

ISSN 2074-272X

науково-практичний
журнал

2016/3



ЕІЕ електротехніка і **ЕІЕ** електромеханіка

Електротехніка. Визначні події. Славетні імена

Електричні машини та апарати

Електротехнічні комплекси та системи.

Силова електроніка

Техніка сильних електричних та магнітних полів.

Кабельна техніка

Електричні станції, мережі і системи

Ювілеї

**За 2014р. журнал отримав індекс 79,35
від міжнародної наукометричної бази
Index Copernicus**



«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

Видання засновано Національним технічним університетом
«Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») у 2002 р.

Співзасновник – Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму
Національної академії наук України» (ДУ «ІТПМ НАНУ»)

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової
інформації Серія КВ № 21021-10821ПР від 07.10.2014 р.



«ELECTRICAL ENGINEERING & ELECTROMECHANICS»

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

- Klymenko B.V.** Editor-in-Chief, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (NTU "KhPI"), Ukraine
Sokol Ye.I. Deputy Editor, Professor, Corresponding member of NAS of Ukraine, rector of NTU "KhPI", Ukraine
Rozov V.Yu. Deputy Editor, Professor, Corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine"(SI "ITPM NASU"), Kharkiv, Ukraine
- Batygin Yu.V.** Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine
Bíró O. Professor, Institute for Fundamentals and Theory in Electrical Engineering, Graz, Austria
Bolyukh V.F. Professor, NTU "KhPI", Ukraine
Doležel I. Professor, University of West Bohemia, Pilsen, Czech Republic
Féliachi M. Professor, University of Nantes, France
Gurevich V.I. Ph.D., Honorable Professor, Central Electrical Laboratory of Israel Electric Corporation, Haifa, Israel
Kildishev A.V. Associate Research Professor, Purdue University, USA
Kuznetsov B.I. Professor, SI "ITPM NASU", Kharkiv, Ukraine
Kyrylenko O.V. Professor, Member of NAS of Ukraine, Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Podoltsev A.D. Professor, Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Rainin V.E. Professor, Moscow Power Engineering Institute, Russia
Rezynkina M.M. Professor, SI "ITPM NASU", Kharkiv, Ukraine
Rozanov Yu.K. Professor, Moscow Power Engineering Institute, Russia
Shkolnik A.A. Ph.D., Central Electrical Laboratory of Israel Electric Corporation, member of CIGRE (SC A2 - Transformers), Haifa, Israel
Yuferov V.B. Professor, National Science Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology", Ukraine
Vinitzki Yu.D. Professor, GE EEM, Moscow, Russia
Zagirnyak M.V. Professor, Corresponding member of NAES of Ukraine, rector of Kremenchuk M.Ostrohradskyi National University, Ukraine
Zgraja J. Professor, Institute of Applied Computer Science, Lodz University of Technology, Poland

НАЦІОНАЛЬНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ*

- Клименко Б.В.** головний редактор, професор, НТУ "ХПІ"
Сокол Є.І. заступник головного редактора, член-кор. НАНУ, ректор НТУ "ХПІ"
- Розов В.Ю.** заступник головного редактора, член-кор. НАНУ, директор ДУ "ІТПМ НАНУ"
- Гречко О.М.** відповідальний секретар, к.т.н., НТУ "ХПІ"
Баранов М.І. д.т.н., НДПКи "Молнія" НТУ "ХПІ"
Боев В.М. професор, НТУ "ХПІ"
Веприк Ю.М. професор, НТУ "ХПІ"
Гриб О.Г. професор, НТУ "ХПІ"
Гурин А.Г. професор, НТУ "ХПІ"
Данько В.Г. професор, НТУ "ХПІ"
Жемеров Г.Г. професор, НТУ "ХПІ"
Кравченко В.І. професор, директор НДПКи "Молнія" НТУ "ХПІ"
Міліх В.І. професор, НТУ "ХПІ"
Михайлов В.М. професор, НТУ "ХПІ"
Омельяненко В.І. професор, НТУ "ХПІ"
Пуйло Г.В. професор, ОНТУ, Одеса
Резинкін О.Л. професор, НТУ "ХПІ"
Рудаков В.В. професор, НТУ "ХПІ"
Сосков А.Г. професор, ХНУМГ імені О.М. Бекетова, Харків
- Ткачук В.І.** професор, НУ "Львівська Політехніка"
Шинкаренко В.Ф. професор, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

* Члени національної редакційної колегії працюють у провідних українських наукових, освітніх та дослідницьких установах

NATIONAL EDITORIAL BOARD*

- Klymenko B.V.** Editor-in-Chief, professor, NTU "KhPI"
Sokol Ye.I. Deputy Editor, corresponding member of NAS of Ukraine, rector of NTU "KhPI"
Rozov V.Yu. Deputy Editor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of SI "ITPM NASU"
- Grechko O.M.** Executive Managing Editor, Ph.D., NTU "KhPI"
Baranov M.I. Dr.Sc. (Eng.), NTU "KhPI"
Boev V.M. Professor, NTU "KhPI"
Vepryk Yu.M. Professor, NTU "KhPI"
Gryb O.G. Professor, NTU "KhPI"
Guryan A.G. Professor, NTU "KhPI"
Dan'ko V.G. Professor, NTU "KhPI"
Zhemerov G.G. Professor, NTU "KhPI"
Kravchenko V.I. Professor, NTU "KhPI"
Milykh V.I. Professor, NTU "KhPI"
Mikhaylov V.M. Professor, NTU "KhPI"
Omel'yanenko V.I. Professor, NTU "KhPI"
Puilo G.V. Professor, Odessa National Polytechnic University
Rezynkin O.L. Professor, NTU "KhPI"
Rudakov V.V. Professor, NTU "KhPI"
Soskov A.G. Professor, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv
- Tkachuk V.I.** Professor, Lviv Polytechnic National University
Shynkarenko V.F. Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

* Members of National Editorial Board work in leading Ukrainian scientific, educational and research institutions

Адреса редакції / Editorial office address:

Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПІ", вул. Кирпичова, 21, м. Харків, 61002, Україна
Dept. of Electrical Apparatus, NTU "KhPI", Kyrpichova Str., 21, Kharkiv, 61002, Ukraine

тел. / phone: +38 057 7076281, +38 067 3594696, e-mail: a.m.grechko@gmail.com (Гречко Олександр Михайлович / Grechko O.M.)

ISSN (print) 2074-272X

ISSN (online) 2309-3404

© Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", 2016
© ДУ "Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України", 2016

Підписано до друку 27.06.2016 р. Формат 60 x 90 1/8. Папір – офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,25.

Наклад 200 прим. Зам. № 66/172-03-2016. Ціна договірна.

Дизайн та оформлення обкладинки Вировець Л.П. e-mail: vsv_2007@ukr.net

Надруковано ТОВ "Друкарня "Мадрид"", Україна, 61024, м. Харків, вул. Максиміліанівська, 11



ЗМІСТ

Електротехніка. Визначні події. Славенні імена

Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 32: Альтернативная энергетика: состояние и перспективы развития 3

Електричні машини та апарати

Василевский В.В. Модель динамики влажности в системе «бумажная изоляция» – «трансформаторное масло» в нестационарных тепловых режимах силового трансформатора 17

Маляр В.С., Маляр А.В. Механічні характеристики трифазних асинхронних двигунів при однофазному живленні 21

Финкельштейн В.Б., Егоров А.Б. Характеристики четырехфазного вентильного реактивного двигателя при питании от бесконденсаторного коммутатора 25

Чабан А.В., Левониук В.Р., Дробот І.М., Герман А.Ф. Математичне моделювання перехідних процесів у лінії Лехера в стані неробочого ходу 30

Електротехнічні комплекси та системи. Силова електроніка

Лобов В.Й., Лобова К.В. Задатчик інтенсивності для пристрою плавного пуску електродвигуна заглибного насоса 36

Техніка сильних електричних та магнітних полів. Кабельна техніка

Баранов М.И., Князев В.В., Кравченко В.И., Рудаков С.В. Результаты расчетно-экспериментальных исследований электротермической стойкости опытных образцов из листовой стали к воздействию нормированных компонент импульсного тока искусственной молнии 40

Електричні станції, мережі і системи

Нижевский И.В., Нижевский В.И. Методика измерения сопротивления заземляющего устройства 50

Сендерович Г.А., Дяченко А.В. Метод определения расположения источника колебаний напряжения в электрической сети 58

Сиротин Ю.А. Ортогональные составляющие трехфазного тока при асимметричной активно-реактивной нагрузке в четырехпроводной цепи 62

Сокол Е.И., Гриб О.Г., Швец С.В. Сетевая оптимизация оперативного обслуживания элементов энергосистемы 67

Ювілеї

Пешков Изяслав Борисович (к 80-летию со дня рождения) 73

TABLE OF CONTENTS

Electrical Engineering. Great Events. Famous Names

Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 32: Alternative energy: state and prospects of development 3

Electrical Machines and Apparatus

Vasilevskij V.V. Dynamics model of moisture in paper insulation-transformer oil system in non-stationary thermal modes of the power transformer 17

Malyar V.S., Malyar A.V. Mechanical characteristics of three-phase induction motors with single-phase power supply 21

Finkelshtein V.B., Yegorov A.B. Characteristics of a 4-phase valve reluctance motor when powered by uncapacitor switchboard 25

Chaban A.V., Levoniuk V.R., Drobot I.M., Herman A.F. Mathematical model of electromagnetic processes in Lehera line at open-circuit operation 30

Electrotechnical complexes and systems. Power Electronics

Lobov V.I., Lobova K.V. Intensity setter for a device of smooth start of submersible pump electric motor 36

High Electric and Magnetic Field Engineering. Cable Engineering

Baranov M.I., Kniaziev V.V., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. Results of calculation-experimental investigations of electro-thermal resistibility of sheet steel samples to action of rationed components of pulsed current of artificial lightning..... 40

Power Stations, Grids and Systems

Nizhevskiy I.V., Nizhevskiy V.I. A technique of measuring of resistance of a grounding device..... 50
Senderovich G.A., Diachenko A.V. A method for determining location of voltage fluctuations source in electric grid 58
Sirotnin Iu.A. Orthogonal components of the three-phase current at asymmetrical active-reactive load in 4-wire circuit..... 62
Sokol Ye.I., Gryb O.G., Shvets S.V. Network centrism optimization of expeditious service of elements of the power supply system..... 67

Anniversaries

Peshkov Iziaslav Borisovich (on the 80th anniversary of his birth) 73

ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!

Науково-практичний журнал «Електротехніка і Електромеханіка» – передплатне видання. Вартість передплати на 2016 рік – 289,26 грн., на два місяці – 48,21 грн., на чотири місяці – 96,42 грн., на шість місяців – 144,63 грн., на вісім місяців – 192,84 грн., на десять місяців – 241,05 грн. Передплатний індекс: 01216.

ШАНОВНІ АВТОРИ ЖУРНАЛУ!

Постановою президії ВАК України від 15 січня 2003 р. № 1-08/5 науково-практичний журнал «Електротехніка і Електромеханіка» внесено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук та перереєстровано Наказом МОН України № 1328 від 21 грудня 2015 р. Журнал зареєстровано як фаховий з № 1 2002 року.

Починаючи з 2005 року згідно з договором між редакцією журналу «Електротехніка і Електромеханіка» та Всеросійським інститутом наукової та технічної інформації Російської академії наук (ВИНИТИ РАН), інформація про статті з журналу за відбором експертів ВИНИТИ розміщується у Реферативному журналі (РЖ) та Базах даних (БД) ВИНИТИ.

Починаючи з №1 за 2006 р. згідно з Наказом МОН України №688 від 01.12.2005 р. журнал надсилається до УкрІНТЕІ.

Електронна копія журналу «Електротехніка і Електромеханіка», зареєстрованому у Міжнародній системі реєстрації періодичних видань під стандартизованим кодом ISSN 2074-272X, надсилається до Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського і, починаючи з 2005 р., представлена на сайті бібліотеки (<http://nbuv.gov.ua/>) в розділі «Наукова періодика України», а також на офіційному сайті журналу (<http://eie.khpi.edu.ua/>).

Починаючи з №1 за 2016 р. усі статті на сайті доступні на двох мовах – обов'язково англійською, а також російською або українською. Також кожній статті в журналі присвоюється унікальний цифровий ідентифікатор DOI (Digital Object Identifier) від організації Crossref (<http://crossref.org/>).

Журнал «Електротехніка і Електромеханіка» включений у довідник періодичних видань Ulrich's Periodical Directory, представлений у загальнодержавній реферативній базі даних «Україніка Наукова», реферативному журналі «Джерело», індексується у міжнародних наукометричних базах даних Index Copernicus, Російський Індекс Научного Цитування – РИИЦ (ELIBRARY), Google Scholar, та входить до баз даних EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, Elektronische Zeitschriftenbibliothek та ін.



Звертаємо увагу авторів на необхідність оформлення рукописів статей відповідно до Вимог, які наведені на офіційному сайті журналу (<http://eie.khpi.edu.ua/>), розміщеному на платформі «Наукова періодика України» (<http://journals.uran.ua/>). Статті, оформлені згідно з Вимогами, будуть публікуватися у першу чергу.

М.И. Баранов

**АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 32:
АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

Наведено короткий науково-аналітичний огляд про стан і перспективи світового розвитку альтернативної енергетики, що включає вітроенергетику, сонячну енергетику, геотермальну енергетику, біогазову енергетику, приливну гідроенергетику, водневу енергетику і малу гідроенергетику. Бібл. 30, рис. 28.

Ключові слова: альтернативна енергетика, стан і перспективи світового розвитку, огляд.

Приведен краткий научно-аналитический обзор о состоянии и перспективах мирового развития альтернативной энергетики, включающей ветроэнергетику, солнечную энергетику, геотермальную энергетику, биогазовую энергетику, приливную гидроэнергетику, водородную энергетику и малую гидроэнергетику. Библ. 30, рис. 28.

Ключевые слова: альтернативная энергетика, состояние и перспективы мирового развития, обзор.

Введение. Энергетика, как известно, является той одной из основных промышленных отраслей экономики любой страны мира, по уровню развития и потенциальным возможностям которой в социуме судят об экономической силе (мощи) страны. Несмотря на продолжающееся лидерство в настоящее время в мировой выработке электрической и тепловой энергии таких ее традиционных мощных источников как тепловых, атомных и гидроэлектростанций, в последние годы в промышленно развитых странах мира свои «обороты» набирает *альтернативная энергетика*, основанная на возобновляемых источниках энергии сравнительно небольшой мощности [1]. К таким перспективным возобновляемым источникам энергии следует отнести источники, базирующиеся, прежде всего, на использовании [1-8]: энергии ветра, энергии солнечного излучения, тепловой энергии ядра Земли, энергии биогаса от утилизации отходов, потенциальной энергии воды при установленной мощности гидроэлектростанций (ГЭС) до (5-30) МВт и энергии от применения водорода. Альтернативная энергетика в отличие от традиционной энергетики имеет для человечества почти неограниченные сырьевые ресурсы и потенциальные возможности. Кроме того, ее практическое использование не приводит к негативным экологическим последствиям для окружающей нас природы. Учитывая актуальность и важность энергетической проблемы для человечества, несомненный научно-технический интерес представляет краткий аналитический обзор современных достижений ученых и специалистов всего мира в решении насущных прикладных задач в области альтернативной энергетики.

1. Ветроэнергетика. Данный вид альтернативной энергетики стал на сегодня одним из основных научно-технических «локомотивов» в продвижении возобновляемых источников энергии на мировой энергорынок [2]. *Ветроэнергетика* (*wind power*) является той отраслью нетрадиционной энергетики, которая специализируется на преобразовании кинетической энергии воздушных масс, перемещающихся в нижних слоях атмосферы Земли, в электрическую, механическую, тепловую или в другую форму энергии [2]. Ветроэнергетика является сейчас бурно развивающейся во всем мире технической отраслью. Так, в 2014 г. количество электрической энергии, произведенной всеми ветрогенераторами мира, составило 706 ТВт·час (около 3 % от всего произведенного человечеством годового объема электроэнергии) [2]. В 2014 г. 85 стран мира использовали ветроэнергетику на коммерческой основе. Необ-

ходимо отметить, что некоторые страны особенно интенсивно развивают ветроэнергетику. Так, например, Дания в 2014 г. с помощью ветрогенераторов (при их установленной мощности 4845 МВт) выработала до 39 % от своего годового объема производства электричества [2]. По данным Европейской ассоциации ветроэнергетики Германия в 2005 г. имела установленную мощность ветроэнергетических установок (ВЭУ) в размере 18428 МВт. В 2014 г. эта установленная мощность ВЭУ составила в Германии уже 34250 МВт [2]. Что касается Украины, то в 2005 г. установленная мощность ее ВЭУ составляла 77 МВт, а в 2014 г. – 498 МВт [2]. Для сравнения отметим, что в 2005 г. Российская Федерация (РФ) имела установленную мощность своих ВЭУ всего 14 МВт, а в 2009 г. – 18 МВт [2]. Укажем и то, что в 2010 г. в Европе было сконцентрировано до 44 % от всех сооруженных в мире ветровых электростанций, в Азии – 31 %, а в Северной Америке – 22 % (оставшиеся 3 % приходились на все остальные материковые части земного шара) [2]. Согласно статистическим данным Всемирного совета по энергии ветра суммарная установленная мощность ветровых электростанций на нашей планете на начало 2011 г. составляла около 238 ГВт (к концу 2011 г. она увеличилась примерно на 25 %) [2]. Развитие ветроэнергетики на нашей планете в 21-ом столетии носит экспоненциальный темп роста. Причем так, что каждые три года суммарная установленная мощность ветровых электростанций мира удваивается [9]. На «лицо» научно-технические и коммерческие интересы общества к развитию и внедрению в практику ветроэнергетики.

1.1. Виды и устройство ветроэнергетических установок. Ветроэнергетика и применяемые в ней ВЭУ являются, по сути, техническим воплощением сравнительно новой технологии производства электроэнергии. Основными направлениями развития современной ветроэнергетики является автономная или «малая» ветроэнергетика, основанная на использовании единичных ВЭУ, и централизованная или «большая» ветроэнергетика, которая базируется на использовании ветровых электрических станций (ВЭС) [9]. По положению оси ротора ВЭУ делятся на горизонтально-осевые и вертикально-осевые [9]. На рис. 1 показан внешний вид «фермы» современных горизонтально-осевых ВЭУ установленной мощности до 250 кВт, сооруженных в полевых условиях в прибрежной

© М.И. Баранов

зоне запада РФ [10]. Заметим, что в РФ самой крупной ВЭС является станция «Зеленоградская» установленной мощностью 5,1 МВт (Калининградская обл.), состоящая из 21 ВЭУ датской компании «SEAS Energi Service A.S.» [2]. На рис. 2 в схематическом виде приведено устройство современной ВЭУ горизонтально-осевого исполнения, а на рис. 3 – общий вид современной ВЭУ вертикально-осевого исполнения [11].



Рис. 1. Общий вид современной горизонтально-осевой трехлопастной ВЭУ установленной мощностью до 250 кВт, размещенной на равнинной прибрежной территории [10]

Из данных (рис. 2) видно, что основными частями ВЭУ указанного вида является собственно ветрогенератор (турбина – *turbine*) и башня (*tower*), на которой расположен этот ветрогенератор. ВЭУ содержит комплекс сооружений и механизмов.

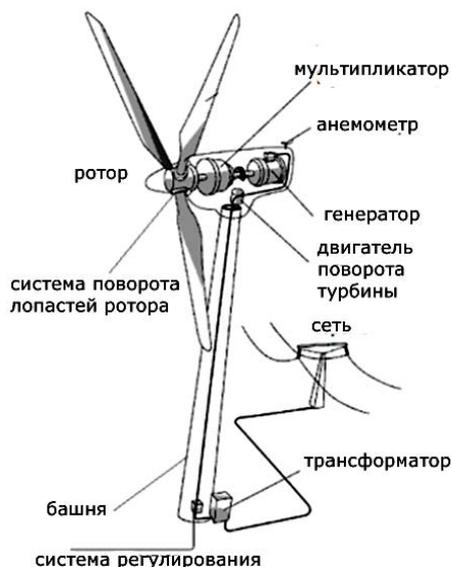


Рис. 2. Схематическое устройство современной ВЭУ [9, 10]

Указанные на рис. 2 составные части и механизмы ВЭУ необходимы для ее эффективной работы по промышленному производству электроэнергии за счет энергии ветра и ее дальнейшей передаче в электросеть. Турбина (*turbine*) ВЭУ состоит из ротора (*rotor*) и корпуса (*housing*), в котором находятся (см. рис. 2): анемометр (*anemometr*); мультипликатор (*gearbox*); генератор (*generator*); частотный преобразователь (*frequency converter*); механизмы поворота лопастей (*pitch system*) и турбиной (*yaw motor and yaw system*); системы охлаждения (*cooling system*); система регулирования (*control system*) и защиты (*safety system*) [9, 10]. Трансформатор (*transformer*) может размещаться прямо у подножья башни (*tower*) ВЭУ.



Рис. 3. Общий вид шотландской вертикально-осевой двухлопастной ВЭУ морского базирования с вертолетной площадкой в зоне ветрогенератора мощностью до 6000 кВт [11]

На рис. 4-6 в укрупненном виде показаны гигантские лопасти и турбины современных горизонтально-осевых трехлопастных ВЭУ установленной мощностью до 1500 кВт при проведении на них дорогостоящих ремонтно-восстановительных работ [9, 11].



Рис. 4. Укрупненный вид турбины современной горизонтально-осевой трехлопастной ВЭУ марки *NORDEX* установленной мощностью до 1500 кВт сухопутного базирования в период ее техобслуживания на высоте около 70 м [11]



Рис. 5. Редкое фотоизображение момента техобслуживания на высоте около 70 м лопастей и ротора турбины современной горизонтально-осевой трехлопастной ВЭУ установленной мощностью до 1500 кВт сухопутного базирования [11]



Рис. 6. Момент проведения с участием экипажа вертолета техобслуживания на высоте 80 м норвежской горизонтально-осевой трехлопастной крупнейшей ВЭУ с установленной мощностью до 5000 кВт сухопутного базирования [11]

Все современные ВЭУ по характеру своего размещения делятся на ветроустановки сухопутного (см. рис. 1, 4-6) и морского (рис. 3 и 7) базирования [9, 11].



Рис. 7. Момент подготовки к монтажным работам на современной горизонтально-осевой трехлопастной ВЭУ установленной мощностью до 600 кВт морского базирования [11]

1.2. Технические характеристики ВЭУ и экономические аспекты ветроэнергетики. Величина вырабатываемой ВЭУ электроэнергии существенно зависит от скорости ветра. Ветрогенератор начинает производить электрический ток при скорости ветра 3 м/с и автоматически отключается при скорости ветра более 25 м/с [2]. Установлено, что воздушные потоки у поверхности земли (моря) являются практически ламинарными – их нижележащие атмосферные слои тормозят расположенные выше [2]. Этот физический эффект в атмосфере Земли заметно снижается при высотах порядка 100 м и более. Поэтому мощные современные ВЭУ имеют высоту башни не менее 70 м.

Максимальная мощность ВЭУ достигается при скорости ветра в 15 м/с [2]. Из имеющихся данных следует, что современная крупная ВЭУ мощностью 2 МВт характеризуется [2]: высотой башни – 70 м; длиной лопастей – 37 м; весом ротора турбины – 52 т;

весом машинного отделения – 82 т. На сегодня ВЭУ с турбиной марки V90 мощностью 3 МВт производства датской фирмы «Vestas» имеет полную высоту – 115 м, высоту башни – 70 м и диаметр лопастей – 90 м [9].

На рис. 8 приведен внешний вид лопасти, предназначенной для использования в составе такой ВЭУ.



Рис. 8. Укрупненное изображение отдельной лопасти длиной 40 м современной горизонтально-осевой ВЭУ, размещенной на заводской площадке готовой продукции [2, 11]

Укажем, что в 2009 г. в современных ВЭУ турбины класса (1,5-2,5) МВт занимали до 82 % в мировой «большой» ветроэнергетике [2]. Кроме того, отметим то, что к началу 2015 г. общая установленная мощность всех производящих электроэнергию ветрогенераторов мира составляла около 369 ГВт [2]. При этом средний прирост в мире суммы мощностей ветрогенераторов, начиная с 2009 г., составляет до 40 ГВт за год. Он обусловлен, прежде всего, бурным развитием «большой» ветроэнергетики в США, Индии, КНР и Германии [2]. В индустрии ветроэнергетики в 2008 г. по всему земному шару было задействовано до 400 тыс. людей [2]. Себестоимость электричества, производимого в промышленных масштабах ветрогенераторами, в значительной мере зависит от скорости ветра. Так, при скорости ветра 8 м/с она составляет примерно 3,6 цента/(кВт·ч) [2]. Что касается стоимости строительства крупных ВЭУ, то она, например, для опытного образца, приведенного на рис. 6 и сооруженного недавно в Норвегии, составляет 67,5 млн. долларов США [11]. Из этого видно, что ВЭУ являются дорогой техникой. Расходы на ее приобретение окупаются в течение первых 7 лет эксплуатации (при расчетном сроке службы в 25 лет) [9, 11].

1.3. Недостатки и проблемы ветроэнергетики.

Рассматриваемый нами вид альтернативной энергетики является нерегулируемым источником энергии. Выработка электроэнергии при помощи ВЭУ существенно зависит от такого отличающегося большим непостоянством природного фактора как скорость ветра. Считается, что строительство ВЭС выгодно в таких регионах, где среднегодовая скорость ветра составляет не менее (5-6) м/с [1]. Поэтому для ВЭС характерна большая неравномерность выдачи электроэнергии в энергосистему. В этой связи ветроэнергетика требует определенного резервирования мощности в соответствующих энергосистемах. Эта особенность в работе ВЭУ существенно удорожает получаемую от них электроэнергию. Иногда дело доходило до того, что энергосистемы с большой неохотой подключали ветрогенераторы к энергосетям. В связи с чем в некоторых странах мира появились даже специальные законодательные акты, обязывающие диспетчеров энергосистем выполнять данные подключения ВЭУ [2].

Практика показала, что проблемы в электросетях и диспетчеризации энергосистем из-за нестабильности работы ветрогенераторов начинаются после достижения ими доли в (20-25) % от общей установленной мощности системы [2]. Что касается небольших по мощности единичных ВЭУ (случай «малой» ветроэнергетики), то они также могут иметь проблемы с сетевой инфраструктурой. Обусловлено это обстоятельство тем, что стоимость линии электропередачи и распределительного устройства для их подключения к энергосистеме могут оказаться слишком большими. Крупные по мощности ВЭУ испытывают значительные проблемы с ремонтом, поскольку замена крупной детали (лопасти, ротора и др.) на высоте порядка 100 м является сложным и дорогостоящим мероприятием.

Определенными недостатками данного вида альтернативной энергетики являются также создаваемый вращающимися лопастями шум вокруг работающих ВЭУ (из-за него зона отчуждения вокруг крупных ВЭУ составляет по радиусу не менее 300 м), низкочастотные вибрации грунта в зоне размещения мощных ВЭУ и технические сложности, возникающие при молниезащите крупногабаритных лопастей и турбин ВЭУ [2, 9]. В последнее время специалисты стали обращать внимание на ухудшение телевизионной связи в районах размещения ветряных электростанций [2, 9].

1.4. Ветроэнергетика в Украине. Современная энергетика Украины, хотя и медленным, но зато поступательным путем, движется в направлении развития экологически чистой энергетики на основе нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Государственные программы создают у нас благоприятные условия для развития новых энерготехнологий, включающих и ветроэнергетику. На рис. 9 приведена карта Украины с нанесенными на нее зонами средних за год скоростями ветра. Из данных рис. 9 и указанных в подразделе 1.3 сведений следует, что наиболее рациональными районами строительства ветряных электростанций в Украине являются Прикарпатье и всё причерноморское побережье, где среднегодовые скорости ветра достигают значений 5 м/с и более [2, 9]. Наиболее крупной ветровой электростанцией в Украине является станция «Новозаводская» с установленной мощностью до 23 МВт (Донецкая обл.) [2, 9].



Рис. 9. Карта Украины с зонами средних скоростей ветра [2]

Ветровая энергетика в последние годы стала одним из самых востребованных источников альтернативной энергии. При всех своих недостатках ветровая энергетика является экологически чистым способом получения энергии. Поэтому ей в современном обще-

стве уделяется повышенное внимание как со стороны правительственных институций, так и гражданских организаций. В заключение следует указать, что доля ветровой энергетики в системе энергоснабжения Украины может быть значительно увеличена за счет практической реализации масштабных общегосударственных мероприятий в области энергосбережения.

2. Солнечная энергетика. Данный вид энергетики является одним из перспективных направлений альтернативной энергетики, основанным на непосредственном использовании солнечного излучения для получения с его помощью энергии в виде электроэнергии или тепловой энергии [3]. Принято считать, что именно солнечная энергетика (*гелиоэнергетика*) может стать настоящим «преемником» у традиционной энергетики, способным подхватить у нее эстафету в обеспечении человечества энергией [12]. Современный ход развития нашей цивилизации обязывает людей взять под свой контроль поток солнечной энергии, сохраняя при этом уникальный земной климат. Известно, что на входе в атмосферу Земли плотность потока мощности солнечного излучения численно составляет в среднем 1367 Вт/м^2 [3]. Следует напомнить читателю, что эта величина является солнечной постоянной [13]. Дойдя до поверхности земли, данная величина из-за поглощения и рассеяния атомами (молекулами) атмосферных газов, аэрозолями, каплями воды и кристаллами льда уменьшается и на экваторе составляет уже около 1020 Вт/м^2 [3]. На сегодня имеются два основных физико-технических способа энергетического использования солнечного излучения [12]: первый – *фотоэлектрический*, обеспечивающий прямое получение электроэнергии с помощью фотоэлектрических элементов (ФЭЭ), облучаемых этим излучением; второй – *фототермический*, обеспечивающий получение тепловой энергии с помощью нагрева рассматриваемым излучением жидкого теплоносителя. В рамках данного обзора остановимся более подробно на первом способе практического применения солнечного излучения. Что касается второго способа преобразования энергии солнечного излучения, то в нем теплоноситель (как правило, вода) нагревается в коллекторе (системе светопоглощающих труб), устанавливаемом на крыше здания (рис. 10), до достаточно высокой температуры (около $90 \text{ }^\circ\text{C}$) и используется в дальнейшем для отопления помещений.



Рис. 10. Общий вид солнечного коллектора при фототермическом способе использования энергии светового потока [3]

2.1. Краткие основы физики фотоэлектрических элементов. В качестве основы ФЭЭ может использоваться монокристаллический кремний с добавками в него других химических элементов, образующих в этом материале структуру с $p-n$ - переходом [3]. Принцип работы полупроводникового кремниевого ФЭЭ (рис. 11) с учетом принятых на сегодня физических положений, изложенных в [13], заключается в следующем. В p - слое полупроводника создается «дырочная» (положительная) проводимость, а в n - слое – электронная (отрицательная). На границе этих слоев возникает потенциальный барьер, препятствующий перемещению носителей зарядов (электронов и «дырок») из одного слоя полупроводника в другой. Поэтому до воздействия на ФЭЭ солнечного излучения (потока фотонов) в указанном полупроводнике электрический ток будет отсутствовать. При падении же на ФЭЭ потока фотонов (квантов электромагнитной энергии) из-за поглощения этих квазичастиц будут создаваться пары электрон-«дырка». Эти пары будут подходить к границе указанных слоев и понижать потенциальный (энергетический) барьер между p - и n -слоями полупроводника. Тем самым в полупроводнике для его носителей зарядов (электронов и «дырок») будут создаваться условия для их беспрепятственного прохождения из слоя в слой. В результате в полупроводнике будет возникать наведенная электродвижущая сила (ЭДС) и полупроводник будет становиться источником электрического тока. Можно говорить о том, что способность производить электричество возникает в полупроводнике благодаря его особой химической структуре на субатомарном уровне и созданию в нем внутреннего электрического поля под внешним энергетическим действием на эту структуру электромагнитных квантов светового потока. Значение фото-ЭДС в полупроводнике будет тем больше, чем будет интенсивнее световой поток или поток фотонов [13].

2.2. Типы фотоэлектрических элементов. На сегодня в технике фотоэлектрических преобразователей принято различать следующие три поколения ФЭЭ [3]: *первое поколение* – кристаллические, включающие монокристаллические кремневые, поликристаллические (мультикристаллические) кремниевые и тонкослойные поликремневые элементы; *второе поколение* – тонкопленочные, включающие микрокристаллические, нанокристаллические, на основе теллурида кадмия и на основе диселенида-меди-индия-галлия элементы; *третье поколение* – фотосенсибилизированные красителем, органические (полимерные), неорганические и на основе каскадных структур элементы. Необходимо указать, что все указанные ФЭЭ в своей основе содержат $p-n$ - переход [3].

Небезынтересна для любопытного читателя та информация, которая связана с физико-техническими особенностями получения $p-n$ - перехода в монокристаллическом кремнии ФЭЭ, приведенного на рис. 11. Согласно указанной схеме построения такого ФЭЭ монокристаллический кремний, исторически доминировавший на начальном этапе производства в мире ФЭЭ (до 90 % рыночных объемов), в виде тонкой пластинки укладывается поверх металлической основы (нижнего базового контакта). Обе торцевые стороны полупроводниковой пластинки из кремния явля-

ются присадочными для изменения ее проводимости. С одной стороны эта пластинка легируется (обогащается) электронами для создания в полупроводнике n -слоя перехода путем добавления к кремнию химического элемента с более высоким числом валентных электронов (как правило, фосфора), а с другой противоположной стороны она легируется химическим элементом с малым количеством валентных электронов (как правило, бором) для создания в полупроводнике p -слоя перехода [14, 15]. В результате такого легирования монокристаллического кремния в нем и создается нужный нам $p-n$ - переход. Затем на такой модифицированный полупроводник с $p-n$ - переходом укладывается очень тонкая металлическая сеточка (верхний контакт) и сверху наносится антиотражающее покрытие (см. рис. 11). После присоединения к нижнему и верхнему металлическим контактам проводов внешней электрической цепи ФЭЭ готов к приему потока светового излучения и выработке за счет проявляющегося в нем *фотогальванического эффекта* [13, 16] на своем $p-n$ - переходе фото-ЭДС.

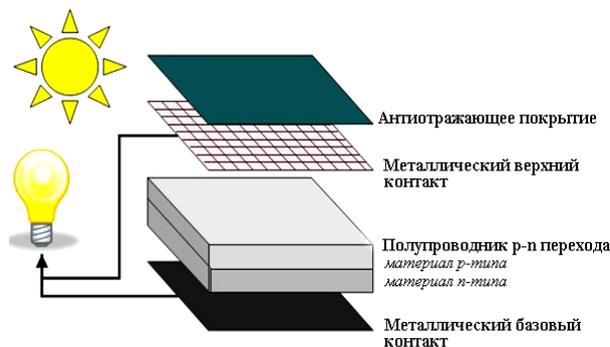


Рис. 11. Схематическое изображение ФЭЭ первого поколения с $p-n$ - переходом, образованным монокристаллическим кремнием с примесями из других химических элементов [3]

Отметим и то, что в последнее время намечился определенный прогресс в создании ФЭЭ на основе оптических наноантенн, напрямую преобразующих электромагнитную энергию светового излучения в электрический ток [3, 17]. Перспективность наноантенн обусловлена их высоким теоретическим коэффициентом полезного действия (КПД), достигающим до 85 %, и потенциально более низкой стоимостью. При этом под КПД для ФЭЭ следует понимать параметр, который показывает какая часть электромагнитной энергии светового потока на уровне атомного строения его рабочего полупроводникового материала преобразовывается в электрическую энергию. В первой половине 20-го столетия КПД для сернисто-талиевых ФЭЭ составлял не более 1 % [3]. Для современных кремниевых ФЭЭ, а также изготовленных на основе арсенида галлия, их КПД достигает (10-20) % [15]. Большим научно-техническим достижением полупроводниковой промышленности стала разработка и создание кремниевых ФЭЭ с КПД до 40 %. Важным направлением в развитии мировой солнечной энергетики является создание более дешевых и удобных фотоэлектрических преобразователей, выполненных на основе ленточных поликристаллических кремниевых структур, тонких пленок аморфного кремния и других полупроводниковых материалов. Из новых полупроводниковых струк-

тур наиболее высокоэффективной для применения в составе ФЭЭ оказалась структура «алюминий-галлий-мышьяк», промышленное и коммерческое освоение которой только начинается на рынке гелиотехнологий [15]. Огромную перспективу в области солнечной энергетики открывают именно гетероструктурные (неоднородные по структуре) полупроводники, состоящие из ряда разных по химическому составу полупроводников [15]. На практике оказалось, что при их применении в составе ФЭЭ они в два раза эффективнее современных кремниевых полупроводников. Заметим, что за научное открытие, изучение и внедрение в область гелиоэнергетики, а также в лазерную технику подобных полупроводниковых гетероструктур наш соотечественник, академик РАН, директор Ленинградского физико-технического института РАН, профессор Алфёров Ж.И. был удостоен Нобелевской премии по физике за 2000 г. [3, 15].

2.3. Способы технической реализации фотоэлектрических элементов. Отдельный ФЭЭ, изготовленный на основе традиционного полупроводника из кристаллического кремния, способен вырабатывать постоянное электрическое напряжение сравнительно малого значения (до 0,5 В) [15]. Поэтому на практике отдельные ФЭЭ собирают в модули, а ряд модулей – в панели (батареи), выходное номинальное постоянное напряжение с которых может составлять 12, 24 и 48 В [3]. Солнечные батареи могут выполняться как жестко закрепленными на неподвижном основании (рис. 12), так и подвижными с отслеживанием места нахождения на небосклоне Солнца (рис. 13). В связи с тем, что используемые в быту и на производстве потребители электроэнергии адаптированы для питания от однофазной сети переменного напряжения номинальным уровнем 220 В или от трехфазной сети переменного напряжения номинальным уровнем 380 В, то для реального применения солнечных батарей между ними и потребителем электроэнергии должен размещаться *инвертор* – электротехническое устройство, преобразующее постоянное напряжение от нашего гелиоисточника в соответствующее переменное напряжение. Очевидно, что в светлое время суток солнечная панель будет работать и вырабатывать электричество, а в темное время суток – «отдыхать» [12].



Рис. 12. Внешний вид небольшой жестко закрепленной на крыше жилого дома неподвижной солнечной панели [15]

Так как потребителю электроэнергии требуется круглосуточное энергообеспечение, то в электросеть солнечной батареи необходимо вводить мощный накопитель электрической энергии – аккумулятор [12].



Рис. 13. Внешний вид небольшой подвижной солнечной панели с системой слежения (поворота) «за Солнцем» [15]

Заряд аккумуляторов от солнечных панелей требует соблюдения определённого алгоритма. Поэтому для управления процессом зарядки аккумуляторной батареи от гелиопанелей используется специальное электронное устройство – *контроллер* (рис. 14) [3, 12].

