdzishvili G., Iashvili N. SCADA SYSTEM TRAINING LABORATORY STAND. Materials of the International Scientific and Practical Conference "Science, Education, Innovation: Approbation of Research Results", February 9, 2017, Prague, Czech Republic.
5. Imnaishvili L., Bedineishvili M. SCADA systems. Methodical instructions for laboratory work. GTU Library. Code CD – 3523. 2017.
6. Grigalashvili J. Methodological guidelines for studying Arduino. GTU. 2016
7. <https://www.teamviewer.com/>

ინფორმაცია ავტორების შესახებ

ლევან იმნაიშვილი, ტექნ. მეცნ. დოქტორი, პროფესორი, კომპიუტერული ინჟინერიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, limn54@gmail.com.

მაგალი ბედინეიშვილი, ინფორმატიკის აკადემიური დოქტორი, ასოცირებული პროფესორი, კომპიუტერული ინჟინერიის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, m.bedineishvili@gtu.ge.

გელა გოდერძიშვილი, ტექნ. მეცნ. კანდიდატი, პროფესორი, საინჟინრო ფიზიკის დეპარტამენტი, ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების სასწავლო-სამეცნიერო და საექსპერტო ლაბორატორიის ხელმძღვანელი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, gelag49@mail.ru.

გოჩა ზედგინიძე, აკადემიური დოქტორი, ასისტენტი, კომპიუტერული ინჟინერიის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, g.zedginidze@gtu.ge.

არჩილ ჭოველიძე, მაგისტრი, სისტემების ზედამხედველი, მულტიმედიური საკონფერენციო და უსაფრთხოების სისტემების მართვისა და ექსპლუატაციის საუნივერსიტეტო ცენტრი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, archilichovelidze@gmail.com.

Юрий Коваль

Обзор новых датчиков газа компании FIGARO

Аннотация. Статья знакомит читателей с новыми датчиками контроля качества воздуха внутри помещений, датчиками утечки метана, фреона, датчиками ацетона, углекислого и угарного газа, кислорода, а также раскрывает некоторые особенности их применений.

Ключевые слова: метан, FIGARO, TGS8101, TGS8410, TGS2630, TGS1820, CDM7161, KE-25LF.

Yuri Koval

Overview of the new FIGARO gas sensors

Abstract. This article introduces readers to new indoor air quality sensors, methane, freon, acetone, carbon dioxide and carbon monoxide, oxygen sensors, and also reveals some of the features of their applications.

Keywords: methane, FIGARO, TGS8101, TGS8410, TGS2630, TGS1820, CDM7161, KE-25LF.

Введение. Несмотря на продолжающийся экономический кризис из-за пандемии корона вирусной болезни, а также спадом объемов производства и продаж - рынок датчиков газа продолжает развиваться. Теперь, в компании FIGARO, где с 01.04.20 президентом и директором стал Toshihiro Uda, все больше доминируют продажи датчиков и модулей горючих, а также взрывоопасных газов, а встречи с дистрибьюторами проходят в формате веб-конференций.

Кроме того, в связи с этой пандемией - появились новые тенденции к увеличению спроса на датчики кислорода и датчики контроля качества воздуха компании FIGARO, а именно:

- в респираторах со встроенными датчиками кислорода, которые также используются и в аппаратах искусственной вентиляции легких;
- в детекторах CO₂, которые управляют вентиляцией внутри помещений;
- в детекторах вирусов в выдыхаемом воздухе, которые используют датчик контроля качества воздуха.

Основная часть. Новый, предварительно калиброванный датчик TGS8101, который представляет из себя датчик контроля качества воздуха внутри помещений, относительной влажности и температуры. TGS8101 выполнен по технологии МЭМС (Микроэлектромеханическая система) на одной подложке с интегральной схемой специального назначения по технологии КМОП-МЭМС, является дальнейшим совершенствованием датчика TGS8100 [1], который сейчас серийно производится на заводах FIGARO. Однако, при подключении датчика TGS8100 к внешней интегральной схеме обработки данных, возникают дополнительные расходы, связанные со сложными корпусными и проводными межчиповыми связями, где паразитная связь порождает дополнительный шум. Более продвинутый способ интеграции КМОП-МЭМС в TGS8101- это монолитный подход, где датчик и схемы разрабатываются и

изготавливаются на одной подложке. Монолитная интеграция повышает характеристики датчика за счет уменьшения его размера, потребляемой мощности и шума [2].

TGS8101 будут применяться в автоматизированных системах "умный дом" для контроля качества воздуха, в очистителях воздуха, для управления работой вытяжки воздуха на кухне, в детекторах запаха. Первые образцы TGS8101 станут доступны к приобретению в третьем квартале 2021 года.

Основные характеристики TGS8101 приведены в табл. 1, а внешний вид на рис. 1.

Основные характеристики датчика TGS8101

Таблица 1

Напряжение питания	1,7 ... 3,6 В
Рабочий диапазон влажности	0 ... 100 % RH
Диапазон измеряемых концентраций газа	0,5 ... 100 ppm
Рабочий ток	2 мА
Температура эксплуатации	-40 ... +85 °C
Выходной интерфейс	I2S, SPI



Рис. 1. Внешний вид датчика TGS8101

Датчик утечки метана и водорода TGS8410, изготовленный по МЭМС технологии в корпусе TO-5 (см. рис. 2), который был анонсирован FIGARO еще в 2013 году, после серии испытаний и поиску оптимальных производственных мощностей, ожидает наконец начала своего серийного производства в октябре 2021 года.

Благодаря высокой долговечности и стабильности, датчик метана TGS8140 идеален для таких применений, как, например, портативные газовые детекторы, детекторы газа с автономным электропитанием, в том числе и для контроля утечки метана на газопроводах и газозаправочных станциях.

Новый датчик создает возможность разработки детектора метана, который может надежно проработать около 5 лет всего лишь от одной литиевой батарейки с напряжением 2.8 В и емкостью 2400 мА/ч.



Рис. 2. Внешний вид датчика TGS8140

Новый модуль FCM2630 с датчиком TGS2630 (рис. 2), будет применяться для контроля утечки фреона R32 в системах охлаждения и в кондиционерах.

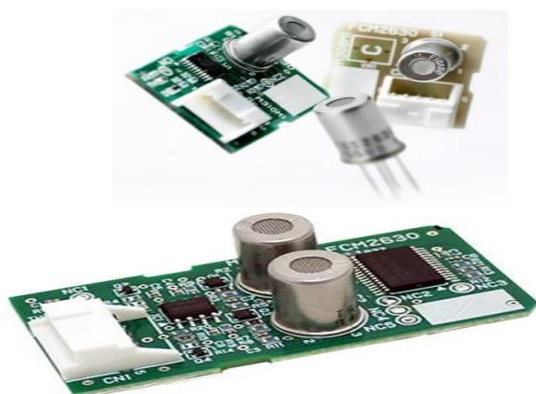


Рис. 3. Внешний вид модулей FCM2630 с датчиками TGS2630

FCM2630 будет иметь заводскую калибровку по измерению утечки фреона, схему температурной компенсации, устойчивость к интерференционным газам, компактное исполнение и соответствие

стандартам IEC60335-2-40 и JRA4068. Модуль FCM2630 будет доступен в трех исполнениях - FCM2630-C01 (аналоговый выход), FCM2630-E00 (цифровой выход с одним датчиком) и FCM2630-H00 (цифровой выход с двумя датчиками). Благодаря использованию двух датчиков, FCM2630-H00 будет иметь повышенный срок службы - 15 лет.

Для измерения уровня концентрации ацетона, компания FIGARO предлагает использовать новый термокаталитический датчик TGS1820 и модуль EM1820 (рис. 4).



Рис. 4. Внешний вид датчика TGS1820 и модуля EM1820

Особенности датчика TGS1820:

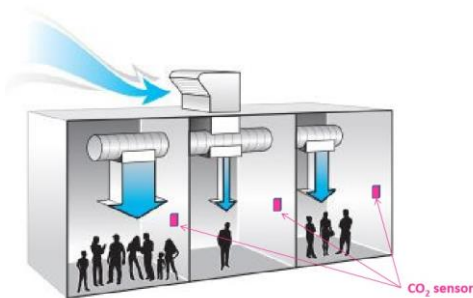
- высокая чувствительность к ацетону;
- высокая селективность к интерференционным газам, таким как этанол и водород;
- быстрое время реакции на изменение концентрации ацетона;
- потребляемая мощность около 160 мВт.

Применения:

- анализаторы ацетона в выдыхаемом человеке воздухе;
- детекторы ацетона;
- датчик нарушения метаболизма при однотипной диете.

Теперь, рассмотрим новые решения компании FIGARO для управления системами вентиляции внутри помещений. Меньше циркуляции свежего воздуха в помещении дает значительные преимущества в экономии энергии, но может способствовать дальнейшему и более широкому распространению коронавируса. Подтверждением этих слов может быть инцидент, который возник на японском круизном лайнере "Бриллиантовая принцесса" зимой 2020 года, где были обнаружены больные коронавирусом, поэтому на судне был объявлен карантин и оно месяц простояло в порту Йокогамы. Среди 3711 человек пассажиров и членов экипажа, 761 человек заболело и 11 человек умерло.

Датчики углекислого газа (CO₂) могут внести свой вклад в вентиляцию с контролем энергопотребления, обеспечивая наилучшее сочетание экономии электроэнергии и вентиляции, см. рис.5.



რის. 5. Использование датчиков CO₂ для эффективного управления системой вентиляции внутри помещений.

Компания Figaro анонсировала новый модульный датчик CO₂ CDM7161 (рис.6) для определения концентрации углекислого газа (двуоксида углерода CO₂). Модуль оснащен двумя инфракрасными сенсорами и отличается высокой точностью при сверхнизком энергопотреблении. В модуле используются два ИК датчика диоксида углерода CO₂, работающие по принципу определения поглощения инфракрасного излучения на разных ИК длинах волн, которые излучаются от одного источника ИК света. Один датчик измеряет интенсивность на частоте поглощения ИК света молекулами CO₂, а второй - интенсивность эталонной ИК частоты, отличную от частоты поглощения ИК света молекулами CO₂. Соотношение между интенсивностями частоты поглощения и эталонной частоты - определяет абсолютную концентрацию углекислого газа в воздухе.



რის. 6. Внешний вид датчика углекислого газа CDM7161

В более простых модулях используется только один датчик, что позволяет осуществлять лишь относительные измерения концентрации углекислого газа. Конструкция с двумя ИК датчиками, работающими на одной ИК частоте, как в датчиках CDM7160, позволяет использовать модуль для получения абсолютных величин концентрации CO₂ в воздухе, а использование нового двухчастотного ИК метода, как в CDM7161, позволяет этим датчикам проводить высокоточные измерения в помещениях с высоким базовым содержанием диоксида углерода – таких, как больницы, учебные заведения и другие места долговременного массового скопления людей.