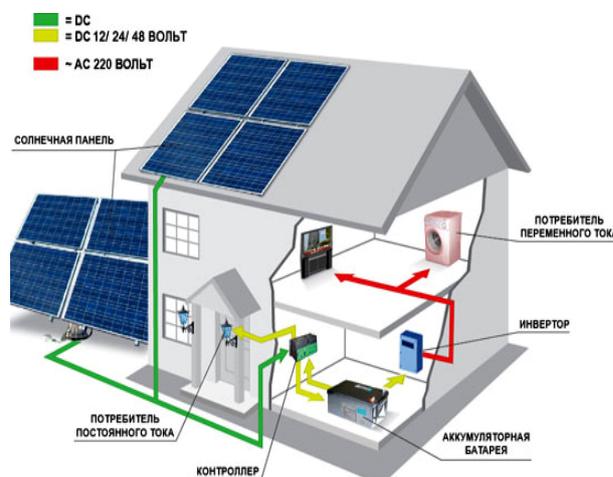


Рис. 14. Типовая схема подключения солнечных панелей к сетям постоянного и переменного токов жилого дома [3]

В настоящее время срок эксплуатации солнечных батарей доведен до 25 лет [12]. Изменение выходной мощности от солнечной батареи достигается путем добавления или демонтажа ее отдельных модулей. Стоимость солнечной батареи составляет сейчас около 1,5 долларов США за 1 ватт ее установленной мощности [12]. Эта стоимость из года в год падает. Монтаж в Украине на объекте «под ключ» солнечных панелей оценивается примерно в 4,5 \$ USA/Вт [12].

2.4. Промышленное применение фотоэлектрических элементов и экономические аспекты гелиоэнергетики. Для такого использования ФЭЭ необходимо создавать солнечные электростанции (СЭС), предназначенные для прямого преобразования солнечной радиации в электрическую энергию [18]. Отметим, что первая экспериментальная СЭС, использовавшая правда фототермический способ преобразования солнечного излучения, была построена в 1985 г. в СССР (г. Щёлкино, Крым). Ее пиковая установленная мощность составляла около 5 МВт [18]. Кстати, такую же мощность имел и ядерный реактор на первой в мире атомной электростанции (АЭС), построенной в 1954 г. также в СССР (г. Обнинск; научный руководитель работ – академик АН СССР И.В. Курчатов) и положившей начало

ядерной энергетике [19]. Так как энергосистема Крыма являлась дефицитной, то в этом регионе солнечная энергетика получила интенсивное развитие. Благодаря данному альтернативному источнику энергии в 2014 г. здесь с помощью СЭС вырабатывалось до 30 % от потребного объема электроэнергии [18]. Следует заметить, что в конце 2010 г. этот показатель собственно вырабатываемой электроэнергии для Крыма составлял лишь 7 %. В настоящее время мощность солнечных «парков» в Крыму составляет уже около 227,3 МВт [18]. Основу гелиоэнергетики Крыма составляют СЭС «Охотниково» установленной мощностью 80 МВт (рис. 15) и СЭС «Перово» установленной мощностью 100 МВт (рис. 16). Обе эти СЭС были построены фирмой «Activ Solar» [18]: станция «Охотниково» в 2011 г. на около 160 га и станция «Перово» в 2012 г. на 200 га.



Рис. 15. Общий вид фрагмента территории СЭС «Охотниково» с установленной мощностью 80 МВт (Крым) [18]

Солнечные батареи СЭС «Охотниково» состоят из примерно 365 тыс. модулей на базе поликристаллических ФЭЭ и могут вырабатывать до 100 ГВт·ч электроэнергии в год. Данная СЭС удовлетворяет потребности в электроэнергии для около 20 000 домохозяйств. Солнечные панели СЭС «Перово» состоят из 455 тыс. поликристаллических фотоэлектрических модулей, соединенных примерно 1500 км кабеля [18].



Рис. 16. Общий вид фрагмента территории СЭС «Перово» с установленной мощностью 100 МВт (Крым) [18]

СЭС «Перово», которая была по состоянию на июнь 2012 г. самой мощной солнечной электростанцией в мире, производит до 132,5 ГВт·ч экологически чистой электроэнергии в год. Укажем и то, что 1 августа 2015 г. в Крыму была запущена СЭС «Николаевка» с установленной мощностью 70 МВт, которая сейчас работает в режиме опытной эксплуатации [18].

Гелиоэнергетика активно развивается во всем мире. Темпы ее роста просто поразительны. Так, если в 2005 г. производство ФЭЭ в мире составляло около 1,65 ГВт, то в 2012 г. общая установленная мощность

мировых гелиоэнергетических установок превысила 100 ГВт [3, 18]. На начало 2014 г. данная мощность фотоэлектрических установок в мире оценивалась уже в 139 ГВт [18]. Лидером по установленной мощности здесь являются страны Евросоюза, в котором Германия имеет самые высокие показатели «на душу» населения по производству электроэнергии за счет использования мощностей гелиоэнергетики. В середине 2011 г. только в фотоэлектрической промышленности Германии было занято более 100 тыс. человек. Кроме того, в 2011 г. около 3 % электроэнергии, выработанной в Италии, было получено при помощи фотоэлектрических установок [18]. Согласно прогнозам, полученная на основе солнечного излучения энергия гипотетически сможет к 2050 г. обеспечить до (20-25) % потребностей человечества в электричестве. Это позволит резко сократить выбросы углекислоты в атмосферу Земли. Эксперты энергорынка считают, что процентное обеспечение потребностей мира к 2050 г. электроэнергией, полученной на СЭС, будет упираться в вопрос стоимости 1 кВт·ч при монтаже солнечных батарей гелиоустановок «под ключ». В 2013 г. цена 1 кВт·ч, выработанного на СЭС в регионах с большим количеством солнечного излучения (например, для Южной Калифорнии в США), составляла около 10 центов. Стоимость же 1 кВт·ч электроэнергии, вырабатываемой на АЭС, обходится сейчас примерно в 15 центов [18]. Годовая выработка электроэнергии в мире на СЭС в 2014 г. составила 185,9 ТВт·ч (около 0,79 % от ее всего произведенного за год объема) при годовом приросте в 38 % [3]. Что касается окупаемости средств, вложенных в гелиоэнергетику, то, например, для США при их среднем показателе энергоемкости солнечного излучения в 1700 кВт·ч/м² в год энергоокупаемость гелиоустановок с поликристаллическими кремниевыми модулями в их батареях с КПД в 12 % составляет около 4 лет [3, 18].

2.5. Крупнейшие СЭС мира. Укажем наиболее крупные из действующих гелиоэлектростанций мира:

- Гелиоэлектростанция «Million Solar Roofs» на 1000 МВт (1-я очередь – 2015 г., Калифорния, США);
- Гелиоэлектростанция с установленной мощностью 550 МВт (Мохаве, Калифорния, США);
- Гелиоэлектростанция с установленной мощностью 290 МВт (2012 г., Калиенте, Аризона, США);
- Гелиоэлектростанция с установленной мощностью 200 МВт (Голмуд, КНР);
- Гелиоэлектростанция с установленной мощностью 166 МВт (Шипкау, Германия);
- Гелиоэлектростанция с установленной мощностью 145 МВт (Нойхарденберг, Германия);
- Гелиоэлектростанция с установленной мощностью 100 МВт (2012 г., Перово, Крым);
- Гелиоэлектростанция с установленной мощностью 80 МВт (2011 г., Охотниково, Крым);
- Гелиоэлектростанция с установленной мощностью 70 МВт (2015 г., Николаевка, Крым).

Заметим, что крупнейшей в мире СЭС за полярным кругом является станция с установленной мощностью 1 МВт (Багагай, Якутия, РФ) [18]. Тем не менее, РФ многократно отстает от уровня генерации электроэнергии с помощью СЭС ведущими странами мира. Просто экзотически выглядит СЭС мощностью

100 кВт, введенная в строй в сентябре 2010 г. в Белгородской обл. (РФ) [18]. В сентябре 2014 г. была запущена в опытную эксплуатацию Кош-Агачская СЭС мощностью 5 МВт (Алтай, РФ). В ближайших планах РФ значится довести к 2020 г. суммарный объем установленных мощностей СЭС до 1500 МВт [18].

2.6. Применение фотоэлектрических элементов на транспорте. ФЭЭ могут устанавливаться на различных транспортных средствах: лодках, электромобилях, поездах, самолётах и др. [3]. Один из таких возможных вариантов использования солнечных батарей запечатлен на рис. 17. В этих случаях ФЭЭ вырабатывают электроэнергию, которая используется либо для бортового питания транспортного средства, либо для электродвигателей электротранспорта [3, 12].



Рис. 17. Беспилотный самолёт NASA «Pathfinder Helios» с ФЭЭ, установленными на его оригинальных крыльях [3]

В Японии и Италии уже имеются железнодорожные поезда с установленными на крышах их вагонов солнечными панелями, вырабатываемое электричество которыми используется для питания кондиционеров, освещения и аварийных систем [3]. В настоящее время компания «Solatec LLC» продаёт тонкоплёночные ФЭЭ толщиной 0,6 мм для их установки на крышу гибридного автомобиля марки Toyota Prius. Аэродинамика автомобиля от применения таких ФЭЭ не нарушается. Получаемое от ФЭЭ электричество в этом случае идет на подзарядку аккумуляторов автомобиля, что увеличивает его пробег примерно на 10 % [3]. В 2010 г. пилотируемый самолет «Solar Impulse» на ФЭЭ продержался в воздухе около суток, что вселяет надежду на использование таких аппаратов в качестве технического дополнения к спутникам [3].

2.7. Изобретение гетерозлектроиков и новые перспективы гелиоэнергетики. Последние научные открытия и изобретения в области ФЭЭ могут внести кардинальные изменения в область гелиоэнергетики. Российские ученые сообщили об открытии ими нового класса фотоэлементов – гетерозлектроиков и создании на их основе ФЭЭ нового поколения, а также изготовлении с их помощью высокоэффективной солнечной батареи – «звездной батарее» (рис. 18) [3, 15].

Основными составными частями «звездной батарее» являются гетерозлектроический фотоэлемент и гетерозлектроический конденсатор [15]. Гетерозлектроический фотоэлемент преобразует солнечную энергию в электрическую энергию, а гетерозлектроический конденсатор накапливает ее. «Звездная батарея» может функционировать и при отсутствии солнечного света, улавливая при этом режиме своей работы лишь инфракрасное излучение. При преобразовании видимого света ее эффективность составляет около 54 %, а при преобразовании инфракрасного излучения – около 31 % [15].



Рис. 18. Внешний вид революционного изобретения учеными РФ в области фотоэлементов – «звездной батарее» [15]

В «звездной батарее» фототок в четыре раза выше, чем в солнечной панели, а ее масса, приходящаяся на один ватт создаваемой мощности, практически в 1000 раз меньше. Отметим, что установленный в «звездной батарее» гетерозлектроический конденсатор имеет малые габариты и большую электрическую емкость. Так, при объеме всего в 180 см³ емкость гетерозлектроического конденсатора в «звездной батарее» составляет около 0,11 Ф [15]. За счет чего же удалось добиться в «звездной батарее» таких выдающихся результатов? По-мнению авторов этого изобретения из Научного центра полупроводниковых изделий (РФ) – за счет явления *суперкогерентности*, возникающего в полупроводнике с предварительно введенными в него наночастицами других химических элементов при воздействии на него внешнего электромагнитного поля [15]. Благодаря явлению суперкогерентности у гетерозлектроиков появляется новое физическое свойство – способность объединять на одной частоте электромагнитные волны солнечного света, которые, как известно, характеризуются разными частотами и соответственно длинами [13]. Применение гетерозлектроиков («звездных батарей») в гелиоэнергетике сулит большие перспективы для развития этого вида альтернативной энергетики [3, 15].

3. Геотермальная энергетика. Данный вид альтернативной энергетики базируется на разности температур между кипящим жидкометаллическим ядром диаметром до 7000 км с температурой около 5000 °С нашей планеты и ее остывшей твердой поверхностью [20, 21]. Подземные воды в результате обусловленных указанной разностью температур тепловых процессов, протекающих в твердой коре Земли толщиной до 100 км, разогреваются до высоких температур. Порой эти температуры существенно выше температуры ее кипения. Считается, что температура пород и воды в земной коре, нагреваемых магмой Земли, редко превышает 370 °С [20]. Только в некоторых районах земного шара температура подземных вод оказывается достаточной для выработки с ее помощью электроэнергии. Эти районы находятся, как правило, в зонах разлома тектонических плит твердой коры. Поэтому практического использования и активного развития *геотермальной энергетике* следует ожидать именно в таких районах с низкозалегающими геотермальными ресурсами нашей планеты, сосредоточенных, прежде всего, в Исландии, РФ (на Камчатке) и США (в Калифорнии) [4]. Глубокозалегающие геотермальные

ресурсы Земли из-за большой стоимости при этом поисковых геолого-разведочных и буровых работ для рассматриваемых нами целей не подходят [4].

3.1. Основные способы использования тепла ядра Земли. По способу применения геотермальной энергии различают следующие две основные технологии [20]: *первая* – ее прямое использование, при котором выходящие с глубин к поверхности Земли горячая вода и пар применяются в системах отопления зданий, садоводстве и производственных процессах; *вторая* – производство с ее помощью электроэнергии, при котором тепло от ядра Земли используется для приведения в движение ротора турбины геотермальным паром. На рис. 19 приведена схема первого способа применения геотермального тепла [4].

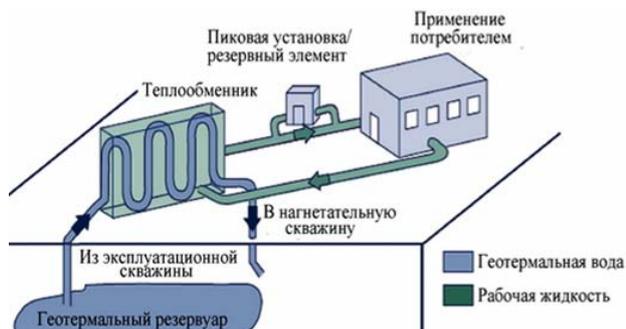


Рис. 19. Схематическое изображение первого способа использования геотермального тепла для отопления зданий [4]

В современных системах прямого использования рассматриваемого тепла в обнаруженный и обследованный специалистами геотермальный резервуар бурится скважина для обеспечения наземных устройств постоянным потоком с него горячей воды (см. рис. 18). В случае, когда геотермальная скважина не является артезианской для замкнутого резервуара подземных вод, находящегося под высоким положительным давлением, используется забойный насос. При глубинах геотермальных скважин более 250 м применяются погружные насосы, обеспечивающие подачу горячей геотермальной воды в теплообменник и далее в нагнетательную скважину. Нагретая в теплообменнике рабочая жидкость подается для обогрева помещений.

На рис. 20 показана возможная схема второго способа применения геотермального тепла. В этом случае поднятая с глубин по специальным жаростойким трубам горячая двухфазная смесь (воды и пара) подается в разделитель (см. рис. 19), с которого отобранный перегретый пар направляется на лопасти паровой турбины, вращающей ротор турбогенератора.

После разделителя горячая геотермальная вода, а также сконденсированный в конденсаторе турбины пар по нагнетательным скважинам направляются обратно в землю. В настоящее время существует два основных типа геотермальных энергетических технологий [20]: *первый тип* – «мгновенный пар»; *второй тип* – «сухой пар». На рис. 20 проиллюстрирована технология первого типа, в которой используется вытекающая под давлением из геотермальной скважины горячая вода с температурой выше 180 °С. В этом случае, из-за падения давления в поднятой геотермальной воде происходит ее частичное закипание и образование в разделителе «мгновенного пара», направляемого в турбину. Гео-

термальные электростанции (ГТЭС), использующие технологию второго типа, работают на подземных ресурсах «сухого пара» [20]. Так как подземные резервуары с залежами «сухого пара» отыскать трудно, то ГТЭС работают, как правило, в режиме технологии «мгновенного пара» [4, 20].

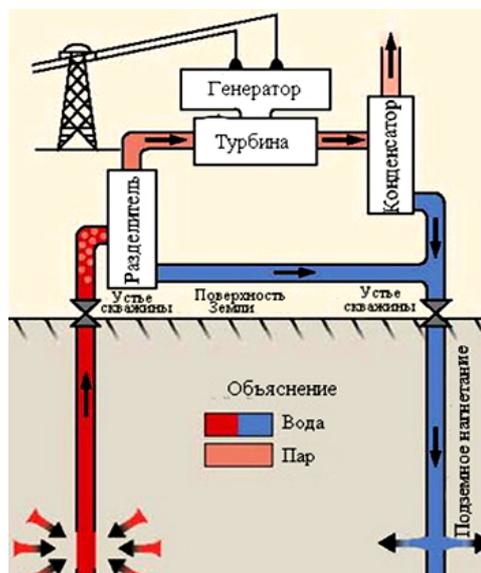


Рис. 20. Схематическое изображение второго способа использования геотермального тепла, предназначенного для выработки электроэнергии [4]

3.2. Промышленное использование геотермальной энергии. Осуществляется такое применение геотермального тепла при помощи ГТЭС. Первая в мире ГТЭС установленной мощностью 7,5 МВт была построена в Италии в 1911 г. [22]. Сегодня первое место в мире по количеству ГТЭС (77 станций) и объему вырабатываемой ими электроэнергии занимает США. Установленная мощность ГТЭС США в 2010 г. составляла около 3100 МВт [22]. Вырабатываемая в США на ее ГТЭС электроэнергия составляла в 2010 г. более 40 % от всех действовавших тогда в мире подобных мощностей [22]. При этом доля вырабатываемой электроэнергии ГТЭС на указанный период составляла от общей выработки электроэнергии в США лишь 0,3 % [22]. Больше всего геотермальной энергии «на душу» населения вырабатывается сейчас в Исландии, где около 95 % жилых домов отапливается за счет геотермальной энергии [4]. Согласно [20] в Исландии в настоящее время до 60 % всей потребляемой энергии берут из Земли. Мировая практика промышленного использования геотермального тепла показывает, что наибольшей эффективностью характеризуются те ГТЭС, у которых температура на глубине забора воды их геотермальных скважин составляет не менее 250 °С [23]. На рис. 21 приведен общий вид современной ГТЭС, построенной в Исландии [22].

На рис. 22 приведен общий вид крупнейшего на данный момент в РФ объекта геотермальной энергетики – Мутновской ГТЭС мощностью 50 МВт (Камчатка), запущенной в эксплуатацию в 2002 г. [22]. Годовая выработка электроэнергии данной ГТЭС по состоянию на 2010 г. составляла 360,5 млн. кВт·ч [4]. В настоящее время на ней ведутся работы по модернизации ГТЭС и увеличению ее мощности до 80 МВт.



Рис. 21. Внешний вид современной ГТЭС с установленной мощностью 100 МВт (2001 г., Несьявеллир, Исландия) [22]



Рис. 22. Внешний вид Мутновской ГТЭС с установленной проектной мощностью 50 МВт (2002 г., Камчатка, РФ) [22]

Отметим, что на начало 2009 г. суммарная мощность ГТЭС во всём мире выросла до 10,5 ГВт [22]. Для сравнения укажем, что на начало 2000 г. подобная цифра составляла около 6 ГВт. Прослеживается явная тенденция в годовом приросте установленных мощностей ГТЭС в мировом масштабе на 500 МВт. Главным достоинством геотермальной энергетики является практическая неиссякаемость её подземных ресурсов и полная независимость от условий окружающей среды, времени суток и года. По оценкам геофизиков скорость остывания ядра Земли равна примерно (300-350) °С за миллиард лет [22]. Перспективными источниками перегретых геотермальных вод обладают многочисленные вулканические зоны Земли, включая Камчатку, Курильские, Японские и Филиппинские острова, а также Кавказ, Новую Зеландию, территории Кордильер и Анд в Северной и Южной Америке [4]. Одним из недостатков рассматриваемого нами вида альтернативной энергетики является пока сравнительно высокая себестоимость вырабатываемого с помощью ГТЭС 1 кВт·ч электрической энергии. Сейчас она сопоставима с таковой для тепловых электростанций (ТЭС), для которых в российских условиях себестоимость производимой на ТЭС электрической энергии составляет до 1 руб./кВт·ч, но в 10 раз выше себестоимости выработки электроэнергии на ГЭС. Для справки укажем, что для ГЭС эта себестоимость в РФ достигает до 10 коп./кВт·ч [20].

4. Биогазовая энергетика. Мировой рынок возобновляемой энергии по экспертным оценкам стремительно развивается [1, 5]. **Биогазовая энергетика**, как небольшой сектор этого энергорынка, и биогазовые установки (БГУ) в настоящее время являются характерными элементами современного безотходного производства во многих областях сельского хозяйства и пищевой промышленности. Конечным выходным продуктом в БГУ (рис. 23) является биогаз, содержащий в своем составе примерно 60 % метана [5].



Рис. 23. Общий вид современной биогазовой установки [5]

Сырьем для получения в БГУ биогаза является жидкий и плотный навоз от крупного рогатого скота (КРС), свиней и домашних птиц. Кроме того, БГУ могут работать на отходах производств предприятий пищевой промышленности и специально выращенных энергетических растениях (например, травы, кукурузы и подсолнечника), повышающих выход с них биогаза. На современных БГУ из одной тонны навоза КРС получают до (30-50) м³ биогаза [5]. Кстати, одна корова способна обеспечить получение 2,5 м³ биогаза в сутки. Полученный на БГУ биогаз в дальнейшем может использоваться как для производства с помощью газовых турбин электроэнергии, так и биотоплива для заправки автомобилей. В Швеции и Швейцарии биометан уже долгое время используется в городских автобусах и грузовых машинах [5]. Из одного м³ биогаза можно выработать около 2 кВт·ч электроэнергии [5]. Отметим, что в настоящее время в Германии уже построено около 4200 БГУ, с помощью биогаза которые производят около 13000 ГВт·ч электрической энергии в год [5]. В перспективных планах Германии содержится увеличение к 2020 г. количества высокоэффективных БГУ нового поколения до 12 тыс., способных обеспечить годовую выработку экологически чистой электроэнергии до 39000 ГВт·ч [5].

5. Приливная гидроэнергетика. Сегодня нам хорошо известно, что грандиозному явлению в нашей природе, связанному с ритмичным в течение земных суток движением морских и океанических вод в виде приливов и отливов, способствуют силы гравитации Солнца и Луны [13, 19]. Дважды в сутки Солнце и Луна силой своего тяготения заставляют морскую воду то наступать на берег, то отходить от него назад. Это явление известно людям с давних времен, однако использовать его с целью получения электроэнергии человечество научилось лишь недавно. Именно **приливная гидроэнергетика** на реализацию этой физикотехнической цели и направлена. На практике эта цель воплощается с помощью приливных электростанций (ПЭС), принцип работы которых поясняет рис. 24 [6].

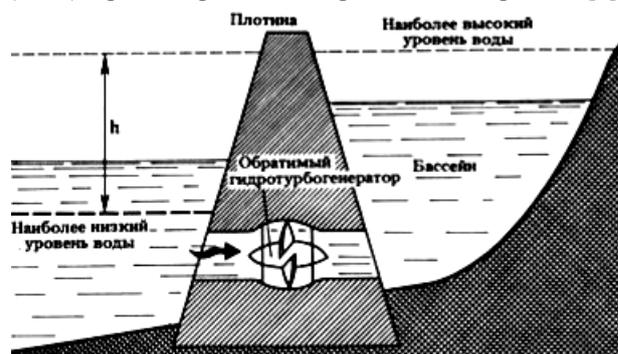


Рис. 24. Схема к пояснению работы современной ПЭС [6]

Режим работы ПЭС обычно состоит из нескольких технологических циклов. *Первый цикл* – период прилива, когда поступающая с моря вода наполняет бассейн ПЭС (см. рис. 24). В этот период движение «наступающей» на берег и соответственно на плотину ПЭС воды вращает установленные в основании бетонной плотины колеса капсульных агрегатов и электростанция вырабатывает переменный электрический ток. *Второй цикл* – период отлива, когда морская вода «отступает» от берега и соответственно от плотины ПЭС. Разность уровней воды в заполненном бассейне ПЭС при приливе и в «отступившем» при отливе море может максимально составлять до $h \approx 19$ м [6]. Во время отлива вода, уходя из бассейна ПЭС в море (океан), опять вращает рабочие колеса гидротурбогенераторов, но теперь только в обратную сторону. И электростанция продолжает производить переменный электрический ток. Рабочие агрегаты современных ПЭС обеспечивают одинаково хорошую и надежную работу своих генерирующих гидротурбогенераторов при вращении их колес в любую из двух сторон. *Третий цикл* – период простоя колес гидротурбогенераторов, обусловленный «затишьем» морской воды («мертвая зона»). В этот период ПЭС прекращает выработку электроэнергии. Для исключения в течение этого цикла перебоев в подаче от ПЭС электроэнергии ее потребителям используются резервные мощности энергосистемы с работающими в ее составе ТЭС, АЭС, ГЭС, ГТЭС и ВЭС, к которой подключена ПЭС. Интересно, что первую в мире ПЭС построили в 1913 г. вблизи г. Ливерпуля (Шотландия) [24]. Установленная мощность этой ПЭС составляла 635 кВт. Ученые-гидрологи и энергетики подсчитали, что для эффективной работы ПЭС необходимо, чтобы перепад уровней морской воды между отливом и приливом составлял более четырех метров. Наиболее подходящим местом размещения ПЭС считается то, где приливы имеют свою наибольшую амплитуду и где береговой скальный рельеф позволяет создавать большой замкнутый бассейн для этого вида электростанции, наполняемый в период прилива морской водой [24]. В последние годы приливная гидроэнергетика получила свое дальнейшее развитие. Она пополняется принципиально новыми техническими решениями при создании в мире ПЭС. При этом их главным отличием является отсутствие дорогих железобетонных плотин. Вместо компактных гидротурбин электрогенераторы ПЭС нового поколения приводятся в движение крупными лопастями колес диаметром от 10 до 20 м [24].

На рис. 25 приведен внешний вид современной ПЭС установленной мощностью 240 МВт, размещенной на французском побережье [6]. Длина железобетонной плотины этой ПЭС, служащей одновременно и мостом на скоростной автотрассе, составляет 800 м.



Рис. 25. Общий вид ПЭС «Ля Ранс» мощностью 240 МВт (1967 г., река Ранс, Северная Бретань, Франция) [6]

Кстати, максимальная амплитуда прилива на севере Франции может составлять до 14,7 м [24]. Что касается рекордных в мире значений амплитуды прилива моря (океана), то они составляют около 19,5 м. Такие абсолютные уровни прилива были зарегистрированы в Канаде на ее Атлантическом побережье (в заливе Фанди) [24]. Важным фактором при создании ПЭС являются благоприятные геологические условия для основания ее перегораживающей плотины. Поэтому при строительстве ПЭС специалисты пользуются данными не только для амплитуд прилива, но и прочностными характеристиками грунтов, их сейсмичностью и надежностью при эксплуатации ПЭС.

На рис. 26 для сравнения с большой французской ПЭС приведена малая российская ПЭС с установленной мощностью по состоянию на 2009 г. в 1,7 МВт [6]. Еще в советское время был разработан проект строительства Пенжинской ПЭС (Пенжинская губа в Охотском море, Дальний Восток, РФ) [6]. Проектная мощность этой электростанции составляла 87 ГВт. Такой энергетический показатель выводил ее на уровень самой крупной ПЭС в мире [6]. В настоящее время статус этого заманчивого проекта по созданию гигантской ПЭС нам неизвестен. Следует заметить, что в зоне предполагаемого строительства в РФ Пенжинской ПЭС амплитуда морского прилива достигает наибольшего в бывшем СССР уровня в 11 м [24]. Из других крупных действующих в мире ПЭС следует указать электростанцию с установленной мощностью 254 МВт, построенную в 2011 г. в Южной Корее [6]. Эта ПЭС способна обеспечить электроэнергией город с населением в 500 тыс. человек. В планах правительства Южной Кореи значится запуск в ближайшее время ПЭС с установленной мощностью 812 МВт [6].



Рис. 26. Общий вид ПЭС «Кислогубская» мощностью 1,7 МВт (1968 г., Кислая губа, Кольский полуостров, РФ) [6]

Общий потенциал приливной энергетики во всем мире сейчас ориентировочно оценивается по установленной мощности в 1000 ГВт [24, 25]. Годовая выработка всеми ПЭС мира электрической энергии составляла на начало 2015 г. примерно 2000 млрд. кВт·ч, в том числе в РФ – до 250 млрд. кВт·ч [24, 25].

6. Водородная энергетика. Этот вид альтернативной энергетики относится к активно развивающейся сейчас отрасли энергетики [7]. Перед человечеством все отчетливее встает глобальный вопрос, касающийся изменения энергетического «фундамента» развития общества [26]. Основным энергетическим сырьем в мире сейчас являются нефть и природный газ, запасы которых могут создать перед людьми непреодолимые проблемы примерно через 50 лет [26]. Нефтегазовая энергетика уже сейчас создает немалые

экологические проблемы на нашей планете. Вот поэтому специалисты свой взор обратили на водород, запасы которого на Земле практически неисчерпаемы. **Водородная энергетика** базируется на использовании водорода в качестве средства для генерирования, аккумуляции, транспортировки и потребления энергии людьми, транспортной инфраструктурой и различными производственными технологиями. Водород выбран здесь в качестве рабочего средства (энергоносителя) не случайно, а как наиболее распространенный химический элемент на поверхности нашей планеты и в космосе [13]. Кроме того, это вещество имеет достаточно высокую теплоту сгорания (около 143 МДж/кг, тогда как для каменного угля она составляет 29,3 МДж/кг [7, 13]), а продуктом его сгорания в кислороде является вода. Причем, образовавшаяся вода от такой химической реакции может вновь вводиться в оборот рассматриваемого вида альтернативной энергетики. На сегодня пока непреодолимой проблемой в области водородной энергетики остается неэкономичность промышленного производства водорода H_2 .

6.1. Основные технологии производства водорода. К данным технологиям получения водорода H_2 следует отнести на сегодня следующие [7, 27]: а) традиционная паровая конверсия природного газа; б) газификация угля; в) электролиз воды; г) термохимическая обработка биомассы; д) термическая обработка воды (термолиз) в солнечных концентраторах; е) нетрадиционная каталитическая конверсия природного газа от тепла высокотемпературного ядерного газоохлаждаемого реактора; ж) водно-щелочной электролиз под давлением с использованием электроэнергии АЭС. В настоящее время водород H_2 производят, в основном (до 95 % от всего объема), путем традиционной конверсии природного газа (метан CH_4 под давлением в присутствии катализатора и температуре в (700-1000) °С смешивают с водяным паром) [7]. Себестоимость такой технологии получения водорода H_2 – до 5 \$ USA/кг [27]. Газификация угля является старейшим и сравнительно дорогим способом получения водорода H_2 , при котором уголь нагревают с водяным паром при температуре (800-1300) °С без доступа воздуха [27]. Электролиз воды, основанный на протекании химической реакции $2H_2O + \text{энергия} \rightarrow 2H_2 + O_2$, характеризуется себестоимостью процесса производства водорода H_2 до 7 \$ USA/кг [27]. Нагрев биомассы (отходов из древесины) без доступа кислорода при температуре (500-800) °С приводит к получению водорода H_2 , окиси углерода CO и метана CH_4 . При этом себестоимость производства водорода H_2 составляет около 7 \$ USA/кг [27]. Прямой термолиз воды в концентраторах солнечной энергии (при температуре свыше 2500 °С вода разлагается на водород H_2 и кислород O_2) обеспечивает получение водорода при его себестоимости не менее 10 \$ USA/кг [27]. Применение с целью промышленного производства водорода H_2 высокотемпературных ядерных газоохлаждаемых реакторов, обеспечивающих высокие температуры своего гелиевого теплоносителя (около 1000 °С), используемого при каталитической конверсии метана CH_4 , и дешевой электроэнергии АЭС, вырабатываемой ею в ночное время суток, находится сейчас пока на стадии технологических разработок [27, 28]. Отметим, что в настоящее время в РФ новейшими техноло-

гиями промышленного производства водорода активно занимается РИЦ «Курчатовский институт» [26, 27].

6.2. Применение водорода в топливных элементах для получения электрической и тепловой энергий. Производство электрической и тепловой энергий с использованием водорода H_2 реализуется в топливных элементах (ТЭ) [27, 28]. В ТЭ протекает химическая реакция вида: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{энергия}$. Видно, что эта реакция является обратной той, которая протекает при электролизе воды [7]. В конце 2006 г. во всем мире эксплуатировалось уже около 5000 малых стационарных водородных электростанций, базирующихся на ТЭ [27]. К середине 2008 г. только в Японии было установлено около 3000 бытовых стационарных энергетических установок (СЭУ) мощностью до 10 кВт на водородных ТЭ, а их стоимость снизилась до 19000 \$ USA за 1 кВт мощности [27]. Отметим, что в 2006 г. в мире было установлено около 800 СЭУ на водородных ТЭ мощностью свыше 10 кВт. Их суммарная мощность составляла 100 МВт [7]. Сейчас в мире бурно развивается рынок мобильных энергетических установок (МЭУ), использующих водородные ТЭ для подзарядки мобильных телефонов, ноутбуков и другой электронной аппаратуры [7, 27]. В 2008 г. мировое производство МЭУ с водородными ТЭ составило около 9000 шт. (основной потребитель этих легких и емких источников – армия США) [27].

Водородные ТЭ в настоящее время нашли свое определенное практическое применение на транспорте (рис. 27). Причем, стоимость автомобильных водородных ТЭ на рынке снизилась с 275 \$ USA за 1 кВт мощности в 2002 г. до 110 \$ USA/кВт в 2005 г. [7, 27].



Рис. 27. Пассажирский автобус марки Mercedes Benz Citaro, работающий на водородных ТЭ (2006 г., г. Лондон) [7]

Департамент энергетики США планирует довести к 2020 г. стоимость автомобильных водородных ТЭ до 30 \$ USA за 1 кВт их мощности [7, 27]. В июне 2008 г. компания «Matsushita Electric Industrial Co Ltd (Panasonic)» начала промышленное производство в Японии водородных ТЭ. Эта компания планирует к 2016 г. продать около 200 тыс. бытовых СЭУ и МЭУ на водородных ТЭ [27]. Следует указать и то, что водородные ТЭ производят энергию на борту шаттлов USA, начиная с 1981 г. [27]. В марте 2008 г. во время экспедиции STS-123 шаттла «Endeavour» водородные ТЭ производства компании USA «UTC Power» преодолели рубеж в 100 тыс. операционных часов работы в открытом космосе. В планах министерств Индустрии, Коммерции и Экономики Южной Кореи обозначена стратегическая цель – создание в обществе к 2040 г. водородной экономики, производящей на СЭУ

с водородными ТЭ до 22 % всей электроэнергии [27]. Это дает нам основание считать такие химические источники электрического тока как ТЭ, в которых идет прямое преобразование химической энергии в электрическую с высоким значением КПД (до 85 % [26]), «движителем» водородной энергетики [27, 28].

7. Малая гидроэнергетика. Малая гидроэнергетика получила в последние десятилетия определенное развитие в мире в основном из-за стремления людей избежать экологического ущерба, наносимого водохранилищами крупных ГЭС. Чаще всего к малым гидроэлектростанциям (МГЭС) относят энергообъекты, установленная мощность которых не превышает 5 МВт [8]. В тоже время согласно требованиям Европейской ассоциации малой гидроэнергетики МГЭС считаются такие, установленная мощность которых не превышает 10 МВт [8]. Отметим и то, что в СССР согласно требованиям СНиП 2.06.01-86 к МГЭС относились те ГЭС, установленная мощность которых составляла до 30 МВт, а диаметр рабочего колеса их турбины был до 3 м [8]. Из этих данных видно, что единые требования в мире к понятию МГЭС на сегодня отсутствуют. Тем не менее, во многих странах мира МГЭС имеют свою определенную энергонишу в годовом балансе выработки ими электроэнергии [29].

7.1. Развитие малой гидроэнергетики в мире.

В Республике Беларусь по состоянию на 2010 г. действовало 36 МГЭС общей установленной мощностью 13,5 МВт с годовой выработкой свыше 33 млн. кВт·ч электроэнергии [8]. В Швеции действует 1350 МГЭС, которые вырабатывают до 10 % необходимой стране электроэнергии. В РФ, в которой в соответствии с требованиями действующего в ней стандарта ГОСТ Р51238-98 к МГЭС относят станции с мощностью до 30 МВт, работают около 100 подобных электростанций с суммарной установленной мощностью около 90 МВт [8]. Их объем выработки электроэнергии составляет примерно 200 млн. кВт·ч в год [29]. Укажем, что технический потенциал малой гидроэнергетики РФ составляет по экспертным оценкам около 360 млрд. кВт·ч в год (эта цифра близка к 30 % от потребляемого в РФ годового объема электричества) [8]. Отметим, что в 2006 г. суммарная установленная мощность МГЭС во всем мире составляла около 73 ГВт. Лидером здесь оказалась КНР (47 ГВт), а далее идут Япония (4 ГВт) и США (3,4 ГВт) [29]. Небезынтересно, что суммарные мировые инвестиции в малую гидроэнергетику в 2006 г. составили около 6 млрд. \$ USA.

7.2. Малая гидроэнергетика в Украине. Экономический гидропотенциал малых рек Украины экспертами оценивается сейчас в размере до 1,5 млрд. кВт·ч годовой выработки электроэнергии [30]. Приоткрывая страничку истории развития в нашей стране малой гидроэнергетики отметим, что в 1934 г. была введена в эксплуатацию Корсунь-Шевченковская ГЭС установленной мощностью 2,65 МВт [30]. Эта МГЭС по своим техническим показателям была одной из лучших станций своего времени. Вначале 1950-х годов число малых ГЭС, действовавших в Украине, составляло 956 единиц при их суммарной мощности около 30 МВт. Интересно отметить и то, что в конце 1929 г. количество подобных ГЭС на территории Украины было равным 150 единицам с общей мощностью 8,4 МВт [30]. В дальнейшем из-за концентрации

производства электроэнергии на мощных ГЭС и ТЭС строительство МГЭС было прекращено, а сотни МГЭС были остановлены. Одна часть из них была законсервирована, другая часть демонтирована, а оставшаяся часть просто разрушена. В итоге на сегодня в Украине сохранилось лишь 48 единиц МГЭС (рис. 28), большинство из которых требует реконструкции [30]. К ним относятся такие сравнительно мощные станции, как Теремле-Рикская, Гайворонская, Корсунь-Шевченковская, Стеблевская, Ладижинская и др.



Рис. 28. Общий вид плотины и машинного отделения отечественной МГЭС (2009 г., Украина) [30]

Безусловно, малая гидроэнергетика Украины из-за своего незначительного удельного веса (до 0,2 % [30]) в общем энергобалансе страны не может существенно влиять на условия ее энергообеспечения. Однако, эксплуатация МГЭС дает возможность вырабатывать ныне около 250 млн. кВт·ч электроэнергии в год. Этот объем эквивалентен ежегодной экономии до 75 тыс. тонн дефицитного органического топлива [8].

Вывод. Альтернативная энергетика, несмотря на свою малую долю (до 10 %) в нынешнем суммарном мировом годовом балансе выработки электроэнергии, из-за вынужденной смены в ближайшие 50 лет нефтегазового «фундамента» мировой энергетике на иной с большими сырьевыми, потенциальными и экологическими возможностями имеет большие перспективы в развитии и использовании обществом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://alt-energetic.ucoz.ru/index/0-10>.
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ветроэнергетика>.
3. https://ru.wikipedia.org/wiki/Солнечная_энергетика.
4. https://ru.wikipedia.org/wiki/Геотермальная_энергетика.
5. <http://www.agro-t.de/Bio/biogas.html>.
6. https://ru.wikipedia.org/wiki/Приливная_электростанция.
7. https://ru.wikipedia.org/wiki/Водородная_энергетика.
8. https://ru.wikipedia.org/wiki/Малая_гидроэлектростанция.
9. <http://altenergy.in.ua/category/vetryanaya-energiya>.
10. http://www.molomo.ru/myth/wind_energy.html.
11. <http://masterok.livejournal.com/220814.html>.
12. http://www.avante.com.ua/rus/library/lib_perspektiv_soln_energetiki.htm.
13. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.
14. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Том 38. – Вып. 8. – С. 937-948. doi: 10.1134/1.1787110.
15. <http://altco.in.ua/technology/solar-energy>.
16. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
17. Краснок А.Е., Максимов И.С., Денисюк А.И., Белов П.А., Мирошниченко А.Е., Симовский К.Р., Кившарь Ю.С. Оптические наноантенны // Успехи физических наук. – 2013. – Том 183. – №6. – С. 561-589. doi: 10.3367/ufnr.0183.201306a.0561.

18. https://ru.wikipedia.org/wiki/Солнечная_электростанция.
 19. Храмов Ю.А. История физики. – К.: Изд-во «Феникс», 2006. – 1176 с.
 20. <http://re.energybel.by/geothermal-ru>.
 21. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: Изд-во «Точка», 2014. – 400 с.
 22. <http://www.energyofnature.org/2387>.
 23. Берман Э., Маврицкий Б.Ф. Геотермальная энергия. – М.: Мир, 1978. – 416 с.
 24. <http://alternativenergy.ru/energiya/553-prilivnaya-elektro-stanciya-princip-foto.html>.
 25. <http://energetika.in.ua/ru/books/book-5/part-1/section-2/2-5>.
 26. <http://federalbook.ru/files/TEK/Soderzhanie/Tom%2010/V/Kovalchuk.pdf>.
 27. <http://www.o8ode.ru/article/energy/energy.htm>.
 28. Легасов В.А. Атомно-водородная энергетика и технология. – М.: Атомиздат, 1978. – 475 с.
 29. <http://www.cleandex.ru/articles/2008/03/18/hydropower2>.
 30. <http://alterpower.com.ua/energy-water/41-malaya-gidro-energetika-ukraini>.

REFERENCES

1. Available at: <http://alt-energetic.ucoz.ru/index/0-10> (accessed 11 July 2015). (Rus).
 2. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power (accessed 25 October 2013).
 3. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy (accessed 03 May 2014).
 4. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_energy (accessed 08 June 2014).
 5. Available at: <http://www.agro-t.de/Bio/biogas.html> (accessed 05 January 2014).
 6. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Tidal_power (accessed 17 May 2015).
 7. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_economy (accessed 20 February 2015).
 8. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Small_hydro (accessed 20 March 2015).
 9. Available at: <http://altenergy.in.ua/category/vetryanaya-energiya> (accessed 02 April 2015).
 10. Available at: http://www.molomo.ru/myth/wind_energy.html (accessed 10 June 2015). (Rus).
 11. Available at: <http://masterok.livejournal.com/220814.html> (accessed 10 May 2015). (Rus).
 12. Available at: http://www.avante.com.ua/rus/library/lib_perspektiv_soln_energetiki.htm (accessed 28 September 2014). (Rus).
 13. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).
 14. Alferov Z.I., Andreev V.M., Rumyantsev V.D. Solar photovoltaics: Trends and prospects. *Semiconductors*, 2004, vol.38, no.8, pp. 899-908. doi: 10.1134/1.1787110.
 15. Available at: <http://alteco.in.ua/technology/solar-energy> (accessed 20 October 2014).
 16. *Bol'shoj illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov* [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. (Rus).
 17. Krasnok A.E., Maksymov I.S., Denisyuk A.I. Belov P.A., Miroshnichenko A.E., Simovskii C.R., Kivshar Yu.S. Optical Nan antennas. *Uspehi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences*, 2013, vol.183, no.6, pp. 561-589. doi: 10.3367/ufnr.0183.201306a.0561.
 18. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_power_station (accessed 22 November 2014).
 19. Khranov Yu.A. *Istoriia fiziki* [History of Physics]. Kiev, Feniks Publ., 2006. 1176 p. (Rus).
 20. Available at: <http://re.energybel.by/en/geothermal/> (accessed 09 April 2014).

21. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki. Tom 3: Teoriya i praktika elektrofizicheskikh zadach* [Selected topics of Electrophysics. Vol. 3: Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2014. 400 p. (Rus).
 22. Available at: <http://www.energyofnature.org/2387> (accessed 12 March 2013).
 23. Berman E., Mavritskiy B.F. *Geotermal'naja energija* [Geothermal energy]. Moscow, Mir Publ., 1978. 416 p. (Rus).
 24. Available at: <http://alternativenergy.ru/energiya/553-prilivnaya-elektro-stanciya-princip-foto.html> (accessed 18 May 2014). (Rus).
 25. Available at: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-5/part-1/section-2/2-5> (accessed 27 November 2014). (Rus).
 26. Available at: <http://federalbook.ru/files/TEK/Soderzhanie/Tom%2010/V/Kovalchuk.pdf> (accessed 27 November 2014). (Rus).
 27. Available at: <http://www.o8ode.ru/article/energy/energy.htm> (accessed 04 March 2012). (Rus).
 28. Legasov V.A. *Atomno-vodorodnaja energetika i tehnologija* [Atomic hydrogen energy and technology]. Moscow, Atomizdat Publ., 1978. 475 p. (Rus).
 29. Available at: <http://www.cleandex.ru/articles/2008/03/18/hydropower2> (accessed 18 March 2008). (Rus).
 30. Available at: <http://alterpower.com.ua/energy-water/41-malaya-gidro-energetika-ukraini> (accessed 07 May 2015). (Rus).

Поступила (received) 26.10.2015

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., гл.н.с.,
 НИПКИ «Молния»
 Национальный технический университет
 «Харьковский политехнический институт»,
 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
 тел/phone +38 057 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov
 Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»
 National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
 47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 32: Alternative energy: state and prospects of development.

Purpose. Implementation of brief analytical review of the state and prospect of development in the modern world of alternative energy, including wind energy, sun energy, geothermal energy, biogas energy, flood-tide water energy, hydrogen energy and small water energy. **Methodology.** Scientific methods of collection, analysis and analytical treatment of scientific and technical information in area of the present state of world energy and ways of its further development. **Results.** A brief scientific and technical review is resulted about the state and prospects of world development of basic types of alternative energy. It is shown that, in spite of comparatively small stake (to 10 %) of this untraditional energy in general world balance of making of electric power, world association taking into account the necessary changing in the nearest 50 years of present oil-gas «foundation» of energy on other with large raw material, potential and ecological possibilities are forced to invest large financial means in development of the indicated directions of alternative energy. **Originality.** First on the basis of materials of separate magazine publications, scientific monographs and internet-reports on power problem the brief analytical review of the state and prospects of world development of basic types of alternative energy is executed. **Practical value.** Deepening and spread of the scientific and technical learnings in area of functioning and ways of development of modern energy. Scientific popularization of arising up before society claimed tasks from global and important for all of humanity of power problem. References 30, figures 28.

Key words: alternative energy, state and prospects of world development, review.

В.В. Василевский

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ВЛАЖНОСТИ В СИСТЕМЕ «БУМАЖНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ» - «ТРАНСФОРМАТОРНОЕ МАСЛО» В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМАХ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

З метою підвищення точності розрахунку ресурсних характеристик потужного трансформатору запропонована модель динаміки вологості паперово-масляної ізоляції. Запропонована модель відрізняється від вже існуючих врахуванням міграційних процесів вологи в паперово-масляній ізоляції під впливом змінення теплового режиму трансформатор. Виконано комп'ютерне моделювання зносу паперово-масляної ізоляції і зроблена оцінка впливу можливого змінення ступню вологості на ресурс. Бібл. 7, рис. 4.

Ключові слова: паперово-масляна ізоляція, потужний трансформатор, комп'ютерне моделювання, динаміка вологості.

С целью повышения точности расчета ресурсных характеристик силового трансформатора предложена модель прогнозирования динамики влажности бумажно-масляной изоляции. Предложенная модель отличается от существующих учетом процессов миграции влаги в бумажно-масляной изоляции под влиянием изменения теплового режима силового трансформатора. Проведено компьютерное моделирование износа бумажно-масляной изоляции и произведена оценка влияния возможного изменения степени увлажнения на ресурс. Библ. 7, рис. 4.

Ключевые слова: бумажно-масляная изоляция, силовой трансформатор, компьютерное моделирование, динамика влажности.

Введение. Создание систем мониторинга трансформаторного оборудования является актуальной научно-технической задачей. Известен ряд систем, как отечественных производителей (ООО «Энергоавтоматизация», ОАО «ЗТР» [1]), так и зарубежных (ABB, Siemens) [2], одной из функций которых является возможность оценки остаточного ресурса единичного силового трансформатора (СТ) на основании данных мониторинга.

Ресурс маслonaполненного силового трансформатора в основном определяется ресурсом его бумажной изоляции (БИ). Влияние на расход ресурса БИ СТ оказывают следующие факторы: изменение температуры, степень увлажнения целлюлозы и трансформаторного масла (ТМ), а также степень окисленности масла. Вода может образовываться в процессе эксплуатации как в самом СТ, в качестве продукта старения БИ, так и попадать из окружающей среды вследствие частичной разгерметизации бака. Миграция влаги в изоляционной системе происходит под влиянием изменения теплового режима СТ.

Важной проблемой при вычислении прогнозируемых ресурсных характеристик в эксплуатации СТ является построение возможных трендов влажности бумажно-масляной изоляции (БМИ), кислотности ТМ и изменения факторов эксплуатации, таких как температура окружающей среды и ток нагрузки.

Анализ исследований. Существующие модели влагообмена определяются их назначением – определение влажности БИ на основе измерения влажности ТМ в процессе мониторинга СТ с применением кривых равновесного содержания влаги [3] или расчетных методов [4]. В таких моделях не учитывается (или учитывается в недостаточной степени) возможное изменение факторов эксплуатации в горизонте прогноза.

Также возможно формирование тренда влажности БИ исходя из предположения, что рост влагосодержания БМИ СТ в результате старения составит

приблизительно 2-3 % [5] и что этот рост будет происходить линейно в течение эксплуатации.

В этом случае снижается точность прогноза расхода ресурса СТ, отсутствует возможность получить полную картину динамики влажности и оценить ее влияние на расход ресурса.

На данном этапе отсутствуют модели, с помощью которых можно было бы прогнозировать динамику влажности в изоляционной системе СТ с учетом динамики факторов эксплуатации, параметров технического обслуживания (ТО).

Постановка задачи. Цель исследования заключается в повышении точности расчета ресурсных характеристик БМИ СТ путем учета динамики влажности во взаимосвязи с динамикой температуры БИ и ТМ в модели расхода ресурса. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- предложить пути оценки влияния миграции влаги в БМИ СТ на ресурс БИ СТ;
- построить модель динамики влажности БМИ в неравновесном состоянии влагосодержания в БМИ во взаимодействии с моделями нагрузки, температуры окружающей среды и ТО СТ;
- провести компьютерное моделирование расхода ресурса БМИ с целью оценки влияния миграционных процессов влаги на расход ресурса БМИ.

Результаты исследований. Структурная схема взаимосвязи модели влагообмена в БМИ СТ с другими элементами модели прогнозирующей расход ресурса приведена на рис. 1. Она включает в себя модель внешних факторов эксплуатации (ФЭ, формирует тренды тока нагрузки I_d и температуры охлаждающей среды θ_a), модель технического состояния БМИ и технического обслуживания (ТС БМИ и ТО, формирует тренды теплоемкости и теплового сопротивления для разных видов охлаждения R_{ON} ; R_{OF} ; C_{ON} ; C_{OFF}), термодинамическую модель (ТДМ, формирует тренд темпе-

ратуры наиболее нагретой точки (ТННТ), θ_h), модель влагообмена в БМИ СТ и блок оценки износа (ОИ, расчет значения израсходованного ресурса L) [6].

Модель влагообмена, в свою очередь, состоит из блока влажности БИ (БВБИ) и блока влажности ТМ (БВТМ), которые взаимосвязаны между собой.

Расчетная влажность БИ в определенный момент времени t определяется по формуле [5]:

$$W_c = A \cdot e^{-B \cdot \theta_h} \cdot p^{k+a \cdot \theta_h}, \quad (1)$$

где W_c – расчетная влажность БИ, %; A, B, k, a – табличные данные для определенного вида изоляции; θ_h – ТННТ, °С; p – парциальное давление паров воды, мм рт. ст.

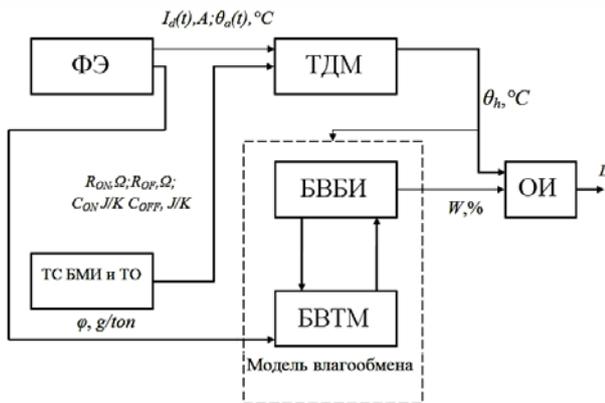


Рис. 1. Блок схема взаимосвязи модели влагообмена с другими моделями

Динамика влажности в системе БИ ТМ описана с помощью UML модели, приведенной на рис. 2.

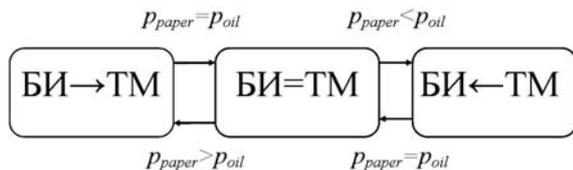


Рис. 2. Модель влагообмена в системе БИ ТМ

Модель представляет собой диаграмму состояний, переходы между которыми осуществляются с учетом соотношений между парциальными давлениями паров воды в БИ (p_{paper}) и ТМ (p_{oil}). В каждом состоянии выполняется соответствующее действие:

1) БИ→ТМ – перенос влаги из БМ в ТМ. Количество влаги, которое мигрирует из БМ в ТМ за период времени dt при изменении значения ТННТ определяется дифференциальным уравнением:

$$\frac{dW_{paper}}{dt} = \frac{W_{c.paper}(\theta_{h1}) - W_{paper}(\theta_{h2})}{\tau}, \quad (2)$$

где τ – постоянная времени переноса влаги; $W_{c.paper}(\theta_{h1})$ – влажность БИ W_c при ТННТ θ_{h1} , %; $W_{c.paper}(\theta_{h2})$ – влажность БИ W_c при ТННТ θ_{h2} , %.

Изменение степени увлажнения ТМ в результате миграции влаги из БИ:

$$\frac{dW_{oil}}{dt} = \frac{W_{c.oil}(\theta_{h1}) + \frac{W_{paper} \cdot m_{oil}}{m_{paper}}}{\tau}, \quad (3)$$

где $W_{c.oil}(\theta_{h1})$ – влажность ТМ при ТННТ θ_{h1} , %; m_{oil} – общая масса ТМ в СТ, т; m_{paper} – общая масса БИ в СТ, кг.

Значение влажности ТМ при ТННТ θ_{h1} определяется либо по результатам мониторинга, либо по результатам экспертной оценки.

2) БИ←ТМ – перенос влаги из ТМ в БИ. Количество влаги, которое мигрирует из ТМ в БИ за период времени dt , которое характеризуется изменением ТННТ:

$$\frac{dW_{paper}}{dt} = \frac{W_{c.paper}(\theta_{h2}) - W_{paper}(\theta_{h1})}{\tau}. \quad (4)$$

Изменение степени увлажнения ТМ в результате миграции влаги в БИ в этом случае:

$$\frac{dW_{oil}}{dt} = \frac{W_{c.oil}(\theta_{h1}) - \frac{W_{paper} \cdot m_{oil}}{m_{paper}}}{\tau}. \quad (5)$$

3) БИ = ТМ – равновесное состояние, к которому система стремится при равенстве температур БМ, ТМ и охлаждающей среды;

Во всех состояниях на этапе эксплуатации происходит прирост влаги в БИ и ТМ, динамика этого прироста описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\frac{dm_{oil}}{dt} = k_{oil}, \quad \frac{dm_{paper}}{dt} = k_{paper}. \quad (6)$$

где k_{oil}, k_{paper} – коэффициенты, характеризующие прирост массы влаги в ТМ и БИ, соответственно, г/кг·ч; m_{oil}, m_{paper} – масса влаги в ТМ и БИ соответственно, кг.

Начальным состоянием является состояние БМ = ТМ, в котором система находится в течение промежутка времени dt , пока соблюдается равенство парциальных давлений паров воды в БМИ СТ. Исходными данными для модели влагообмена служат значения ТННТ, измеренной относительной влажности трансформаторного масла, температуры масла вблизи датчика влажности, содержание ароматических углеводородов в масле и табличные данные для определенного вида изоляции. Равновесное значение влажности БИ определяется по (1) для значений θ_{h1} и относительной влажности ТМ φ (%), величина φ определяется по данным мониторинга ТМ либо экспертным путем. Прирост влаги в БМИ СТ вследствие старения целлюлозы или разгерметизации бака СТ рассчитывается по формуле (6).

При изменении температурного режима СТ происходит нарушение баланса парциальных давлений и система переходит в состояние БМ→ТМ ($p_{paper} > p_{oil}$) либо в состояние БМ←ТМ ($p_{paper} < p_{oil}$). Динамика влажности в БИ и ТМ вследствие изменения парциальных давлений и градиентов влажности в течении периода времени dt рассчитывается по формулам (2-5).

Источниками исходных данных для расчета влагообмена служат данные моделей внешних эксплуатационных факторов (значение прироста влаги в результате разложения целлюлозы и поступления влаги из окружающей среды), модели технического состояния БМИ (изменения базовых показателей), термодинамической модели (ТННТ). Полученное значение

влажности бумажной изоляции используется при расчете ресурса в блоке оценки ресурса.

Модель ТО предусматривает возможность как планового ТО, так и ТО по техническому состоянию. Результат ТО СТ заключается в снижении влажности БИ и кислотности ТМ до определенных минимальных значений. При работе модели по варианту планового ТО понижение показателей влажности и кислотности БМИ СТ происходит в заданные периоды времени (путем сушки и регенерации БМИ СТ). В случае ТО по состоянию понижение показателей влажности и кислотности БМИ СТ происходит по достижении этими параметрами критических значений.

В предложенных моделях допущены следующие упрощения:

- процесс ТО СТ принят как процесс с нулевой длительностью;
- моделирование не учитывает изменения ресурсных характеристик БИ СТ в период времени от момента установки СТ на месте эксплуатации до момента включения его под нагрузку;
- рост степени окисленности масла происходит линейно в течение периода эксплуатации между двумя ТО.

В качестве базового тренда используемого для проверки адекватности получаемых с помощью модели результатов может быть принят тренд расхода ресурса СТ с аналогичными параметрами, оборудованного системой мониторинга, и находящегося в аналогичных условиях эксплуатации.

Для настройки модели влагообмена использованы кривые Ооммена или Фабра и Пиччона [7] для равновесного содержания влаги в системе БИ – ТМ. Предполагается, что перед включением СТ под нагрузку в результате термодинамических процессов температура в системе БМИ СТ – окружающая среда уравнивается и будет равна θ_a . В соответствии с законом равновесия [5] парциальные давления паров воды в системе также уравниются. Для задания начальных условий моделирования θ_h принимается постоянной и равной θ_a , абсолютная влажность ТМ равна 10-15 г/т (что соответствует влажности ТМ СТ I класса по [5]). Далее производится расчет W_c для заданных исходных условий и полученное значение влажности БИ сравнивается с контрольной точкой на кривых Ооммена или Фабра и Пиччона для проверки правильности расчета. Полученное значение W_c будет являться значением влажности БИ в начале эксплуатации СТ.

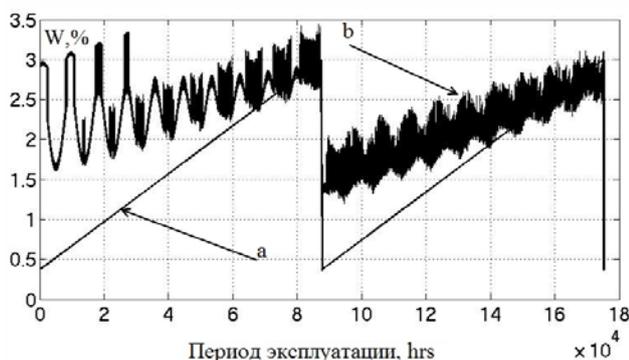


Рис. 3. Тренды влажности БМИ

Предложенные модели реализованы в программе Matlab Simulink. В качестве примера для оценки работоспособности модели проведено моделирование износа БМИ для двух вариантов динамики влажности в системе БИ – ТМ.

В первом варианте значение влажности в течение моделирования возрастает линейно и понижается до некоторого начального значения после ТО СТ (рис. 3, кривая *a*). Во втором варианте применен тренд влажности, полученный в результате использования предложенной модели (рис. 3, кривая *b*).

Исходные данные для моделей ФЭ, ТС БМИ и ТО и ТДМ: номинальный ток трансформатора равен 406 А, мощность потерь холостого хода равно 29,3 кВт, максимальное значение кислотности ТМ равно 0,29 мг КОН/г, базовое значение кислотности ТМ 0,2 мг КОН/г, среднегодовая температура окружающей среды 9,4 °С, амплитуда годового изменения среднесуточной температуры θ_a равна 12,6 °С, амплитуда суточного изменения θ_a равна 4 °С, коэффициент изменения среднегодовой θ_a равен 2 °С, коэффициент изменения среднегодового I_d 2 А, среднесуточное изменение I_d 20 А, среднегодовое изменение I_d 244,2 А, максимально допустимое значение ТННТ принято равным 150 °С, максимально допустимое значение влагосодержания бумажной изоляции – 5%.

Исходные данные для построения тренда влажности рис. 3, кривая *a*: базовое значение влагосодержания БИ равно 0,37 %, максимальное значение влагосодержания БИ 3 %.

Исходные данные для построения тренда влажности рис. 3, кривая *b*: содержание ароматических углеводородов в масле $C_A = 17$ % (масло Т-750 ГОСТ 982-80), $A = 5,55$, $B = 0,034$, $k = 0,49$, $a = -0,0007$ (электротехнический картон ЭМЦ).

Период моделирования – 20 лет. Результаты моделирования при определенных выше исходных данных приведены на рис. 4. По оси абсцисс откладывается срок службы СТ в часах, а по оси ординат – величина израсходованного ресурса L , также в часах.

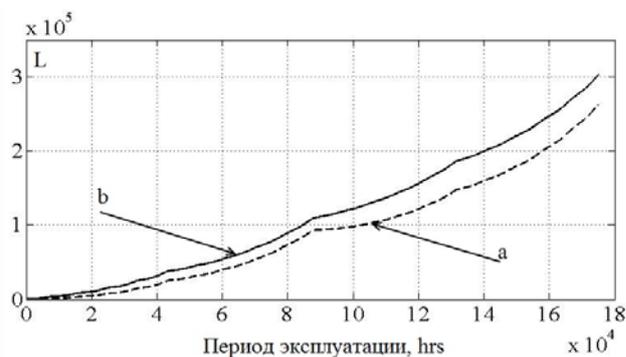


Рис. 4. Результаты моделирования

Из полученных результатов видно, что применение разных вариантов тренда влажности БИ оказывает значительное влияние на конечное значение израсходованного ресурса. Так, износ СТ в случае тренда рис. 3, *a* составил 30,03 лет за 20 лет эксплуатации а в случае рис. 3, *b* – 34,6 лет.

Выводы.

Предложена модель влагообмена в системе «бумажная изоляция – трансформаторное масло» во взаимосвязи с другими моделями, описывающими состояние силового трансформатора в эксплуатации: моделью факторов эксплуатации, термодинамической моделью силового трансформатора и моделью технического состояния бумажно-масляной изоляции.

Предложенная модель позволяет строить детализированный тренд динамики влажности бумажно-масляной изоляции по данным мониторинга единичного силового трансформатора или по результатам моделирования изменения эксплуатационных параметров силового трансформатора.

Учет динамики влагосодержания бумажно-масляной изоляции силового трансформатора позволяет повысить точность оценки ресурса бумажной изоляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспертная система мониторинга, диагностики и управления трансформаторным оборудованием «ЭСМДУ ТРАНС» производства ПАО «ЗТР». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ztr.com.ua/ru/monitoring-system>.
2. Русов В.А., Овсянников А.Г., Живодерников С.В. Зарубежный опыт мониторинга состояния маслонаполненного оборудования // Материалы IV научн.-практ. семинара Общественного совета специалистов Сибири и Востока по проблемам мониторинга трансформаторного оборудования и диагностики электрических установок, 20-24 апреля 2009 г., Новосибирск: ГЦРО, 2009. – С. 7-22.
3. Cheng J., Robalino D., Werelius P., Ohlen M. Advanced technique for moisture condition assessment in power transformers // Journal of International Council on Electrical Engineering. – 2014. – vol.4. – no.3. – pp. 185-191. doi: 10.5370/JICEE.2014.4.3.185.
4. Мордкович А.Г., Туркот В.А. Система управления, мониторинга и диагностики трансформаторного оборудования СУМТО // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2007. – №6. – С. 23-28.
5. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под ред. Лизунова С.Д., Лоханина А.К. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.
6. Поляков М.А., Василевский В.В. Prediction of wearing out of power transformer winding insulation // Технічна електродинаміка. – 2014. – №5. – С. 65-67.
7. Du Y., Zahn M., Lesieutre B.C., Mamishev A.V., Lindgren S.R. Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 1999. – vol.15. – no.1. – pp. 11-20. doi: 10.1109/57.744585.

REFERENCES

1. *E'kspertnaya sistema monitoringa, diagnostiki i upravleniya transformatornym oborudovaniem «E'SMDU TRANS» proizvodstva PAO «ZTR»* (Expert system for monitoring, diagnostic and control of transformer equipment «E'SMDU TRANS» produced by PAO «ZTR») Available at: <http://www.ztr.com.ua/ru/monitoring-system>. (accessed 13 May 2014). (Rus).
2. Rusov, V.A., Ovsyannikov, A.G., Zhivodernikov S.V. Foreign experience of oil-filled equipments monitoring. *Materials IV nauchno-prakticheskogo seminaru Obshchestvennogo soveta spetsialistov Sibiri i Vostoka po problemam monitoringa transformatornogo oborudovaniya i diagnostiki elektricheskikh ustanovok* [Proceedings of the IV scientific workshop of the Public Council of experts of Siberia and the East on the monitor-

- ing of transformer equipment and diagnostics of electrical installations]. Novosibirsk, Russia, 20-24 April 2009, pp. 7-22. (Rus).
3. Cheng J., Robalino D., Werelius P., Ohlen M. Advanced technique for moisture condition assessment in power transformers. *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 2014, vol.4, no.3, pp. 185-191. doi: 10.5370/JICEE.2014.4.3.185.
4. Mordkovich A.G. The system of management, monitoring and diagnostics of transformers SUMTO. *ELEKTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaja promyshlennost' – ELEKTRO. Electrical engineering, power industry, electrical industry*, 2007, no.6, pp. 23-28. (Rus).
5. Lizunov S.D., Lokhanin A.K. *Silovye transformatory. Spravochnaja kniga* [Power transformers. Handbook]. Moscow, Energoizdat Publ., 2004. 616 p. (Rus).
6. Polyakov M.A., Vasilevskij V.V. Prediction of wearing out of power transformer winding insulation. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamic*, 2014, no.5, pp. 65-67.
7. Du Y., Zahn M., Lesieutre B.C., Mamishev A.V., Lindgren S.R. Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 1999, vol.15, no.1, pp. 11-20. doi: 10.1109/57.744585.

Поступила (received) 04.02.2016

Василевский Владимир Валентинович, аспирант, Запорожский национальный технический университет, 69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64, тел/phone +380 50 8893073, e-mail: Lisses@ukr.net

V.V. Vasilevskij

¹Zaporozhye National Technical University, 64, Zhukovsky Str., Zaporozhye, 69063, Ukraine.

Dynamics model of moisture in paper insulation-transformer oil system in non-stationary thermal modes of the power transformer.

Introduction. An important problem in power transformers resource prognosis is the formation of moisture dynamics trends of transformer insulation. **Purpose.** Increasing the accuracy of power transformer insulation resource assessment based on accounting of moisture dynamics in interrelation with temperature dynamics. Working out of moisture dynamics model in paper insulation-transformer oil system in conjunction with thermodynamic model, load model and technical maintenance model. **Methodology.** The mathematical models used for describe the moisture dynamics are grounded on nonlinear differential equations. Interrelation moisture dynamics model with thermodynamic, load and technical maintenance models described by UML model. For confirming the adequacy of model used computer simulation. **Results.** We have implemented the model of moisture dynamics in power transformers insulation in interrelation with other models, which describe the state of power transformer in operation. The proposed model allows us to form detailed trends of moisture dynamics in power transformers insulation basing on monitoring data or power transformers operational factors simulation results. We have performed computer simulation of moisture exchange processes and calculation of transformer insulation resource for different moisture trends. **Originality.** The offered model takes into account moisture dynamics in power transformers insulation under the influence of changes of the power transformers thermal mode and operational factors. **Practical value.** The offered model can be used in power transformers monitoring systems for automation of resource assessment of oil-immersed power transformers paper insulation at different phase of lifecycle. Model also can be used for assessment of projected economic efficiency of power transformers exploitation in projected operating conditions. References 7, figures 4.
Key words: oil-paper insulation, power transformer, computer model, moisture dynamics.

В.С. Маляр, А.В. Маляр

МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИ ОДНОФАЗНОМУ ЖИВЛЕННІ

Запропоновано метод розрахунку механічних характеристик трифазних асинхронних двигунів, які живляться від однофазної мережі. Обертове магнітне поле створюється завдяки вмиканню послідовно в одну фазу конденсаторів. Задача розв'язується як крайова у трифазній нерухомій системі координат. В математичній моделі двигуна враховується насичення магнітопроводу та витіснення струму. Бібл. 5, рис. 3.

Ключові слова: механічна характеристика, асинхронний двигун, однофазне живлення, крайова задача, проєкційний метод, конденсатор.

Предложен метод расчета механических характеристик трехфазных асинхронных двигателей, которые питаются от однофазной сети. Вращающееся магнитное поле создается за счет включения последовательно в одну фазу конденсаторов. Задача решается как крайовая в трехфазной системе координат. В математической модели двигателя учитывается насыщение магнитопровода и вытеснение тока. Библ. 5, рис. 3.

Ключевые слова: механическая характеристика, асинхронный двигатель, однофазное питание, крайовая задача, проекционный метод, конденсатор.

Вступ. Асинхронні двигуни (АД) в основному виготовляються з трифазними обмотками, які живляться симетричною трифазною системою напруг. Однак на практиці може виникати потреба вмикання їх в однофазну мережу [1], для чого використовують конденсатори, які створюють зсув за фазою струму в одній обмотці, і магнітне поле двигуна стає не пульсуючим, а обертовим, внаслідок чого виникає електромагнітний момент. Крім того, розроблені і знаходять широке застосування конденсаторні електричні двигуни, які призначені для роботи від однофазної мережі [5]. І в першому, і в другому випадках існує проблема розрахунку їх пускових характеристик й вибору ємності конденсаторів.

В технічній літературі відомі методи розрахунку моменту при різних значеннях ємності конденсаторів [1, 2], однак ці методи не мають достатньої точності, оскільки не враховують адекватно такі чинники, як несиметрію живлення, насичення магнітопроводу та витіснення струму. Проблема аналізу роботи несиметричних режимів роботи АД методами математичного моделювання потребує вирішення двох задач: вибору математичної моделі двигуна і методу розрахунку. Ці проблеми взаємопов'язані, тому що з використанням спрощеної математичної моделі АД неможливо адекватно врахувати чинники, які визначають точність розрахунків, а застосування більш складних моделей потребує застосування відповідного математичного апарату.

Метою роботи є розроблення методу і алгоритму розрахунку механічних характеристик асинхронних двигунів, які живляться від однофазної мережі.

Система рівнянь. Трифазний АД з конденсаторами в одній фазі за визначенням є несиметричним зі сторони статора, а тому для аналізу електромагнітних процесів у них найбільш адекватною і оптимальною є трифазна система координат, але не фізична, а так звана загальмована [4]. В цій системі контури статора не перетворюються, що дає змогу адекватно описати

процеси в них, а трифазна обмотка ротора замінюється еквівалентною нерухомою трифазною, осі якої збігаються з осями обмотки статора.

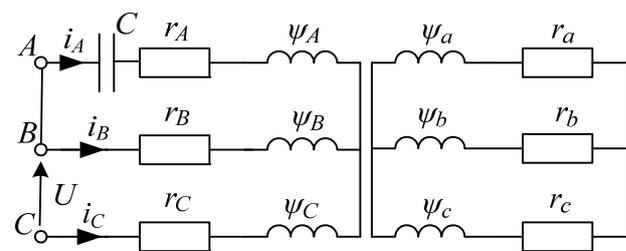


Рис. 1

Система рівнянь, які описують електромагнітні процеси в АД, трифазна обмотка статора якого живиться від однофазної мережі за зображеною на рис. 1 схемою, має вигляд [4]

$$\frac{d\psi_A}{dt} - \frac{d\psi_B}{dt} = -r_A i_A + r_B i_B - u_k;$$

$$\frac{d\psi_B}{dt} - \frac{d\psi_C}{dt} = -r_B i_B + r_C i_C + u_{BC};$$

$$i_A + i_B + i_C = 0;$$

$$\frac{d\psi_a}{dt} - \frac{d\psi_b}{dt} = -r_a i_a + r_b i_b - \alpha(\psi_b - 2\psi_c + \psi_a); \quad (1)$$

$$\frac{d\psi_b}{dt} - \frac{d\psi_c}{dt} = -r_b i_b + r_c i_c - \alpha(\psi_c - 2\psi_a + \psi_b);$$

$$i_a + i_b + i_c = 0;$$

$$\frac{du_k}{dt} = \frac{i_A}{C},$$

де $u_{BC} = \sqrt{3}U_m \sin(\omega_0 t - \pi/2)$ – лінійна напруга живлення; U_m , ω_0 – амплітуда фазної напруги та кутова частота; $\alpha = \omega_0(1-s)/\sqrt{3}$; s – ковзання; ψ_ξ , i_ξ , r_ξ ($\xi=A, B, C, a, b, c$) – потокозчеплення, струми та активні опори контурів; u_k – напруга на конденсаторі ємністю C .

© В.С. Маляр, А.В. Маляр

Метод і алгоритм розрахунку. Запишемо систему (1) одним векторним рівнянням $m = 7$ -го порядку вигляду

$$A \frac{d\vec{y}}{dt} = B\vec{y} + D\vec{x} + \vec{u}, \quad (2)$$

де

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & & & & & \\ & 1 & -1 & & & & \\ & & & 1 & -1 & & \\ & & & & 1 & -1 & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix};$$

$$\vec{y} = \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ u_k \end{bmatrix}; \quad \vec{x} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \\ u_k \end{bmatrix}; \quad \vec{u} = \begin{bmatrix} 0 \\ u_{BC} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & \alpha & \alpha & -2\alpha & \\ & & & -2\alpha & \alpha & \alpha & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \end{bmatrix};$$

$$\vec{D} = \begin{bmatrix} -r_A & r_B & & & & & -1 \\ & -r_B & r_C & & & & \\ 1 & 1 & 1 & & & & \\ & & & -r_a & r_b & & \\ & & & & -r_b & r_c & \\ & & & 1 & 1 & 1 & \\ & & & & & & \end{bmatrix}.$$

Система ДР (2) у формі Коші має вигляд

$$\frac{d\vec{y}(\vec{x}, t)}{dt} = z(\vec{y}, \vec{x}, \vec{u}, t). \quad (3)$$

Оскільки вектор $\vec{u}(t) = \vec{u}(t+T)$ є періодичною функцією часу, в усталеному режимі (при $s = \text{const}$) розв'язком системи ДР (3) є T -періодичні залежності компонент вектора $\vec{x}(t) = \vec{x}(t+T)$. Визначення періодичних функціональних залежностей компонент вектора \vec{x} шляхом розрахунку перехідного процесу до усталення неприйнятний з багатьох міркувань. Така задача найбільш ефективно може бути розв'язана в позачасовій області шляхом розв'язування крайової задачі розробленим на основі загальної теорії нелінійних коливань проєкційним методом, теоретичною основою якого є апроксимація координат стану

сплайнами третього порядку [3]. Формування крайової задачі здійснюється на сітці n вузлових точок періоду T . Результатом апроксимації одного ДР системи (3) є система алгебричних рівнянь n -го порядку

$$H\vec{Y} - \vec{Z} = \vec{U}, \quad (4)$$

де H – матриця переходу від неперервних координат до їх вузлових значень, елементи якої визначаються лише сіткою вузлів [3]; $\vec{Y} = (\overline{y_1}, \overline{y_n})^*$; $\vec{Z} = (\overline{z_1}, \overline{z_n})^*$; $\vec{U} = (\overline{u_1}, \overline{u_n})^*$, а системи ДР (2) – m векторних рівнянь вигляду (4)

$$H_c \vec{Y}_c - \vec{Z}_c = \vec{U}_c, \quad (5)$$

де $H_c = \text{diag}(H_1, H_m)$; $\vec{Y}_c = (\overline{Y_1}, \overline{Y}_m)^*$; $\vec{Z}_c = (\overline{Z_1}, \overline{Z}_m)^*$; $\vec{U}_c = (\overline{U_1}, \overline{U}_m)^*$.