Образцы датчиков CDM7161 будут доступны к заказу во II квартале 2021 года.

Производство датчиков углекислого газа CDM7160 компанией FIGARO пока приостановлено в связи с пожаром в октябре 2020 года на заводе Asahi Kasei Microsystem в городе Нобеока (Япония), который комплектует их необходимыми электронными компонентами. Поэтому заказы по ним сейчас не принимаются и клиентам рекомендуется использовать похожие аналоги.

Недавно, компания FIGARO освоила производство нового электрохимического датчика кислорода KE-25LF по бессвинцовой технологии с гальваническим типом ячейки (рис. 7). Основные характеристики датчика KE-25LF приведены в табл. 2.



რის. 7. Внешний вид датчика кислорода KE-25LF

Основные характеристики датчика KE-25LF с гальваническим типом ячейки

Таблица 2

Диапазон измерения концентрации кислорода	0...30%	
Температура	+5...+40 °C	
Время отклика (90%)	15 сек	
Атмосферное давление	(0.8~1.2 atm)	
Продолжительность безотказной работы при температуре +20° и стандартной концентрации O ₂ в атмосфере	5 лет	

Выводы. Главными достоинствами нового датчика являются бессвинцовая технология, которая соответствует директиве RoHS₂, отсутствие необходимости во внешнем источнике питания, нет времени предварительного нагрева, быстрый

отклик на изменение концентрации кислорода и отсутствие чувствительности к CO_2 , H_2S и SO_2 .

Применяются электрохимические датчики кислорода в разработке и производстве:

- медицинского оборудования: наркозно-дыхательная аппаратура, респираторы, кислородные обогатители, кислородные инкубаторы, аппараты ИВЛ;

- оборудования для пищевой промышленности: холодильное оборудование, теплицы, рефрижераторы и овощехранилища;

- систем безопасности и климат-контроля: кислородные датчики, пожарные извещатели,

газоанализаторы и сигнализаторы безопасности, кондиционеры, анализаторы топочных и выхлопных газов.

Литература

1. www.figaro.co.jp
2. Barrettino, D.; Graf, M.; Zimmermann, M.; Hagleitner, C.; Hierlemann, A.; Baltes, H. A smart single-chip micro-hotplate-based gas sensor system in CMOS-technology. Analog Integr. Circuits Signal Process. 2004. 39. 275–287

Сведения о авторах

Юрий Анатольевич Коваль, главный инженер компании ООО “СЭА ЭЛЕКТРОТЕХНИКА”, Киев, Украина.
e-mail: yurikov@sea.com.ua

ნუგზარ იაშვილი, შოთა მესტვირისვილი, ქეთევან მახაშვილი

ბუნებრივი გაზის ოდორიზაციის ხარისხის კონტროლის მიკროპროცესორული მოწყობილობა

ანოტაცია: განხილულია ბუნებრივ გაზში, სპეციალური ნივთიერების ოდორანტის დამატების პროცესი და ამ პროცესის ხარისხის კონტროლის ხელსაწყო. ოდორიზაცია წარმოადგენს გაზის საყოფაცხოვრებო და საწარმოო პირობებში უსაფრთხოდ გამოყენების აუცილებელ ოპერაციას. ნაჩვენებია ოდორიზაციის დანადგარი და მისი გაზში ინტენსივობის განსაზღვრის ხელსაწყო.

საკვანძო სიტყვები: ბუნებრივი გაზი, ოდორანტი, ოდორიზაცია, გაზის სუნის ინტენსივობის ხელსაწყო.

Nugzar Iashvili, Shota Mestvirishvili, Ketevan Makhashvili

Microprocessor Devise for Quality Control of Natural Gas Odorization

Abstract. The report examines the issues of determining the quality of the process of adding odorant in natural gas. The place of odorisation in the network of household gas supply to the consumer is shown. A general algorithm for gas odorization is given. The main requirements for the microprocessor of the odorization quality control device are formulated.

Keywords: Gas odorization; Odorant; Quality control; Microprocessor device.

შესავალი. ბუნებრივი გაზი, რომელსაც მოიხმარს მოსახლეობა უსუნო გაზია. ბინაში გაზის გაჟონვის აღმოსაჩენად არსებობს მეტად მარტივი, საიმედო და აპრობირებული ხერხი: ბუნებრივ გაზს უმატებენ მძაფრი, უსიამოვნო სუნის მქონე ნივთიერებას ე.წ. ოდორანტს. შესაბამისად, ამ პროცესს ბუნებრივი გაზის ოდორიზაცია ეწოდება. ჩვეულებრივ ოდორიზაციას ახდენენ გაზის მოსახლეობისათვის მიწოდების წინ გაზგამანაწილებელ სადგურებში (გგს).

ზოგადად, ოდორანტებს წაეყენებათ სამი მთავარი მოთხოვნა: 1) ის არ უნდა იყოს ადამიანის ჯანმრთელობისათვის მავნე, მომწამვლელი და სახიფათო; 2) ოდორანტის დამატებით ბუნებრივმა გაზმა უნდა შეიძინოს სპეციფიკური სუნი რომელიც მკვეთრად უნდა განსხვავდებოდეს სხვა სუნებთან; 3) ოდორანტი არ უნდა იწვევდეს გაზის მიღების და დანადგარების დაზიანებას-კოროზიას. საყოფაცხოვრებო გაზის ოდორიზაციისათვის გამოიყენება სხვადასხვა ტიპის ნივთიერებები ოდორანტები: კაპტანი, პენ-კაპტანი, ეთილ-მერკაპტანი, ბუთილმერკაპტანი და სხვა.

ძირითადი ნაწილი. გაზში დამატებული ოდორანტის რაოდენობა უნდა იყოს ისეთი, რომ მისი კონცენტრაცია საკმარისი აღმოჩნდეს ნორმალური ყნოსვის მქონე ადამიანის მიერ შეგრძნებისათვის და ამავე დროს გაზის მოცულობითი კონცენტრაცია არ უნდა აღემატებოდეს აფეთქების ქვედა ზღვარის 1/5-ს. პრაქტიკულად გამოთვლილია, რომ ეს

მნიშვნელობა შეადგენს 10-დან 30-მდე გრამს 1000 მ³ გაზზე და ის დამოკიდებულია გაზის ხარისხზე, წნევაზე, ტემპერატურაზე, გაზგაცვანილობის ქსელის მდგომარეობაზე. მის სიგრძეზე, გაზის ნაკადის ხაზოვან სიჩქარეზე და სხვა ფაქტორებზე. ყოველივე ეს მიუთითებს, რომ ოდორიზაცია არ არის მარტივი პროცესი და შესაბამისად, ოდორიზაციის დანადგარი საკმაოდ რთული სტრუქტურისაა.

არსებობს ბუნებრივი გაზის ოდორიზაციის რამდენიმე ხერხი:

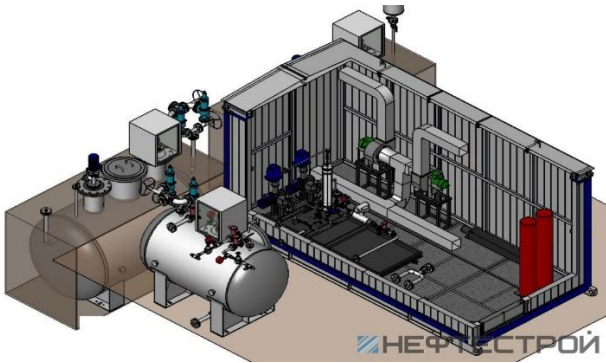
1. გაზის ნაკადში ოდორანტის წვეთოვანი შეყვანა;

2. გაზის ნაკადში ოდორანტის ფითილური ხერხით შეყვანა;

3. გაზის ნაკადში ოდორანტის ბარბოტაჟული მეთოდით შეყვანა.

ავტომატიზაციისა და საკონტროლო-გამზომი ხელსაწყოების გამოყენებისა. ოდორიზაციის ერთ ერთი ავტომატური დანადგარი ნაჩვენებია ნახ. 1-ზე.

როგორც აღვნიშნეთ გაზის ოდორიზაცია არ არის მარტივი პროცესი და შესაბამისად, რთულია ოდორიზაციის დანადგარი. ცხადია, რომ აუცილებელია თვით ოდორიზაციის კონტროლი, რადგან ოდორანტის ნაკლებობა ან მეტობა არასასურველია. ოდორანტი თუ მცირე კონცენტრაციით არის დამატებული ბუნებრივ გაზში, ის ვერ ასრულებს თავის დანიშნულებას. მომხმარებელი ვერ გაიგებს



ნახ. 1. ბუნებრივი გაზის ოდორიზაციის ავტომატიზირებული დანადგარი

ჟონავს თუ არა მეთანი, რადგან ვერ შეიგრძნობს ოდორიზებული გაზის უსიამოვნო მკვეთრ სუნს. მეორე მხრივ, თვით ოდორანტი წარმოადგენს მავნე გაზს და მისი მაღალი კონცენტრაცია ბუნებრივ გაზში სახიფათოა გაზის მომხმარებლისათვის.

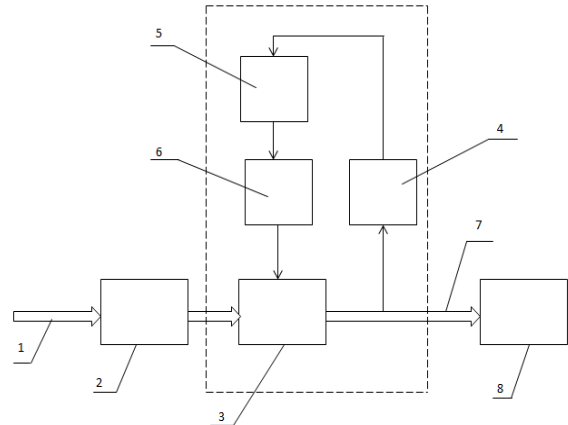
ცხადია, რომ აუცილებელია თვით ოდორიზაციის პროცესის კონტროლი, რათა განსაზღვროს ოდორიზაციის ხარისხი. ბუნებრივი გაზის ოდორიზაციის ადგილი მომხმარებლისათვის გაზის მიწოდების ქსელში ნაჩვენებია ნახ.2-ზე.

თვით ოდორიზაციის ახასიათებენ ოდორანტის შენახვის ჭურჭელის ტევადობით, წარმადობით, ტუმბოს სიმძლავრით და ოდორიზაციის პროცესის ოპერაციების კონტროლის დონით.