Нелінійна система (5) алгебричних рівнянь mn -го порядку є дискретним відображенням нелінійної системи ДР (2) порядку m і апроксимує її на періоді T . Її розв'язком є вектор \vec{X} , компонентами якого є значення струмів віток та напруги на конденсаторі у вузлах сітки. За її допомогою можна не тільки розрахувати усталений режим, але й дослідити вплив на режим роботи двигуна зміни будь-якої координати, що входить до цієї системи. Для розрахунку усталеного режиму при заданому ковзанні застосовується метод продовження по параметру. Для цього в систему (5) вводимо параметр ε шляхом множення вектора прикладених напруг на ε і диференціюємо її по ньому. У результаті отримаємо диференціальне рівняння (ДР)

$$W \frac{d\vec{X}_c}{d\varepsilon} = \vec{U}_c, \quad (6)$$

де $W = \left(H_c - \frac{\partial \vec{Z}_c}{\partial \vec{Y}_c} \right) \frac{\partial \vec{Y}_c}{\partial \vec{X}_c} - \frac{\partial \vec{Z}_c}{\partial \vec{X}_c}$ – матриця Якобі, блочні

елементи якої $\left. \frac{\partial \vec{y}}{\partial \vec{x}} \right|_j$, $\left. \frac{\partial \vec{z}}{\partial \vec{y}} \right|_j$, $\left. \frac{\partial \vec{z}}{\partial \vec{x}} \right|_j$ визначаються значеннями параметрів АД в j -му вузлі.

$$\left. \frac{\partial \vec{y}}{\partial \vec{x}} \right|_j = \begin{bmatrix} L_j & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \left. \frac{\partial \vec{z}}{\partial \vec{y}} \right|_j = B; \quad \left. \frac{\partial \vec{z}}{\partial \vec{x}} \right|_j = D;$$

$$L_j = \begin{bmatrix} L_{AAj} & L_{ABj} & L_{ACj} & L_{Aaj} & L_{Abj} & L_{Acj} \\ L_{BAj} & L_{BBj} & L_{BCj} & L_{Baj} & L_{Bbj} & L_{Bcj} \\ L_{CAj} & L_{CBj} & L_{CCj} & L_{Caj} & L_{Cbj} & L_{Ccj} \\ L_{aAj} & L_{aBj} & L_{aCj} & L_{aaj} & L_{abj} & L_{acj} \\ L_{bAj} & L_{bBj} & L_{bCj} & L_{baj} & L_{bbj} & L_{bcj} \\ L_{cAj} & L_{cBj} & L_{cCj} & L_{caj} & L_{cbj} & L_{ccj} \end{bmatrix}.$$

Інтегруючи систему ДР (6) по ε від $\varepsilon = 0$ до $\varepsilon = 1$, знаходимо значення вектора \vec{X} при заданій напрузі живлення, яке можна уточнити методом Ньютона.

Для дослідження впливу на режим роботи АД зміни будь-якої координати необхідно, вважаючи вектор прикладеної напруги незмінним, продиференцію-

вати систему (5) по цій координаті як параметру. Зокрема у разі розрахунку механічної характеристики отримаємо систему ДР

$$W \frac{d\vec{X}_c}{ds} = \frac{\partial \vec{Z}_c}{\partial s}, \quad (7)$$

інтегруючи яку, отримаємо багатовимірну характеристику. При цьому матриця Якобі така, як в (6), а вектор правих частин складається з n векторів вигляду

$$\left. \frac{\partial \vec{Z}}{\partial s} \right|_j = \frac{\partial B}{\partial s} \vec{y}_j,$$

де $\partial B / \partial s$ дорівнює матриці B , в якій $\alpha = -\omega_l / \sqrt{3}$.

Задача розрахунку механічної характеристики розв'язується в два етапи: на першому розраховуємо усталений режим при ковзанні $s = 1,0$, а на другому – залежності координат в функції ковзання від $s = 1,0$ до заданого значення. І на їх основі механічну характеристику $M_e = M_e(s)$. Електромагнітний момент АД обчислюється за формулою [4]

$$M_e = \frac{P}{\sqrt{3}} I_\mu \left((i_{\mu B} - i_{\mu C}) \dot{I}_A + (i_{\mu C} - i_{\mu A}) \dot{I}_B + (i_{\mu A} - i_{\mu B}) \dot{I}_C \right).$$

Для визначення елементів матриці L_j диференціальних індуктивностей використовується характеристика намагнічування головного магнітного шляху і залежності потокозчеплень розсіювання статора (s) та ротора (r) від відповідних струмів [4]

$$\psi_\mu = \psi_\mu(i_\mu), \quad \psi_{\sigma s} = \psi_{\sigma s}(i_s), \quad \psi_{\sigma r} = \psi_{\sigma r}(i_r),$$

де i_s, i_r – модулі зображувальних векторів цих струмів.

З метою врахування витіснення струму в стержнях ротора кожен з них разом із короткозамкненими кільцями розділяється по висоті на k шарів. Тобто вважається, що на роторі є k короткозамкнених обмоток з відповідними розмірами і кожна з них еквівалентується трифазною. За таких умов в системі рівнянь (1) замість трьох рівнянь для ротора необхідно записати $3k$ рівнянь вигляду

$$\frac{d\psi_{ak}}{dt} - \frac{d\psi_{bk}}{dt} = -r_{ak}i_{ak} + r_{bk}i_{bk} - \alpha(\psi_{bk} - 2\psi_{ck} + \psi_{ak});$$

$$\frac{d\psi_{bk}}{dt} - \frac{d\psi_{ck}}{dt} = -r_{bk}i_{bk} + r_{ck}i_{ck} - \alpha(\psi_{ck} - 2\psi_{ak} + \psi_{bk});$$

$$i_{ak} + i_{bk} + i_{ck} = 0.$$

Збільшення кількості рівнянь не призводить до зміни алгоритму розрахунку і мало впливає на обсяг обчислень, оскільки матриця Якобі слабо заповнена, що дає змогу для розв'язування системи рівнянь використовувати алгоритм, який враховує її структуру.

Приклад результатів математичного моделювання наведено на рис. 2, 3.

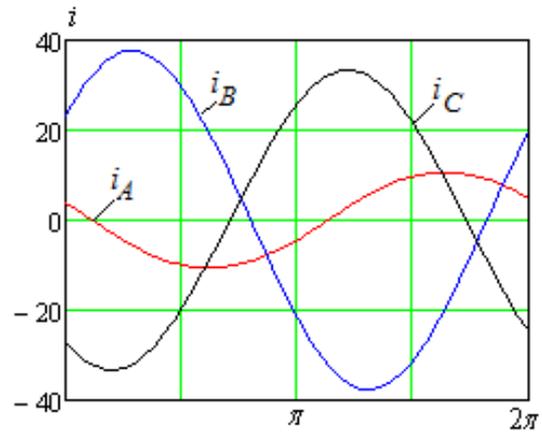


Рис. 2. Періодичні залежності струмів фаз двигуна 4A80B2Y3 при ковзанні $s = 1,0$ і ємності конденсаторів $C = 100$ мкФ

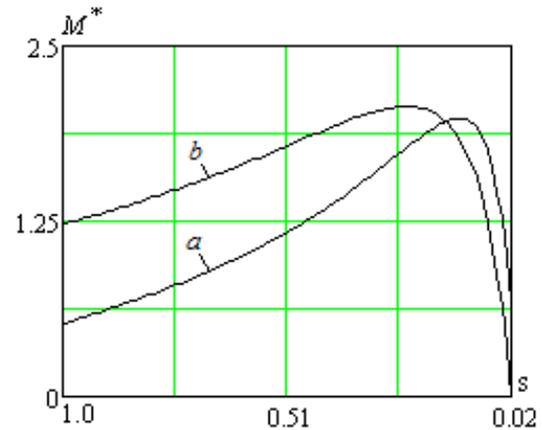


Рис. 3. Статичні механічні характеристики двигуна 4A80B2Y3 при різних ємностях конденсаторів: $C = 100$ мкФ (a) і $C = 200$ мкФ (b)

Висновок.

Розроблений метод розрахунку статичних механічних характеристик трифазних АД з короткозамкненим ротором, які живляться від однофазної мережі, дає змогу досліджувати вплив ємності конденсаторів на перебіг процесу пуску і вибирати таке її значення, яке забезпечує необхідний пусковий момент. В основу розробленого алгоритму покладено математичну модель АД, в якій враховується насичення магнітопроводу й витіснення струму в стержнях ротора, і диференціальний метод розрахунку статичних характеристик на основі розв'язування крайової задачі для системи диференціальних рівнянь електричної рівноваги.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Беспалов В.Я., Мощинский Ю.А., Петров А.П. Динамические показатели трехфазных асинхронных двигателей, включаемых в однофазную сеть // Электротехника. – 2000. – №1. – С. 13-19.
2. Бешта А.С., Семин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя при несимметричном питании статоров // Электромеханичні та енергозберігаючі системи. – 2014. – №2. – С. 10-16.
3. Маляр В.С., Маляр А.В. Математическое моделирование периодических режимов работы электротехнических

устройств // Электронное моделирование. – 2005. – Т.27. – №3. – С. 39-53.

4. Филъц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. – К.: Наукова думка, 1979. – 208 с.

5. Шуруб Ю.В. Математическая модель асинхронного конденсаторного двигателя с тиристорным управлением // Технічна електродинаміка. – 1999. – №4. – С. 52-56.

REFERENCES

1. Bepalov V.Ya., Moshchynsky Yu.A., Petrov A.P. Dynamic indicators of three-phase induction motors connected to single-phase supply. *Elektrotehnika – Electrical engineering*, 2000, no.1, pp. 13-19. (Rus).

2. Beshta A.S., Semin A.A. Evaluation of parameters of the equivalent circuit of the induction motor for asymmetrical power supply to the stator. *Elektromekhanichni i enerhozberhachiuchy systemy – Electromechanical and energy saving systems*, 2014, vol. 2, pp. 10-16. (Rus).

3. Malyar V.S., Malyar A.V. Mathematical modeling of periodic modes of electrotechnical devices. *Electronnoe modelirovanie – Electronic Modeling*, 2005, vol.27, no.3, pp. 39-53. (Rus).

4. Fyl'ts R.V. *Matematicheskie osnovy teorii elektromekhanicheskikh preobrazovatelei* [Mathematical foundations of the theory of electromechanical transducers]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1979. 208 p. (Rus).

5. Shurub Yu.V. A mathematical model of an asynchronous capacitor engine with a thyristor control. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 1999, no.4, pp. 52-56. (Rus).

Надійшла (received) 09.03.2016

Маляр Василь Сафронович¹, д.т.н., професор,
Маляр Андрій Васильович¹, д.т.н., професор,
¹Національний університет «Львівська політехніка»,
79013, Львів, вул. С. Бандери, 12,
тел/phone +38 032 2582119,
e-mail: svmalyar@polynet.lviv.ua

V.S. Malyar¹, A.V. Malyar¹

¹ Lviv Polytechnic National University,
12, S. Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine.

Mechanical characteristics of three-phase induction motors with single-phase power supply.

Aim. Development of a method for calculating mechanical characteristics of three-phase induction motors with single-phase power supply. **Methods.** The developed algorithm is based on the high-adequacy mathematical model of motor and projection method for solving the boundary problem for equations of electrical circuits balance presented in the three-phase coordinate system. As a result of asymmetry of power supply to the stator windings, in steady state, flux-linkage and current change according to the periodic law. They are determined by solving the boundary problem. **Results.** The developed mathematical model allows determining periodic dependence of coordinates as a function of slip and, based on them, mechanical characteristics of motors. **Academic novelty.** The developed method relies on a completely new mathematical approach to calculation of stationary modes of nonlinear electromagnetic circuits, which allows obtaining periodic solution in a timeless domain. **Practical value.** Using the developed calculation algorithm, one can select capacitance required to start an induction motor with single-phase power supply and calculate static mechanical characteristics at a given capacitance. References 5, figures 3.

Key words: mechanical characteristic, induction motor, single-phase power supply, boundary problem, projection method, capacitor.

В.Б. Финкельштейн, А.Б. Егоров

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧЕТЫРЕХФАЗНОГО ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПИТАНИИ ОТ БЕСКОНДЕНСАТОРНОГО КОММУТАТОРА

Розглянуто електромеханічні процеси в вентильному реактивному двигуні і його характеристики при живленні від комутатора фірми Graseby Controls Ltd з вилученими з його схеми конденсаторами. Розроблено математичну модель, проведено чисельний і експериментальний аналіз характеристик і параметрів вентильного реактивного двигуна. Результати, які представлені в статті, дозволяють проводити вибір числа витків і потужність двигуна в порівнянні з двигуном, що живиться від комутатора за схемою асиметричного моста в залежності від технічних вимог. Бібл. 9, табл. 1, рис. 10.

Ключові слова: вентильний реактивний двигун, комутатор, потокозчеплення фаз, кут повороту ротора, потужність двигуна.

Рассмотрены электромеханические процессы в вентильном реактивном двигателе и его характеристики при питании от коммутатора фирмы Graseby Controls Ltd с изъятными из его схемы конденсаторами. Разработана математическая модель, проведено численный и экспериментальный анализ характеристик и параметров вентильного реактивного двигателя. Результаты, которые представлены в статье, разрешают проводить выбор числа витков и мощности двигателя в сравнении с двигателем, который питается от коммутатора по схеме асимметрического моста в зависимости от технических требований. Библ. 9, табл. 1, рис. 10.

Ключевые слова: вентильный реактивный двигатель, коммутатор, потокозчепление фаз, угол поворота ротора, мощность двигателя.

Введение. Постановка задачи. В настоящее время все чаще в различных машинах и механизмах применяются вентильные реактивные двигатели (ВРД), известные в западных странах и в США как Switched Reluctance Motor (SRM) [7-9], в России – как вентильно-индукторные двигатели [6] (ВИД) и вентильные индукторно-реактивные двигатели [2] (ВИРД), в Украине – ВРД. При проектировании этих двигателей решается вопрос выбора коммутатора.

Анализ последних достижений и публикаций по данному вопросу. В то время, как коммутатор по схеме асимметричного моста [9] (рис. 1) включает восемь транзисторов и восемь диодов; коммутатор Миллера [9] (рис. 2) содержит шесть транзисторов и шесть диодов; в схему коммутатора фирмы Graseby Controls Ltd [9] (рис. 3), кроме четырех транзисторов и четырех диодов, входят два конденсатора. Кроме того, в коммутаторе (рис. 3) имеет место дисбаланс напряжений, что приводит к увеличению пульсаций момента и к существенному снижению мощности двигателя.

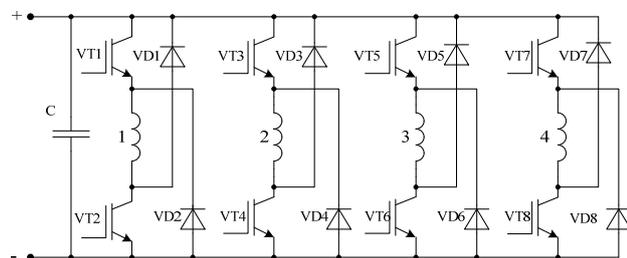


Рис. 1. Коммутатор по схеме асимметричного моста

При питании двигателя по схеме Миллера его мощность уменьшается на 20 % по сравнению с мощностью двигателя при его питании от коммутатора по схеме асимметричного моста [4]. Наибольшая мощность двигателя получается при его питании по схеме асимметричного моста по сравнению с мощностью

двигателя при питании от любых коммутаторов по иным схемам. В значительной степени свойствами коммутатора определяются характеристики двигателя.

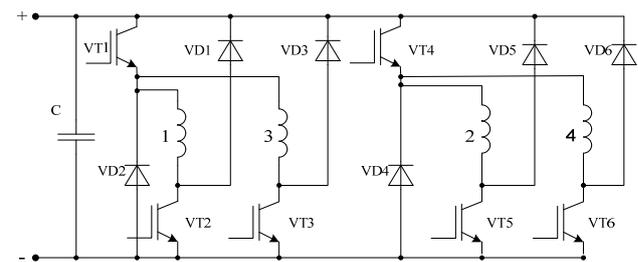


Рис. 2. Коммутатор Миллера

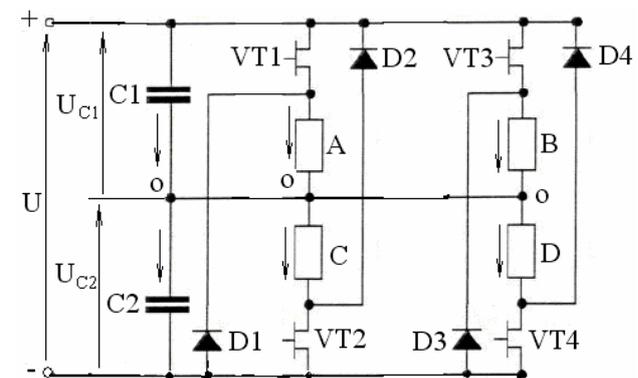


Рис. 3. Коммутатор фирмы Graseby Controls Ltd

В [5, 6] для питания четырехфазного ВРД применен коммутатор (рис. 5). Этот коммутатор состоит из четырех транзисторов и четырех диодов, но особенности работы схемы, математическая модель и характеристики двигателя, как с обычным, так и с клювообразным ротором, при питании от этого коммутатора не рассмотрены.

Целью работы является разработка математической модели для расчета электромеханических харак-

теристик ВРД при питании от коммутатора с четырьмя транзисторами и четырьмя диодами для определения параметров обмоток двигателей, позволяющих улучшить виброакустические характеристики и получить высокие экономические показатели.

Разработка математической модели. Магнитная цепь двигателя с размещенными обмотками фаз представлена на рис. 4.

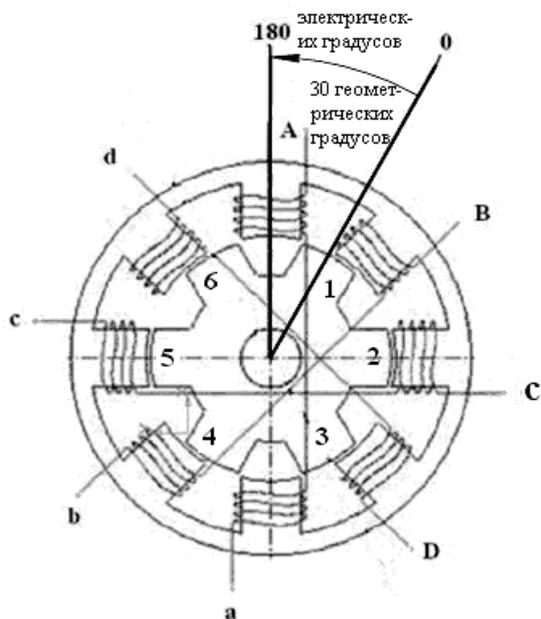


Рис. 4. Магнитная цепь двигателя

Схема коммутатора показана на рис. 5, отдельные звенья схемы состоят из фаз *A* и *D*; *C* и *B*.

Принято, что сопротивление транзисторов в открытом состоянии и диодов для прямого тока равно нулю, а сопротивление транзисторов в закрытом состоянии и диодов для обратного напряжения равно бесконечности. При питании одной фазы двигателя и при питании одновременно двух соседних фаз (рис. 4) определен поток через зубец [2]. При подключении второй фазы поток первой фазы изменился на 2,5%. Это позволяет принять допущение об отсутствии взаимной индуктивности фаз.

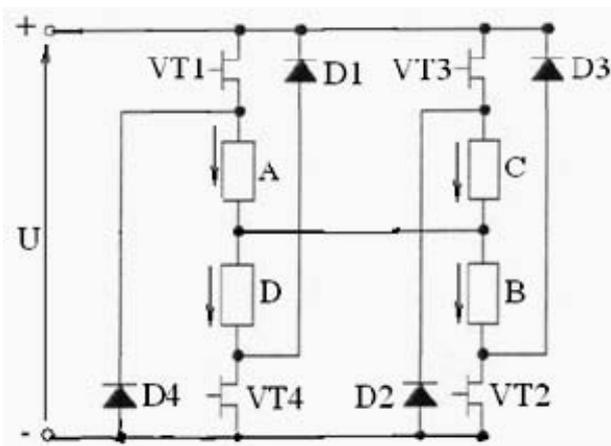


Рис. 5. Схема примененного коммутатора

Когда угол поворота ротора ζ в электрических радианах находится в диапазоне $0 \leq \zeta \leq \pi/2$, то тран-

зисторы *VT1* и *VT2* открыты и, если при этом токи в фазах *D* и *C* не равны нулю, то фаза *D* через диод *D1* и транзистор *VT1* подключается параллельно к фазе *A*, а фаза *C* через транзистор *VT2* и диод *D2* подключается параллельно к фазе *B*. Транзисторы *VT4* и *VT3* заперты.

На данном интервале угла поворота ротора токи фаз, потокосцепления и момент ВРД описываются системой дифференциальных уравнений (1)

$$\begin{aligned} i_A \cdot r + \frac{d\Psi_A(i_A, \zeta)}{dt} + i_B \cdot r + \frac{d\Psi_B(i_B, \zeta)}{dt} &= U; \\ i_C \cdot r + \frac{d\Psi_C(i_C, \zeta)}{dt} &= -i_B \cdot r - \frac{d\Psi_B(i_B, \zeta)}{dt}; \\ i_D \cdot r + \frac{d\Psi_D(i_D, \zeta)}{dt} &= -i_A \cdot r - \frac{d\Psi_A(i_A, \zeta)}{dt}; \\ i_D &= i_A + i_C - i_B, \end{aligned} \quad (1)$$

где i_A, i_B, i_C и i_D – токи фаз, $\Psi_A(i_A, \zeta), \Psi_B(i_B, \zeta); \Psi_C(i_C, \zeta), \Psi_D(i_D, \zeta)$ – потокосцепления фаз как функции их токов и угла поворота ротора; r – активное сопротивление обмотки фазы (все величины – в системе СИ).

Четвертое уравнение в (1) справедливо во всех диапазонах углов поворота ротора.

В диапазоне углов поворота ротора в электрических радианах $\pi/2 \leq \zeta \leq \pi$ транзисторы *VT1* и *VT4* открыты, а транзисторы *VT2* и *VT3* – заперты. При этом, фаза *B* подключена параллельно фазе *A*, а фаза *C* – параллельно фазе *D*. Исходная система уравнений для указанного интервала углов поворота ротора может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} i_D \cdot r + \frac{d\Psi_D(i_D, \zeta)}{dt} + i_A \cdot r + \frac{d\Psi_A(i_A, \zeta)}{dt} &= U; \\ i_B \cdot r + \frac{d\Psi_B(i_B, \zeta)}{dt} &= -i_A \cdot r - \frac{d\Psi_A(i_A, \zeta)}{dt}; \\ i_C \cdot r + \frac{d\Psi_C(i_C, \zeta)}{dt} &= -i_D \cdot r - \frac{d\Psi_D(i_D, \zeta)}{dt}. \end{aligned} \quad (2)$$

В диапазоне углов поворота ротора в электрических радианах $\pi \leq \zeta \leq 3\pi/2$ транзисторы *VT3* и *VT4* открыты, фаза *A* через транзистор *VT4* и диод *D4* подключена параллельно фазе *D*, а фаза *B* через диод *D3* и транзистор *VT3* подключена параллельно фазе *C*. Транзисторы *VT1* и *VT2* заперты. Электромагнитные процессы в ВРД в этом диапазоне углов поворота ротора описываются системой

$$\begin{aligned} i_C \cdot r + \frac{\partial \Psi_C(i_C, \zeta)}{\partial i_C} + i_D \cdot r + \frac{\partial \Psi_D(i_D, \zeta)}{\partial i_D} &= U; \\ i_A \cdot r + \frac{d\Psi_A(i_A, \zeta)}{dt} &= -i_D \cdot r - \frac{d\Psi_D(i_D, \zeta)}{dt}; \\ i_B \cdot r + \frac{d\Psi_B(i_B, \zeta)}{dt} &= -i_C \cdot r - \frac{d\Psi_C(i_C, \zeta)}{dt}. \end{aligned} \quad (3)$$

В диапазоне углов поворота ротора в электрических радианах $3\pi/2 \leq \zeta \leq 2\pi$ транзисторы *VT3* и *VT2* открыты, а транзисторы *VT1* и *VT4* – заперты. При этом фаза *A* подключена параллельно фазе *B*, а фаза *D* – параллельно фазе *C*. Уравнения ВРД могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned}
 i_B \cdot r + \frac{d\Psi_B(i_B, \zeta)}{dt} + i_C \cdot r + \frac{d\Psi_C(i_C, \zeta)}{dt} &= U \\
 i_D \cdot r + \frac{\partial \Psi_D(i_D, \zeta)}{\partial i_D} &= -i_C \cdot r - \frac{\partial \Psi_C(i_C, \zeta)}{\partial i_C}; \\
 i_A \cdot r + \frac{d\Psi_A(i_A, \zeta)}{dt} &= i_B \cdot r + \frac{d\Psi_B(i_B, \zeta)}{dt}.
 \end{aligned} \quad (4)$$

Аналитические зависимости потокосцепления фазы от тока и угла поворота ротора представлены в [3].

Для решения систем (1 – 4) методом Рунге-Кутты их необходимо представить как системы линейных алгебраических уравнений относительно производных от токов фаз по времени. С учетом того, что

$$\begin{aligned}
 \frac{d\Psi(i, \zeta)}{dt} &= \frac{\partial \Psi}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt} + \omega \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial \zeta}; \\
 \omega &= \frac{d\zeta}{dt}.
 \end{aligned} \quad (5)$$

Системы дифференциальных уравнений (1 – 4), разрешенные относительно первых производных токов, совместно с четвертым уравнением (1), вторым уравнением (5) и уравнением (6) позволяют, применяя метод Рунге-Кутты, получить зависимости токов, моментов и потокосцеплений фаз от времени и угла поворота ротора, а также частоты вращения от времени.

$$\begin{aligned}
 \frac{d\omega}{dt} &= \left(\int_0^{i_A} \frac{\partial \Psi_A(i_A, \zeta)}{\partial \zeta} \cdot di_A + \int_0^{i_B} \frac{\partial \Psi_B(i_B, \zeta)}{\partial \zeta} \cdot di_B + \right. \\
 &\left. + \int_0^{i_C} \frac{\partial \Psi_C(i_C, \zeta)}{\partial \zeta} \cdot di_C + \int_0^{i_D} \frac{\partial \Psi_D(i_D, \zeta)}{\partial \zeta} \cdot di_D - M_c \right) / J,
 \end{aligned} \quad (6)$$

где M_c – момент сопротивления на валу двигателя; J – момент инерции вращающихся масс.

В соответствии с изложенной математической моделью составлена программа расчета в среде MathCAD 2001.

На рис. 6 показана зависимость момента фазы от угла поворота ротора при питании ВРД от коммутатора по рис. 5 при наибольшей мощности (сплошная кривая), при равных удельных потерях (штрих пунктирная кривая) с удельными потерями при питании ВРД от коммутатора по схеме асимметричного моста, при наименьшей пульсации момента (пунктирная кривая).

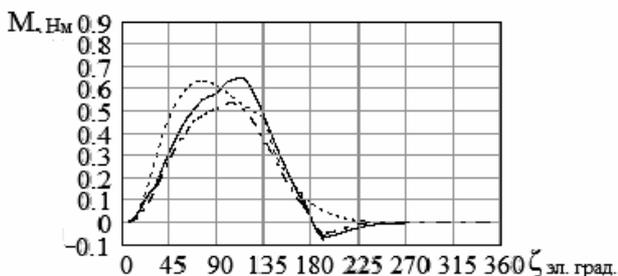


Рис. 6. Зависимость момента фазы от угла поворота ротора при питании ВРД от коммутатора по рис. 5

На рис. 7 показана зависимость результирующего момента от угла поворота ротора при питании ВРД от коммутатора по рис. 5 при наибольшей мощности (сплошная кривая), при равных удельных потерях

(штрих пунктирная кривая) с удельными потерями при питании ВРД от коммутатора по схеме асимметричного моста, при наименьшей пульсации момента (пунктирная кривая).

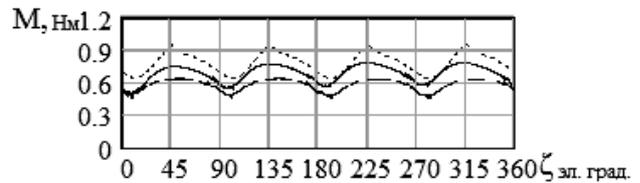


Рис. 7. Зависимость результирующего момента от угла поворота ротора при питании ВРД от коммутатора по рис. 5

На рис. 8 и 9 показаны кривые изменения тока и потокосцепления фазы соответственно.

На рис. 8 показана зависимость тока фазы от угла поворота ротора при питании ВРД от коммутатора по рис. 5 при наибольшей мощности (сплошная кривая), при равных удельных потерях (штрих пунктирная кривая) с удельными потерями при питании ВРД от коммутатора по схеме асимметричного моста, при наименьшей пульсации момента (пунктирная кривая).

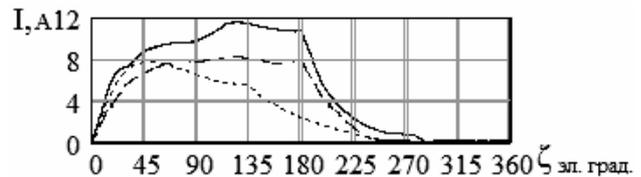


Рис. 8. Зависимость тока фазы от угла поворота ротора при питании ВРД от коммутатора по рис. 5

На рис. 9 показана зависимость потокосцепления фазы от угла поворота ротора при питании ВРД от коммутатора по рис. 5 при наибольшей мощности (сплошная кривая), при равных удельных потерях (штрих пунктирная кривая) с удельными потерями при питании ВРД от коммутатора по схеме асимметричного моста, при наименьшей пульсации момента (пунктирная кривая).

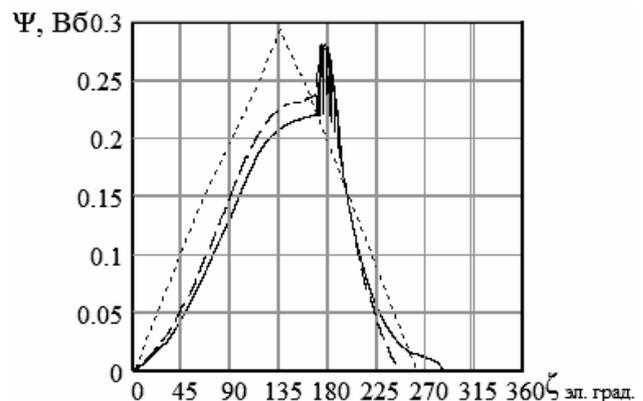


Рис. 9. Зависимость потокосцепления фазы от угла поворота ротора при питании ВРД от коммутатора по рис. 5

На рис. 10 представлена зависимость фазного напряжения от угла поворота ротора. Результаты расчета момента одной фазы ВРД представлены на рис. 6, результирующего момента двигателя – на рис. 7.

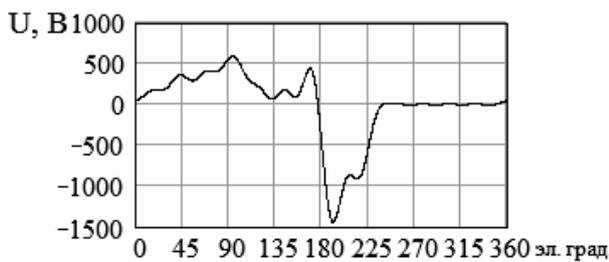


Рис. 10. Зависимость фазного напряжения от угла поворота ротора

Таблица 1

P_2 , Вт	n , об/мин	I_{ph} , А	η , %	P_o , Вт	P_{Fe} , Вт	P_{sch} , Вт	P_{mech} , Вт	ΔM , %	p_t , Вт/см ²	B , Тл	W_p	Схема коммутатора
1665	6006	3,863	61,6	59,8	540	114	325	38,8	1,621	1,121	130	Ас. мост (рис. 1)
1066	5997	2,67	60,7	34,56	256	79	322	21,18	1,07	0,772	143	Ас. мост (рис. 1)
1066	5937	3,464	53,2	29,61	524	30,4	325	12,18	1,59	1,128	102	4 диода, 4 транзистора (рис. 5)

*Примечание. Расчет потерь в стали производился по [1].

У двигателя, питающегося от коммутатора по схеме асимметричного моста (рис. 1), мощность, при которой обеспечивается максимально допустимая температура обмотки составляет 1,665 кВт. Но при этом пульсации момента составляют 38,8 %, что обуславливает высокие уровни шумов и вибраций. Благодаря установке углов коммутации, обеспечивающих снижение пульсаций момента и снижению мощности двигателя до уровня, ниже которого не имеет место снижение величины пульсации момента, получена мощность 1,066 кВт и величина пульсации момента 21,18%. Такая же мощность достигнута на двигателе при питании его от коммутатора на четырех транзисторах и четырех диодах. При этом стоимость коммутатора по схеме асимметричного моста на сегодняшний день составляет 1200 грн. Коммутатор по рис. 5 более дешевый, стоимость его составляет 540 грн. Пульсации же момента двигателя с этим коммутатором, как видно из табл. 1, почти вдвое меньше, чем наименьшие пульсации момента двигателя, питающегося от коммутатора по схеме асимметричного моста.

Следовательно, для двигателей с улучшенными виброакустическими характеристиками необходимо применять коммутатор по рис. 5.

Выводы.

1. Для получения улучшенных виброакустических характеристик ВРД целесообразно применять бесконденсаторный коммутатор на четырех транзисторах и четырех диодах, который позволяет получить вдвое меньшую величину пульсации момента, чем наименьшая величина пульсации момента двигателя, питающегося от коммутатора по схеме асимметричного моста.

2. Стоимость ВРД с бесконденсаторным коммутатором по схеме с четырьмя транзисторами и четырьмя диодами более чем в два раза меньше чем двигателя с коммутатором по схеме асимметричного моста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галайко Л.П. Учет магнитных потерь при проектировании вентильных индукторных двигателей // *Электротехника і електромеханіка*. – 2003. – №2. – С. 17-18. doi: 10.20998/2074-272X.2003.2.04.

Расчетные данные двигателей приведены в табл. 1, где P_2 – полезная мощность; n – частота вращения; I_{ph} – фазный ток; P_o – потери в обмотке; P_{Fe} – потери в стали; P_{sch} – потери в схеме коммутатора; P_{mech} – механические потери; ΔM – величина пульсаций момента; p_t – потери, приходящиеся на единицу внешней боковой поверхности сердечника статора (удельные потери – отношение суммарных потерь в двигателе к площади внешней боковой поверхности сердечника статора); W_p – число витков в фазе обмотки.

2. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели. СПб: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2003. – 148 с.

3. Зинченко Е.Е., Финкельштейн В.Б. Методика аппроксимации кривых намагничивания вентильных индукторно-реактивных двигателей // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2009. – №1 – С. 13-16. doi: 10.20998/2074-272X.2009.1.03.

4. Зинченко Е.Е., Финкельштейн В.Б. Сравнение характеристик вентильного реактивного двигателя при его питании от коммутаторов по схемам Миллера и асимметричного моста // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2012. – №1. – С. 33-35. doi: 10.20998/2074-272X.2012.1.07.

5. Лучко А.Р. Повышение эффективности электропривода бытовых погружных насосов путем использования вентильных индукторных двигателей: дисс. ... канд. техн. наук (05.09.03). – Запорожье, 2005. – 160 с.

6. Патент РФ №2390085, МПК H02K19/10, H02K19/12, H02K29/00. Вентильно-индукторный четырехфазный нереверсивный двигатель / Шабаев В.А., Кругликов О.В., Тубис Я.Б. – Заявл. 24.07.2008. – Опубл. 20.05.2010.

7. Krishnan R. Switched Reluctance Motor Drives. Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications. – CRC Press, 2001. – 398 p. doi: 10.1201/9781420041644.

8. Lawrenson P.J., Stephenson J.M., Fulton N.N., Blenkinsop P.T., Corda J. Variable-speed switched reluctance motors // *IEE Proceedings B Electric Power Applications*. – 1980. – vol.127. – no.4. – p. 253. doi: 10.1049/ip-b.1980.0034.

9. Miller T.J.E. Switched reluctance motors and their control. Magna Physics Publishing and Clarendon Press. Oxford, 1993.

REFERENCES

1. Galaiko L.P. The account of magnetic losses for want of designing switched reluctance motors. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2003, no.2, pp. 17-18. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2003.2.04.

2. Gollandtsev Y.A. *Ventil'nye induktorno-reaktivnye dvigateli* [Valve inductor and jet engines]. St. Petersburg, GNC RF CNII Elektropribor Publ., 2003. 148 p. (Rus).

3. Zinchenko E.E., Finkelshtein V.B. T A technique of magnetization curve approximation for switched reluctance motors. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2009, no.1, pp. 13-16. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2009.1.03.

4. Zinchenko E.E., Finkelshtein V.B. Performance analysis of a switched reluctance motor fed through an asymmetric half-bridge converter and a Millers bridge converter. *Elektrotehnika*

i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2012, no.1, pp. 33-35. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2012.1.07.

5. Luchko A.R. *Povyshenie effektivnosti electoprivoda bytovykh pogruzhnykh nasosov putem ispolzovaniya ventilnykh dvigatelei*. Diss. cand. techn. nauk [Increase of efficiency of the electric drive of household submersible pumps by use of valve inductor engines. Cand. tech. sci. diss.]. Zaporozhye, 2005. 160 p. (Rus).

6. Shabayev V.A., Kruglikov O.V., Tubis Ya.B. *Ventil'no-induktorniye chetyrekhfaznyi nereversivnyi dvigatel'* [Valve inductor 4-phase irreversible motor]. Patent Russian Federation, no. 2390085, 2010. (Rus).

7. Krishnan R. *Switched Reluctance Motor Drives. Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications*. CRC Press, 2001. 398 p. doi: 10.1201/9781420041644.

8. Lawrenson P.J., Stephenson J.M., Fulton N.N., Blenkinsop P.T., Corda J. Variable-speed switched reluctance motors. *IEE Proceedings B Electric Power Applications*, 1980, vol.127, no.4, p. 253. doi: 10.1049/ip-b.1980.0034.

9. Miller T.J.E. *Switched reluctance motors and their control*. Magna Physics Publishing and Clarendon Press. Oxford, 1993.

Поступила (received) 22.03.2016

Финкельштейн Владимир Борисович¹, д.т.н., проф.,
Егоров Алексей Борисович², к.т.н., доц.,

¹ Харьковський національний університет
городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,
61002, Харьков, ул. Революции, 12,
тел/phone +38 057 7319528, e-mail: finalvb@gmail.com

² Українська інженерно-педагогічна академія,
61003, Харьков, ул. Университетская, 16,
тел/phone +38 066 7228206, e-mail: diaskk@yandex.ru

V.B. Finkelshtein¹, A.B. Yegorov²

¹ O.M. Beketov National University of Urban Economy
in Kharkiv,

12, Revolution Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

² Ukrainian Engineering Pedagogics Academy,
16, Universitetskaya Str., Kharkiv, 61003, Ukraine.

Characteristics of a 4-phase valve reluctance motor when powered by uncapacitor switchboard.

Purpose. Nowadays more and more in a variety of machines and mechanisms applied switched reluctance motor. When designing these engines solve the problem selection switch. While the switch scheme comprises symmetrical bridge and eight transistors, eight diodes; Miller switch comprises six transistors and six diodes; in company Graseby Controls Ltd switch circuit but four transistors and four diodes includes two capacitors. The aim is to develop a mathematical model, calculation program, a numerical analysis of the characteristics and parameters of the WFD and the characteristics of their work. **Methodology.** It is assumed that the resistance in the open state transistors and diodes for direct current is zero and the resistance of the transistors in the closed state, and diode reverse voltage is infinity. When feeding a single-phase motor and power at the same time two adjacent phases determined by the flow through the tooth. **Results.** The motor powered by a switch on the circuit symmetrical bridge power, which provides a maximum permissible winding temperature is 1.665 kW. But at the same time the surge up to 38.8%, resulting in high levels of noise and vibration. Through the installation of switching angles, ensuring reduction of torque ripple and reduce engine power to a level below which there is a decrease in the value of torque ripple, received power of 1,066 kW and a torque ripple value of 21.18 %. For engines with improved vibration acoustic characteristics necessary to use a switch of four transistors and four diodes. **Practical value.** For motors with improved vibration acoustic characteristics appropriate to apply uncapacitor switch on four transistors and four diodes, which allows you to receive half the value of torque ripple than the lowest value of the motor torque ripple, eating from a switch on the circuit asymmetric bridge. The cost of reluctance motor with uncapacitor switch on the circuit with four transistors and four diodes is more than two times less than the motor with the switch on the circuit asymmetric bridge. References 9, tables 1, figures 10.

Key words: valve reluctance motor, switchboard, flux linkage of phases, rotor angle of rotation, motor power.

А.В. Чабан, В.Р. Левонюк, І.М. Дробот, А.Ф. Герман

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЛІНІЇ ЛЕХЕРА В СТАНІ НЕРОБОЧОГО ХОДУ

У роботі, на основі узагальненого міждисциплінарного (інтердисциплінарного) методу математичного моделювання, який ґрунтується на модифікації інтегрального варіаційного принципу Гамільтона-Остроградського, запропоновано математичну модель двопровідної довгої лінії електропередач, що працює в неробочому стані. Представлено результати комп'ютерної симуляції перехідних процесів у вигляді рисунків, які аналізуються. Бібл. 12, рис. 12.

Ключові слова: математичне моделювання, принцип Гамільтона-Остроградського, рівняння Ейлера-Лагранжа, електроенергетична система, лінія електропередач з розподіленими параметрами.

В работе, на основе обобщенного междисциплинарного (интердисциплинарного) метода математического моделирования, основанного на модификации интегрального вариационного принципа Гамильтона-Остроградского, предложена математическая модель двухпроводной длинной линии электропередач, которая работает на холостом ходу. Представлены результаты компьютерной симуляции переходных процессов в виде рисунков, которые анализируются. Библ. 12, рис. 12.

Ключевые слова: математическое моделирование, принцип Гамильтона-Остроградского, уравнение Эйлера-Лагранжа, электроэнергетическая система, линия электропередач с распределенными параметрами.

Вступ. Математичне моделювання складних електричних систем на сьогоднішній день є важливою технічною проблемою. За допомогою апарата математичного моделювання можна аналізувати електромагнітні та електромеханічні неусталені процеси різноманітних електротехнічних об'єктів і систем, не залучаючи до останніх коштовні натурні експерименти. Не є винятком тут і електроенергетика.

У нинішній праці в якості прикладу аналізу системи Лехера [1] використано довгу лінію з розподіленими параметрами, яка працює на постійному струмі. Відомо, що такі лінії знайшли належне місце в електроенергетичних системах багатьох країнах світу. Передавання електроенергії в такий спосіб: зменшує втрати в лініях (за рахунок відсутності явища скін-ефекту), уможливує об'єднання між собою локальних енергосистем, що працюють з різною частотою та зменшує затрати на будівництво при великих відстанях за рахунок меншої кількості проводів й допоміжної арматури та ін.

На жаль, у нашій державі в силу певних причин, утім і економічних, у 2014 році було виведено з ладу єдину лінію постійного струму Волгоград-Донбас, яка була спроектована на напругу 800 кВ. Але у високорозвинених зарубіжних країнах згадані лінії не тільки ефективно працюють, але вводяться в експлуатацію нові, із-за певних переваг, згаданих вище. Тут можна згадати такі лінії: тихоокеанська лінія постійного струму потужністю 1400 МВт, напругою ± 400 кВ, довжиною 1362 км для передачі електроенергії від ГЕС в штаті Орегон в енергосистему Лос-Анджелеса; лінія передачі електроенергії ГЕС «Сянцзяба» (Xiangjiaba) – Шанхай у Китаї напругою ± 800 кВ забезпечує передачу потужності 6 400 МВт на відстань у 2000 км; у Канаді три лінії передачі довжиною близько 900 км, побудовані від ГЕС Нельсон Рівер, що знаходяться за полярним колом, до м. Вінніпег на півдні країни. Потужність третьої ЕППС склала 2000 МВт при напрузі ± 500 кВ; в Бразилії введені в роботу два ланцюги ЕППС ГЕС Ітайпу пропускною спро-

можністю по 3150 МВт при напрузі ± 600 кВ. Довжина кожного ланцюга близько 800 км, та ін. [2].

Аналіз останніх досліджень. Серед низки наукових робіт присвячених аналізу перехідних процесів у електроенергетичних системах розглянемо деякі з них, найближчих до теми даної праці.

В [3] розроблена математична модель дво- та трипровідної лінії електропередач змінного струму для дослідження перехідних процесів та явищ перенапруг в лінії 500 кВ. На основі програмного комплексу АТР-ЕМТР були розраховані перехідні процеси та досліджені явища перенапруг під час аварійного стану лінії.

Практичний підхід при дослідженні перехідних електромагнітних процесів репрезентовано в роботі [4]. Після опису багатьох випадків моделювання висвітлені вимоги для моделювання вибраних елементів енергосистеми. Також зроблено порівняльний аналіз досліджень перехідних електромагнітних процесів на коректних і неправильних моделях енергосистеми.

В роботі [5] представлена математична модель електромагнітних перехідних процесів в електричних системах, яка основана на дискретних вузлових рівняннях в фазних координатах і неявних методах чисельного інтегрування, що дає можливість моделювати перехідні процеси при симетричних та несиметричних комутаціях і пошкодженнях в електричних мережах будь-якої конфігурації.

Праця [6] охоплює широкий спектр аналізу перехідних і усталених процесів в електроенергетиці під оригінальним кутом зору. Матеріал книги базується на класичних підходах до моделювання електроенергетичних систем. На жаль, очевидно із-за обмеження об'єму книги, в останній не представлено результати комп'ютерної симуляції хвильових процесів у лініях.

Метою роботи є удосконалення, на основі застосування варіаційних підходів, методів математичного моделювання перехідних процесів у лінії Лехера, яка працює в режимі неробочого ходу, й за рахунок цього більш коректно симулювати хвильові процеси.

© А.В. Чабан, В.Р. Левонюк, І.М. Дробот, А.Ф. Герман

Варіаційна модель лінії Лехера. Щоб будувати математичні моделі досліджуваних об'єктів з високим рівнем адекватності потрібно правильно використовувати основні фундаментальні закони прикладної фізики, які застосовуються в відповідних галузях науки [9]. У нашому випадку це електродинаміка [1, 6, 7].

Математичне моделювання, зазвичай, використовує два підходи. Перший – класичний підхід, що ґрунтується на законі збереження енергії і другий – варіаційний, що ґрунтується на мінімізації функціоналу дії системи [9]. Кожен з цих підходів має свої вади й переваги, але при правильному використанні призводить до вірних результатів [8]. Іншими словами, дороги, які ведуть до остаточної моделі відрізняються, але одержаний результат – однаковий. Звичайно, право вибору підходу до моделювання належить досліднику.

Ми пропонуємо для аналізу перехідних процесів у лінії Лехера використовувати модифікований принцип Гамільтона-Остроградського (варіаційний підхід) [9]. Згаданий підхід дає можливість уникнути декомпозиції єдиної динамічної системи, а одержати вихідні рівняння стану виключно з єдиного енергетичного підходу, шляхом побудови розширеної функції Лагранжа [9]. Іншими словами, запропонована дорога дає змогу будувати моделі динамічних систем на підставі міждисциплінарних (інтердисциплінарних) підходів. Особливо це актуально для систем з розподіленими параметрами, у тім і для довгих ліній електропередач, коли в рівняннях стану об'єкта потрібно враховувати: електростатичні впливи (явище корони), термодинамічні впливи (нагрівання електропроводів, особливо під час плавлення ожеледі), механічні впливи на проводи, зокрема, різного роду коливання (особливо резонансні й близькі до резонансу (биття коливаний) процеси) та ін. В нинішній праці ми не враховуємо вище згадані впливи, але ці впливи ми плануємо враховувати в подальших наших дослідженнях, власне для цього ми і пропонуємо цей підхід.

Ключовим елементом модифікованого принципу Гамільтона-Остроградського є розширений неконсервативний лагранжіан. Представимо його аналітичний вигляд [8, 10]:

$$L^* = \tilde{T}^* - P^* + \Phi^* - D^*, \quad (1)$$

де L^* – модифікована функція Лагранжа, \tilde{T}^* – кінетична коенергія, P^* – потенціальна енергія, Φ^* – енергія дисипації, D^* – енергія сторонніх непотенціальних сил.

Ми вже згадували, що лінія Лехера в загальному випадку розглядається як система з розподіленими параметрами [10, 11]. Тоді елементи модифікованої функції Лагранжа будуть не енергетичними функціями, а їхніми відповідними густинами [1]. Отже, функціонал дії за Гамільтоном-Остроградським буде виглядати так [9]:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} \left(L^* + \int_l L_l dl \right) dt, \quad I = \int_l L_l dl, \quad \text{тут } L^* = 0, \quad (2)$$

де S – дія за Гамільтоном-Остроградським, L_l – лінійна густина модифікованої функції Лагранжа, I – енергетичний функціонал.

Запишемо складники розширеної функції Лагранжа (мається на увазі лінійної густини) [9]:

$$\frac{\partial T^*}{\partial x} \equiv T_l = \frac{L_0 Q_t^2}{2}, \quad \frac{\partial P^*}{\partial x} \equiv P_l = \frac{1}{2C_0} Q_x^2, \quad Q_t \equiv \frac{\partial Q}{\partial t} = i; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Phi^*}{\partial x} \equiv \Phi_l = \Phi_{l3} - \Phi_{lB} = \int_0^t \left(\frac{R_0}{2} Q_t^2 - \frac{g_0}{2C_0^2} Q_x^2 \right)_{t=\tau} d\tau, \quad (4)$$

де $i(x,t)$ – струм в лінії, R_0, g_0, C_0, L_0 – параметри лінії, Φ_{l3} – зовнішня дисипація енергії, Φ_{lB} – внутрішня дисипація енергії, $Q(x,t)$ – заряд лінії.

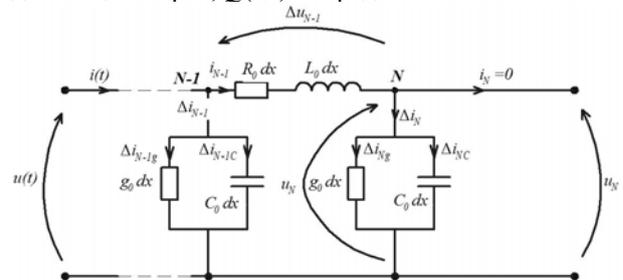


Рис. 1. Електрична схема з'єднання елементів лінії Лехера в стані неробочого ходу

Важливо відзначити, що в рівнянні (4) фігурує знак мінус! Це пов'язано з тим що функція внутрішньої дисипації залежить від струмів витоку, які протікають між проводами лінії. Очевидно, що лінія електропередач під час пересилання енергії від джерела до споживача споживає енергію, що розсіюється в просторі. Іншими словами, енергія передається виключно за допомогою електромагнітного поля, а проводи лінії лише вказують напрямок поширення електромагнітної хвилі [1].

З урахуванням рівнянь (3), (4) енергетичний функціонал буде виглядати так [9]:

$$I = \int_l \left\{ \frac{L_0}{2} Q_t^2 - \frac{1}{2C_0} Q_x^2 + \int_0^t \left(\frac{R_0}{2} Q_t^2 - \frac{g_0}{2C_0^2} Q_x^2 \right)_{t=\tau} d\tau \right\} dl. \quad (5)$$

Запишемо варіацію енергетичного функціоналу (5) і прирівняємо її до нуля

$$\int_l \left\{ \left[L_0 Q_t + R_0 \int_0^t Q_t|_{t=\tau} d\tau \right] \delta Q_t - \left[\frac{1}{C_0} Q_x + \frac{g_0}{C_0^2} \int_0^t Q_x|_{t=\tau} d\tau \right] \delta Q_x \right\} dl = 0. \quad (6)$$

Далі, для кожного з підінтегральних виразів застосуємо правило інтегрування за частинами, а також відому теорему Гаусса-Остроградського. Тоді, для першої дужки будемо мати [9]:

$$- \int_l \frac{\partial}{\partial t} \left(L_0 Q_t + R_0 \int_0^t Q_t|_{t=\tau} d\tau \right) \delta Q dl + \Omega_t \quad (7)$$

і для другої:

$$- \int_l \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{C_0} Q_x + \frac{g_0}{C_0^2} \int_0^t Q_x|_{t=\tau} d\tau \right) \delta Q dl + \Omega_x, \quad (8)$$

де Ω_t, Ω_x – крайові умови до функціоналу (5).

Звідки, можемо записати

$$\delta I = \int_l \left\{ \frac{1}{C_0} \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{g_0}{C_0^2} \int_0^t \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} d\tau - L_0 \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} - R_0 \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t \frac{\partial Q}{\partial t} d\tau \right\} \delta Q dl + \Omega = 0, \quad \Omega = \Omega_t + \Omega_x. \quad (9)$$

Легко бачити, що варіація енергетичного функціоналу може бути рівною нулю тільки у випадку рівності нулю підінтегральної функції або варіації функції заряду лінії. Оскільки δQ ніколи не може бути рівною нулю [9, 12] то енергетичний функціонал (9) одержує стаціонарне значення лише у випадку рівності нулю підінтегральної функції, тобто наявності рівняння Ейлера-Пуасона [9, 12]

$$\frac{1}{C_0} \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{g_0}{C_0^2} \int_0^t \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} d\tau - L_0 \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} - R_0 \frac{\partial Q}{\partial t} = 0. \quad (10)$$

Запишемо до рівняння (10) вираз стаціонарних зв'язків [1, 10]

$$-\frac{1}{C_0} \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = L_0 \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} + R_0 \frac{\partial Q}{\partial t}. \quad (11)$$

Узявши до уваги вираз [1]

$$\int_0^t \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} d\tau = \frac{\partial Q}{\partial t}, \quad \int_0^t \frac{\partial Q}{\partial t} d\tau = Q \quad (12)$$

приходимо остаточно до відомого телеграфного рівняння [1, 10]

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} + (R_0 C_0 + g_0 L_0) \frac{\partial Q}{\partial t} + g_0 R_0 Q. \quad (13)$$

Рівняння лінії Лехера (телеграфне рівняння) записане для функції заряду лінії. Але воно легко трансформується у загальне телеграфне рівняння

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 \lambda}{\partial t^2} + (R_0 C_0 + g_0 L_0) \frac{\partial \lambda}{\partial t} + g_0 R_0 \lambda, \quad \lambda = (Q, u, i). \quad (14)$$

Досвід показує, що для найбільш оптимального описання фізичних процесів у лінії доцільно в якості загальної функції використати функцію напруги, тобто $\lambda = u(x, t)$ [1, 10]

Перепишемо (14) у такий спосіб:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = (C_0 L_0)^{-1} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - (g_0 L_0 + C_0 R_0) v - g_0 R_0 u \right), \quad \frac{\partial u}{\partial t} = v. \quad (15)$$

Найважливішою проблемою розв'язання рівняння (15) є визначення початкових ($v(x, t)|_{t=0}$) і крайових ($u(x, t)|_{x=0}$ і $u(x, t)|_{x=l}$) умов. Що до перших, то тут проблема розв'язується у звичайний спосіб (їх розраховують з попередніх досліджень або приймають нульовими). Основна проблема зводиться до пошуку крайових умов. У загальному випадку напруги на початку $u(x, t)|_{x=0}$ й кінці $u(x, t)|_{x=l}$ лінії є невідомими. У конкретному випадку (щодо нинішньої праці) напруга на початку лінії відома, натомість у кінці лінії – ні. Власне пошуком цієї напруги ми й займемось.

Запишемо рівняння (11) в такий спосіб (з урахуванням $Q_x(x, t) = C_0 u(x, t)$):

$$-\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = R_0 i(x, t) + L_0 \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}. \quad (16)$$

Далі, для лінії електропередач рівняння (15), (16) запишемо в дискретному просторі (дискретизуємо за методом прямих)

$$\frac{dv_j}{dt} = (C_0 L_0)^{-1} \left(\frac{u_{j-1} - 2u_j + u_{j+1}}{(\Delta x)^2} - (g_0 L_0 + C_0 R_0) v_j - g_0 R_0 u_j \right), \quad u_1 = u(x, t)|_{x=0}, \quad u_N = u(x, t)|_{x=l}; \quad (17)$$

$$-\frac{u_{j+1} - u_{j-1}}{2\Delta x} = R_0 i_j + L_0 \frac{di_j}{dt}; \quad (18)$$

$$\frac{du_j}{dt} = v_j, \quad j = 2, \dots, N-1. \quad (19)$$

Перепишемо рівняння (17), (18) для N -го вузла дискретизації згідно з рис. 1 у такому вигляді:

$$\frac{dv_N}{dt} = \frac{1}{C_0 L_0} \left[\frac{1}{(\Delta x)^2} (u_{N-1} - 2u_N + u_{N+1}) - (g_0 L_0 + C_0 R_0) v_N - g_0 R_0 u_N \right]; \quad (20)$$

$$-\frac{u_{N+1} - u_{N-1}}{2\Delta x} = 0, \quad (21)$$

де u_{N+1} – функція напруги вузла дискретизації у фіктивному шарі [10], яку знайдемо з рівняння (21).

Тоді,

$$u_{N+1} = u_{N-1}. \quad (22)$$

Ураховуючи (20) і (22) запишемо кінцеве рівняння довгої лінії для N -го вузла

$$\frac{dv_N}{dt} = \frac{2}{C_0 L_0 (\Delta x)^2} u_{N-1} - \left(\frac{2}{C_0 L_0 (\Delta x)^2} + \frac{g_0 R_0}{C_0 L_0} \right) u_N - \frac{g_0 L_0 + C_0 R_0}{C_0 L_0} v_N, \quad (23)$$

$$\frac{du_N}{dt} = v_N. \quad (24)$$

Важливою функціональною залежністю, яка цікавить потенційних користувачів є значення струму в елементах лінії Лехера. Розрахувати його можна так. Дискретизуючи рівняння (16) за методом прямих (права похідна) будемо мати:

$$-\frac{u_{j+1} - u_j}{\Delta x} = R_0 i_j + L_0 \frac{di_j}{dt}. \quad (25)$$

Звідки, одержимо остаточно

$$\frac{di_j}{dt} = \frac{1}{L_0 \Delta x} (u_j - u_{j+1}) - \frac{R_0}{L_0} i_j, \quad j = 1, \dots, N-1. \quad (26)$$

Сумісному інтегруванню підлягає така система диференціальних рівнянь: (17), (19), (23), (24), (26).

Результати комп'ютерної симуляції. Комп'ютерна симуляція перехідних процесів проводилась для лінії Лехера на постійному струмі в стані неробочого ходу. Лінія має такі параметри: $R_0 = 0.86 \cdot 10^{-1}$ Ом/км $L_0 = 0.134 \cdot 10^{-12}$ Гн/км, $C_0 = 0.85 \cdot 10^{-8}$ Ф/км, $g_0 = 0.375 \cdot 10^{-7}$ См/км, довжина лінії $l = 600$ км. Лінія заживляється постійною напругою $u(x, t)|_{x=0} = 400$ кВ.

На рис. 2, 3, 4 показано просторовий розподіл електромагнітної хвилі як функціональної залежності струмів (1) та напруг (2). З рисунків видно фізичні за-

сади електромагнітних процесів у довгій лінії Лехера. Проаналізуємо ці процеси.

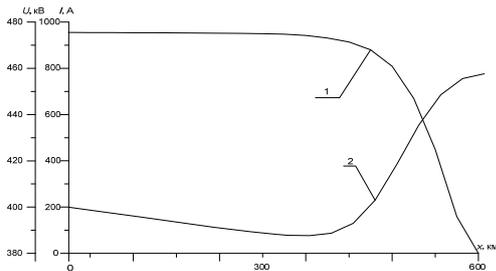


Рис. 2. Розподіл струму (1) і напруги (2) в лінії в момент часу $t = 0.002$ с

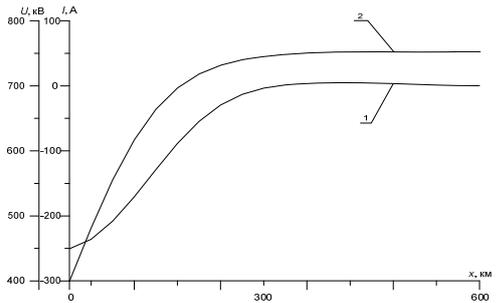


Рис. 3. Розподіл струму (1) і напруги (2) в лінії в момент часу $t = 0.004$ с

На рис. 2. показано просторовий розподіл функції струму та напруги в момент часу 0.002 с. Аналізуючи згаданий рисунок легко бачити, що функція напруги починає спадати, і в центральній частині лінії різко піднімається догори. А функція струму у цьому ж місці навпаки, – спадає.

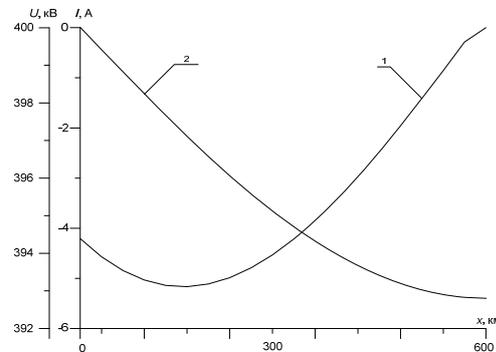


Рис. 4. Розподіл струму (1) і напруги (2) в лінії в момент часу $t = 0.1$ с

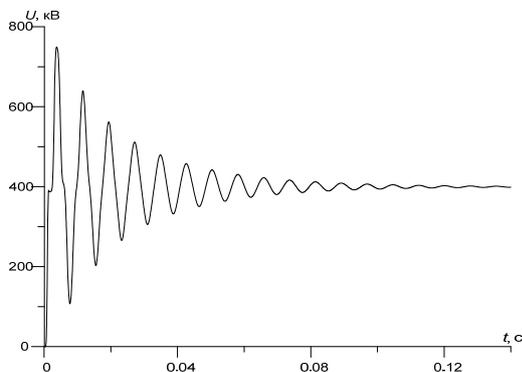


Рис. 5. Зображення функції перехідного процесу напруги в центральній точці лінії

Нагадаємо, що хоча лінія знаходиться в неробочому стані, струми витoku та струми в елементах лінії будуть присутніми. Власне причина того – це ємнісні струми між проводами лінії. Очевидно, що в кінці лінії електропередач струм буде рівний нулю, оскільки лінія ненавантажена.

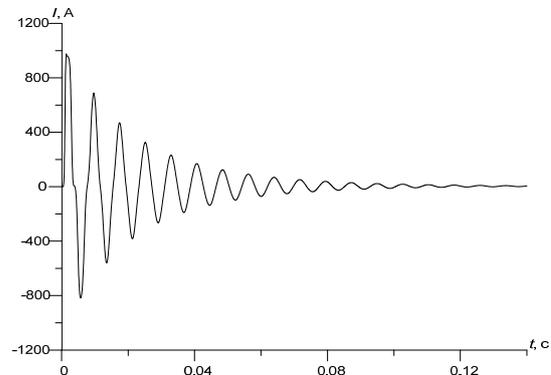


Рис. 6. Зображення функції перехідного процесу струму в центральній точці лінії

На рис. 3. показано те саме, але в момент часу 0.004 с. Якщо в момент часу 0.002 с (див. рис. 2) функція напруги зросла до 460 кВ то в момент часу 0.004 с цей зріст був 750 кВ. Напруга зросла майже в два рази. Щодо струмів, то вони зменшились майже в чотири рази.

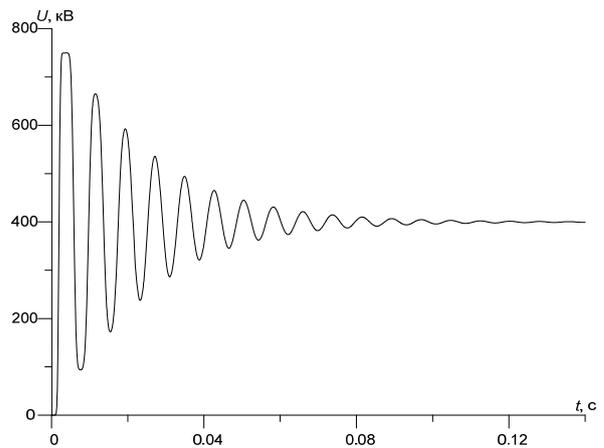


Рис. 7. Зображення функції напруги перехідного процесу в кінці лінії

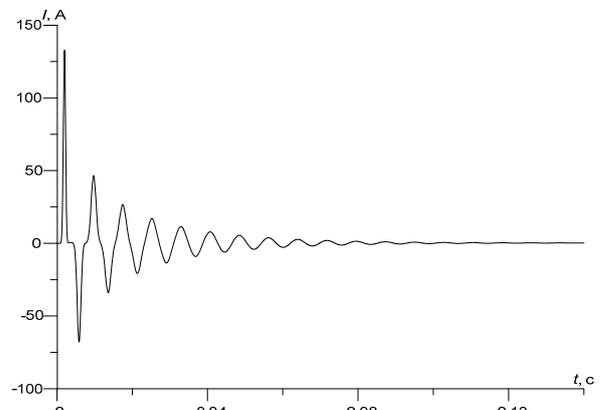


Рис. 8. Зображення функції струму перехідного процесу в кінці лінії

На рис. 4. показано знову ж таки те саме, що й на рис. 2 і 3 в момент часу коли перехідний процес практично завершився. З рисунку видно, що відхилення функцій напруги й струму прийняли практично мінімальне значення. Іншими словами, амплітуда електромагнітної хвилі в результаті дисипаційних процесів істотно зменшилася. Коливний процес практично затухає.

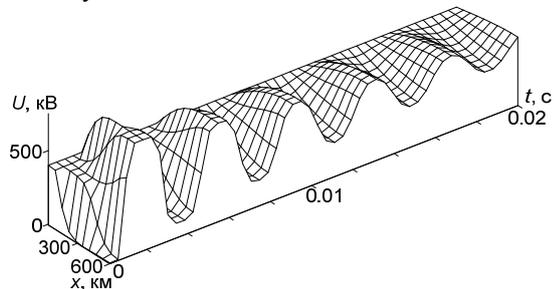


Рис. 9. Часово-просторовий розподіл функції напруги в момент часу $t \in [0; 0.02]$ с

На рис. 5 - 8 показано перехідний процес функціональних залежностей напруги й струму (часовий розподіл). Перших два рисунки стосуються центрального вузла лінії для напруги й центрального відрізка лінії для струму. Других два – передостаннього вузла лінії та передостанньої дискретної вітки лінії.

Здійснюючи порівняльний аналіз згаданих рисунків легко бачити, що функції напруги (див рис. 5 і 7) мало змінюється. Зовсім іншу картину бачимо (див. рис. 6 і 8) стосовно струмів. Струм змінюється майже у 8 разів. Це пов'язано з тим що лінія електропередач є ненавантажена (неробочий хід).

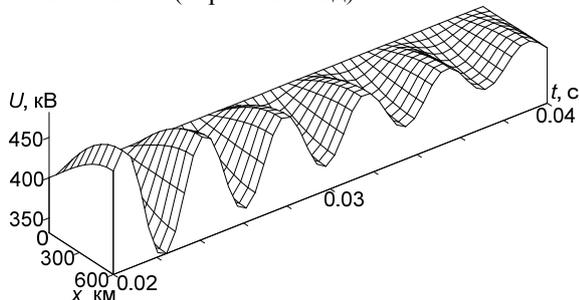


Рис. 10. Часово-просторовий розподіл функції напруги в момент часу $t \in [0.02; 0.04]$ с

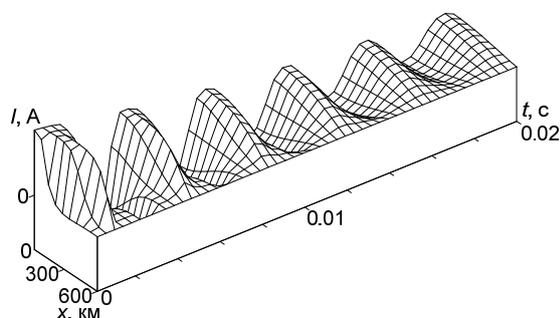


Рис. 11. Часово-просторовий розподіл функції струму в момент часу $t \in [0; 0.02]$ с

Рис. 9 і 10 репрезентують напругу лінії як функцію часової й просторової координат. Ці рисунки

представлені у 3D форматі. Варто зазначити досить високу інформативність цих рисунків, яка полягає в тому, що і просторовий, і часовий розподіли створюють тривимірний простір. Доцільно згадані рисунки аналізувати у порівнянні з рис. 2 – 5 і 7.

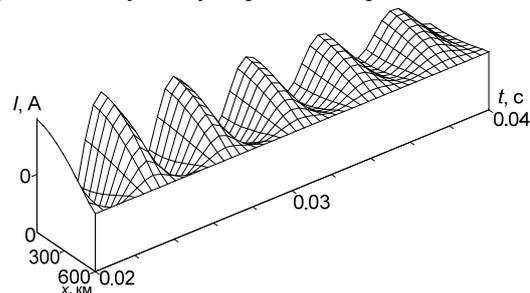


Рис. 12. Часово-просторовий розподіл функції струму в момент часу $t \in [0.02; 0.04]$ с.

На рисунках 11 і 12 показано те саме, що і на попередніх двох, але для функції струму. Як бачимо функція напруги і струму знаходяться у протифазі. Оскільки природа напруги пов'язана з електричним полем, а струм з магнітним то можна зробити висновок про просторову перпендикулярність полів E і B , що стверджує класика електродинаміки [1]. Представлені рисунки доцільно аналізувати у порівнянні з рис. 2 – 4, 6, 8.

Висновки.

1. Варіаційні підходи до моделювання перехідних процесів у довгих лініях електропередач дають можливість уникнення декомпозиції єдиної системи, натомість формувати кінцеві рівняння стану виключно з єдиного енергетичного підходу шляхом побудови розширеної функції Лагранжа.

2. Важливим моментом під час розв'язання диференціальних рівнянь стану довгої лінії є пошук крайових умов, які досить часто є завуальованими, некоректно заданими, а також використання крайових умов Неймана та Пуанкаре. Знаходження цих умов тягне за собою заангажування повної системи диференціальних рівнянь досліджуваного об'єкту, зокрема, трансформаторів, реакторів, компенсаційних пристроїв тощо, що значно ускладнює розрахунок перехідних процесів у довгій лінії.

3. Досвід показує, що під час аналізу локальних електроенергетичних систем в найоптимальнішому варіанті телеграфне рівняння довгої лінії доцільно записувати у функції напруги. У випадку моделювання локальних енергетичних систем, коли використовують електромагнітні моделі елементів цих систем (Ψ – типу та A – типу) виникають труднощі з використанням відомого методу вузлових напруг, що унеможливує знаходження напруги на початку та кінці лінії, а відтак, не дає змоги коректно розв'язати саме рівняння. Усе це ставить під сумнів ступінь адекватності еventуальних результатів, які одержані за допомогою відомих інженерних програм Mathematica, MatLab та ін., а особливо використання цих програм стає неможливим, коли розглядають коло-польові моделі елементів. У такому випадку до кожної конкретної задачі потрібно використовувати відповідний апарат математичного моделювання.

4. На основі результатів комп'ютерної симуляції можна зробити низку висновків:

- функція напруги має найбільшу амплітуду коливань в кінці лінії, коли функція струму – на початку лінії;
- просторовий розподіл функціональних залежностей лінії засилання (рис 2, 3 і 4), підтверджує фізичні засади електродинаміки стосовно хвильових процесів в довгих лініях електропостачання;
- представлений у 3D форматі часово-просторовий розподіл функцій струму й напруги надають найбільше інформації про хвильові процеси в лінії Лехера в стані неробочого ходу.

Матеріали цієї роботи будуть використовуватися в подальших дослідженнях, які стосуватимуться довгих трифазних ліній електропередач з різними видами та типами навантажень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шимони К. Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1956. – 773 с.
2. <https://www.energetika.in.ua>.
3. Nayir A. Simulation of transient processes on overvoltage in electric transmission lines using ATP-EMTP // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences. – 2013. – №21. – pp. 1553-1556. doi: 10.3906/elk-1108-8.
4. Sowa P., Kumala R., Łuszcz K. Modeling of power system components during electromagnetic transients // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. – 2014. – vol.1. – iss.10. – pp. 715-719.
5. Веприк Ю.Н., Минченко А.А. Коммутационные перенапряжения в электропередаче 750 кВ // Электротехника і електромеханіка. – 2009. – №4. – С. 17-20. doi: 10.20998/2074-272X.2009.4.04.
6. Кириленко О.В. та ін. Математичне моделювання в електроенергетиці. Підручник / за ред. М.С. Сегеди. – Львів: Львівська політехніка, 2010. – 608 с.
7. Нейман Л.Р., Демірчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. Учебник для вузов. Том 1. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с.
8. Уайд Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. – Л.: Энергия, 1964. – 539 с.
9. Чабан А.В. Принцип Гамильтона-Остроградского в электромеханических системах. – Л.: В-во Тараса Сороки, 2015. – 488 с.
10. Чабан А.В. Математичне моделювання коливних процесів в електромеханічних системах. – Л.: В-во Тараса Сороки, 2008. – 328 с.
11. Зеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.
12. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Мир, 1987. – 542 с.
6. Kyrylenko O.V. *Matematychnе modelyuvannya v elektroenerhetytsi* [Mathematical modeling in the power]. Lviv, Lviv Polytechnic National University Publ., 2010. 608 p. (Ukr).
7. Neyman L.R., Demirchyan K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. V 2-kh t. T. 1* [Theoretical bases of electrical engineering. In 2 vols. Vol. 1]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981, p. 536. (Rus).
8. Uayd D., Vudson G. *Elektromekhanicheskoye preobrazovaniye energii* [Electromechanical energy conversion]. Leningrad, Energiia Publ., 1964. 539 p. (Rus).
9. Chaban A.V. *Pryntsyp Hamiltona-Ostrohradskoho v elektromekhanichnykh systemakh* [The principle of Hamilton-Ostrogradskii in electromechanical systems]. Lviv, Taras Soroka Publ., 2015. 488 p. (Ukr).
10. Chaban A.V. *Matematychnе modelyuvannya kolyvnykh protsesiv v elektromekhanichnykh systemakh* [Mathematical modeling of oscillating processes in electromechanical systems]. Lviv, Taras Soroka Publ., 2008. 328 p. (Ukr).
11. Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strakhov S.V. *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of circuit theory]. Moscow, Energiia Publ., 1975. 752 p. (Rus).
12. Vasydzu K. *Variatsionnyye metody v teorii uprugosti i plastichnosti* [Variational methods in the theory of elasticity and plasticity]. Moscow, Mir Publ., 1987. 542 p. (Rus).

Надійшла (received) 22.01.2016

Чабан Андрій Васильович¹, д.т.н., професор,
Левонюк Віталій Романович¹, асистент,
Дробот Іван Михайлович¹, ст. викладач,
Герман Андрій Фердинандович¹, ст. викладач,

¹ Львівський національний аграрний університет,
30831, Львівська обл., Дубляни, вул. В. Великого, 1,
e-mail: atchaban@gmail.com, bacha1991@ukr.net

A.V. Chaban¹, V.R. Levoniuk¹, I.M. Drobot¹, A.F. Herman¹
¹ Lviv National Agrarian University,

1, V. Velykoho Str., Dubliany, Lviv Region, 30831, Ukraine.

Mathematical model of electromagnetic processes in Lehera line at open-circuit operation.

Purpose. The work proposed for the modeling of transients in Lehera line uses a modified Hamilton-Ostrogradskiy principle. The above approach makes it possible to avoid the decomposition of a single dynamic system that allows you to take into account some subtle hidden movements. This is true for systems with distributed parameters, which in the current work we are considering. **Methodology.** Based on our developed new interdisciplinary method of mathematical modeling of dynamic systems, based on the principle of modified Hamilton-Ostrogradskiy and expansion of the latter on the non-conservative dissipative systems, build mathematical model Lehera line. The model allows to analyze transient electromagnetic processes in power lines. **Results.** In this work the model used for the study of transients in the non-working condition Lehera line. Analyzing the results shows that our proposed approach and developed based on a mathematical model is appropriate, certifying physical principles regarding electrodynamics of wave processes in long power lines. Presented in 3D format, time-space distribution function of current and voltage that gives the most information about wave processes in Lehera line at non-working condition go. **Originality.** The originality of the paper is that the method of finding the boundary conditions of the third kind (Poincare conditions) taking into account all differential equations of electric power system, i.e. to find the boundary conditions at the end of the line involves all object equation. This approach enables the analysis of any electric systems. **Practical value.** Practical application is that the wave processes in lines affect the various kinds of electrical devices, proper investigation of wave processes is the theme of the present work. References 12, figures 12.

Key words: mathematical modeling, Hamilton-Ostrogradskiy principle, Euler-Lagrange equation, electric power system, power line with distributed parameters.

В.Й. Лобов, К.В. Лобова

ЗАДАТЧИК ІНТЕНСИВНОСТІ ДЛЯ ПРИСТРОЮ ПЛАВНОГО ПУСКУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЗАГЛИБНОГО НАСОСА

Розглядається задача побудови задатчика інтенсивності для формування зміни кута відкриття тиристорів регулятора напруги. Це дозволяє змінювати по складній траєкторії напругу живлення на статорі електродвигуна заглибного насоса, забезпечуючи цим потрібний час плавного прискорення обертання ротора. Для реалізації задатчика інтенсивності апаратними засобами автоматизації надано блок-схему, а програмним шляхом – математичні вирази. Бібл. 9, табл. 1, рис. 2.

Ключові слова: заглибний насос, асинхронний електродвигун, тиристорний регулятор напруги, кут відкриття тиристорів, задатчик інтенсивності, пуск, час прискорення.

Рассматривается задача построения задатчика интенсивности для формирования изменения угла открывания тиристоров регулятора напряжения. Это позволяет менять по сложной траектории напряжение питания на статоре электродвигателя погружного насоса, обеспечивая, тем самым, нужное время плавного ускорения вращения ротора. Для реализации задатчика интенсивности аппаратными средствами автоматизации представлена блок-схема, а программным путем – математические выражения. Библ. 9, табл. 1, рис. 2.

Ключевые слова: погружной насос, асинхронный электродвигатель, тиристорный регулятор напряжения, угол открывания тиристоров, задатчик интенсивности, пуск, время ускорения.