დასკვნა. გაზგამანაწილებელ სადგურებში ოდორიზაციის პროცესის შემდეგ მოითხოვება სპეციალური მოწყობილობის ოდორანტის კონცენტრაციის განსაზღვრის ანალიზატორის დაყენება, რომლის დანიშნულებაცაა განსაზღვროს ბუნებრივ ოდორიზებულ გაზში მერკაპტანის კონცენტრაცია. ხელსაწყო მუშაობს ავტომატურად ადამიანის გარეშე და არ მოითხოვს ტექნიკურ მომსახურებას.

ოდორიზაციის ხარისხის განსაზღვრა შესაძლებელია აგრეთვე სპეციალური ხელსაწყოთი: გაზის სუნის ინტენსივობის ინდიკატორით. ინდიკატორი არსებული სტანდარტის შესაბამისად განსაზღვრავს ბუნებრივი გაზის ოდორიზაციის ხარისხს, რომელიც გამოიხატება ქულებით, რომელიც შესაძლებელია დავაკავშიროთ ოდორანტის რაოდენობასთან რომელიც იზომება მგ/მ³-ში.

ინდიკატორი მუშაობს გაზის სუნის განსაზღვრის ელექტროქიმიური მეთოდით.



ნახ. 2. ოდორიზაციის ადგილი მომხმარებლისათვის გაზის მიწოდების ქსელში:

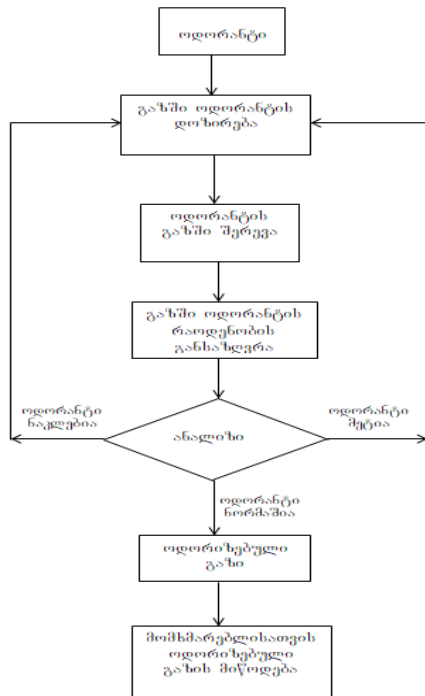
- 1 - მაგისტრალური გაზი; 2 - გამანაწილებელი სადგური; 3 - ოდორიზაციის მოწყობილობა; 4 - დოზირების ბლოკი; 5 - ოდორანტის ჭურჭელი; 6 - ოდორიზაციის საკონტროლო ხელსაწყო; 7 - ოდორიზებული გაზი; 8 - მომხმარებელი

ბუნებრივი გაზის ოდორიზაციის პროცესის ზოგადი ალგორითმი მოცემულია ნახ.3-ზე.

არსებობს ოდორიზაციის ავტომატიზაციის სხვადასხვა სტრუქტურის მქონე სისტემები და მოწყობილობები, მაგრამ მათთვის საერთოა შემდეგი შემადგენელი ნაწილები: ოდორანტის მოცულობა (ჭურჭელი); დოზირების ბლოკი; წინასწარი და სუფთა გაწმენდის ფილტრები; ოდორანტის მიწოდების სენსორი; ვენტილაციის მოწყობილობა; გაზის ხარჯზომი; ხარისხის კონტროლის ხელსაწყო, დაგზიანების კონტროლის ხელსაწყო და მართვის მიკრო-პროცესორული ბლოკი.

მართალია ასეთი სისტემის ცალკეული ელემენტები რეალიზებულია არსებულ დანადგარებში, მაგრამ სრული მოცულობით ოდორიზაციის ავტომატიზაციის კომპლექსური სისტემა ჯერ ჯერობით არ არსებობს. ავტომატიზაციის კომპლექსური სისტემის აუცილებელი შემადგენელი ძირითადი მოწყობილობებია: ელექტრომაგნიტური სარქველი, ფილტრიანი ტუმბო, დონის სენსორი და ორკედლიანი ჭურჭელი ოდორანტისათვის. ამჟამად მიმდინარეობს მუშაობა ამ ცალკეულ

მოწყობილობების სრულყოფაზე. განსაკუთრებით ეს ეხება ოდორანტის დონის განსაზღვრის ინტელექტუალურ სენსორს,



ნახ. 3. ბუნებრივი გაზის ოდორიზაციის პროცესის ზოგადი ალგორითმი

რომელიც ეფუძნება ჰიდროსტატიკურ მეთოდს, რადგან ეს მეთოდი საშუალებას იძლევა მიკროპროცესორული ბლოკით განისაზღვროს წნევის ქვეშ მყოფ ჭურჭელში სითხის (ოდორანტის) დონე და მოცულობა (მასა).

კონსტრუქციულად ოდორიზაციის დანადგარი შედგება ორი ნაწილისაგან: ტექნოლოგიური ბლოკი და მართვის ბლოკი.

ყოველივე ზემოთ აღნიშნულის გათვალისწინებით ჩამოყალიბებული იქნა გაზის ოდორიზაციის პროცესის ავტომატიზაციის სისტემისადმი ძირითადი მოთხოვნები, რომლებიც ჩადებული უნდა იქნას სისტემაში:

- ოდორიზაციის პროცესის უწყვეტი კონტროლი;
- ოდორიზაციის დანადგარის მუშაობის კორექტირების შესაძლებლობა;
- დანადგარში წარმოქმნილი შეფერხებებისა და ავარიული სიტუაციების გამოვლენა;
- არასტანდარტულ სიტუაციებში დროულად რეაგირების შესაძლებლობა;
- ოდორიზაციის ნორმის დაწესება და მისი განუწყვეტელი კონტროლი;
- მართვის ცენტრში ინფორმაციის გადაცემის შესაძლებლობა;

ლიტერატურა

1. Kovalev B.K. Nekotorye problemy odorizacii gaza. Vestnik Gazprommasa. Vypusk 1. 201.
2. Rybkin D.E. Kontrol odorizacii: nos ili pribor? M.: Gaz Rossii. 2014. No 3.
3. Staskevici N.L. Spravochnik po gazosnabzeniu i ispolzovaniu gaza. Leningrad: Nedra. 1990.
4. Skaftymov N.D. Spravochnik po gazosnabzeniu i ispolzovaniu gaza. Leningrad: Nedra. 1990.

ინფორმაცია ავტორების შესახებ

ნუგზარ იაშვილი - საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ავტომატიზაციის ცენტრი, დირექტორი, თბილისი, საქართველო, n.iashvili@gtu.ge;

შოთა მესტირიშვილი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო, sh.mestvirishvili@gtu.ge

ქეთევან მახაშვილი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, აგრობიზნესის ფაკულტეტი, პროფესორი, თბილისი, საქართველო. qotoko@gmail.com

Константин Агеев

Устройство обнаружения утечки газов «Кристалл» для жилых помещений, система мониторинга утечки газов «CERBER»

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы создания сигнализатора утечки газов и системы мониторинга, построенного на базе этого устройства.

Ключевые слова: утечка газов, газосигнализатор, электромагнитный клапан, система мониторинга, алгоритм работы.

Konstantin Ageev

Residential gas leak detection device "Crystal" and gas leak "CERBER" monitoring system

Annotation. The report discusses the issues of creating a gas leak detector and a monitoring system based on this device.

Key words: gas leakage, gas detector, solenoid valve, monitoring system, work algorithm.

Введение. Предупреждение аварийных ситуаций при эксплуатации газового оборудования очень важный и необходимый участок работы в цепочке поставки и потребления бытового газа. Статистика говорит о том, что ежедневно в мире происходят взрывы бытового газа, разрушаются дома, гибнут люди и животные. Ещё трагичнее выглядит статистика гибели людей и животных от угарного газа.

Немного из истории разработки. Цель разработки – создание системы предупреждения аварий при использовании газа в быту, появления угарного газа в помещениях, увеличения температуры окружающей среды в помещении до критической температуры ($+54^{\circ}\text{C}$). Работа системы должна быть максимально автономной, алгоритм работы системы должен исключать человеческий фактор в управлении подачи газа в помещение (здание), где концентрация газа превышает предельно допустимые значения.

Система мониторинга утечки газа «CERBER» была разработана в 2011 году в результате совместной работы специалистов двух предприятий - частного внедренческого научно-производственного предприятия «Укрэкспо-процесс» и частного малого предприятия «Кристалл».

Частное внедренческое научно-производственное предприятие "Укрэкспо-процесс" основано 21 декабря 1991. Основным видом деятельности является инженерно-техническое обеспечение производства, внедрение новейших технологий и изделий отечественных товаропроизводителей.

Частное малое предприятие «Кристалл» основано 20 февраля 1992 года. Основным видом деятельности предприятия является - конструкторская разработка и серийное производство электронных блоков любой сложности по техническим заданиям Заказчиков. В

течение 28 лет предприятие изготовило и поставило в адрес Заказчиков больше 4 миллионов электронных изделий, а их ассортимент за этот период составил более 150 наименований.

На протяжении последних 15 лет ПВНВП "Укрэкспо-процесс" успешно сотрудничает с ЧМП "Кристалл", именно поэтому специалисты двух компаний начали работы по реализации проекта внедрения системы безопасного использования бытового газа.

В 2011 году были разработаны, впервые в Украине сертифицированы по стандарту Европы ДСТУ EN 50194: 2009, запатентовано в Украине, и начато производство газосигнализаторов моделей D&K и системы мониторинга утечки газа «CERBER», с целью оперативного получения аварийными службами сигналов об утечке и превышение допустимой безопасной концентрации газа. В 2012 году система мониторинга утечки газа

«CERBER» вошла в число призеров всеукраинского конкурса качества продукции «100 ЛУЧШИХ ТОВАРОВ УКРАИНЫ». В этом же 2012 году по инициативе генерального директора Союза предпринимателей малых, средних и приватизированных предприятий Украины Быковца Вячеслава Михайловича и Минэнерго Украины в городе Хмельницком на базе предприятия по газоснабжению и газификации ПАО "Хмельницкгаз" состоялась Всеукраинское специальное техническое совещание по вопросу внедрения газосигнализаторов модели D&K 2-A-GS и системы мониторинга утечки газа "CERBER", по итогам которой было принято решение предложить всем областным предприятиям по газоснабжению внедрить «пилотные проекты» по установке системы «CERBER» и газосигнализаторов D&K.

Основная часть. Алгоритм работы системы «CERBER». Газосигнализатор модели D&K, который установлен в помещении, при

превышении допустимой до взрывоопасной концентрации газа (для метана 0,5%) или превышении допустимого безопасного уровня угарного газа (0,005%), превышения температуры окружающей среды свыше 54°C включает аварийную звуковую (не ниже 85 дБ) и световую сигнализации, выключает отсекающий клапан (при его наличии в помещении), одновременно передает информацию на ПК диспетчера аварийной газовой службы об адресе, где установлен газосигнализатор, данные владельца помещения (Ф.И.О., телефоны и т.д.) и вид газа, по которому состоялось срабатывание газосигнализатора. Время передачи информации после срабатывания газосигнализатора не более 10 секунд.

Время срабатывания газосигнализатора после достижения установленных уровней концентраций газов по метану не более 30 секунд, по угарному газу не более 60 секунд. Кроме того, газосигнализатор рассылает тревожные смс-сообщения на 10 номеров мобильных телефонов (владельца, соседей, родственников и т.д.), которые владелец заранее записал в память газосигнализатора. По предложению специалистов

аварийной газовой службы, где проходило тестирование системы, предусмотрена функция удаленного (с пульта диспетчера) отключения магистралей газоснабжения (при наличии управляемого вентиля).

Вся система мониторинга утечки газа «CERBER» состоит из газосигнализаторов, центрального блока и программного обеспечения, устанавливается на рабочем месте оператора аварийной газовой службы за 20 минут и не требует каких-либо дополнительных материалов и работ. В системе предусмотрено одновременную работу со всеми операторами мобильной связи. Один центральный блок системы одновременно обслуживает любое количество абонентов, в базовом варианте 200 000.

В 2019 г. по предложению заказчиков система мониторинга утечки газа «CERBER» была доработана и получила новый алгоритм работы и новые функции, что делает систему более универсальной и надёжной в работе.

В результате доработки система получила новые состав и алгоритм работы.

Пример системы приведен на рис 1., где:

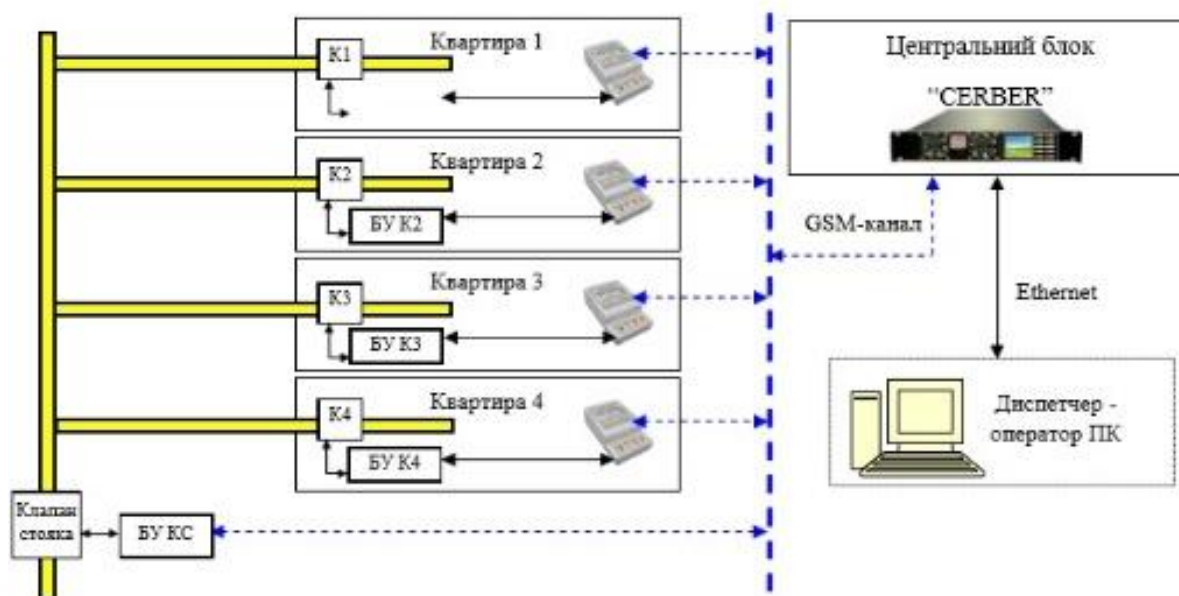


Рис. 1.

--- проводное соединение
--- беспроводное соединение
(GSM-канал или радиоканал)

К1 - электроклапаны отсекающие с датчиком положения штока, рабочее напряжение 12 В постоянного тока, устанавливаются в квартирах. Клапан стояка - электроклапан отсекающий с датчиком положения штока, рабочее напряжение 12 В постоянного тока, устанавливается на стояке.

БУ К1 - блок управления клапанами, которые устанавливаются в квартирах. Напряжение питания

БУ К1(Н) 220В, 50Гц.

Блок управления состоит из аккумулятора, схемы преобразования напряжения переменного 220 В в напряжение постоянного тока необходимого для питания схемы радиомодуля, схемы зарядки аккумулятора, схемы датчика положения штока клапана.

Функции БУ К1(Н):

- обеспечение необходимого напряжения питания для работы клапана, в т.ч. от встроенного аккумулятора в случае отключения сетевого напряжения 220В;

- обеспечение передачи импульса отключения от газосигнализатора клапану;

- обеспечение передачи информации о положении штока клапана через газосигнализатор на центральный блок "CERBER" и ПК диспетчера аварийной службы.

БУ КС - блок управления клапаном, который устанавливается на стояке. Напряжение питания БУ КС 220В, 50Гц. Блок управления состоит из аккумулятора, схемы преобразования напряжения переменного 220 В в напряжение постоянного тока необходимого для питания схемы радиомодуля, GSM- модуля, схемы зарядки аккумулятора, схемы датчика положения штока клапана.

Функции БУ КС:

- обеспечение необходимого напряжения питания для работы клапана, в т.ч. от встроенного аккумулятора в случае отключения сетевого напряжения 220В;

- обеспечение передачи импульса отключения клапану от газосигнализаторов, установленных в квартирах, газовое оборудование которых подключено к стояку;

- обеспечение формирования импульса отключения по заданному алгоритму

- количество газосигнализаторов, которые включили аварию по любому газу или температуре на протяжении установленного времени. Например, 3 газосигнализатора сработали в течении 5 минут. Параметры (количество сработавших газосигнализаторов и время) алгоритма может менять, по каналу радиомодуля или GSM- модуля, оператор аварийной службы;

- обеспечение передачи информации о положении штока клапана на центральный блок "CERBER" и ПК диспетчера аварийной службы.

Алгоритм работы клапанов (квартирный, стоячный, магистральный)

При определении алгоритма работы трёх видов клапанов – квартирный, стоячный и магистральный, мы выбирали из двух возможных вариантов:

1) включение каждого вида клапана происходит при достижении концентрации газа определённого значения. Например, квартирный клапан перекрывает подачу газа при достижении концентрации значения 0,55% метана в окружающем воздухе, стоячный клапан при 0,75% и магистральный клапан при 1,1%;

2) включение квартирного клапана происходит при достижении концентрации газа определённого значения, для стоячного и магистрального клапанов происходит через

определённые временные установки. Например, квартирный клапан перекрывает подачу газа при достижении

3) концентрации значения 0,55% метана в окружающем воздухе, стоячный клапан перекрывается при условии непрерывного наличия концентрации более 0,55% в течении времени Т1, магистральный клапан перекрывается при условии непрерывного наличия концентрации более 0,55% в течении времени Т2. Значение времени Т1 всегда меньше Т2, и они устанавливаются определённым значением при заводской калибровке. В дальнейшем Т1 и Т2 могут быть изменены администратором системы.

Первый вариант имеет преимущество в условиях лабораторных испытаний и оказывается очень неточным в реальных условиях эксплуатации газовых установок и аварийных ситуациях. Опыт показал, что неточность связана с различными условиями эксплуатации (температура окружающей среды, атмосферное давление, влажность), которые значительно влияют на концентрацию газа в различных точках помещения. Так, измерения прецизионным измерителем газа при включенной, но не зажжённой одной из 4 газовых горелок бытовой газовой плиты показали в четырёх точках над газовой плитой значения в момент срабатывания газосигнализатора – 0,55% в месте установки газосигнализатора, 0,38% - в 40 см от сигнализатора по горизонтали вправо и 0,8% - в 40 см влево. Специалисты это объясняют «плохим» свойством перемешивания метана с воздухом, что приводит к неоднородности концентрации в реальных условиях аварийной ситуации.

Второй вариант устраняет недостатки первого и даёт возможность более гибкой настройки работы системы в целом уже во время её эксплуатации. Поэтому выбор остановили на втором варианте.

В конструкции предусмотрено изменение значений Т1 и Т2 программно, без демонтажа газосигнализатора, при помощи ПО (установлено в газосигнализаторе) и sms – сообщений. Настраиваемый параметр- время ожидания повторного анализа Т1, Т2, величина в секундах. Диапазон допустимых значений 1...999 сек.

На стадии настройки и заводской калибровки параметр Т1 устанавливается в значение по умолчанию 180 сек, параметр Т2 – 240 сек.

Все права администратора мы передаём предприятию – заказчику.

Выводы. В системе мы использовали клапаны производства Турции, на шток которых устанавливаем датчик положения штока, таким образом, не изменяя и не вмешиваясь в конструкцию клапана, мы получаем функцию контроля положения штока. Для надёжной работы газосигнализаторов D&K 2-A-GS и системы мониторинга утечки газа "CERBER" мы применяем

комплектующие ведущих мировых производителей электронных компонентов – датчики фирмы “FIGARO” (Япония), микроконтроллеры и специальные микросхемы фирмы “MICROCHIP” (США).

Внедрение и эксплуатация газосигнализаторов моделей D&K 2-A-GS и системы мониторинга утечки газа "CERBER" позволит предупредить аварийные ситуации и значительно уменьшить количество жертв и разрушений зданий при эксплуатации газового оборудования в быту.

Литература

1. EN50194-1. Аппарат только сигнализация для обнаружения горючих газов в жилых помещениях. Часть 1. Методы испытаний и требования к характеристикам.
2. EN50291-1. Детекторы газа. Электрооборудование для обнаружения окиси углерода в домашних условиях. Часть 1. Методы испытаний и требования к рабочим характеристикам.

3. TGS3870. Техническая информация для комбинированных датчиков метана и окиси углерода, 12/2005.

4. JP2004309343A. Способ управления полупроводниковым газовым датчиком. 2004.

5. Перекрестная чувствительность датчиков TGS26XX. Ноябрь. 2008. Figaro Engineering Inc.