Вступ. Зростання як житлового, так і промислового будівництва останнім часом зробило стабільне та якісне водопостачання одним із першочергових завдань. Найбільш перспективним його способом є використання підземних джерел за допомогою свердловин різної глибини, яка є складною гідротехнічною спорудою, що вимагає кваліфікованого підходу до облаштування та надійного обладнання – свердловинних насосів. Ці агрегати спеціально розроблені для роботи в досить складних умовах. Вони є коштовні та, в силу специфіки монтажу, їх ремонт пов'язаний зі значними труднощами і витратами. Тому при підборі такого обладнання слід звертати увагу на ряд деталей та практичних моментів, які допоможуть збільшити термін безперебійної роботи устаткування і максимально знизити експлуатаційні витрати.

Один з таких ключових параметрів – це спосіб пуску асинхронного електродвигуна заглибного насоса (АЕЗН), який є одним з найбільш несприятливих режимів для електродвигуна, водопідйомних труб і водозахватної частині свердловини. Електродвигун насоса в цей період на короткий час піддається піковому навантаженню, тому його пусковий струм у 4-7 разів перевищує значення номінального при відносно невисокому пусковому моменті. Це веде до підвищеного теплового зносу ізоляції обмоток статора, від якого суттєво залежить надійність і довговічність електродвигуна. Шкідливий такий запуск і для агрегату і свердловини в цілому, оскільки часто супроводжується гідроударом, що руйнує трубопровід, арматуру та сам насос. Найбільш ефективним вирішенням усіх цих проблем є забезпечення плавного пуску АЕЗН.

Аналіз досліджень і публікацій. Створення та дослідження систем керованого пуску електродвигунів змінного струму досить широко висвітлено у вітчизняній і зарубіжній літературі. Як правило, для забезпечення цієї мети використовуються наступні способи: переключення із схеми «зірка» у схему «трикутник» або включення електродвигуна за допомогою пускового трансформатора, або шляхом фазового

управління напругою на статорі або використання перетворювачів частоти [1-9]. Як показує практика для АЕЗН, економічно обґрунтованими є відносно прості пристрої з параметричним фазовим керуванням. Для цього використовуються тиристорні регулятори напруги (ТРН), що є найбільш широко поширеними, їх експлуатація буде застосовуватися і в майбутньому для електродвигунів малої та середньої потужності [1-3, 6, 8].

Керування пусковими режимами електроприводів за допомогою ТРН найбільш просто виконувати шляхом формування задатчиками інтенсивності необхідних законів зміни у часі напруги, що живить обмотки статора. Прикладену до статора напругу живлення регулюють за допомогою кута α_s відкриття тиристорів ТРН, що включені в статорні ланцюги електродвигуна. Виконується пуск при сталій або безперервній (по лінійному або експонентному закону) зміні кутів α_s , що формуються за допомогою апаратних або програмних задатчиків інтенсивності. При значному статичному навантаженні на валу механізму вдається регулювати у широкому діапазоні час пуску електродвигуна, що дозволяє знизити пускові струми та величини ударних електромагнітних моментів [2, 3, 6, 7]. Однак, відомі закони регулювання кута α_s не дозволяють виконати керований пуск АЕЗН, за технічними вимогами яким необхідно мати час розгону не менше 20 с і більше. АЕЗН відноситься до малоінерційних електроприводів, так як він має не значний сумарний момент інерції $J_s \leq 2J_e$, (J_e – момент інерції електродвигуна) і статичний момент на валу $M_s \leq 0,4M_n$ (M_n – номінальний момент). Тому при пуску АЕЗН відомими способами достатньо напруги зворушення U_s , щоб електродвигун розігнався до швидкості, близької до номінальної. Цей пуск є не керований і виконується за час, що дорівнює 0,4-0,8 с та не регулюється в часі. Подальше збільшення напруги живлення до номінальної не робить суттєвого впливу на плавність

пуску, так як швидкість електродвигуна міняється в невеликому діапазоні [8, 9].

Мета роботи – теоретичне обґрунтування, розробка та реалізація регульованого плавного пуску асинхронного електродвигуна заглибного насоса при використанні ТРН із задатчиком інтенсивності, який по раціональному закону буде змінювати кут відкривання тиристорів, що дозволить ефективно впливати на напругу живлення статорних обмоток електродвигуна для забезпечення в широкому діапазоні зміни часу плавного пуску та збільшити термін безперебійної роботи гідротехнічної споруди і максимально знизити експлуатаційні витрати.

Результати досліджень. Плавний пуск АЕЗН пропонується виконувати наступним способом. У початковий момент часу на обмотки статора електродвигуна подається напруга зворушення U_s . Під дією цієї напруги ротор електродвигуна починає розганятися. Одночасно, напруга зворушення U_s зменшується за час пуску t_1 за експоненціальним законом до мінімальної напруги U_{\min} . При цій напрузі ротор електродвигуна продовжує ще стійко обертатися. Починаючи з моменту часу t_1 і досягнення мінімальної напруги U_{\min} , напруга на статорних обмотках електродвигуна збільшується по експоненціальному закону до номінального значення напруги живлячої мережі U_{sn} . Цей пуск протікає плавно за потрібний час t_2 до встановлення номінальної швидкості обертання ротора електродвигуна.

Для реалізації цього способу пуску апаратним пристроєм використовується задатчик інтенсивності, блок-схема якого надана на рис. 1.

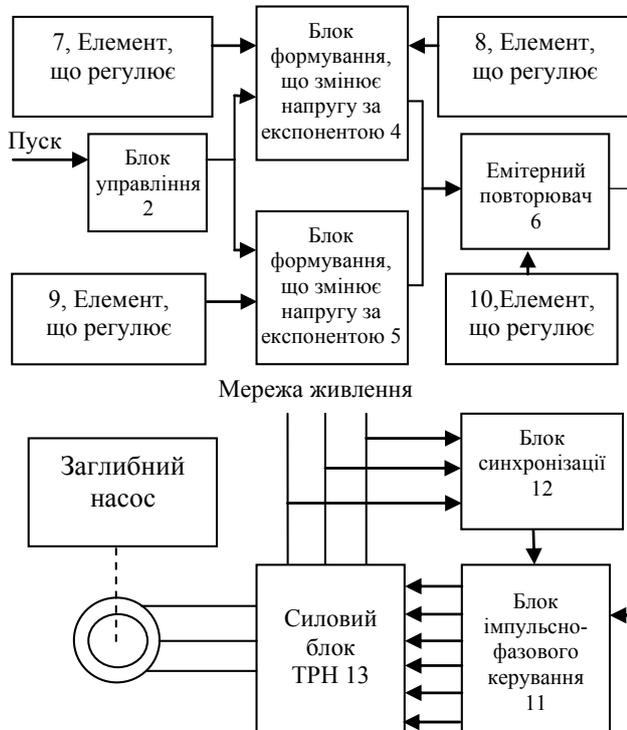


Рис. 1. Блок – схема задатчика інтенсивності для плавного пуску електродвигуна типу АЕЗН

При реалізації цього способу програмними засобами використовують математичний вираз (1):

$$U_{sn} = \begin{cases} U_s e^{-t_1/t_n}, & \text{при } 0 \leq t \leq t_1; \\ U_s + U_{\min} (1 - e^{-t_2/t_n}), & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2, \end{cases} \quad (1)$$

де t_1, t_2 – сталі часу, t_n – загальний час пуску АЕЗН.

Кут відкривання тиристорів силового блоку ТРН визначається через початковий кут відкривання $\alpha_{(0)}$:

$$\alpha_s = \begin{cases} \alpha_{(0)} (1 - e^{-t_1/t_n}), & \text{при } 0 \leq t \leq t_1; \\ \alpha_{(0)} e^{-t_2/t_n}, & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2. \end{cases} \quad (2)$$

Напруга зворушення і мінімальна напруга у виразі (1) відповідно визначаються за формулами:

$$U_s = U_{sn} \frac{\sqrt{M_s^0}}{M_n}, \quad (3)$$

$$U_{\min} = U_{sn} \frac{\sqrt{M_s^1}}{M_s}, \quad (4)$$

де M_s^0 – статичний момент при нерухомому роторі електродвигуна; M_n – пусковий момент електродвигуна при номінальній напрузі живлення; M_s^1 – статичний момент навантаження при мінімальній частоті обертання ротора електродвигуна; M^s – момент електродвигуна при номінальній напрузі живлення та мінімальній частоті обертання ротора електродвигуна.

Стала часу t_1 виразах (1) і (2) визначається з основного рівняння руху електроприводу та механічної характеристики електродвигуна:

$$t_1 \approx J_{\Sigma} \omega_r^s \ln \left| \frac{(M_{\alpha} + M_s^0) \omega_{\min} - M_s^0 \omega_r^s}{M_s^0 \omega_r^s} \right|, \quad (5)$$

де J_{Σ} – приведений момент інерції електроприводу; $\omega_r^s, \omega_{\min}$ – синхронна та мінімальна частоти обертання ротора електродвигуна; M_{α} – електромагнітний момент, що визначається за механічною характеристикою електродвигуна.

Підстановка числових даних дає значення t_1 (5), що не перевищує п'яти періодів мережевої напруги, та розраховується для конкретного електроприводу. Стала часу t_2 у тих же виразах (1) і (2) вибирається у межах одного або двох значень заданого часу пуску. Це викликано тим, що напруга живлення є достатньою для розгону АЕЗН у зоні робочих швидкостей, визначає плавність пуску, істотно нижче номінальної напруги та розраховується із урахуванням параметрів конкретного електроприводу. Тому для збільшення часу розгону АЕЗН у зоні робочих швидкостей, необхідно збільшити сталу часу t_2 .

В таблиці надані значення, а на рис. 2 – залежності $U_s = f(t/t_n)$ при зміні сталих часу t_1, t_2 і напруги U_s , що розраховувалась за виразом (1). На графіках значення напруги U_s представлені у частках номінальної напруги мережі U_{sn} , а поточний час – у частках часу при прямому пуску асинхронної машини із номінальною напругою мережі, а T_{ss} – є період зміни напруги живлячої мережі U_{sn} .

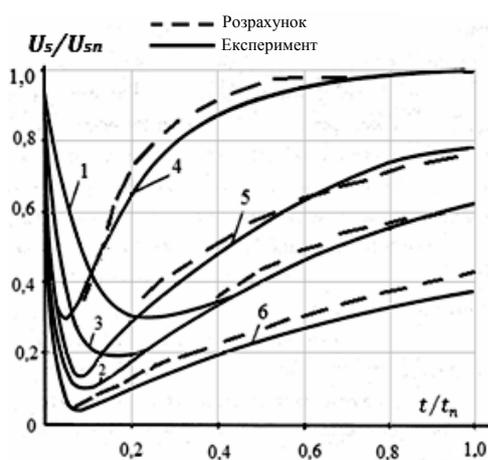
Із отриманих результатів випливає, що при збільшенні сталої часу t_2 від 5 до 25 T_{ss} мінімальна напруга U_{\min} на обмотках статора електродвигуна досягає

величини, рівної $0,3U_{sn}$ (рис. 2,а). Збільшення сталої часу t_2 від значення, необхідного часу t_n пуску електроприводу до значення, рівного $10t_n$ приводить до того, що ця напруга значно зменшується та досягає величини, рівної $0,05U_{sn}$.

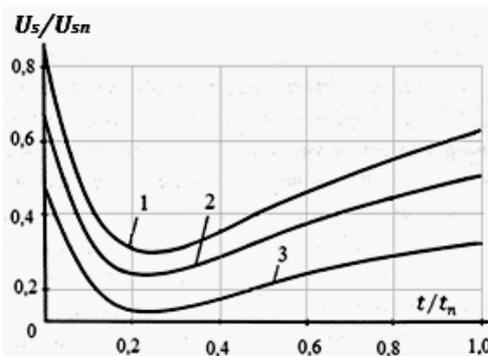
Таблиця

Залежності $U_s / U_{sn} = f(t/t_n)$

№ характеристики (рис. 2,а)	t_1	t_2	№ характеристики (рис. 2,б)	U_s
1	$5t_n$	$25T_{ss}$	1	0,85
2	$5t_n$	$5T_{ss}$	2	0,65
3	$5t_n$	$12,5T_{ss}$	3	0,5
4	t_n	$5T_{ss}$		
5	$3t_n$	$5T_{ss}$		
6	$10t_n$	$5T_{ss}$		



а



б

Рис. 2. Залежності $U_s / U_{sn} = f(t/t_n)$

При зменшенні U_s до $0,5U_{sn}$ (рис. 2,б третя крива) ця функція протягом часу, рівного $t/t_n = 1$ досягає величини, рівної $0,35U_s/U_{sn}$, при $U_s = 0,8U_{sn}$ (друга крива) – $0,43U_s/U_{sn} = 0,43$ (рис. 2,б). У той же час при U_s/U_{sn} (перша крива) функція досягає вже величини 0,62. Зниження напруги U_s призводить до більш тривалого наростання функції $U_s/U_{sn} = f(t/t_n)$.

Висновки.

1. Доведена необхідність використання в широкому діапазоні часу прискорення ротора асинхронного електродвигуна заглибного насоса ТРН із задатчиком інтенсивності, який має дві сталі часу, що змінюються по експоненціальному закону і враховує величину напруги зворушення ротора електродвигуна. При зміні в розробленому задатчику інтенсивності

сталі часу і величини напруги зворушення ротора виходить сімейство характеристик живлячих напруг із ТРН, які можуть подаватися на статорні обмотки для формування пускових режимів асинхронного електродвигуна заглибного насоса та збільшити термін безперебійної роботи гідротехнічної споруди і максимально знизити експлуатаційні витрати.

2. Розроблений задатчик інтенсивності може бути використаний в перетворювачах частоти для формування пускових режимів, що використовуються, наприклад, в електроприводах конвеєрних машин для випалювання котунів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лобов В.Й., Лобова К.В. Метод определения времени пуска и торможения асинхронных электродвигателей с резисторно-тиристорными модулями // *Электротехника і електромеханіка*. – 2015. – №4. – С. 40-44. doi: 10.20998/2074-272X.2015.4.07.
2. Петрушин В.С., Якимец А.М., Бангула В.Б. Анализ пуска асинхронного двигателя с помощью тиристорного преобразователя напряжения // *Электротехника і електромеханіка*. – 2012. – №6. – С. 31-33. doi: 10.20998/2074-272X.2012.6.06.
3. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. – М.: Издательство «Академия», 2004. – 256 с.
4. Фигаро Б.И., Васильев Д.С. Применение устройств плавного пуска и торможения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в электроприводах крановых механизмов передвижения // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2011. – №4. – С. 30-38.
5. Lobov V., Lobova K. Choice of braking method of asynchronous electric motor for using in electric drives of conveyor equipment // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – №8. – pp. 6-12.
6. Lobov V. Method for research of parametric control schemes by asynchronous motor // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – №6. – pp. 102-108.
7. Черный А.П., Гладырь А.И., Осадчук Ю.Г. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: Монография. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2006. – 280 с.
8. Лобов В.И. Исследование пусковых и тормозных режимов асинхронных электроприводов с тиристорным параметрическим управлением: дис. ... к. техн. наук. – М. ВНИИЭлектропривод, 1983. – 269 с.
9. Бродский Ю.А., Егорова С.А., Лобов В.Й., Швец С.А. А.с. СССР №1108589. Способ пуска малоинерционного асинхронного электродвигателя, МПК Н 02 Р 1/26. Оpubл. 15.08.1984. Бюл. № 30. – 4 с.

REFERENCES

1. Lobov V.I., Lobova K.V. Method of determining the start time of induction motors in the control of resistor-thyristor modules. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.4, pp. 40-44. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.4.07.
2. Petrushin V.S., Yakimets A.M., Bangula V.B. Analysis of a thyristor voltage converter fed induction motor start. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.6, pp. 31-33. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2012.6.06.
3. Braslavskiy I.Ya., Ishmatov Z.S., Polyakov V.N. *Energosberegayushchiy asinkhronnyy elektroprivod* [Energy-saving asynchronous electric]. Moscow, Academiya Publ., 2004. 256 p. (Rus).

4. Figaro B.I., Vasilyev D.S. Application of squirrel-cage induction motor soft starting and braking in the electric drives of crane travel mechanisms. *Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy – Electrotechnic and computer systems*, 2011, no.4, pp. 30-38. (Rus).
5. Lobov V., Lobova K. Choice of braking method of asynchronous electric motor for using in electric drives of conveyor equipment. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no.8, pp. 6-12.
6. Lobov V. Method for research of parametric control schemes by asynchronous motor. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no.6, pp. 102-108.
7. Chernyi A.P., Gladyr A.I., Osadchuk Y.G. *Puskovye sistemy nereguliruemyykh elektropriwodov: Monografiia* [Starting unregulated electric system: Monograph]. Kremenchuk: PP Cherbatyh A.V. Publ., 2006. 280 p. (Rus).
8. Lobov V.I. *Issledovanie puskovykh i tormoznykh rezhimov asinkhronnykh elektropriwodov s tiristornym parametricheskim upravleniem*. Diss. kand. techn. nauk [Research of starting and braking modes of asynchronous electric drives with thyristor parametric-hydraulic control. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 1983. 269 p. (Rus).
9. Brodsky Y.A., Egorova S.A., Lobov V.I., Shvets S.A. *Sposob puskа maloinertsionnogo asinkhronnogo elektrodvigatelia* [Method of starting a fast-response induction motor]. USSR Certificate of Authorship, no.1108589, 1984. (Rus).

Поступила (received) 10.02.2016

Лобов Вячеслав Иосифович¹, к.т.н.,
 Лобова Карина Витальевна¹, студентка,
¹ Государственное высшее учебное заведение
 «Криворожский Национальный университет»,
 50027, Кривой Рог, ул. XXII Партсъезда, 11,
 тел/phone +38 0564 4090635,
 e-mail: lobov.vjcheslav@yandex.ru

V.I. Lobov¹, K.V. Lobova¹
 SIHE «Kryvyi Rih National University»,
 11, XXII Partz'izdu Str., Kryvyi Rih, 50027, Ukraine.

Intensity setter for a device of smooth start of submersible pump electric motor.

Purpose. Development of an intensity setter, which in a rational law changes the opening thyristor the voltage regulator and effectively to changing power supply voltage stator windings of the electric pump deepening, ensuring a smooth start in a wide range.

Methodology. Electric submersible pump belongs to the small inertia electric, since it is not significant total moment of inertia, not exceeding two moments of inertia of the motor and static moment on the shaft does not exceed forty percent of the nominal torque. For technical requirements that electric acceleration time should have no less than twenty seconds or more. Office starting modes of electric submersible pumps economically justified using thyristor voltage regulator by forming the dial changes the intensity of the necessary legislation in time voltage feeding the stator windings. This ensures a smooth start right rotor of the electric submersible pump. **Results.** A block diagram of the intensity setter that is: with control unit, two units that form the exponential voltage supply emitter follower and regulatory elements. The mathematical expressions for voltage at the stator windings of the motor, changing exponentially, opening the angle of thyristor power unit thyristor the voltage regulator, which is determined through the initial angle of opening. Provided formula for pick-up voltage and minimum voltage, time constants, which are determined from the basic equations of motion and mechanical characteristics of the electric motor. Analytical investigated by the voltage dependence violation by changing the time constant flowing and growing exhibitor supply voltage stator electric circuit deepening pump.

Originality. Proposed in the initial time on the stator windings of the electric pick-up voltage is applied. Under the influence of this voltage, motor rotor begins to accelerate. At the same time, pick-up voltage decreases the minimum startup voltage varies exponentially in which the rotor of the electric motor continues to rotate more steadily. Now the voltage at the motor stator windings increases exponentially to the nominal voltage of the supply network. This start flowing smoothly for the right time to establish nominal rotor speed of the motor. **Practical value.** Developed dial allows you to increase the intensity of the electric motor acceleration time and reduce the dynamic loads of the electric submersible pump. References 9, tables 1, figures 2.

Key words: submersible pump, induction motor, thyristor voltage regulator, opening angle of thyristor, intensity setter, start-up, acceleration time.

М.И. Баранов, В.В. Князев, В.И. Кравченко, С.В. Рудаков

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ЛИСТОВОЙ СТАЛИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ НОРМИРОВАННЫХ КОМПОНЕНТ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

Наведено результати оціночних розрахункових і експериментальних досліджень електротермічної стійкості дослідних зразків пластин розміром 0,5 м × 0,5 м з нержавіючої сталі товщиною 1 мм до дії на них імпульсних струмів штучної блискавки з нормованими за вимогами нормативних документів США SAE ARP 5412 і SAE ARP 5416 амплітудно-часовими параметрами (АЧП). Використовувалися коливальна імпульсна А- компонента з першої амплітудою 192 кА, що відповідає часу 34 мкс, і аперіодична тривала С- компонента амплітудою 804 А, що відповідає часу 9 мс. Показано, що тривала С- компонента струму штучної блискавки з нормованими АЧП може призводити до наскрізного проплавлення зазначених зразків. Бібл. 15, рис. 15, табл. 5.

Ключові слова: основні компоненти струму блискавки, генератор імпульсного струму штучної блискавки, плоский сталевий зразок, електротермічна блискавкостійкість.

Приведены результаты оценочных расчетных и экспериментальных исследований электротермической стойкости опытных образцов пластин размером 0,5 м × 0,5 м из нержавеющей стали толщиной 1 мм к воздействию на них импульсных токов искусственной молнии с нормированными по требованиям нормативных документов США SAE ARP 5412 и SAE ARP 5416 амплитудно-временными параметрами (АВП). Использовались колебательная импульсная А- компонента с первой амплитудой 192 кА, соответствующей времени 34 мкс, и аперiodическая длительная С- компонента амплитудой 804 А, соответствующей времени 9 мс. Показано, что длительная С- компонента тока искусственной молнии с нормированными АВП может приводить к сквозному проплавлению указанных образцов. Библ. 15, рис. 15, табл. 5.

Ключевые слова: основные компоненты тока молнии, генератор импульсного тока искусственной молнии, плоский стальной образец, электротермическая молниестойкость.

Введение. При прямых ударах линейной молнии, развивающейся в воздушной атмосфере Земли со среднестатистической частотой до 100 разрядов в секунду [1, 2], в высотные технические сооружения, размещенные на земной поверхности, амплитудно-временные параметры (АВП) импульсного тока в плазменном канале ее разряда могут принимать опасные как для наружных конструктивных элементов, так и силового электротехнического и слаботокового радиоэлектронного оборудования, содержащегося внутри таких сооружений. Согласно требований действующих нормативных документов США SAE ARP 5412 и SAE ARP 5416 [3, 4], относящихся преимущественно к подвергаемым прямым ударам молнии объектам аэрокосмической техники, импульсный ток грозового разряда содержит две основные составляющие: импульсную А- и длительную С- компоненты. При этом нормируемые АВП импульсной А- компоненты тока молнии согласно [3, 4] принимают следующие численные значения: амплитуда тока $I_{mA} = \pm 200$ кА (при допуске $\pm 10\%$); интеграл действия тока $J_A = 2 \cdot 10^6$ А²·с (при допуске $\pm 20\%$); время, соответствующее амплитуде тока $t_{mA} \leq 50$ мкс; продолжительность протекания тока $\tau_{pA} \leq 500$ мкс. В этом случае нормируемые АВП аперіодической длительной С- компоненты тока молнии должны составлять нижеследующие численные значения [3, 4]: амплитуда тока $I_{mC} = \pm(200-800)$ А; переносимый электрический заряд $q_C = \pm 200$ Кл (при допуске $\pm 20\%$); продолжительность протекания тока $\tau_{pC} = (0,25-1)$ с. В 2007 г. в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» был создан мощный высоковольтный генератор тока искусственной молнии типа УИТОМ-1 [5], формирующий на испыты-

ваемом техническом объекте АВП импульсного тока грозового разряда по требованиям указанных нормативных документов [3, 4]. Авторам не известны публикации результатов воздействия молнии на элементы технических сооружений, выполненные из тонкостенной нержавеющей стали. Поэтому оценочные теоретические и экспериментальные исследования уровня устойчивости (стойкости) таких элементов к прямому удару молнии в них с параметрами силы тока, близкими к предельным, представляют практический интерес.

1. Постановка задачи. Рассмотрим плоский образец размером в плане 500×500 мм из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной 1 мм, испытывающий на открытом воздухе прямое воздействие плазменного канала искусственной молнии, имеющего цилиндрическую форму. Пусть по этому каналу протекают импульсная А- и длительная С- компоненты тока грозового разряда, нормированные АВП которых соответствуют требованиям, приведенным в [3, 4]. Требуется вначале осуществить расчетную оценку результатов электротермического воздействия на рассматриваемый образец указанных компонент импульсного тока искусственной молнии, а затем с помощью генератора типа УИТОМ-1 выполнить экспериментальную проверку электротермической молниестойкости опытного образца к прямому удару в него плазменного канала искусственной молнии.

2. Расчетная оценка электротермической стойкости стальных образцов к току искусственной молнии. Выполним вначале оценку данной стойкости исследуемых тонких стальных образцов к дей-

ствию на них импульсного тока, протекающего в канале грозового разряда, по методике, рекомендуемой в [6] международной электротехнической комиссией.

2.1. Результаты расчетов по стандартизированной методике оценки термической молниестойкости. В международном стандарте IEC 62305-1 (см. Приложение D, формулу D.9) приведено аналитическое соотношение, позволяющее оценить объем металла V_0 в объекте, расплавленного из-за действия на него тока молнии, в зависимости от протекшего при этом количества электричества в следующем виде [6]:

$$V_0 = \frac{U_{ac} \cdot q_{Ac}}{d_0} \times \frac{1}{C_w(\theta_m - \theta_e) + C_s}, \quad (1)$$

где V_0 – объем расплавленного металла объекта, м^3 ; U_{ac} – анодное или катодное падение постоянного напряжения вблизи объекта, В; q_{Ac} – количество заряда, переносимого A - или C - компонентой тока молнии, Кл; d_0 – плотность материала объекта, $\text{кг}/\text{м}^3$; C_w – теплоемкость материала объекта, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; θ_m – температура плавления материала объекта, $^\circ\text{C}$; $\theta_e = \theta_0$ – температура окружающей объект среды, $^\circ\text{C}$; C_s – удельная теплота плавления материала объекта, $\text{Дж}/\text{кг}$.

Для оценки размера отверстия или каверны, которые могут образоваться в рассматриваемом листовом образце из нержавеющей стали заданной толщины h при воздействии на него тока молнии, нами были использованы известные численные показатели основных физических параметров для нержавеющей стали марки 12X18H10T, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Параметры для стали 12X18H10T [6-8]

Параметр	Размерность	Значение
U_{ac}	В	10
d_0	$\text{кг}/\text{м}^3$	7900
C_w	$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$	462
θ_m	$^\circ\text{C}$	1455
θ_e	$^\circ\text{C}$	20
C_s	$\text{Дж}/\text{кг}$	$84 \cdot 10^3$

После подстановки значений параметров из табл. 1 в (1) при варьировании заряда $q_{Ac} = q_c$ были получены величины расплавленного цилиндрического объема V_0 стали, которые будучи разделенными на толщину листа h , дают соответствующие значения площади круглой зоны нагрева и радиуса r_c отверстия проплавления в стальном образце, представленные на рис. 1. Для C - компоненты тока молнии длительностью τ_{pC} от 2 до 40 мс заряд $q_c = q_{Ac} = 10$ Кл достигается при силе тока в ее канале, изменяющейся от 5 кА до 250 А. При оценке радиуса r_c образовавшегося отверстия следует учитывать, что тепловой поток поступает в стальной образец не точно, а по площади круга радиусом r_{mc} . Поэтому радиус пятна расплавленного металла не может быть менее r_{mc} . Радиус r_{mc} канала молнии зависит от силы протекающего в нем тока и для нормальных атмосферных условий определяется в виде [8]:

$$r_{mc} = 0,11 \cdot 10^{-3} (I_{mC})^{0,5}. \quad (2)$$

где I_{mC} – максимальное значение силы тока для длительной C - компоненты тока молнии в пластине, А.

Результаты расчета по (2) значения радиуса r_{mc} канала с C - компонентой тока представлены в табл. 2.

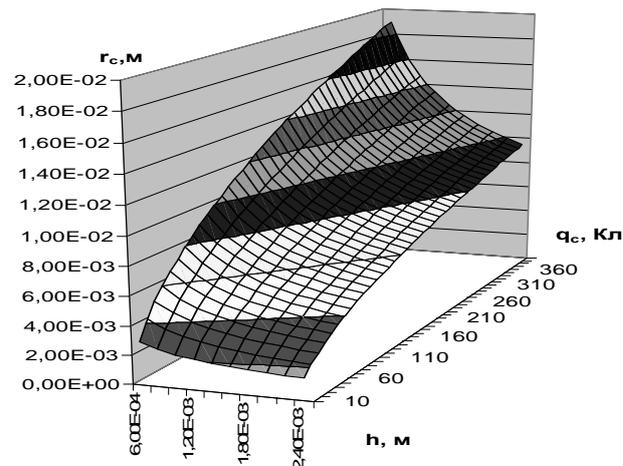


Рис. 1. Зависимость радиуса r_c отверстия проплавления, образуемого в исследуемом стальном листе толщиной h , от протекшего через его материал количества электричества q_c

Таблица 2

Значения радиуса r_{mc} канала грозового разряда в зависимости от силы тока C - компоненты

Сила тока I_{mC} , А	100	200	400	800
Радиус r_{mc} , мм	1,10	1,56	2,20	3,11

При толщине стального листа $h=1$ мм и протекшем заряде $q_c=10$ Кл радиус отверстия проплавления в нем согласно (1) будет примерно равен $r_c=1,64$ мм. Такой же радиус, исходя из (2), имеет канал молнии при силе тока в нем $I_{mC} = 222$ А. Поэтому можно предполагать, что при действии на стальной лист ($h=1$ мм) C - компоненты длительностью примерно 40 мс и силе тока (средней за время этого действия) около 220 А прожиг этого листа будет происходить. Для конкретных значений заряда q_c от C - компоненты тока, которые наблюдались при экспериментах (см. ниже п. 4), расчетное значение диаметра $2r_c$ отверстия проплавления в выбранном образце из стали ($h=1$ мм) при $q_c=187$ Кл достигает 20,8 мм; а при $q_c=165$ Кл – 18,0 мм. Приведенные результаты проплавления стального листа ($h=1$ мм) по расчетной методике из [6] не учитывают процесса отвода тепла от локальной зоны нагрева образца, наличия в нем скин-эффекта и предполагают лишь цилиндрическую форму лунки его прожига. Поэтому они являются численно завышенными.

2.2. Результаты расчетов по методу математического моделирования на основе прикладной программы. Используемый далее метод решения рассматриваемой электротермической задачи базируется на известном фундаментальном аналитическом решении тепловой задачи для плоского массивного металлического проводника с мгновенным поверхностным точечным источником тепла дисковой формы радиусом r_0 [9]. Данное аналитическое решение в [8] было в первом приближении распространено на случай воздействия импульсного тока при прямом ударе молнии в лист. В период времени $0 \leq t \leq t_0$ в области

круглой опорной зоны канала молнии имеется источник тепла дисковой формы радиусом r_0 с усредненной плотностью теплового потока $q_0(t)$, приложенный к плоской наружной поверхности однородной стенки металлической пластины. В цилиндрической системе координат для пространственно-временного изменения превышения температуры $\theta(r,z,t)$ в материале стенки стального образца толщиной h в круговой зоне действия на нее в воздухе во времени t поверхностного теплового потока с усредненной плотностью $q_0(t)$ от плазменного канала с током молнии можно записать следующее приближенное решение рассматриваемой нестационарной электротермической задачи [8]:

$$\theta(r,z,t) = \frac{1}{(\pi\lambda_0 c_0)^{1/2}} \int_0^{t_0} r_0(\tau) q_0(\tau) F(r,z,t-\tau) d\tau, \quad (3)$$

где $\theta(r,z,t) = (\theta_t - \theta_0)$ – превышение температуры материала стенки металлического образца; θ_t – текущая и изменяющаяся во времени t температура материала плоской стенки образца; θ_0 – температура окружающего стенку образца воздуха; r – радиальная координата, направленная от оси токового канала молнии вдоль стенки плоского образца; z – продольная координата, направленная от центра очага теплового воздействия тока молнии внутрь стенки плоского образца; $q_0(\tau)$ – усредненная плотность воздействующего на стенку стального образца поверхностного теплового потока, вызванного плазменным каналом молнии;

$$F(r,z,t-\tau) = \exp[-z^2 c_0 / 4\lambda_0(t-\tau)] \times \\ \times (t-\tau)^{-1/2} \int_0^\infty \exp[-\lambda_0(t-\tau)v^2 / c_0] J_0(vr) J_1(vr_0) dv;$$

τ, v – вспомогательные переменные; $r_0(\tau)$ – текущее значение радиуса канала тока молнии; t – текущее время; t_0 – длительность протекания импульсной A - или длительной C - компонент тока молнии; J_0, J_1 – соответственно функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков; λ_0, c_0 – соответственно коэффициент теплопроводности и удельная объемная теплоемкость материала стенки плоского стального образца, принятые для решаемой задачи постоянными величинами.

Описанная вкратце математическая модель была реализована в виде прикладной программы [10], которая позволяет осуществлять расчет последствий термического воздействия на листы импульсной A - и длительной C - компонент тока молнии. Здесь совместное последовательное воздействие на стальные образцы указанных компонент тока молнии не рассматривается. Результаты приближенных численных расчетов по программе из [10] термического действия лишь одной импульсной A - компоненты тока молнии на стальной образец ($h=1$ мм) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетной оценки термического действия A - компоненты на стальной образец [10]

I_{mA} , кА	t_{mA} , мкс	τ_{pA} , мкс	Глубина оплавления h_{mA} , мм	Радиус оплавления r_{mA} , мм
192	34	500	0,04	31,6

Дополнительно к указанному выше отметим, что для рассматриваемого нами случая радиус r_{0A} канала молнии с импульсной A - компонентой ее тока согласно формулы Брагинского имеет следующий вид [8]:

$$r_{0A} = 0,093(I_{mA})^{1/3}(t_{mA})^{0,5}. \quad (4)$$

При $I_{mA}=192$ кА и $t_{mA}=34$ мкс радиус r_{0A} канала молнии, рассчитанный по (4), равен 31,3 мм. Видно, что это численное значение радиуса $r_{0A}=31,3$ мм хорошо согласуется с радиусом $r_{mA}=31,6$ мм зоны поверхностного оплавления стального образца, вызванного действием на него импульсной A - компоненты. В результате действия импульсной A - компоненты с силой тока $I_{mA}=192$ кА сквозного проплавления листа не наблюдается. В соответствии с табл. А.3 стандарта [6] вероятность появления молнии с силой тока более 200 кА не превышает 0,01 (1 %). Поэтому термическим эффектом действия одной лишь импульсной A - компоненты тока молнии при толщине стального листа $h=1$ мм и более можно пренебрегать с точки зрения возникновения в нем от нее сквозного отверстия.

Результаты расчетных оценок на основе (2) и (3) для стальной пластины ($h=1$ мм) термического действия на ее наружную поверхность длительной C - компоненты тока молнии представлены ниже в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчетной оценки термического действия длительной C - компоненты тока молнии на плоский стальной образец толщиной $h=1$ мм [10]

q_C , Кл	I_{mC} , А	$T_C=T_{long}=t_0$, мс	Диаметр $2r_c$ отверстия проплавления, мм	Средняя сила тока, А
10 ^{*)}	500	40	2,72	250
20 ^{*)}	1000	40	4,06	500
40 ¹⁾	800	100	4,96	400
125	500	500	6,40	250
200	800	500	7,72	400
350 ²⁾	1400	500	9,68	700

Примечание.

*) Вероятность превышения переносимой в плазменном канале молнии величины грозового заряда q_C в 10 Кл и 20 Кл определена соответственно как 50 % и 20 % (см. в [6] рис. А.5);

1) Превышение величины заряда q_C свыше 40 Кл, переносимого нисходящей молнией отрицательной полярности, имеет вероятность менее 5 % (см. в [6] табл. А.1);

2) Превышение величины грозового заряда q_C свыше 350 Кл, переносимого молнией положительной полярности, имеет вероятность менее 5 % (см. в [6] табл. А.1).

Следует отметить, что физика реального процесса протекания в листе тока молнии более сложная, чем в указанных расчетных моделях. Немаловажным фактором здесь является последовательное протекание A - и C - компонент тока. В результате чего осуществляется предварительный нагрев стенки объекта A - компонентой тока. Поэтому полученные по [10] результаты дают заниженное значение радиуса отверстия в стальном листе для принятого варианта их действия. Можно предполагать, что реальные размеры отверстия в листе при ударе естественной двухкомпо-

нентной молнии будут между значениями диаметров, рассчитанными по рассмотренным выше методикам.

3. Испытательная схема и электрические параметры мощных высоковольтных генераторов ГИТ-А и ГИТ-С. На рис. 2 приведена принципиальная электрическая схема генератора типа УИТОМ-1, используемого при экспериментальных исследованиях на электротермическую молниестойкость испытываемых образцов (ИО) выбранной стальной кровли технического сооружения. Из данной схемы видно, что в состав генератора типа УИТОМ-1 входят два отдельных и параллельно работающих на одну электрическую нагрузку – ИО генератора импульсных токов (ГИТ), один из которых ГИТ-А моделирует импульсную *A*- компоненту тока искусственной молнии, а другой ГИТ-С – длительную *C*- компоненту тока искусственной молнии. Укажем, что собственные электрические параметры разрядной цепи генератора ГИТ-А составляют [5]: активное сопротивление $R_A \approx 0,057$ Ом; индуктивность $L_A \approx 2,5$ мкГн; емкость $C_A \approx 333$ мкФ. Собственные электрические параметры разрядной цепи генератора ГИТ-С были равны [5]: активное сопротивление $R_C \approx 4,74$ Ом; индуктивность $L_C \approx 11,43$ мГн; емкость $C_C \approx 45,36$ мФ. Генератор ГИТ-А был собран на основе 111 параллельно включенных высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИК-50-3 (номинальное напряжение ± 50 кВ; номинальная емкость 3 мкФ), а генератор ГИТ-С – на основе 324 параллельно подсоединенных высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИМ2-5-140 (номинальное напряжение ± 5 кВ; номинальная емкость 140 мкФ) [5, 11]. В разрядной цепи генератора ГИТ-А установлен трехэлектродный воздушный коммутатор F_1 с массивными стальными электродами, а в разрядной цепи генератора ГИТ-С – двухэлектродный воздушный коммутатор F_2 с графитовыми электродами.

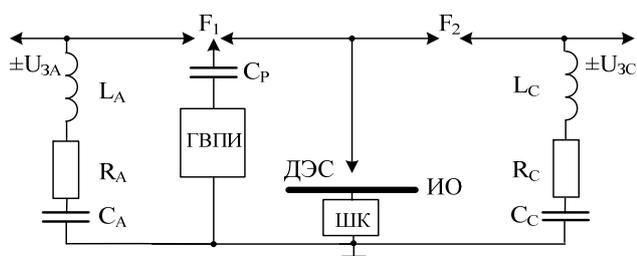


Рис. 2. Принципиальные электрические схемы сильноточных разрядных цепей генераторов ГИТ-А и ГИТ-С для формирования в стальном образце кровли импульсной *A*- и длительной *C*- компонент тока искусственной молнии (ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих микросекундных импульсов напряжения амплитудой до ± 100 кВ; F_1, F_2 – соответственно трех- и двухэлектродный высоковольтные воздушные искровые коммутаторы ГИТ-А и ГИТ-С; $C_p \approx 180$ пФ – разделительная емкость на импульсное напряжение до ± 120 кВ в цепи ГВПИ, управляющего срабатыванием искровых коммутаторов F_1 и F_2 ; ДЭС – двухэлектродная система; ИО – испытываемый образец кровли; ШК – шунт коаксиальный типа ШК-300 для измерения импульсных токов искусственной молнии амплитудой от ± 10 А до ± 300 кА; $\pm U_{3A}, \pm U_{3C}$ – зарядные напряжения соответственно ГИТ-А и ГИТ-С; L_A и L_C, R_A и R_C, C_A и C_C – соответственно собственные индуктивности, активные сопротивления и емкости разрядных цепей ГИТ-А и ГИТ-С) [8]

Высоковольтные коммутаторы F_1 и F_2 являются высоковольтными изделиями собственного изготовления [12]. Плоский стальной образец согласно рис. 2 жестко закреплялся на рабочем столе мощного генератора типа УИТОМ-1 между соответствующими массивными алюминиевыми электродами, подключенными к разрядным цепям генераторов ГИТ-А и ГИТ-С. В испытательной схеме согласно рис. 2 для воспроизведения над ИО плазменного канала искусственной молнии используется воздушная двухэлектродная система (ДЭС), снабженная тонкой электрически взрывающейся проволочкой (ЭВП). В качестве ЭВП в соответствии с требованиями [3, 4] использовалась медная проволочка диаметром 0,2 мм и длиной $l_e = (37-50)$ мм. На рис. 3 в укрупненном виде показана ДЭС рабочего стола генератора УИТОМ-1. Воздушный зазор h_a между верхним массивным цилиндрическим электродом ДЭС и нижним массивным плоским электродом – ИО мог изменяться в диапазоне от 27 до 14 мм. Воздушный зазор h_e в ДЭС между ЭВП и ИО оставался неизменным и равным примерно 1 мм.

На рис. 4 показан общий вид используемой ДЭС.

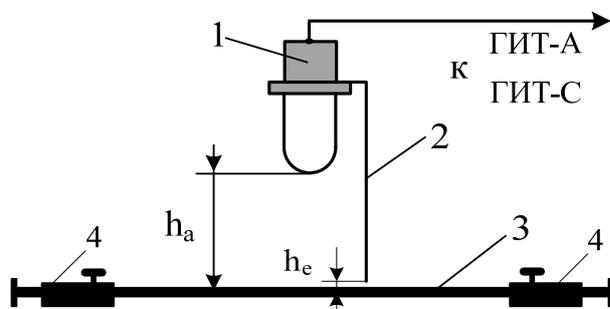


Рис. 3. Укрупненное схематическое изображение ДЭС, используемой в сильноточных разрядных цепях генераторов ГИТ-А и ГИТ-С при получении в плоских стальных ИО импульсной *A*- и длительной *C*- компонент тока искусственной молнии (1 – верхний массивный цилиндрический стальной электрод; 2 – тонкая медная ЭВП; 3 – нижний массивный плоский стальной электрод (ИО); 4 – массивные алюминиевые электроды, предназначенные для закрепления ИО; h_a – длина воздушного промежутка в ДЭС; h_e – длина воздушного промежутка между нижним краем круглой медной ЭВП и наружной плоской поверхностью ИО) [8]



Рис. 4. Общий вид ДЭС с медной ЭВП рабочего стола генераторов ГИТ-А и ГИТ-С при испытаниях в их разрядных цепях ИО тонкой стальной кровли на электротермическую стойкость к прямому воздействию на них импульсной *A*- и длительной *C*- компонент тока искусственной молнии с нормированными согласно [3, 4] АВП ($l_e = 37-50$ мм) [8]

Зарядные напряжения высоковольтных конденсаторов в генераторах ГИТ-А и ГИТ-С для выполнения планируемых экспериментов выбирались отрицательной полярности, а модули их уровней соответственно не превышали $U_{3A} \leq 25$ кВ и $U_{3C} \leq 4,2$ кВ. Выбор полярности зарядных напряжений U_{3A} и U_{3C} определялся необходимостью физического моделирования наиболее тяжелых в электротермическом смысле условий в описанной ДЭС и соответственно в круглой зоне привязки силовоточного цилиндрического плазменного канала с током искусственной молнии на наружной плоской поверхности ИО стальной кровли технического сооружения. Для предотвращения механических разрушений в конденсаторных батареях генераторов ГИТ-А и ГИТ-С и обеспечения требуемых условий техники безопасности и охраны труда для обслуживающего мощный генератор типа УИТОМ-1 персонала при аварийном режиме его работы (например, при электрическом пробое изоляции хотя бы одного из 435 указанных конденсаторов при их заряде или разряде) на всех высоковольтных выводах используемых конденсаторов генераторов ГИТ-А и ГИТ-С были установлены защитные сопротивления, выполненные из высоковольтных постоянных объемных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 на постоянное напряжение ± 25 кВ [5, 13]. Причем, на выводах конденсаторов типа ИК-50-3 были установлены защитные резисторы типа ТВО-60-24 Ом (жесткая сборка из четырех параллельно соединенных резисторов), а на выводах конденсаторов типа ИМ2-5-140 – по одному защитному резистору типа ТВО-60-100 Ом. Параллельная работа генераторов ГИТ-А и ГИТ-С на ИО стальной кровли согласно схеме на рис. 1 обеспечивалась синхронным срабатыванием высоковольтного трехэлектродного управляемого воздушного коммутатора F_1 с массивными полусферическими стальными основными электродами на номинальное напряжение ± 50 кВ [12] и высоковольтного двухэлектродного воздушного коммутатора F_2 с массивными прямоугольными графитовыми электродами, содержащими плоские рабочие поверхности, на номинальное напряжение ± 10 кВ [12]. В свою очередь, синхронное срабатывание коммутаторов F_1 и F_2 осуществлялось за счет подачи через разделительную емкость C_p на средний стальной сферический электрод коммутатора F_1 от генератора высоковольтных поджигающих импульсов (ГВПИ) импульсного напряжения микросекундной длительности амплитудой до ± 100 кВ [5, 12]. При пробое от ГВПИ одного из двух воздушных промежутков коммутатора F_1 и его последующем срабатывании возникающее импульсное перенапряжение на ДЭС с ИО приводит к практически одновременному с ним срабатыванию и коммутатора F_2 . После срабатывания коммутаторов F_1 и F_2 за счет разряда предварительно заряженных высоковольтных конденсаторов генераторов ГИТ-А и ГИТ-С через ИО стальной кровли технического сооружения начинают протекать имитированные импульсы тока молнии с требуемыми по [3, 4] АВП. Следует отметить, что номинальные значения запасаемой электрической энергии в мощных генераторах ГИТ-А и ГИТ-С составляют 416 и 567 кДж соответственно [5, 8, 13].

Измерение АВП импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии в ИО стальной кровли проводилось с помощью поверенных метрологической службой измерительного коаксиального шунта типа ШК-300 [14], имеющего для этих токов соответственно коэффициенты преобразования $K_A \approx 10417$ А/В и $K_C \approx 5219$ А/В, и цифровых запоминающих осциллографов типа Tektronix TDS 1012.

4. Результаты испытаний стальных образцов кровли на стойкость к воздействию импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии. На рис. 5 показан общий вид рабочего стола с ДЭС мощного генератора УИТОМ-1 и жестко закрепленным на нем плоским ИО стальной кровли толщиной $h=1$ мм в пазах массивных алюминиевых электродов, включенных в силовоточные разрядные цепи высоковольтных генераторов ГИТ-А и ГИТ-С.

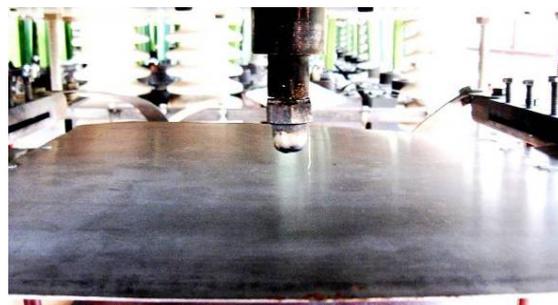


Рис. 5. Внешний вид ИО стальной кровли, закрепленного в ДЭС с ЭВП на рабочем столе генератора типа УИТОМ-1, до прямого воздействия на него от высоковольтных генераторов ГИТ-А и ГИТ-С импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии ($h_a=27$ мм; $l_e=50$ мм)

Представленные ниже результаты двух видов экспериментов по определению электротермической молниестойкости идентичных ИО стальной кровли были получены при одинаковых величинах зарядных напряжений в ГИТ-А и ГИТ-С ($U_{3A}=-25$ кВ; $U_{3C}=-4,2$ кВ), воздушного промежутка $h_e \approx 1$ мм и двух величин воздушного промежутка h_a , равных 27 и 14 мм.

4.1. Результаты экспериментов при $h_a=27$ мм.

На рис. 6 приведена осциллограмма импульсной А-компоненты тока искусственной молнии, протекающей в ИО стальной кровли технического сооружения.

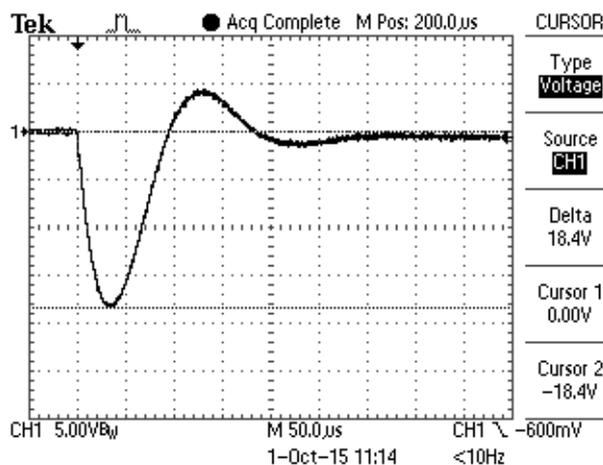


Рис. 6. Осциллограмма импульсной А- компоненты тока искусственной молнии, воздействующей на ИО кровли

Из расшифровки этой осциллограммы следует, что для рассматриваемого случая первая амплитуда импульсной A - компоненты тока искусственной молнии в ИО стальной кровли составляла $I_{mA} \approx -192$ кА. Этой амплитуде затухающей по экспоненте колебательной токовой составляющей соответствовало время t_{mA} , равное 34 мкс. Длительность первой полуволны τ_{1A} тока при этом составляла около 94 мкс, а полная длительность τ_{pA} данной компоненты тока имитированного грозового разряда – примерно 500 мкс. На рис. 7 представлена осциллограмма апериодической длительной C - компоненты тока искусственной молнии амплитудой $I_{mC} \approx -804$ А, протекающей в ИО кровли из нержавеющей стали ($h=1$ мм). Видно, что длительность τ_C этой компоненты импульсного тока молнии на уровне $0,5 \cdot I_{mC}$ была равной примерно 160 мс, а ее полная длительность τ_{pC} – около 0,516 с. Время t_{mC} , соответствующее амплитуде I_{mC} , равно 9 мс.

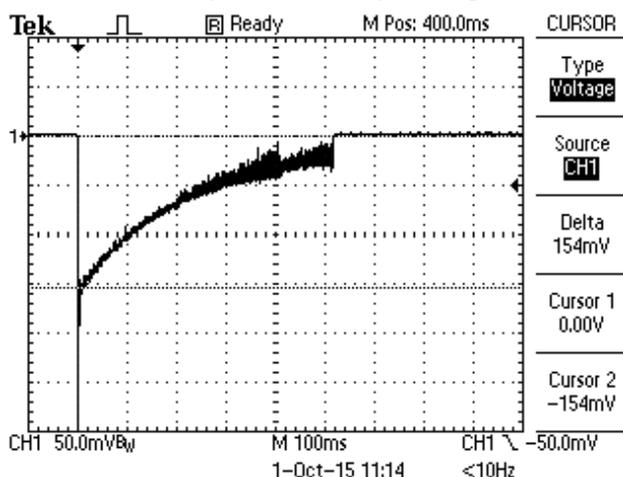


Рис. 7. Осциллограмма длительной C - компоненты тока искусственной молнии, воздействующей на ИО кровли

Согласно рис. 6 на кривой длительной C - компоненты тока искусственной молнии, особенно на завершающей стадии ее протекания, отчетливо видны многочисленные наложенные колебания, обусловленные неустойчивостью горения над ИО кровли импульсной дуги в воздушном промежутке длиной $h_a=27$ мм. При текущем времени t , равном $\tau_{pC} \approx 0,516$ с, данная неустойчивость горения дуги приводит к обрыву ее плазменного канала и прекращению протекания длительной C - компоненты тока в исследуемом ИО стальной кровли. Расшифровка осциллограммы на рис. 6 показывает, что за время $\tau_{pC} \approx 0,516$ с количество электричества q_C , протекшее в разрядной цепи генератора ГИТ-С через ИО кровли, составило в этом случае по модулю около 178 Кл. Этому заряду соответствует усредненное значение тока используемой токовой компоненты в ИО, равное $i_{CC} \approx q_C / \tau_{pC} \approx -345$ А.

На рис. 8 и 9 показаны внешние виды наружной и тыльной поверхностей ИО стальной кровли после совместного воздействия на него импульсной A - и длительной C - компонент тока искусственной молнии с АВП, соответствующими данным осциллограмм на рис. 6 и 7. Видно, что сквозного проплавления стенки ИО кровли из нержавеющей стали толщиной $h=1$ мм в данном случае ($h_a=27$ мм) не произошло. Округлая

зона привязки на наружной поверхности ИО стальной кровли импульсной A - компоненты тока имитированной молнии имела наибольший размер до 60 мм. Глубина образовавшегося в этой зоне кратера не превышала 50 мкм. В округлой зоне привязки длительной C - компоненты тока искусственной молнии произошло локальное расплавление материала стенки ИО стальной кровли, имеющего температуру плавления около 1455 °С [7, 15]. Диаметр зоны расплавления согласно рис. 8 и 9 не превышал 23 мм. На тыльной поверхности ИО стальной кровли отчетливо проявляется «цвета побежалости» от действия на его материал высокой температуры импульсного джоулева нагрева.



Рис. 8. Общий вид на наружной поверхности ИО стальной кровли округлого очага прямого воздействия на него импульсной A - и длительной C - компонент тока искусственной молнии с нормированными согласно требований [3, 4] АВП

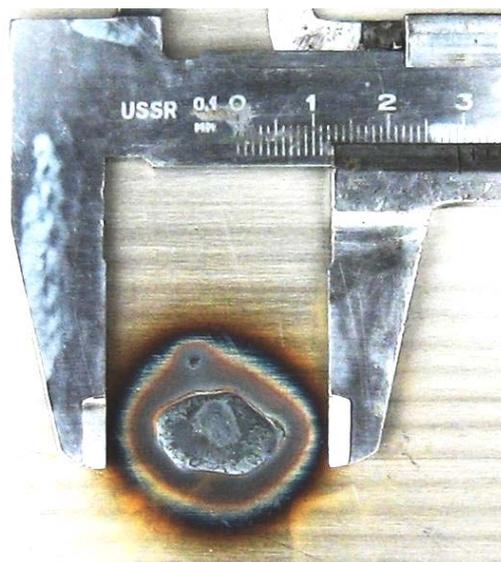


Рис. 9. Внешний вид на тыльной поверхности ИО стальной кровли округлого очага прямого воздействия на него импульсной A - и длительной C - компонент тока искусственной молнии с нормированными согласно требований [3, 4] АВП

4.2. Результаты экспериментов при $h_a=14$ мм.

На рис. 10 и 11 приведены осциллограммы соответственно для импульсной A - и длительной C - компонент тока искусственной молнии, полученные применительно к испытанию ИО стальной кровли на электро-термическую молниестойкость при уменьшении в ДЭС значения h_a до 14 мм. АВП импульсной A - компоненты моделируемого тока молнии при этом полностью соответствовали АВП подобной токовой составляющей грозового разряда, приведенной на рис. 6. Что касается АВП длительной C - компоненты тока имитируемой молнии, то в этом случае ($h_a=14$ мм; $l_e=37$ мм) изменению подверглись лишь три их параметра: полная длительность протекания тока i_C уменьшилась до $\tau_{pC} \approx 0,448$ с; протекший заряд уменьшился до значения $q_C \approx -165$ Кл; средний ток увеличился до уровня $i_{CC} \approx -367$ А. Несмотря на указанные изменения в АВП длительной C - компоненты тока искусственной молнии, в этом случае произошло сквозное проплавление стенки ИО кровли из нержавеющей стали толщиной $h=1$ мм. Диаметр $2r_c$ проплавленного отверстия в ИО составил 12 мм (рис. 12).

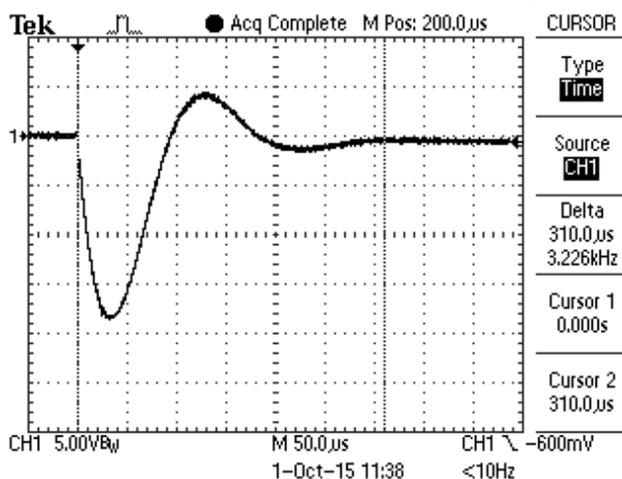


Рис. 10. Осциллограмма импульсной A - компоненты тока искусственной молнии, воздействующей в сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А на плоский ИО стальной кровли толщиной $h=1$ мм ($I_{mA} \approx 192$ кА; $t_{mA} \approx 34$ мкс; $\tau_{pA} \approx 500$ мкс; $J_A \approx 1,9 \cdot 10^6$ А²·с)

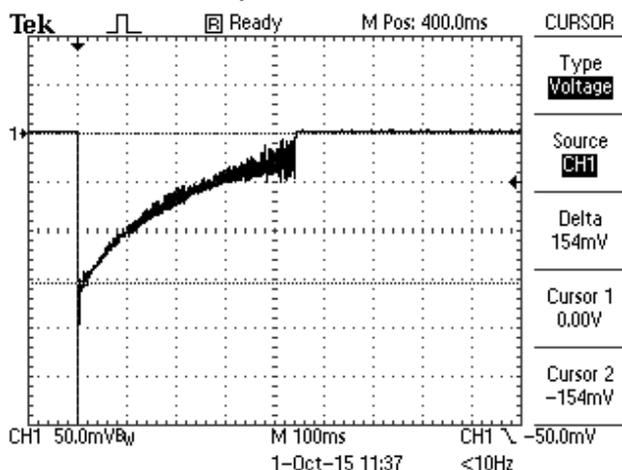


Рис. 11. Осциллограмма длительной C - компоненты тока искусственной молнии, воздействующей на плоский ИО стальной кровли толщиной $h=1$ мм ($I_{mC} \approx 804$ А; $t_{mC} \approx 9$ мс; $\tau_C \approx 160$ мс; $\tau_{pC} \approx 0,448$ с; $q_C \approx -165$ Кл; $i_{CC} \approx -367$ А)

Полученный при $h_a=14$ мм экспериментальный результат, касающийся сквозного проплавления имитируемым током молнии исследуемого тонкостенного образца стальной кровли технического сооружения, может быть объяснен тем, что при уменьшении длины воздушного промежутка h_a в ДЭС (соответственно и длины l_e для ЭВП) рабочего стола используемого генератора типа УИТОМ-1 наступает стабилизация зон привязки на наружной поверхности ИО стальной кровли плазменных каналов для длительной C - и импульсной A - компоненты тока искусственной молнии. Кроме того, уменьшение величины h_a предотвращает разветвление (разделение) в воздухе соответствующих плазменных каналов цилиндрической конфигурации для высоковольтных электрических импульсных и дуговых разрядов (следы подплавления от подобного канального разделения для моделируемой C - компоненты тока молнии как раз и присутствуют на рис. 8 и 9), что также способствует локальной концентрации тепловой энергии, выделяемой в материале исследуемых образцов кровли из нержавеющей стали.



Рис. 12. Внешний вид округлой зоны диаметром около 12 мм сквозного проплавления плоской стенки ИО стальной кровли ($h=1$ мм; $h_a=14$ мм) от прямого действия на него длительной C - компоненты тока искусственной молнии и округлой зоны диаметром до 58 мм ее поверхностного оплавления от прямого действия на ИО импульсной A - компоненты ее тока с нормированными по требованиям [3, 4] АВП

В пользу указанного физического объяснения сквозного проплавления стенки исследуемого тонкостенного ИО стальной кровли используемыми нами импульсными токами с уменьшением длины воздушного промежутка h_a в ДЭС (даже при уменьшении протекшего через ИО электрического заряда для длительной C - компоненты тока искусственной молнии со 178 до 165 Кл) свидетельствуют результаты последующей серии экспериментов, проведенных на мощном генераторе типа УИТОМ-1 для исследуемых ИО при $h_a=14$ мм. На рис. 13 и 14 приведены соответствующие осциллограммы для используемых в этом случае компонент импульсного тока искусственной молнии. Если кривая для импульсной A - компоненты тока имитируемого грозового разряда в последнем

случае повторяет подобные кривые для этой токовой составляющей искусственной молнии, приведенные на рис. 6 и 10, то кривая для длительной C -компоненты тока молнии здесь существенно отличается от аналогичных токовых кривых, приведенных на рис. 7 и 11. Эти отличия, прежде всего, касаются более устойчивого горения в ДЭС над ИО высоковольтной импульсной дуги с током i_C в воздушном промежутке длиной $h_a=14$ мм. Одним из признаков такого процесса протекания этой дуги является практическое отсутствие на кривой аperiodического тока i_C наложенных колебаний значительной амплитуды (см. рис. 14). Следствием такого электромагнитного процесса является увеличенная полная длительность τ_{pC} протекания через ИО стальной кровли импульсного тока i_C , достигающая численного значения 0,736 с. Отсюда следует также и увеличенное количество электричества $q_C \approx -187$ Кл, протекающее через округлую зону привязки плазменного канала длительной C -компоненты тока искусственной молнии на наружной поверхности ИО.

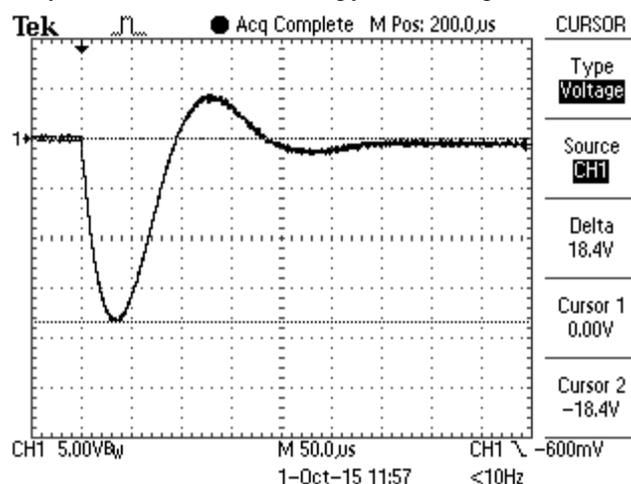


Рис. 13. Осциллограмма импульсной A -компоненты тока имитируемой молнии, воздействующей в силовоточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А на плоский тонкостенный ИО стальной кровли толщиной $h=1$ мм ($I_{mA} \approx 192$ кА; $t_{mA} \approx 34$ мкс; $\tau_{pA} \approx 500$ мкс; $J_A \approx 1,9 \cdot 10^6$ А²·с)

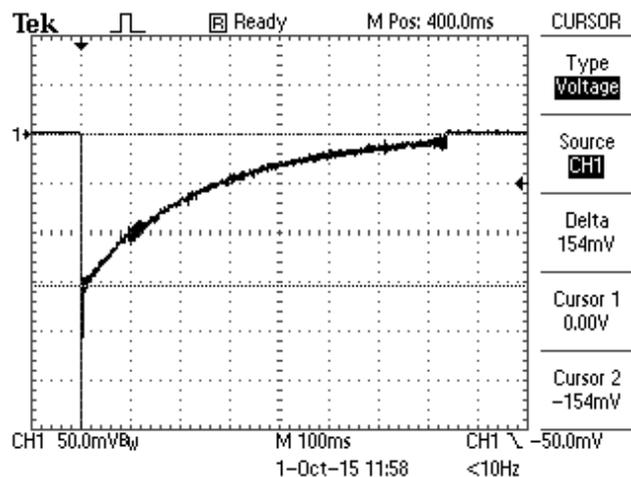


Рис. 14. Осциллограмма длительной C -компоненты тока имитируемой молнии, воздействующей в разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-С на плоский тонкостенный ИО стальной кровли толщиной $h=1$ мм ($I_{mC} \approx 804$ А; $t_{mC} \approx 9$ мс; $\tau_C \approx 160$ мс; $\tau_{pC} \approx 0,736$ с; $q_C \approx -187$ Кл; $i_{CC} \approx -254$ А)

На рис. 15 показан внешний вид результатов прямого совместного воздействия на плоский тонкостенный ($h=1$ мм; $h_a=14$ мм) ИО кровли из нержавеющей стали импульсной A - и длительной C -компонент тока искусственной молнии с нормированными по [3, 4] АВП, приведшего к сквозному проплавлению стальной стенки ИО. Диаметр $2r_{mA}$ приповерхностного (на глубину не более 50 мкм) очага электротермического воздействия на наружную плоскую поверхность ИО стальной кровли от импульсной A -компоненты тока имитируемой молнии составил при этом до 59 мм. Диаметр отверстия в зоне сквозного проплавления стенки исследуемого образца кровли от электротермического действия на нее длительной C -компонент тока имитируемой молнии составил 15 мм.



Рис. 15. Внешний вид округлых зон термического воздействия на плоский ИО стальной кровли импульсной A - и длительной C -компонент тока искусственной молнии с нормированными по требованиям [3, 4] АВП, сопровождающегося сквозным проплавлением стенки ИО ($h=1$ мм; $h_a=14$ мм)

5. Сравнение результатов расчетных оценок и выполненных экспериментов. Это сравнение, проведенное для случая прямого действия на опытные тонкостенные ($h=1$ мм) образцы из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т C -компоненты тока, представлено в табл. 5 (при этом эксперименты проводились при длине воздушного промежутка в ДЭС $h_a=14$ мм).

Таблица 5
Сравнительные данные для результатов выполненных расчетов и экспериментов при оценке термической молниестойкости стальных образцов

Значение заряда q_c , Кл	Диаметр отверстия проплавления в стенке стального образца ($h=1$ мм), мм		
	Эксперимент	По формуле (1)	Численный метод [10]
165	12,0	18,0	7,1
187	15,0	20,8	7,7

Из данных табл. 5 следует, что результаты расчетной оценки электротермической молниестойкости стальных образцов ($h=1$ мм) с использованием (1) удовлетворительно (с погрешностью до 28 %) согласуются с результатами проведенных экспериментов.

Выводы.

1. Результаты выполненных в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» оценочных расчетно-экспериментальных исследований электротермической стойкости опытных плоских образцов размером в плане 500×500 мм из нержавеющей стали толщиной 1 мм к прямому воздействию на них в воздухе импульсной *A*- и длительной *C*- компонент тока искусственной молнии с нормированными АВП согласно действующих требований нормативными документами США SAE ARP 5412 и SAE ARP 5416 указывают на то, что исследованные нами тонкостенные стальные образцы могут подвергаться сквозному проплавлению. Диаметр отверстия сквозного проплавления в исследованных стальных образцах в округлой зоне привязки на их наружной поверхности плазменного канала длительной *C*- компоненты тока имитируемого в лабораторных условиях грозового разряда может достигать 15 мм.

2. Существенное влияние на результаты электротермического воздействия плазменных каналов искусственной молнии с *A*- и *C*- компонентами импульсного тока на исследованные опытные стальные образцы технического сооружения оказывают электрофизические процессы привязки соответствующих плазменных каналов на их наружной поверхности и горения над ними высоковольтной импульсной дуги в воздушном промежутке ДЭС использованного в экспериментах мощного высоковольтного генератора тока искусственной молнии типа УИТОМ-1.

3. Для предотвращения возможных очагов возгорания горючих жидкостей и материалов, размещаемых снизу под тонкостенной стальной оболочкой с указанными характеристиками, поражаемой на открытом воздухе прямыми ударами высоковольтных грозовых разрядов, требуется разработка специальных технических мероприятий, повышающих пожарную безопасность подобных технических сооружений к действию на них больших импульсных токов молнии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юман М.А. Молния. – М.: Мир, 1972. – 327 с.
2. Кравченко В.И. Молния. Электромагнитные факторы и их поражающее воздействие на технические средства. – Х.: НТМТ, 2010. – 292 с.
3. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.
4. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.
5. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С., Дныщенко В.Н. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – №3. – С. 81-85. doi: 10.1134/s0020441208030123.
6. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
7. http://www.sgkarkas.ru/spravochnik/marochnik_stalej/12h18n10t.
8. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: Точка, 2010. – 407 с.
9. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел / Пер. с англ. – М.: Наука, 1964. – 487 с.
10. Дронов В.Н., Серков А.А. Компьютерная программа для расчета структуры электротермического воздействия тока

молнии на металлическую обшивку / Свидетельство о регистрации авторского права № 30557 от 06.10.2009 г. Выдано государственной службой интеллектуальной собственности Украины.

11. Берзан В.П., Геликман Б.Ю., Гураевский М.Н., Ермуратский В.В., Кучинский Г.С., Мезенин О.Л., Назаров Н.И., Перегудова Е.Н., Рудь В.И., Садовников А.И., Смирнов Б.К., Степина К.И. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 656 с.

12. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С. Высоковольтные высокопоточные воздушные разрядники генератора тока искусственной молнии // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – №6. – С. 58-62.

13. Баранов М.И., Рудаков С.В. Разработка новых схем резистивной защиты высоковольтных конденсаторов мощных емкостных накопителей энергии от аварийных токов // Электротехника и электромеханика. – 2015. – №6. – С. 47-52. doi: 10.20998/2074-272X.2015.6.08.

14. Баранов М.И., Кравченко В.И. Электротермическая стойкость проводов и кабелей летательного аппарата к поражающему действию импульсного тока молнии // Электричество. – 2013. – №10. – С. 7-15.

15. Кухлинг Х. Справочник по физике / Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с.

REFERENCES

1. Yuman M.A. *Molniya* [Lightning]. Moscow, Mir Publ., 1972. 327 p. (Rus).
2. Kravchenko V.I. *Molniya. Elektromagnitnyy faktory i porazhayushchie vozdeystviya na tekhnicheskie sredstva* [Lightning. Electromagnetic factors and their impact on the striking technical objects]. Kharkov, NTMT Publ., 2010. 292 p. (Rus).
3. SAE ARP 5412: 2013. *Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms*. SAE Aerospace. USA, 2013. pp. 1-56.
4. SAE ARP 5416: 2013. *Aircraft Lightning Test Methods*. SAE Aerospace. USA, 2013. pp. 1-145.
5. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects. *Pribory i tehnika eksperimenta – Instruments and Experimental Technique*, 2008, no.3, pp. 401-405. doi: 10.1134/s0020441208030123.
6. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
7. Available at: http://www.sgkarkas.ru/spravochnik/marochnik_stalej/12h18n10t (accessed 15 May 2013). (Rus).
8. Baranov M.I. *Izbrannyye voprosy elektrofiziki. Tom 2, Kn. 2: Teoriya elektrofizicheskikh effektiv i zadach* [Selected topics of Electrophysics. Vol.2, Book 2. A theory of electrophysical effects and tasks]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2010. 407 p. (Rus).
9. Karlsru G., Eger D. *Teplotoprovodnost' tverdykh tel / Per. s angl.* [Heat conductivity of solids / Transl. from Eng.]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 487 p. (Rus).
10. Dronov V.N., Serkov A.A. *Komp'yuternaya programma dlja rascheta struktury elektrottermicheskogo vozdeystviya toka molnii na metallicheskuju obshivku / Svidetel'stvo o registratsii avtorskogo prava № 30557 ot 06.10.2009. Vydano gosudarstvennoi sluzhboi intellektual'noi sobstvennosti Ukrainy* [Computer program for the calculation of structure of electro-thermal action of current of lightning on the metallic edging / Testifying to registration of copyright no.30557 from 06.10.2009. It is given out government service intellectual property of Ukraine]. (Rus).
11. Berzan V.P., Gelikman B.Yu., Guraevsky M.N., Ermuratsky V.V., Kuchinsky G.S., Mezenin O.L., Nazarov N.I., Peregudova E.N., Rud' V.I., Sadovnikov A.I., Smirnov B.K., Stepina K.I. *Elektricheskie kondensatory i kondensatornye ustanovki*.

Spravochnik [The electrical capacitors and condenser options. Directory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 656 p. (Rus).

12. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skiy O.S. High-voltage high-current generator air gaps of the current artificial lightning. *Pribory i tekhnika eksperimenta – Instruments and experimental techniques*, 2008, no.6, pp. 58-62. (Rus).

13. Baranov M.I., Rudakov S.V. Development of new charts of capacitance-resistance defense of high-voltage capacitors of powerful capacity stores of energy from emergency currents. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.6, pp. 47-52. (Rus). doi: **10.20998/2074-272X.2015.6.08**.

14. Baranov M.I., Kravchenko V.I. Electrothermal resistance wire and cable to the aircraft to the striking action pulsed current lightning. *Elektrichestvo – Electricity*, 2013, no.10, pp. 7-15. (Rus).

15. Kuhlning H. *Spravochnik po fizike. Per. s nem.* [Dictionary on Physics. Translated from German]. Moscow, Mir Publ., 1982. 520 p. (Rus).

Поступила (received) 23.02.2016

Баранов Михаил Иванович¹, д.т.н., гл.н.с.,
Князев Владимир Владимирович¹, к.т.н., с.н.с.,
Кравченко Владимир Иванович¹, д.т.н., проф.,
Рудаков Сергей Валерьевич², к.т.н., доц.,

¹ НИПКИ «Молния»

Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
тел/phone +38 057 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

² Национальный университет гражданской защиты Украины,
61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94,
тел/phone +38 057 7073438, e-mail: serg_73@i.ua

M.I. Baranov¹, V.V. Kniaziev¹, V.I. Kravchenko¹, S.V. Rudakov²

¹ Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»,
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

² National University of Civil Protection of Ukraine,
94, Chernyshevska Str., Kharkiv, 61023, Ukraine.

Results of calculation-experimental investigations of electro-thermal resistibility of sheet steel samples to action of rationed components of pulsed current of artificial lightning.

Purpose. Calculation and experimental researches of the electro-thermal resistibility of the steel sheet samples to action standard pulse current components of the artificial lightning with amplitude-time parameters (ATP), corresponded the requirements of normative documents of USA for SAE ARP 5412 & SAE ARP 5416. **Methodology.** Electrophysics bases of technique of high tensions and large impulsive currents (LIC), and also scientific and technical bases of planning of devices of high-voltage impulsive technique and measuring in them LIC. Current amplitude $I_{mA}=\pm 200$ kA (with a tolerance of ± 10 %); current action integral $J_A=2\cdot 10^6$ A²·s (with a tolerance of ± 20 %); time, corresponding to the amplitude of the current I_{mA} , $t_{mA}\leq 50$ microseconds; the duration of the current flow $\tau_{pA}\leq 500$ microseconds. **Results.** The results of the evaluation of the calculated and experimental studies of electro-thermal resistance of the samples of plates measuring 0,5 m × 0,5 m stainless steel 1 mm thickness to the action on them artificial lightning impulse currents with rationed ATP on the requirements of normative documents of USA for SAE ARP 5412 & SAE ARP 5416. A pulse A- component have a first amplitude 192 kA, the corresponding time of 34 μs, and the duration aperiodic component amplitude 804 A, corresponding to the time 9 ms. It has been shown that the long C- component current of artificial lightning can lead to keyhole these samples. The diameter of the holes in this thin steel sheet, which is formed during the flow of current C- components can reach 15 mm. The results of calculation and experiment agree within 28 %. **Originality.** For the first time in world practice on the generator large pulsed currents experimental studies of resistibility of sheet steel samples to the action of artificial lightning currents with critical parameters. **Practical value.** Using the results obtained in the practice of lightning protection will significantly improve the functionality and fire safety of different objects in conditions of exposure to linear lightning. References 15, figures 15, tables 5.

Key words: main components of lightning current, impulse current generator of artificial lightning, flat steel sample, electro-thermal resistibility to lightning.

И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Розглянуто трьохелектродна установка для вимірювання опору заземлюючих пристроїв (ЗП) різного призначення. На основі використання системи рівнянь Максвелла запропоновано теоретичне обґрунтування методики вимірювання опору ЗП будь-якої конструкції в довільній структурі ґрунту. Отримано систему рівнянь шостого порядку, рішення якої дозволяє визначити власні і взаємні опори в трьохелектродній установці з досить високою точністю. Розглянуто особливості складання розрахункової схеми заміщення трьохелектродної вимірювальної установки з зосередженими параметрами: власними та взаємними опорами. Використовуючи принцип взаємності, виключена необхідність відшукування точки нульового потенціалу, що представляє вісьма трудомістке завдання. Методика дозволяє забезпечити мінімально можливий рознос вимірювальних електродів за межами ЗП, що істотно зменшує довжину сполучних проводів схеми вимірювання і збільшує відношення «сигнал-перешкоди», а також знімає обмеження щодо забудови території за межами досліджуваного ЗП. Бібл. 12, табл. 2, рис. 11.

Ключові слова: заземлюючий пристрій, вимірювання опору, трьохелектродна установка, мінімальний рознос вимірювальних електродів, методика, схема заміщення.

Рассмотрена трехэлектродная установка для измерения сопротивления заземляющих устройств (ЗУ) различного назначения. На основе использования системы уравнений Максвелла предложено теоретическое обоснование методики измерения сопротивления ЗУ любой конструкции в произвольной структуре грунта. Получена система уравнений шестого порядка, решение которой позволяет определить собственные и взаимные сопротивления в трехэлектродной установке с достаточно высокой точностью. Рассмотрены особенности составления расчетной схемы замещения трехэлектродной измерительной установки с сосредоточенными параметрами: собственными и взаимными сопротивлениями. Используя принцип взаимности, исключена необходимость отыскания точки нулевого потенциала, представляющего весьма трудоемкую задачу. Методика позволяет обеспечить минимально возможный разнос измерительных электродов за пределами ЗУ, что существенно уменьшает длину соединительных проводов схемы измерения и увеличивает отношение «сигнал-помехи», а также снимает ограничения по застройке территории за пределами исследуемого ЗУ. Библ. 12, табл. 2, рис. 11.