References (transliterated)

1. EN50194-1. Alarm-only apparatus for the detection of combustible gases in domestic premises. Part 1. Test methods and performance requirements.
2. EN50291-1. Gas detectors - Electrical apparatus for the detection of carbon monoxide in domestic premises. Part 1: Test methods and performance requirements.
3. TGS3870. Technical Information for Combination Methane and Carbon Monoxide Sensors. 12/2005.
4. JP2004309343A. Method for driving semiconductor gas sensor. 2004 г.
5. Cross sensitivity of TGS26XX sensors. November, 2008. Figaro Engineering Inc.

Сведения об авторах

Константин Романович Агеев – Директор частного предприятия “Кристалл”, г. Хмельницки, Украина.
ageev.avk@gmail.com

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

Светлана Клепикова

Структурные взаимосвязи подсистемы управления энергоэффективностью
предприятия с использованием искусственных нейронных сетей

Аннотация. На основе опыта автора по применению искусственных нейронных сетей совместно с методами экспертных оценок и корреляционного анализа для расчёта прогнозного показателя энергоёмкости предприятия с целью использования результатов при управлении его энергоэффективностью предложено создание группы интеллектуального менеджмента, определены ее профессиональный состав, функции и содержание взаимодействия со структурными подразделениями и руководством предприятия.

Ключевые слова: управление энергоэффективностью, планирование, искусственные нейронные сети, прогнозный показатель, группа интеллектуального энергоменеджмента.

Svitlana Klepikova

Structural relationships of the enterprise energy efficiency management subsystem
using neural networks

Annotation. It is proposed to create an intellectual management group, determine its professional staff, functions and content of interaction with structural units and enterprise management. The proposal is based on the author's experience in the use of artificial neural networks together with the methods of expert assessments and correlation analysis to calculate the predicted indicator of the energy intensity of an enterprise in order to use the results in managing its energy efficiency.

Key words: energy efficiency management, planning, neural networks, forecast indicator, intellectual energy management group.

Введение. Настоящий этап совершенствования управления экономикой характеризуется переходом к цифровой экономике. В Украине Распоряжением Кабинета Министров от 17 января 2018 № 67-р. принята Концепция развития цифровой экономики и общества Украины на 2018-2020 годы, согласно которой одной из основных целей является технологическая и цифровая модернизация промышленности [1].

Одним из методов используемых в некоторых областях экономической деятельности является метод искусственных нейронных сетей (ИНС). Среди исследований нейронных сетей для использования прогнозирования финансовых рынков следует выделить работы Kuan C., White H. [2], Swanson N. [3], которые доказали эффективность ИНС при анализе временных рядов. Garcia R., Genay R. [4], Qi M. и Madala G. [5] обосновали полезность нейронных сетей для анализа трендов на фондовом рынке, а Jorion P. [6] - для прогнозирования валютного курса.

Автором была сделана попытка использовать ИНС при решении исключительно важной для страны проблемы повышения энергоэффективности производства, поскольку показатель энергоёмкости ВВП Украины один из худших в Европе, а

промышленность является одной из наиболее энергопотребляющих отраслей.

Предложенная автором методика позволяет с помощью ИНС, а также использованием метода экспертной оценки и корреляционного анализа на основе предшествующих статистических данных вычислять прогнозное значение показателя энергоёмкости, представляющего отношение объема средств затраченных на энергоносители к единице стоимости выпущенной продукции [7].

Цель работы. На примере управления энергоэффективностью предприятия предложить структуру и определить содержание взаимодействия подразделений предприятия при использовании искусственных нейронных сетей для определения прогнозных показателей при планировании производственной деятельности.

Основной материал. Полученный при выполнении работы опыт привёл к выводу, что эффективное использование методического подхода расчёта прогнозного значения показателя энергоёмкости предприятия с помощью нейронных сетей требует: систематического накопления ежегодных статистических данных, как самого показателя, так и факторов, которые на него влияют; анализа расчётов и установления корректности данных с точки зрения воздействия на

рассчитываемый показатель; выявление типичных расхождений в трактовке того или иного фактора и введение соответствующих корректировок; учёта особенностей предприятия; проведения с помощью ИНС исследований по выбору рациональных значений планируемых показателей производства, влияющих на показатель энергоёмкости; исследования по повышению точности прогнозирования за счёт изменений в структуре и параметрах нейронной сети и др.

Такой широкий набор обязанностей и необходимость систематического их совершения приводит к выводу о целесообразности создания в структуре управления предприятием подструктуры, условно **группы интеллектуального энергomenеджмента** (группы ИЭМ) со

показателей предприятия на следующий год и прогнозного объёма экономии средств от повышения энергосбережения;

6) Контроль за ежегодным накоплением статистических данных, необходимых для обучения нейронной сети и прогнозирования;

7) Проверка адекватности нейронной сети путём сопоставления рассчитанного прогнозного показателя и фактически достигнутого;

8) Анализ и выявление причин существенных расхождений рассчитанного прогнозного показателя энергоёмкости и фактически достигнутого;

9) Исследование влияния входных факторов на значение показателя энергоёмкости и представление руководству предприятия данных для принятия управленческих решений вариантов использования



Рис.1. Структурные взаимосвязи подсистемы управления энергоэффективностью предприятия с использованием ИНС

следующими функциями:

1) Определение, с учётом особенностей предприятия, показателей, которые должны быть входными факторами нейронной сети. Для чего необходимо:

- создание экспертной группы;
- выполнение априорного ранжирования показателей;
- проверка согласованности мнений экспертов по критерию Кендела и Пирсона [7];

2) Обеспечение корректного учёта каждого из входных факторов;

3) Обучение (синтез) нейронной сети, исходя из исторического опыта (статистические данные предприятия предыдущих лет);

4) Анализ в течении года хода выполнения запланированных показателей - входных факторов ИНС, определения корректности их учёта и текущее корректировки выхода ИНС - показателя энергоёмкости предприятия.

5) Расчёты прогнозного значения показателя энергоёмкости, на этапе предварительного планирования конечных значений плановых

объёмов экономии средств от уменьшения затрат на энергоресурсы;

10) Изучение возможности и целесообразности использования кроме PERCEPTRON других структур искусственных нейронных сетей.

Перечень функциональных обязанностей специалистов вышеуказанной группы указывает на необходимость надлежащей их квалификации и хорошее знание производственного процесса.

Напомним, что основная цель использования искусственных нейронных сетей - это обеспечение дополнительной информации экономического характера при принятии управленческих решений на этапе планирования при определении объёмов средств, в частности на программы энергосбережения. На объём этих средств влияет объём ожидаемой экономии за счёт повышения энергоэффективности предприятия, так как это может рассматриваться как дополнительный источник инвестирования. Этот объём рассчитывается с помощью прогнозного показателя энергоёмкости, а для этого нужно значение планируемых на следующий год показателей -

входных факторов ИНС. Поскольку планирование этих показателей является процессом постепенного приближения к конечным значениям вследствие учёта тех или иных внутренних и внешних обстоятельств (договоров, кредитов, инвестиций и др.), которые могут изменяться в процессе планирования, привлечение расчётов, сделанных с помощью ИНС очень полезны, благодаря скорости и конкретности полученной информации. В предложенной модели управления это отражается наличием прямых и обратных связей группы ИЭМ с руководством предприятия для оперативного обмена информацией (Рис. 1).

Особенностью предложенной структурной схемы является выделение группы ИЭМ, как *отдельной подструктуры*, которая имеет связь с высшим руководством предприятия. Это обусловлено, во-первых, тем, что данная группа состоит из специалистов разного профиля: специалистов по энергоменеджменту, финансовым вопросам, специалистов по ИТ-технологиям и др. Во-вторых, для расчётов ИНС нужны основные показатели - входные факторы ИНС, которые будут заложены в производственные планы предприятия. В-третьих, на этапе постепенного уточнения плановых показателей на следующий год целесообразно оперативное взаимодействие между группой ИЭМ и руководством предприятия, что ускоряет процесс принятия рациональных решений.

Связи группы ИЭМ с подразделениями предприятия необходимы для получения информации о ходе выполнения планов по энергоменеджменту. В отличие от связи службы энергоменеджмента с этими подразделениями данная информация выполняет не роль контроля, а необходима для промежуточных расчётов прогнозного коэффициента энергоёмкости. Это, в свою очередь, необходимо для корректного определения того или иного показателя, входного фактора нейронной сети. Например, согласно планового показателя инвестиций оборудование для модернизации закуплено, но ход его освоения показывает, что оно хотя и будет смонтировано и установлено, но в этом году не успеет заработать в полную меру. Безусловно, в этом случае, значение инвестиций как входного фактора для ИНС необходимо скорректировать. Связь со службой энергоменеджмента имеет взаимообменный характер, что позволяет энергоменеджерам учитывать данные расчётов ИНС при разработке стратегии, целей и задач энергосбережения и согласования их с руководством предприятия.

Предложенный в работе методический подход может быть также использован при оценке конкурентоспособности предприятия сопоставлением рассчитанных прогнозных показателей энергоёмкости с предприятиями-конкурентами с целью определения этапов производственного цикла, которые нуждаются в совершенствовании.

Вывод. При переходе к цифровой экономике важным направлением является совершенствование управления промышленными предприятиями. Эффективным аппаратом совершенствования являются искусственные нейронные сети позволяющие при планировании, исходя из предыдущих статистических данных, получать конкретные прогнозные показатели, с учётом сложной взаимосвязи производственной деятельности. Для этого на предприятии целесообразно создавать соответствующую группу интеллектуального прогнозирования, включающую специалистов по экономике, ИТ – технологиям, производству, энергоменеджменту, обеспечив ее взаимодействие со структурными подразделениями и руководством предприятия, как это показано в статье на примере управления энергоэффективностью.

Литература

1. Концепция развития цифровой экономики и общества Украины на 2018-2020 гг.: Распоряжение Кабинета Министров Украины от 17 января 2018. №67. -р. URL:<http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/67-2018-%D1%80>.
2. Kuan C. M., Hornik K., White H. A Convergence Result for Learning in Recurrent Neural Networks. *Neural Computation*. 1994. Vol.6 (3). P. 420–440.
3. Swanson N., White H. A. Model-Selection Approach to Assessing the Information in the Term Structure using Linear Models and Artificial Neural networks. *Journal of Business & Economic Statistics*. 1995. № 13 (3). P. 265–275.
4. Kiani K. Detecting Business Cycle Asymmetries using Artificial Neural Networks and Time Series Models. *Computational Economics*. 2005. № 26 (1). P. 65–89.
5. Qi M., Madala G. Economic Factors and the Stock Market: a New Perspective. *Journal of Forecasting*. 1999. № 18. P. 151–166.
6. Jorion P. Predicting Volatility in the Foreign Exchange Market. *The Journal of Finance*. 1995. № 50 (2). P. 507–528.
7. Клепикова С. В. Применение нейронных сетей в управлении энергоэффективностью предприятия. *Neuro-Fuzzy Modeling Techniques in Economics*. Київ : КНЕУ, 2018. № 7. С. 127 – 147.

Сведения об авторах

Клепикова Светлана Владимировна, кандидат экономических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт, г. Харьков, Украина; e-mail: klepikovasv75@gmail.com

Maia Melikidze, Jaba Gvelebiani

Renewable energy –major aspects of new regulatory framework of the energy sector in Georgia

Abstract: *The present document is the review of major legal aspects of the renewable energy reform in Georgia.*

Results of the research is based on the so called Desk Study methodology and the information received based on the processing of secondary data. Moreover, applying quantitative methodology, by treating and analyzing of statistical data, which were obtained from reliable sources, as well from publicly published information and the data requested to organizations.

World experience regarding abovementioned topic is studied and essential components are identified, which are necessary for rehabilitation of global tourism industry after the pandemic.

General list of the literature includes academic articles from international publications relevant for referencing, legal and sub-legal acts, strategical documents, results of the relevant international researches, requested information from the state structures.

Key Words: *Renewable energy, legal harmonization, regulatory framework, energy sector reform.*

Introduction. Since EU and Georgia signed the agreement regarding association (hereinafter referred to as the Association Agreement) on 17 of June, 2014, Georgia has implemented number of legislative amendments, for the purpose of fulfillment of the obligations envisaged by the agreement.

Ministry of Economy and Sustainable Development of Georgia elaborated 'National Renewable Energy Action Plan' (NREAP) in August, 2019. The strategic document, which defines past and future actions of the government of Georgia regarding renewable energy, within the framework of the obligations of EU and economic needs of the country. Along with the legislative amendments envisaged by the reform, National Action Plan includes appraisal of cost and benefit of supporting means of renewable energy politics, which can be defined as an important monitoring indicator for appraisal of regulation effectivity.

Regulatory Environment. The "Law of Georgia on Promotion of Production and Utilization of Energy from Renewable Sources" is the major legislative document for regulation of the field. For achieving defined aims and tasks, within the renewable energy reform, the law envisages number of means to be accomplished by the Government of Georgia, the Ministry of Economy and Sustainable Development of Georgia (hereinafter the Ministry) and Georgian National Energy and Water Supply Regulatory Commission (GNERC).

Establishing additional regulatory framework, foreseen by the law, is allocated to 24 months period since the law went into a force (December 20, 2019); moreover, envisages preparation, adoption of certain legal acts by major authorities.

Adoption of the rule for establishing minimal requirements of harmonized sample, for national action plan of renewable energy, was one of the first obligations that was imposed on the Government of Georgia 1 month after adoption of the law. The rule for establishing minimal requirements of harmonized

sample, for national action plan of renewable energy was approved by the Resolution #75 of the Government of Georgia of February 6, 2020. The rule defined list of the information that the national action plan of renewable energy shall envisage: expected final energy consumption for 2030; national target indications of the field of 2030 and expected share of energy, generated from renewable energy sources, in electricity, heating, cooling and transportation; means for achieving goals; supporting schemes in electricity, heating, cooling and transportation for promotion of utilization of energy generated from renewable energy sources; means for promotion of utilization of energy generated from biomass; accessibility of the biomass as for internal potential, so regarding the importation; relations with other countries and appraisals regarding potential results of means to be implemented.

The Government of Georgia adopted second document regarding approval of the rule of metering of energy generated from heat pump on February 6, 2020. The Resolution #74 determined acrothermal, geothermal or hydrothermal energy metering formula for energy generated from heat pump, for the purpose of counting energy generated by this form to target indicator determined by the "Law of Georgia on Promotion of Production and Utilization of Energy from Renewable Sources".

Basic Characteristics of the Reform. Adoption of the "Law of Georgia on Promotion of Production and Utilization of Energy from Renewable Sources" on December 20, 2019, was one of the major steps for implementation of renewable energy reform. The law establishes legal basis and with the coming into force of legislative framework, in accordance with the law, Georgia shall achieve major targets of the reform. For better understanding of the significance of renewable energy reform, we will discuss its three major characteristics: target indicators, means of support and mechanisms of cooperation with other states.

One of the main characteristics of renewable energy reform is absolutely new approach of legislative regulation of Georgia – determination of target indicator of the sector. The “Law of Georgia on Promotion of Production and Utilization of Energy from Renewable Sources” defined minimal indicators of the share of energy generated from renewable sources out of total final energy consumption, that shall be achieved due to joint means of different state bodies, after the law comes into force.

According to the law, for 2030 national common target indicator of the share of energy generated from renewable sources shall constitute 35% out of total final energy consumption, that exceeds existing indicator for the end of 2019 by 5.5%. Except the general indicator, the law additionally defines average indicator for the term of very two years, that the country shall comply for the purpose of achieving the common target. Moreover, the law defined obligation for the Government of Georgia, that except achieving the common indicator, for 2030 it is significant that out of final amount of utilized energy by all means of transport in Georgia, 10% of the share of energy to be generated from renewable energy sources. Regulatory approach of the “Law of Georgia on Promotion of Production and Utilization of Energy from Renewable Sources”, regarding definition of special target indicators of the sector, shares the structure and the format of the Directive 2009/28/EC. It is noteworthy the “Law of Georgia on Promotion of Production and Utilization of Energy from Renewable Sources” can not be considered and a comprehensive regulatory document of the sector without complete adoption and the additional regulatory framework to come into operation. The Directive 2009/28/EC defined principles, that 20% share of EU energy consumption by member states shall come from renewable energy sources by 2020. For this purpose, the Directive determined various fixed indicators of the mandatory growth for the member states, taking GDP and existing share of renewable energy into account. The Directive involved three sectors: electricity, heating and cooling; and transportation.

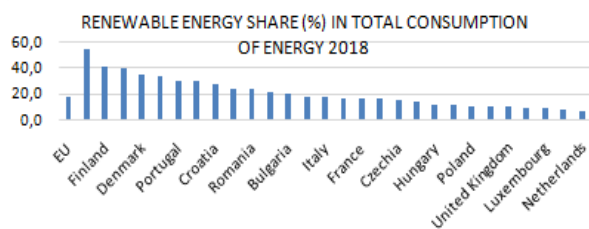


Figure 1. Indicators of the EU and its member states by 2018

By 2010 out of final energy consumption in Estonia the share of energy, generated from renewable sources constituted 24.6%; whereas, the directive 2009/28/EC determined 25% as the target indicator for 2020.

According to the research conducted in 2015, Estonia reached target indicator, determined by the directive, in 2011

In case the EU achieves the target indicator (20%) determined by the Directive 2009/28/EC by 2020, planned growth constitutes of 12% by 2030; whereas envisaging share of energy generated from renewable sources in Georgia (29.5%) in 2019, planned growth by 2030 constitutes 5.5%. It is worth to mention, that according to the data of 2018, only in 7 EU member states (Sweden, Finland, Latvia, Denmark, Austria, Portugal, Estonia) the share of energy, generated from renewable sources exceeded 28%.

Support Mechanisms. For the purpose of achieving common national target indicators the “Law of Georgia on Promotion of Production and Utilization of Energy from Renewable Sources” envisages establishment of special supporting mechanisms.

Information regarding supporting schemes in Georgia shall be transparent and accessible for everyone interested, such as: consumers, architects, constructors, installers, as well heating, cooling electrical device suppliers, moreover the means of transportation working on renewables. Information regarding implemented supporting schemes and reports shall be submitted to the Secretary of the Energy Community by December 31, 2024. Whereas, after this, once every two years. Supporting schemes shall be approved within 12 months after adoption of the law, through presenting by the Ministry to the Government of Georgia. Schemes for promotion of energy production from renewable sources shall be reviewed with the joint context of promotion of general mechanisms of electricity sector. According to the Law of Georgia on Energy and Water Supply, promotion of the electricity generation shall be regulated by following criterias: transparency, non discrimination, economic expediency, minimal cost of the consumer and balance of electrical energy and influence of the operation of Georgian electrical energy system.

The law additionally determines, that with the various supporting mechanisms, determined by the legislative and sub-legal acts, for the purpose of promotion of cogeneration and electricity production from renewable sources, the level of electricity generation from renewables and/or combined production of electricity and heating shall be achieved, that is defined for Georgia by the legislation of the Energy Community. However, the Government of Georgia has not yet approved supporting schemes for promotion of energy generation from renewable sources, “The Concept Design for the Georgian Electricity Market” was approved on April 16, 2020, which envisages significant news for the energy sector (hereinafter referred to as “Market Concept”). Concept of electricity market model sets the guiding principals for organizing and functioning of electricity wholesale market. One of the main aims of the Market Concept is promotion of

supporting mechanisms, envisaged by the "Law on Promotion of Production and Utilization of Energy from renewable Sources".

Market Concept defines idea of wholesale public service and its specific obligations in the field of renewable energy, such as: payments, within supporting schemes, to producers of renewables and other participants of supporting schemes and promotion of renewable energy integration in organized markets. Within the Organized Market, for energy producers, benefiting from renewables supporting schemes, the envisaged cost is reimbursed by public service organization. The rule of carrying out the wholesale public service function, also forming and spending the fund of it, will be defined by the Government of Georgia. As mentioned before, successful use of hydro power resources determines greatest share in renewable energy production and utilization. For the purpose of better assimilation of natural resource and attracting foreign investments, the Government of Georgia offered signing of Guaranteed Power Purchase agreement (PPA) to foreigner investors, that after completing construction of hydro power plant and beginning of production, envisaged obligation of the government to purchase produced energy at specific price.

According to the paragraph 4, of the article 23 of the Law on Electricity and Natural Gas in force before December 20, 2019, in case of agreement among the Government of Georgia, market operator and an investor regarding construction of new power plant, the market operator was obliged to sign direct agreement regarding generated energy and/or purchased guaranteed capacity. In spite of obvious growth of the direct foreign investments in the energy sector, due to the implementation of PPA model, the system was often criticized for lack of transparency, uncompetitiveness and fiscal hazards, due to the long-term financial obligations of the state.

Market Concept defined rule of realization at organized electricity market, envisaged by the Guaranteed Power Purchase Agreement. Participant of Guaranteed Power Purchase Agreement is entitled to agree on the rule of compensation for the difference between market price and price determined by the agreement signed with wholesale public service organization, or sell energy at organized market on its own.

However, realization of the electricity, generated from the most prevalent renewable sources – hydropower, which is implemented based on the Guaranteed Power Purchase Agreement, in accordance with the Market Concept it shall fall within a new legislative regulation. Free electricity market on the one hand, gives possibility to energy producers to preserve guaranteed price, determined by the agreement; on the other hand, by denying guaranteed price, they can operate independently at organized market for the purpose of their benefit growth.

Taking into account the existing legislative framework, the Government of Georgia established support mechanisms for energy production from renewable sources on December 20, 2020. Regarding this matter, practice and guiding principles of the EU, that encouraged implementation of the Directive 2009/28/EC, are relatively important.

The Guiding Documents reviews advantages and disadvantages of support schemes of energy production from renewables. The European Commission considers several support models; among them are guaranteed tariffs (feed-in tariffs (FIT)), premium tariffs (feed-in premiums (FIP)), quotas, tax release, tenders and investment encouragement. Commission estimates supporting feed-in tariffs as outdated model, that makes weaker the connection of production with the market demands, hinders flexible market formation, limits technological progress and capacity growth. Moreover, feed-in tariff that is regulated by Guaranteed Power Purchase Agreement (PPA) encourages reduction of capital expenses of investments and protects investors from price changing hazards.

According to the Guiding Document, feed-in premiums is evolved version of feed-in tariffs, when the renewable energy producer sells produced energy at free market, though gets additional state reimburse for wholesale price. Premiums are fixed or variable, that on the one hand aims growth of production and promotion of technological progress in terms of market competition, on the other hand, promotion of investments by proposing mechanisms of reducing market price.

Except guaranteeing the tariff and compensation mechanisms, the Guiding Documents reviews such support schemes when energy suppliers are obliged to purchase specific amount of renewable energy from energy producers. Investment support takes various forms, the main types being grants, preferential loans and tax exemptions or reductions. Based on the analyzing of existing various mechanisms, for the development of energy market and promotion of the competition, the European Commission considers state auction model as the most effective scheme, which allows all competitive contributors to implement renewable energy project. Besides general recommendation of the auction system, auctions may still require some ex ante calculation of energy costs by the agency preparing the scheme, partly to help avoid strategic bidding, and often include floor or ceiling prices.

Conclusion. Renewable energy sector of Georgia went through various significant phases. For the purpose of utilization of country's major hydro resources, Georgia implemented number of reforms over the years. Implementation of Guaranteed Power Purchase agreement (PPA) model is one of the most significant

actions, which encouraged evident growth of direct foreign investments in the energy sector.

Due to the legislative amendments, made for the purpose of the growth of country's energy independence and establishment of competitive environment, energy sector became more competitive and is moving towards the growing phase. Adoption of Market Concept and steps toward the operation of Energy Exchange are confirming this fact. Regarding Georgia's economic challenges and obligations, envisaged by the Association Agreement, Georgian renewable energy sector has started transformation according to EU standards, which caused new challenges for the country.

Georgia defined obligatory target indicator for common energy consumption by 2030, due to the adoption of the first special law on energy generation from renewable sources on December 20, 2019. Taking into account existing indicator (29.5%) by 2019, determined indicator (35%) for 2030 cannot be appraised as an ambitious target. However, appraisal of the indicators is depended on the number of economic factors and analyzing it is beyond the topic of our research. Within the research, we studied relevant legislative acts of the EU, regarding renewables and new regulatory framework of Georgia. As the result, we indicated that the Law of Georgia on Promotion of Production and Utilization of Energy from Renewable Sources is established based on the content and structure of the Directive 2009/28/EC. Accordingly, the major legislative act of the sector is more declaratory document, rather than regulatory one. That is typical for directives adopted by the EU, though it does not comply with the standards of the major regulatory framework. We can make the conclusion, that adoption of the Law of Georgia on Promotion of Production and Utilization of Energy from Renewable Sources is not sufficient for achieving targets of the reform and for establishing legislative base, until additional regulatory document, envisaged by the law, is set in complete motion.

When analyzing the characteristics of the reform we should pay an attention on two important newses, which are hardly found in legislations of other sectors: obligatory target indicator and support scheme. After determining target indicators as obligatory by 2020 by the Directive 2009/28/EC, the EU made a decision that, for achieving targets by 2030 the same approach was not advisable. Hence, member states were given more

freedom regarding this issue. Considering above mentioned, to estimate wheather it is appropriate to define obligatory target indicators for Georgia by 2030 by the law requires additional research. However, sharing experiencis of the EU countries might become interesting indicator for scrutinizing the topic. According to researches conducted by the EU, defining obligatory target indicators is not always the best mean for achieving the objective. Based on the example of Estonia, we can make a conclusion, that the low obligatory target indicator hindered ambition of the country for renewable growth. Apprising effectivity of directive's approaches is appropriate only after the EU publishes final report on the implementation of the Directive 2009/28/EC. However, the condition, that the EU changed its approach for 2030, can be reviewed as an interesting topic for appraisal appropriateness of Georgian regulatory decision.

Withing the research, we also studied legislative regulation regarding support schemes and foreign practice. Despite, sub-legal act on defining support schemes, envisaged by the law, is not adopted yet, taking into account tendencies and changes in energy sector, it is already possible to identify supposed approaches of Georgia in choosing support schemes. By adopting Market Concept in April, 2020, which regulates principles of realization of renewable energy, we can conclude, that Georgia will offer feed in premium tariff to market contributors. Which includes compensation mechanism for price difference, envisaged by market and Guaranteed Power Purchase Agreement. Market Concept makes clear country's approach towards free market and promotion of competition, which can be estimated as a positive event, taking into account international experience and EU recommendations.

It is relatively hard to appraise potential effect or appropriateness of legislative mechanisms after adoption of only first stage of the legislative reform of renewable energy sector. In case different state structures timely adopt sub-legal acts envisaged by the law, reform of the sector is supposed to complete by 2022. Moitoring of medium target indicators for 2021-2022 envisaged by the law will give possibility to interested parts to estimate the first effect, whereas appraisal of impact of complete legislative package will be impossible before 2023.

About the Authors

Maia Melikidze - Associate Professor, University of Business and Technology; Georgian National Energy and Water supply Regulatory Commission; Commissioner; Tbilisi, Georgia m.melikidze@gnerc.org

Jaba Gvelesiani - Master of Laws, Master of Business Administration; Head of Legal Department, KPMG Georgia; Researcher, Renewable Energy Laboratory (RES LAB); Tbilisi Georgia gvelebiani@gmail.com

Yuliia Dubiei

Technological Transformations In The Electric Power Complex Of Ukraine

Annotation. The article is devoted to identifying the features and priority directions of technological development of the electric power complex of Ukraine. On the basis of the influence of the emerging economic conditions, the author identified the main factors that determine the need for cardinal transformations in the electric power complex of Ukraine. The necessity to take into account the production, technological and innovative components of the energy complex in the process of implementing the directions of the country's energy security has been substantiated.

Key words: technological development, electric power complex, investments, energy security.

Introduction. The technologies used in various sectors of the economy represent complex systems with a specific history and development dynamics. They are characterized by a body of knowledge that is involved in the use of economic resources in the production of goods (services), and methods of their transformation in the process of economic activity of an enterprise - production of goods, processing of raw materials, assembly of finished products, and control over their quality.

A key feature of modern global economic processes is the rapid increase in the competition between states for limited natural resources, the main of which are energy services and goods. Virtually no country can fully provide itself with such resources.

The electric power complex, which ensures the activities of enterprises, various industries, the security of the state and the material living conditions of the population, all of the above makes the basis for strategic system. It is difficult to overestimate the degree of influence of the state of the electric power complex on the economy of Ukraine, the high energy intensity of the

gross domestic product and the growing demand for energy resources make the problems of the efficient functioning of energy enterprises among the most important ones.

There is every reason to believe that in the future the electric power systems will undergo significant changes, since due to technological progress, there will be a radical transformation of the methods of production and consumption of electricity and the attitude of citizens towards it [2].

Ukraine has chosen one of the priority areas of economic development - obtaining energy independence. Already today, the state is confidently moving along the path of reducing and replacing gas consumption, increasing the level of energy efficiency in various sectors and spheres of life, and developing renewable energy.

Purpose of the work. The purpose of the study is to highlight the development of the electric power complex of Ukraine, the need for technological transformations.

5% in 2015 to more than 25% in 2035. The actual and forecast structure of the total the primary energy supply to Ukraine is presented in Table 1, where the approximate forecast of electricity production in 2035 will amount to 195.0 billion kWh, including NPP - 48%, CHPP - 32%, HPP (PSPP) - 7%, renewable energy sources - 13% [5].

The basis of the electric power complex of Ukraine is the United Energy System, which provides centralized supply of electricity to domestic consumers, interacts with the energy systems of neighboring countries, ensuring the import and export of electricity. It combines power generating capacities, distribution networks of the regions of Ukraine, which are interconnected by backbone power lines with a voltage of 220-750 kV. Operational and technological management of the Unified Energy System and management of the power system modes are carried out centrally by the state enterprise NEC Ukrenergo.

In the electric power complex, technologies differ significantly from those of industrial enterprises. Today, the Ukrainian electric power industry is characterized by the simultaneous interaction of various technological structures and technological methods of production.

The Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2035 "Security, Energy Efficiency, Competitiveness" (ESU-2035), approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 18.08.2017 No. 605-r [1], defines the development goals of the energy sector in accordance with the needs economic and social development of the country. The main goal of energy development until 2035 is to ensure energy and environmental safety; transition to energy efficient and energy saving use of resources; energy consumption using innovative technologies.

According to the forecast structure of the total primary energy supply, the volume of natural resources use will significantly decrease in 2035 compared to 2015, and the share of renewable natural resources is planned to increase over this period by more than 20%. In the field of renewable energy sources, it is envisaged to constantly expand the sources of use of all types of renewable energy (which requires the development of the segment of energy storage devices and smart technologies). The share of renewable energy sources in the total primary energy supply will increase from 4% in 2015 to 25% in 2035, and for electricity production from

The structure of the total primary energy supply
to Ukraine,% [5]

Table 1

Primary energy source name	2015 fact	2020 forecast	2025 forecast	2030 forecast	2035 forecast
Coal	30,4	22,0	16,1	14,3	12,5
Natural gas	29,0	29,3	31,0	30,8	30,2
Petroleum products	11,6	11,5	9,2	8,2	7,3
Atomic Energy	25,5	29,3	32,2	29,7	25,0
Biomass, biofuels and waste	2,3	4,9	6,9	8,8	11,5
Solar and wind power	0,1	1,2	2,4	5,5	10,4
HPP	0,5	1,2	1,1	1,1	1,0
Thermal energy	0,6	0,6	1,1	1,6	2,1
TOTAL	100,0	100,0	100,1	100,0	100,0

Labor, material, capital, energy, information technologies, their various combinations and ratios in various systems with their inherent features, which are determined by the socio-economic conditions and the scale of the production process, the availability of production technological personnel and qualified management personnel, are being introduced, capital supply of one employee, regional conditions, local characteristics.

The changes, which indicate a complete transformation of the electricity complex in the future, are based on technological innovations that include solutions ranging from a variety of technologies for generating electricity using renewable energy sources, smart grids and technologies for storing large reserves of electricity to distributed power generation systems, and separate power systems to meet the needs of individual users. The development of these energy technologies coincides in time with the electronic revolution, which opens up new opportunities for creating simplified methods of energy control, energy management and electricity trading [3].

At the same time, the transformation of the technological system of the electric power industry implies not only the restoration of basic production assets, investment assets of all links of the electric power complex of Ukraine, but also ensuring energy and environmental safety, as well as energy and economic efficiency through "smart" energy.

The creation of such an electric power system is a necessity due to the increasing complexity of tasks in the

organization and management in the context of reform, the constantly growing demand for energy services, both in quantitative and qualitative form, the formation of an active consumer status, new requirements of society itself to social, environmental and institutional image of energy.

Consumers will play an increasingly important role in technology choices and competition in the sector will intensify. Factors such as consumer behavior, competition and technology are expected to surpass policy and regulation as the main drivers of destabilization, or at least be at the same level with them.

At the moment, the concept of creating an intelligent energy system in Ukraine is already being formed, where special attention is paid to the problems of the development and placement of generating sources of all types (nuclear and hydro, thermal and renewable energy sources) based on the tasks of rational use of natural energy resources, consumer requirements, taking into account uneven load schedule, power supply problems in large cities and decentralized load. This leads to new requirements for the structure of the country's fuel and energy balance, a new hierarchy scheme and segmentation of the organizational structure of the electric power industry.

Thus, the main factors that determine the need for cardinal transformations in the electric power complex of Ukraine under the influence of the emerging economic conditions can be grouped as follows (Fig. 1).

The identification of these conditions and factors has raised the problem of the development of the Ukrainian electric power industry within the framework of traditional approaches and existing principles and methods, including technological transformation.

Thus, the energy strategy of Ukraine for the period up to 2035 determines that in order to ensure the possibility of parallel operation of the united energy system of Ukraine with the energy association of European countries, a significant amount of organizational and technical measures should be carried out, which will be for the modernization, technological and economic development of the national electric power complex, since at this point in time most of the generating facilities and power grids are worn out by more than 50% and are ineffective:

- as of the end of 2018, more than 85% of blocks of thermal power plants and combined heat and power plants exceeded the limit of physical deterioration of 250 thousand operating hours and need modernization or replacement, since equipment wear leads to excessive fuel consumption, a decrease in operating capacity and a deterioration in environmental performance;

- nuclear units are approaching the end of their design operational capacity: more than 70% of nuclear units require an extension of their service life in the next 10 years;

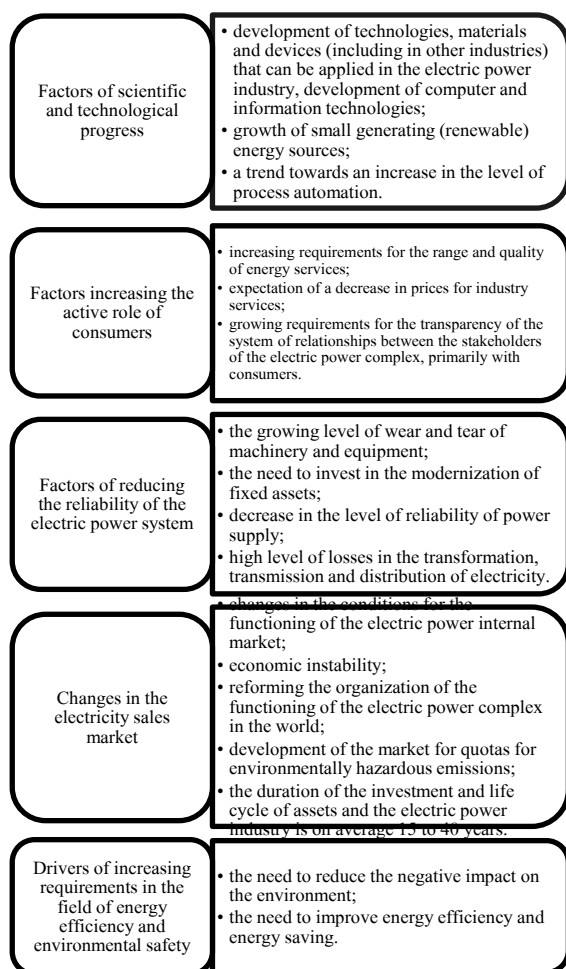


Figure 1. The main factors determining the need for cardinal transformations in the electric power complex of Ukraine under the influence of the emerging economic conditions

- the power balance of the Ukrainian electric power system is characterized by a deficit of both regulatory and flexible capacities; the share of hydroelectric power plants providing the bulk of maneuverable capacities in the total balance of capacities does not exceed 10%, while their optimal level is more than 15%. As a result, CHP and CHP units, which are designed to operate in base mode, are used to support the variable portion of the power system load curve;

- as of the end of 2018, more than 45% of overhead power lines with a voltage of 220-330 kV have been in operation for more than 50 years, more than 65% of the main equipment of transformer substations have exhausted their technical resource;

- significant problems also arise in connection with the insufficient transmission capacity of power transmission lines for the output of the power of nuclear power plants (Rivne, Khmelnytsky, Zaporozhye) and the transfer of excess energy from the Western region to the center and East of Ukraine;

- in distribution networks, a significant number of objects have also worked out their resource: 40.5% of electrical networks and 37.6% of transformer substations need reconstruction or replacement [1].

Based on the current state of the electric power industry, in order to maintain the reliability of the unified electric power system and ensure the growth of the country's economy, the priority tasks of the electric power industry in Ukraine are:

- modernization of existing generating capacities to ensure a solution to the problem of sorbent supplies and waste disposal from its use;

- modernization and development of trunk networks and distribution networks;

- implementation of projects for the construction of HPPs and PSPs (with a total capacity of 5 GW);

- extension of the operating life of operating NPP power units to 20 years, subject to a positive periodic reassessment of the safety of work;

- construction of the third and fourth blocks of the Khmelnytsky NPP with a minimum capacity of 2 GW;

- development of renewable energy sources;

- construction of coal-fired plants to replace capacities that are being decommissioned;

- construction of nuclear power units to replace existing units that will be decommissioned after 2030.

To address the priority tasks of the electric power industry, the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine should develop and implement programs for the development of generating capacities and power grid facilities, taking into account the export potential, which will include:

- programs for the modernization of existing and construction of new generating capacities to avoid capacity shortages;

- an updated program for the development of backbone networks, which is consistent with the program for the construction and modernization of generating capacities;

- a detailed program for the development of distribution networks, coordinated with the program for the construction and modernization of generating capacities and the priority development of trunk networks.

One of the critical tasks of the Ukrainian electric power industry is also the alignment of the daily schedule of electricity consumption. To do this, together with tariff regulation methods, it is necessary to apply non-tariff methods – raising awareness among consumers, spreading the use of heat pumps, thermal accumulators for heating needs, using “smart grids” (technologies that include “smart” systems for measuring and managing energy flows, control electricity supply in accordance with the demand for electricity, as well as devices and systems for accumulating electricity for daily regulation of power supply in the context of the development of distributed generation based on renewable energy sources [4].

In addition to the development of electricity generation from renewable sources and the implementation of energy efficiency measures, which are priority measures worldwide to reduce the negative impact on the environment, Ukraine needs to take the following important steps to improve the eco-friendliness at existing power generating facilities: reducing emissions of pollutants and greenhouse gases and stimulation of utilization of ash and slag waste.

Today, for the successful functioning of the electric power complex of Ukraine, it is important to combine technological and investment development with the improvement of organizational management of enterprises.

To attract investors and ensure a return on investment in technological transformation in the Ukrainian electric power industry, you need:

- to carry out the transition to a new model of the electricity market, providing for reimbursement of economically justified costs to electricity producers, including return on invested capital;

- to introduce a tariff setting system that guarantees a return on capital for investments in natural monopoly objects;

- during the construction of new generating capacities, provide for the need to introduce clear procedures for issuing permits for the construction of generating capacities, as well as the use of tender approaches for the construction of new generating capacities if initiated by the state (provided that there are insufficient incentives for such construction by investors).

In this connection, there is a need to change the business model to ensure that it meets the needs of the transformation of the electricity sector. Utility companies will need to have a clear understanding of the path that the market in which they operate is likely to develop, as well as their company's place in the changing energy system. Companies need to determine in which direction their own markets will develop in the future, how technological advances are affecting those markets, and what this means for their business strategies.

Conclusions. Changes in the energy sector can become an important factor in the socio-economic development of Ukraine, which will lead to an improvement in the living conditions of the population, an increase in the competitiveness of the economy, the leveling of the problem of energy dependence, and the like. Of course, such an "energy transition" will require significant resources (human, financial, technological), as well as provide for the need to implement appropriate structural changes in the Ukrainian economy. The

transformation of the system in the electric power industry will not only create the conditions (need and opportunity) for the modernization of the electric power industry itself on a new organizational, informational and technological basis, but will also become a powerful stimulus for the innovative development of related industries (power engineering, construction, transport and communications, repair service enterprises, adjustment and design), as well as for the development of energy science and highly qualified personnel for the energy sector.

References

1. Enerhetychna stratchiia 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>.
2. Kobets B.B., Volkova I.O. Innovatsionnoye razvitiye elektroenergetiki na baze kontseptsii Smart Grid [Innovative development of the electric power industry based on the Smart Grid concept]. Moscow: IATS Energiya, 2010. 208 p. // available at: https://www.hse.ru/data/2013/01/23/1306487070/SmartGrid_monografia.pdf
3. Preobrazovaniya v elektroenergetike: sobstvennyy put' [Electricity Transformation: Our Own Path] // available at: https://www.pwc.ru/ru/power-and-utilities/assets/energy-transformation_rus.pdf
4. Stan i perspektyvy rozvytku tekhnolohiy «intelektualnykh» elektromerezh, upravlinnya popytom ta system rezhymnoho upravlinnya v umovakh rozvytku ponovlyuvanykh dzherel enerhiyi u zarubizhniy enerhetychniy sferi [Status and prospects of development of technologies of "smart" power grids, demand management and regime management systems in the conditions of development of renewable energy sources in the foreign energy sphere] // available at: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/04/1.-Stan-rozvytku-smart-grid.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_vidnovl_yvanu_energetiku_do_2050_roku.pdf

About the Author

Yuliia Volodymyrivna Dubiei, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management, yuliya.dubey@gmail.com