Ключевые слова: заземляющее устройство, измерение сопротивления, трехэлектродная установка, минимальный разнос измерительных электродов, методика, схема замещения.

Введение. Проблемам измерения электрических параметров земли и заземляющих устройств (ЗУ) посвящены фундаментальные работы известных ученых: А.Л. Вайнер [1], С.И. Коструба [2], А.Б. Ослон [3], Ю.В. Целебровский [4], А.И. Якобс [5] и др. В своих работах и отечественные и зарубежные исследователи отмечают, что одной из важных проблем является проблема точного измерения сопротивления ЗУ различного назначения.

В настоящее время для измерений сопротивлений ЗУ получила широкое распространение трехэлектродная измерительная установка. Одной из главных задач, которую необходимо решить для получения с помощью этой установки достаточно точных результатов, является, как указано в работе [6], правильный выбор мест расположения измерительных электродов, т. е. такая их расстановка, при которой измеренное значение сопротивления отличается от его истинного значения не более чем на некоторую величину, которую принято называть приемлемой погрешностью измерения. Обычно считается, что при измерениях сопротивлений ЗУ приемлемой является погрешность порядка 10 % в ту или иную сторону [5].

Измерение сопротивлений заземлителей больших размеров в однородном грунте представлено в работе [6], в которой описан расчетный метод определения оптимального расположения измерительных электродов при измерении сопротивления заземлителей больших размеров, позволяющий размещать электроды на близких расстояниях от заземлителя.

Однако при этом отмечено, что расчеты с помощью рассматриваемых моделей заземлителей имеют лишь ограниченное применение, связанное с их внешними полями.

Анализ методов Тагга при измерениях сопротивлений заземлителей, приведенный в работе [7], показал, что метод Тагга не пригоден в грунтах с возрастанием удельного сопротивления грунта по глубине.

Вместе с тем, в выводах работы [8] отмечено, что существует принципиальная возможность точного измерения сопротивления заземлителя при любом характере неоднородности грунта и любых размерах и конфигурации ЗУ, без использования расчетных программ, где также показаны пути реализации этой возможности. Однако, к сожалению, и в этом случае необходимо будет определять местоположение потенциального электрода путем отыскания точки нулевого потенциала на месте измерений.

Математическое моделирование процесса измерений сопротивления заземлителя току промышленной частоты в многослойном грунте представлено в работе [9], где описан алгоритм вычисления погрешностей измерения сопротивлений заземлителей электроустановок в многослойных грунтах при различных расположениях измерительных электродов и приведен пример построения линий равных погрешностей для заземлителя сложной формы в четырехслойном грунте. К сожалению, как отмечают авторы [9], выбрать такое расположение электродов, при котором

измеренное сопротивление заземлителя равняется истинному, экспериментальным путем при измерениях на местности невозможно.

Целью работы является теоретическое обоснование методики измерения сопротивления заземлителя с помощью трехэлектродной измерительной установки при любом характере неоднородности грунта, любых размерах и конфигурации ЗУ и произвольном размещении измерительных электродов.

Теоретическое обоснование разработанной методики измерения сопротивления ЗУ. Трехэлектродная установка для измерения сопротивления ЗУ различного назначения в общем случае является многоэлектродной системой. А расчет многоэлектродных систем в линейной проводящей среде любого строения, как отмечено в работе [9], основывается на системе уравнений, предложенных Максвеллом [10].

В связи с этим рассмотрим сначала пример использования расчетной схемы замещения при размещении пассивного заземлителя в поле тока активного заземлителя. На рис. 1 показаны элементы схемы замещения: R_1 – активный заземлитель, R_2 – пассивный заземлитель, R_{12} – взаимное сопротивление.

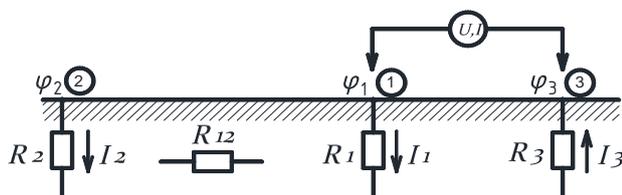


Рис. 1. Взаимовлияние активного (1) и пассивного (2) заземлителей

Допускаем, что источник тока I_1 имеет второй полюс (R_3), располагаемый так, что его поле не влияет на поле в точке 2. Потенциал в точке 2 (φ_2) определяется как $I_1 \cdot R_{12}$, тогда с пассивного электрода R_2 стекает в землю ток I_2 . Источник (тока) подгружается дополнительным током I_2 ; если источник определен как «источник тока», потенциал точки 1 (φ_1) снижается. В случае «источника напряжения» нагрузка источника увеличивается за счёт суммирования токов I_1 и I_2 . Наличие двух токов (I_1 и I_2) позволяет использовать известную уже систему уравнений Максвелла:

$$\begin{cases} \varphi_1 = I_1 R_1 + I_2 R_{12}; \\ \varphi_2 = I_1 R_{12} + I_2 R_2. \end{cases} \quad (1)$$

Отметим известные ограничения при определении (экспериментальном) взаимного сопротивления: из опыта с двумя заземлителями сопротивление R_{12} неопределимо. Желание определить все три сопротивления реализуется при работе с системой из трёх взаимовлияющих заземлителей.

Уравнения Максвелла определяют полевые потенциальные связи, тогда как для упрощения расчётов удобнее использовать схемы замещения с некоторыми (φ, I, R) параметрами.

На примере двух заземлителей, обтекаемых одинаковым током от источника (U, I) в последовательной цепи (рис. 2), рассмотрим варианты схемы замещения.

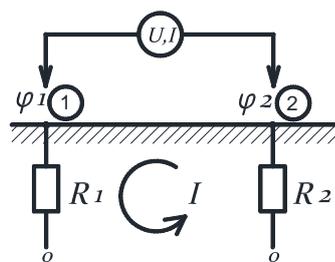


Рис. 2. Система двух заземлителей при их последовательном включении

Следуя электростатической аналогии и уравнениям Максвелла, имеем

$$\begin{cases} \varphi_1 = IR_1 - IR_{12}; \\ \varphi_2 = -IR_{12} + IR_2. \end{cases} \quad (2)$$

На основании уравнений (2) можем записать

$$\begin{aligned} \varphi_1 + \varphi_2 = U = I(R_1 - R_{12} + R_2 - R_{12}) = \\ = I(R_1 + R_2 - 2R_{12}) = IR_{equ}. \end{aligned} \quad (3)$$

Соответствующая уравнению (3) схема замещения получает вид (рис. 3).

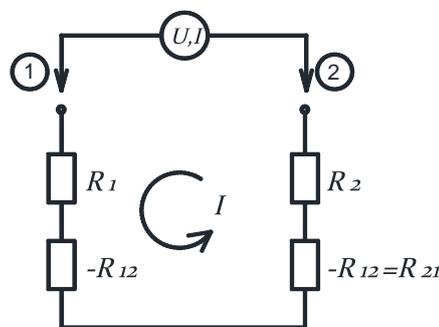


Рис. 3. Вариант схемы замещения для последовательно соединенных заземлителей

Схема, приведенная на рис. 3, пригодна для математического моделирования, но не для модели физической из-за наличия отрицательных сопротивлений R_{12} . Физический аналог для схемы на рис. 3 представим в виде схемы по рис. 4.

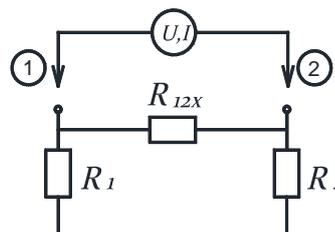


Рис. 4. Расчётный аналог схемы замещения

По равенству входных сопротивлений схем рис. 3 и рис. 4 имеем:

$$R_1 + R_2 - 2R_{12} = \frac{(R_1 + R_2)R_{12X}}{R_1 + R_2 + R_{12X}}. \quad (4)$$

После компоновки слагаемых получим

$$2R_{12X}R_{12} = (R_1 + R_2)^2 - 2R_{12}(R_1 + R_2), \quad (5)$$

а отсюда находим

$$R_{12X} = \frac{(R_1 + R_2)^2}{2R_{12}} - R_1 - R_2, \quad (6)$$

или получаем связь между сопротивлениями R_{12} (см. формулу (5)) и R_{12X} :

$$R_{12} = \frac{(R_1 + R_2)^2}{2(R_1 + R_2 + R_{12X})}. \quad (7)$$

Учтём, что взаимное сопротивление R_{12} меньше меньшего из сопротивлений R_1 или R_2 и $R_{12X} > 0$.

Использование модели по рис. 4 при расчётах для нахождения величины R_{12X} с учётом выражения (7) даёт возможность определения взаимного сопротивления R_{12} ; учёт влияния R_{12} (с соответствующим знаком) должен выполняться согласно рис. 3.

Измерения при двух заземлителях (см. рис. 2) путём ввода источника (U, I) не позволяют расшифровать значения сопротивлений R_1, R_2 и R_{12} , а также потенциалов φ_1 и φ_2 . Вводим в рассмотрение третий электрод в точку 3, как показано на рис. 5, и рассмотрим три опыта: *A, B* и *C*.

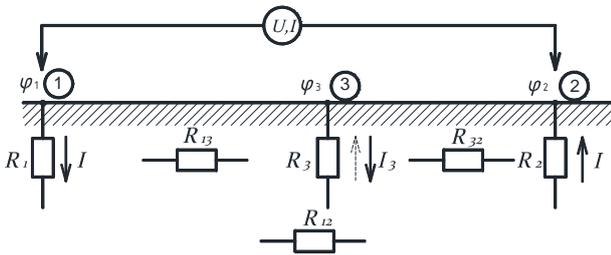


Рис. 5. Трехэлементная система заземлителей, опыт *A*

В опыте *A* активные электроды 1 и 2, обтекаемые общим током I от источника, создают потенциальное поле для пассивного электрода 3, которое определяет потенциал последнего:

$$\varphi_3 = R_{13}I - R_{32}I = I(R_{13} - R_{32}) = IR_{3E}. \quad (8)$$

Появляются напряжения U_{13} и U_{32} . Например, при $U_{32} < U_{13}$ и влияние электрода 2 на формирование φ_3 больше по сравнению с электродом 1. Под действием φ_3 в электроде 3 протекает ток $I_3 = \varphi_3/R_3$. В случае $U_{32} < U_{13}$ ток I_3 совпадает по направлению с током в сопротивлении R_2 ; направление тока I в электроде 1 принято положительным, а в электроде 2 – отрицательным.

Появление тока I_3 следует учесть для активных электродов 1 и 2 через соответствующие взаимные сопротивления в уравнениях Максвелла. С учётом выражения (8) для активного электрода 1 появляется слагаемое

$$-I_3R_{13} = -I \frac{(R_{13} - R_{32})}{R_3} R_{13},$$

и потенциал для электрода 1 определяется как

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= R_1I - R_{12}I - I \frac{(R_{13} - R_{32})}{R_3} R_{13} = \\ &= I \left[R_1 - R_{12} - \frac{(R_{13} - R_{32})R_{13}}{R_3} \right] = IR_{1E}. \end{aligned} \quad (9)$$

Аналогично получаем потенциал и для активного электрода 2:

$$\varphi_2 = I \left[R_2 - R_{12} + \frac{(R_{13} - R_{32})R_{32}}{R_3} \right] = IR_{2E}. \quad (10)$$

Потенциалы φ_1, φ_2 и φ_3 , согласно уравнениям (8), (9) и (10), выражены через ток источника I и величины резисторов (собственные R_s (R_1, R_2 и R_3) и взаимные R_{12} ($R_{12} = R_{21}, R_{13} = R_{31}$ и $R_{23} = R_{32}$)).

Измерение напряжений между пассивным 3 и активными 1 и 2 электродами соответственно определяет

$$U_{13} = \varphi_1 - \varphi_3;$$

$$U_{32} = \varphi_3 - \varphi_2.$$

Следовательно,

$$U_{13} = I(R_{1E} - R_{3E}) \quad \text{и} \quad \frac{U_{13}}{I} = R_{1E} - R_{3E}, \quad (11)$$

$$U_{32} = I(R_{3E} - R_{2E}) \quad \text{и} \quad \frac{U_{32}}{I} = R_{3E} - R_{2E}. \quad (12)$$

Измерение напряжений U_{13}, U_{32} при токе I определяет левые части двух уравнений связи с шестью резисторами согласно (11) и (12).

Следующие два уравнения получаем при измерении с вводом тока между точками 1 и 3. В этом случае рассматриваем согласно рис. 6, опыт *B*.

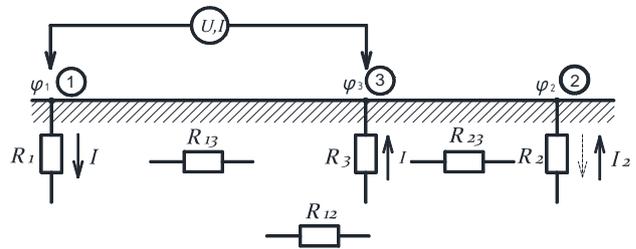


Рис. 6. Подключение источника (U, I) в опыте *B*

Напряжение U и ток I «свои» для данного опыта, т.е. отличны от величин в опыте *A*. Измерение напряжений U_{32} и U_{12} позволяет определить, например, $U_{32} < U_{12}$ и тогда полагать ток в сопротивлении R_2 совпадающим по направлению с током в сопротивлении R_3 .

Для пассивного электрода 2 имеем потенциал

$$\varphi_2 = I(R_{23} - R_{12}) = IR_{2E},$$

и стекающий с него ток

$$I_2 = I \frac{(R_{23} - R_{12})}{R_2}.$$

Для активного электрода 1 потенциал определяем по выражению

$$\varphi_1 = I \left[R_1 - R_{13} - \frac{(R_{23} - R_{12})R_{12}}{R_2} \right] = IR_{1E}.$$

С учётом взаимовлияний для активного электрода 3 имеем потенциал

$$\varphi_3 = I \left[R_3 - R_{13} + \frac{(R_{23} - R_{12})R_{23}}{R_2} \right] = IR_{3E}.$$

В результате получаем доступные для измерений напряжения

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = I(R_{1E} - R_{2E}) \quad \text{или} \quad \frac{U_{12}}{I} = (R_{1E} - R_{2E}) \quad (13)$$

и напряжения

$$U_{32} = \varphi_3 - \varphi_2 = I(R_{3E} - R_{2E}) \quad \text{или} \quad \frac{U_{32}}{I} = (R_{3E} - R_{2E}). \quad (14)$$

В опыте *C* источник (U, I) включен между точками 3 и 2, как показано на рис. 7.

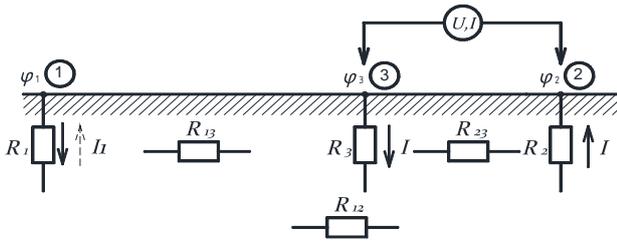


Рис. 7. Подключение источника (U, I) в опыте С

Измерение напряжений U_{13} и U_{12} позволяет в случае, например, $U_{13} > U_{12}$ полагать потенциал φ_1 ближе к потенциалу φ_2 и токи для точек 1 и 2 совпадают по направлению.

Выразим потенциал пассивного электрода 1:

$$\varphi_1 = -IR_{12} + IR_{13} = I(R_{13} - R_{12}) = IR_{E1}.$$

Ток I_1 в сопротивлении R_1 определяем по формуле:

$$I_1 = I \frac{(R_{13} - R_{12})}{R_1}.$$

Потенциалы активных электродов 3 и 2 определяются соответственно по формулам:

$$\varphi_3 = I \left(R_3 - R_{32} - \frac{(R_{13} - R_{12})}{R_1} R_{13} \right) = IR_{E3}$$

и

$$\varphi_2 = I \left(R_2 - R_{32} + \frac{(R_{13} - R_{12})}{R_1} R_{12} \right) = IR_{E2}.$$

Поскольку в данном опыте измеряем напряжения

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = I(R_{E1} - R_{E2})$$

и

$$U_{13} = \varphi_1 - \varphi_3 = I(R_{E1} - R_{E3}),$$

то в итоге получаем еще два уравнения:

$$\frac{U_{12}}{I} = (R_{E1} - R_{E2}) \quad (15)$$

и

$$\frac{U_{13}}{I} = (R_{E1} - R_{E3}). \quad (16)$$

Таким образом, выполненное выше рассмотрение определяет объем экспериментов (измерений) в трех опытах (A, B, C).

Ввод источника (U, I) в точки 1 и 2 (опыт A) и измерение напряжений U_{13A} и U_{32A} при токе I_A , дает возможность рассчитать входные сопротивления

$$\frac{U_{13A}}{I_A} = R_{(1-3)A}$$

и

$$\frac{U_{32A}}{I_A} = R_{(3-2)A}.$$

Такие сопротивления есть левые части уравнений:

- из уравнений (8), (9) и (11) получаем

$$R_{(1-3)A} = \left[(R_1 - R_{12}) - \frac{(R_{13} - R_{32})R_{13}}{R_3} \right] - (R_{13} - R_{32}), \quad (17)$$

- из уравнений (8), (10) и (12):

$$R_{(3-2)A} = \left[(R_2 - R_{12}) + \frac{(R_{13} - R_{32})R_{32}}{R_3} \right] + (R_{32} - R_{13}). \quad (18)$$

Опыт B, ввод источника (U, I) в точки 1 и 3 и измерение напряжений U_{32B} и U_{12B} при токе I_B .

С учетом определенного выше (выражения (13) и (14)) получаем

$$R_{(1-2)B} = \frac{U_{12B}}{I_B} = \left[(R_1 - R_{13}) - \frac{(R_{23} - R_{12})R_{12}}{R_2} \right] - (R_{23} - R_{12}); \quad (19)$$

$$R_{(3-2)B} = \frac{U_{32B}}{I_B} = \left[(R_3 - R_{13}) + \frac{(R_{23} - R_{12})R_{23}}{R_2} \right] - (R_{23} - R_{12}). \quad (20)$$

Опыт C, ввод источника (U, I) в точки 3 и 2, измерение напряжений U_{13C} и U_{12C} при токе I_C .

С учетом выражения (15) получаем

$$\frac{U_{12C}}{I_C} = (R_{12} - R_{13}) + \left[R_2 - R_{32} + \frac{(R_{13} - R_{12})R_{12}}{R_1} \right] = R_{(1-2)C}, \quad (21)$$

а из выражения (16) имеем

$$\frac{U_{13C}}{I_C} = (R_{12} - R_{13}) + \left[R_3 - R_{32} - \frac{(R_{13} - R_{12})R_{13}}{R_1} \right] = R_{(1-3)C}. \quad (22)$$

В итоге получаем систему шести уравнений (17) – (22) с шестью неизвестными ($R_1, R_2, R_3, R_{12}, R_{13}, R_{23}$) при известных по измерениям значениях сопротивлений $R_{(1-3)A}, R_{(3-2)A}, R_{(1-2)B}, R_{(3-2)B}, R_{(1-2)C}, R_{(1-3)C}$.

Решение полученной системы шести уравнений с шестью неизвестными выполнено с помощью программы, реализованной в пакете Mathcad.

Некоторые особенности измерения сопротивления ЗУ. К изложенной выше методике полезно также отметить следующее. В случае применения метода с электродом нулевого потенциала φ_p , например, в линейной схеме «объект с R_g – токовый электрод R_c » и экспериментально определенное местоположение потенциального электрода R_p для последнего добиваются выполнения условия

$$\varphi_p = 0 = \alpha_{gp}I - \alpha_{cp}I \quad (23)$$

при последовательном соединении R_g и R_c с источником (U, I) – см. рис. 2.

В общем случае потенциал φ_p по уравнению (23) не равен нулю, но существуют потенциалы от тока I в электродах R_g и R_c . Тогда в случае наличия некоторой проводимости (на землю) потенциального электрода с него при $\varphi_p \neq 0$ стекает ток I_p и между электродами в схеме выделяются напряжения:

$$\begin{cases} \varphi_g - \varphi_p = U_{g-p}; \\ \varphi_c - \varphi_p = U_{c-p}, \end{cases} \quad (24)$$

в соответствии с выражением

$$\varphi_p = \alpha_{gp}I - \alpha_{cp}I + \alpha_{pp}I_p = U_{g-p} - U_{c-p} + U_p, \quad (25)$$

где α_{pp} – собственный потенциальный коэффициент заземлителя потенциального электрода.

Напряжения U_{g-p} и U_{c-p} могут быть измерены при условии пренебрежимо малого влияния проводимости

измерительной цепи на токораспределение в исследуемой системе (электроды R_g , R_p и R_c).

При известном токе I и измеренном напряжении U_{g-p} по выражению

$$U_{g-p} = \alpha_{gp} I \quad (26)$$

оцениваем величину α_{gp} .

В рассматриваемой системе трех заземлителей (рис. 5) аналогичные расчёты типа (26) позволяют определить (по обозначениям рис. 5) сопротивления взаимные R_{12} , R_{13} , R_{23} .

Известные теперь величины взаимных сопротивлений позволяют рассматривать для определения собственных сопротивлений три уравнения, например, (17) – (19) или другую комбинацию указанных уравнений, образующих после введения взаимных сопротивлений систему уравнений шестого порядка.

Рассмотренный выше подход к определению собственных и взаимных сопротивлений для случая трех заземлителей основан на использовании естественных взаимовлияний элементов конкретной группы заземлителей. Большие возможности для исследования электрических цепей. При этом очевидно, что уравнения связи должны образовывать в случае трех заземлителей систему уравнений шестого порядка (по числу взаимных и собственных сопротивлений).

Формально особенности решений системы уравнений шестого порядка можно оценить при решениях для схемы замещения с искомыми резисторами. Расчётная схема (используется и для физического моделирования) для группы заземлителей рассмотрена ниже.

Выделим для примера группу из трех заземляющих устройств ЗУ (GD), как показано на рис. 8.

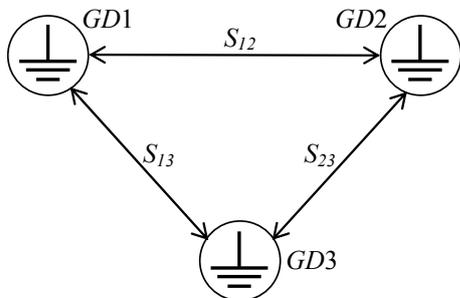


Рис. 8. Варианты размещения (в плане) группы ЗУ (GD) с удалениями S друг от друга

Отсутствие электрических (проводниковых) связей между ними проверяется обязательно.

По определению – каждое ЗУ можно характеризовать некоторым «собственным» сопротивлением R_s (как бы в отсутствии влияния «соседей») и эффектом взаимных сопротивлений R_{vz} .

Кстати, традиционная ситуация (отраженная в инструкциях, руководящих документах и др.) измерения, например, R_{GD1} вполне соответствует рис. 8 при ЗУ2 (или ЗУ3) – токовый электрод, а ЗУ3 (ЗУ2), соответственно – потенциальный. Причем, рекомендуется обеспечивать возможно низкие взаимные сопротивления (по сути – взаимовлияния) через либо поиск удобных позиций для ЗУ2 и ЗУ3, либо через увеличе-

ние взаиморасстояний. Очевидно, рекомендации РД [11, 12] предполагают при их реализации оценку собственного сопротивления ЗУ1.

Будем искать упрощение (против РД) для получения собственно R_{GD1} , а именно через определение (количественное) R_s и R_{vz} в схеме по рис. 8. Реализация этого предложения снимает требование РД по удалению токового электрода от R_{GD1} (искомого); упрощается измерение собственного потенциала для R_{GD1} .

Для трех (электрически не связанных) заземлителей (ЗУ), расположенных некоторым образом на территории (рис. 8), использование электростатической аналогии с учетом преобразований (6) и (7) позволяет представить расчётную схему замещения в виде, показанном на рис. 9. Отметим, что исходно для измерений доступны три точки: 1, 2, 3.

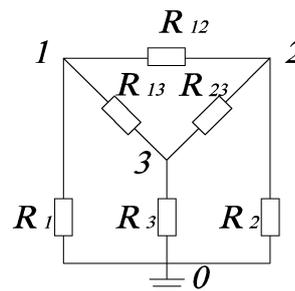


Рис. 9. Расчётная схема замещения для группы из трех заземляющих устройств

Некоторый источник (U , например, трансформатор) подключаем поочередно к двум точкам системы и измеряем приложенное напряжение, а также напряжения третьей точки относительно двух, подключенных к источнику. Отдельные опыты (I, II и III) показаны на рис. 10 и обозначены как a , b и c соответственно.

Соответствующие напряжения (U_{12} , U_{13} , U_{32}) в отдельных опытах различны по величинам.

В лабораторных условиях исследована модель схемы замещения (см. рис. 9) с определенными параметрами, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1
Величины резисторов для схемы по рис. 9

Резистор	R_1	R_2	R_3	R_{12}	R_{13}	R_{23}
Величина, Ом	10	20	5	5	3	3

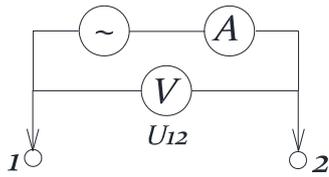
Результаты измерений напряжений приведены в табл. 2.

Таблица 2
Измерение напряжений в модели схемы замещения по рис. 9 согласно рис. 10.

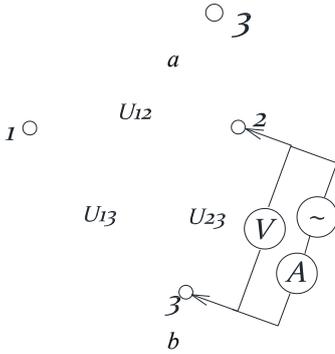
Источник подключен	U_{12} , В	U_{23} , В	U_{13} , В	φ_1 , В	φ_2 , В	φ_3 , В
Опыт I, U_{12}	2,75	1,42	1,33	1,18	1,6	0,18
Опыт II, U_{23}	1,47	2,31	0,83	0,28	1,77	0,55
Опыт III, U_{13}	1,4	0,82	2,24	1,5	0,09	0,74

Напряжения на «собственных» сопротивлениях, измеренные относительно точки «0», обозначены через соответствующие φ .

Соотношения измеренных напряжений описываются системами:



U_{13} U_{23}



U_{12} U_{23}

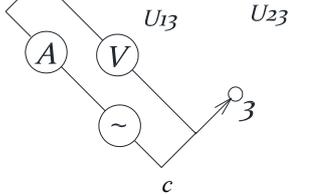


Рис. 10. Подключение источника и измеряемые напряжения в группе заземлителей по рис. 8

Рис. 10,a

$$\begin{cases} U_{12} = \varphi_1 + \varphi_2; \\ U_{23} = \varphi_2 - \varphi_3; \\ U_{13} = \varphi_1 + \varphi_3; \end{cases} \quad (27)$$

Рис. 10,b

$$\begin{cases} U_{12} = \varphi_2 - \varphi_1; \\ U_{23} = \varphi_2 + \varphi_3; \\ U_{13} = \varphi_1 + \varphi_3; \end{cases} \quad (28)$$

Рис. 10,c

$$\begin{cases} U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2; \\ U_{23} = \varphi_2 + \varphi_3; \\ U_{13} = \varphi_1 + \varphi_3. \end{cases} \quad (29)$$

Отдельные равенства в системах (27) – (29) выполняются с приближенностью измерений напряжений.

Формально система, например, (27) имеет три уравнения связи с тремя неизвестными φ_1, φ_2 и φ_3 . Однако система неразрешима путем элементарного исключения одной из неизвестных и дальнейшим решением системы двух уравнений с двумя оставшимися неизвестными.

Вместе с тем отметим, что оценка (по измерениям, расчетам) величин φ в системах (27) – (29) достаточна для получения всех шести искомых сопротивлений (три собственных, три взаимных).

Дополнительные исследования на территории размещения заземляющих устройств ЗУ1, ЗУ2 и ЗУ3 заключаются в снятии градиентных кривых в удобном направлении при подключении напряжения по вариантам рис. 10. Исходим из того, что между двумя заземлителями на поверхности земли при приложении к ним напряжения (рис. 11,a) образуется потенциальное поле U_x , в том числе и по любой линии l на поверхности между краями заземлителей (рис. 11,b).

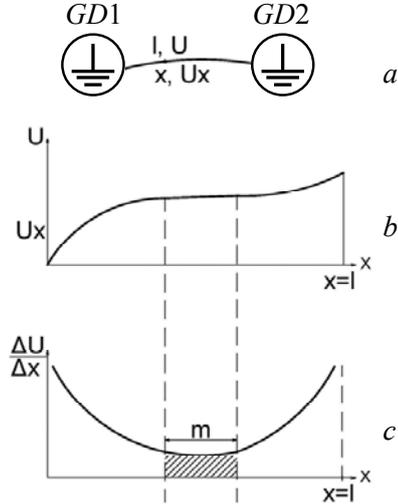


Рис. 11. Потенциальное поле между двумя заземлителями и градиентная кривая

Кривая (потенциальная) по рис. 11,b соответствует градиентной кривой $\Delta U_x / \Delta x$ (см. рис. 11,c). Измерения ΔU_x представляются относительно несложными: входные клеммы вольтметра присоединены к электродам с разномом Δx на длине переставляемого вдоль линии l шаблона.

Напряжения, измеренные вольтметром (одна клемма – в грунте на участке m , вторая (по очереди) в точку 1 и точку 2) дают оценку φ_1 и φ_2 . Как и большинство измерений для заземлителей, рассмотренный метод для φ_1, φ_2 приближенный.

Знание φ_1, φ_2 определит величину φ_3 для системы (27); по значениям φ_2 и φ_3 находим φ_1 в (28); по значениям φ_1 и φ_3 находим φ_2 в (29). Последующий возможный расчет проводимостей (сопротивлений) для схемы по рис. 9 рассмотрен выше.

Программа, реализующая изложенную в статье методику, позволяет на основании соответствующих электрических измерений оценить не только сопротивление заземляющих устройств электроустановок, но и как собственные, так и взаимные сопротивления заземлителей всех электродов в трехэлектродной установке измерения сопротивления заземляющего устройства. Также нет необходимости разносить измерительные электроды на большие расстояния и, следовательно, использовать провода большой длины в измерительной схеме трехэлектродной установки. Кроме того, в предложенной методике нет ограничений в расположении измерительных электродов в связи с местными условиями даже в случае плотной застройки территории за пределами исследуемого заземлителя. И, наконец, главное – отпадает необходимость в поиске точки нулевого потенциала на месте

измерений для потенциального электрода или в расчете границы нулевой погрешности, представляющих собой трудоемкий процесс.

Результаты экспериментальных исследований трехэлектродной установки измерения сопротивления заземлителя в электролитической ванне Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» показали, что предложенная методика позволяет получить достаточно точный результат во всех случаях измерений сопротивлений заземляющих устройств электроустановок.

Выводы.

1. Впервые приводится теоретическое обоснование новой методики измерения сопротивления заземлителя с помощью трехэлектродной измерительной установки при любом характере неоднородности грунта, любых размерах и конфигурации заземляющих устройств и произвольном размещении измерительных электродов, которая, по своей сути, является универсальной.

2. На основании проведенных исследований установлено, что разработанная методика обладает следующими преимуществами:

- позволяет оценить собственные и взаимные сопротивления заземлителей всех электродов в трехэлектродной установке измерения сопротивления заземляющего устройства;
- отсутствует необходимость в разное измерительных электродов на большие расстояния в измерительной схеме трехэлектродной установки;
- нет ограничений в расположении измерительных электродов в связи с местными условиями даже в случае плотной застройки территории за пределами исследуемого заземлителя;
- отсутствует необходимость в поиске точки нулевого потенциала на месте измерений для потенциального электрода или в расчете границы нулевой погрешности, представляющих собой трудоемкий процесс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайнер А.Л. Заземления. – Харьков: ГНТИ Украины, 1938. – 287 с.
2. Коструба С.И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 168 с.
3. Ослон А.Б. Заземляющие устройства на линиях электропередачи и подстанциях высокого напряжения // Итоги науки и техн. ВИНТИ. Сер. электр. станции, сети и системы. – М.: ВИНТИ. – 1966. – С. 65-184.
4. Кац Е.Л., Меньшов Б.Г., Целебровский Ю.В. Заземляющие устройства электроустановок высокого и низкого напряжений // Итоги науки и техн. ВИНТИ. Сер. электр. станции и сети. – М.: ВИНТИ. – 1989. – Т.15. – 158 с.
5. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
6. Ослон А.Б., Коструба С.И. Измерение сопротивлений заземлителей больших размеров // Электричество. – 2006. – №8. – С. 49-56.
7. Ослон А.Б. Анализ методов Тагга при измерениях сопротивления заземления // Третья Российская конференция по заземляющим устройствам: Сборник докладов

(27-31 октября 2008 года). – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия. – 2008. – С. 111-120.

8. Ослон А.Б., Целебровский Ю.В. Пересечение потенциальных кривых и сопротивление заземляющего устройства // Третья Российская конференция по заземляющим устройствам: Сборник докладов (27-31 октября 2008 года). – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия. – 2008. – С. 121-130.

9. Ослон А.Б., Коструба С.И. Математическое моделирование процесса измерений сопротивления заземлителя току промышленной частоты в многослойном грунте // Электричество. – 2008. – №5. – С. 12-17.

10. Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники. Ч.3. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1948. – 343 с.

11. РД 153-34.0-20.525-00. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок. – М.: СПО ОРГРЭС, 2000. – 64 с.

12. СОУ 31.2-21677681-19:2009. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. [Чинний від 29.03.2010]. – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – 54 с.

REFERENCES

1. Vainer A.L. *Zazemleniia* [Grounding]. Kharkov, GNTI Ukrainy Publ., 1938. 287 p.
2. Kostuba S.I. *Izmerenie elektricheskikh parametrov zemli i zazemlyayushchikh ustroystv* [Measurement of electrical parameters of the earth and ground grids]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 168 p. (Rus).
3. Oslon A.B. Grounding devices on power lines and high voltage substations. *Results of science and tech. VINITI. Ser. el. stations, networks and systems*. Moscow, VINITI Publ., 1966, pp. 65-184. (Rus).
4. Kats E.L., Men'shov B.G., Tselebrovskii Iu.V. Grounding devices of electrical installations of high and low voltage. *Results of science and tech. VINITI. Ser. el. station and networks*. Moscow, VINITI Publ., 1989, vol. 15, 158 p. (Rus).
5. Burgsdorf V.V., Yakobs A.I. *Zazemlyayushchie ustroystva elektroustanovok* [Grounding device of electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 400 p. (Rus).
6. Oslon A.B., Kostuba S.I. Measuring the resistance of large grounding devices. *Electrichestvo – Electricity*, 2006, no.8. pp. 49-56. (Rus).
7. Oslon A.B. Tagg methods analysis for measuring grounding resistance. *III Rossiiskaia konferentsiia po zazemliayushchim ustroystvam: Sbornik dokladov* [3rd Russian Conf. on Grounding Devices: Collected Papers]. Novosibirsk, Russia, 27-31 October 2008, pp. 111-120. (Rus).
8. Oslon A.B., Tselebrovskii Iu.V. The intersection of the potential curves and the resistance of the grounding device *III Rossiiskaia konferentsiia po zazemliayushchim ustroystvam: Sbornik dokladov* [3rd Russian Conf. on Grounding Devices: Collected Papers]. Novosibirsk, Russia, 27-31 October 2008, pp. 121-130. (Rus).
9. Oslon A.B., Kostuba S.I. Mathematical modeling of the process of grounding resistance measurement current of industrial frequency in multilayer soil. *Electrichestvo – Electricity*, 2008, no.5, pp. 12-17. (Rus).
10. Neiman L.R., Kalantarov P.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Ch. 3* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Part 3]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1948. 343 p. (Rus).
11. RD 153-34.0-20.525-00. *Metodicheskie ukazaniia po kontroliu sostoianiiia zazemliayushchikh ustroystv elektroustanovok* [RD 153-34.0-20.525-00. Guidelines for the control of state-earthlings electrical devices]. Moscow, SPO ORGRES Publ., 2000. 64 p. (Rus).

12. SOU 31.2-21677681-19:2009. *Viprobuвання ta kontrol' pristroyiv zazemlennya elektroustanovok. Tipova instruktsiya* [SOU 31.2-21677681-19:2009. Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction.]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrainy Publ., 2010. 54 p. (Ukr).

Поступила (received) 27.12.2015

Нижневский Илья Викторович¹, инженер.

Нижневский Виктор Ильич¹, доц., к.т.н.,

¹ Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»,

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,

тел/phone +38 057 7076977, e-mail: nivich1@mail.ru

I.V. Nizhevskiy¹, V.I. Nizhevskiy¹

¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

A technique of measuring of resistance of a grounding device.

Introduction. Measurement of resistance of the grounding device (GD) by means of a three-electrode system. This requires not only the right choice of installation locations of measuring electrodes, but also the determination of the point of zero potential. Implementation of these requirements quite time-consuming, and in some cases impossible. **Aim.** Develop a new technique for measuring the electrical resistance of the GD. **Task.** The method of measuring the resistance of the GD with

the help of a three-electrode setup is necessary to exclude the determination of the point of zero potential. **Method.** Mathematical modeling and calculation engine. **Results.** A three-electrode system for measuring the resistance of grounding devices (GD) for various purposes is considered. On the basis of Maxwell equations a theoretical substantiation of a new technique for measuring the resistance of any GD of any construction in random soil structure has been proposed. An equation system of the sixth order has been obtained, its solution makes it possible to measure its own mutual resistance in the three-electrode installation with sufficiently high accuracy. Peculiarities of drawing up a calculation scheme of substitution of a three-electrode installation with lumped parameters: self and mutual impedance. Use of the principle of reciprocity eliminates the need of finding a point of zero potential which is a rather difficult task. The technique allows to minimize the spacing of measuring electrodes outside the GD, which substantially reduces the length of wiring of the measurement circuit and increases the «signal-to-interference» ratio and also removes the restrictions on the development of the territory outside the GD being tested. **Conclusion.** The procedure allows to evaluate the self and mutual impedance grounding all the electrodes in a three-electrode measuring installation of the grounding resistance of the device without finding the point of zero potential. References 12, tables 2, figures 11.

Key words: grounding device, resistance measurement, three-electrode installation, minimum spacing of measuring electrodes, technique of measuring, substitution circuit.

Г.А Сендерович, А.В. Дяченко

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА КОЛЕБАНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Запропоновано метод кореляції коливань потужності і напруги, який дозволяє визначати місце розташування джерела коливань напруги в системі електропостачання. Бібл. 5, рис. 4.

Ключові слова: якість електроенергії, показники якості електроенергії, коливання напруги, джерело коливання напруги, крива зміни напруги, крива зміни активної потужності, визначення відповідальності.

Предложен метод корреляции колебаний мощности и напряжения, который позволяет определять место расположения источника колебаний напряжения в системе электроснабжения. Библ. 5, рис. 4.

Ключевые слова: качество электроэнергии, показатели качества электроэнергии, колебания напряжения, источник колебания напряжения, кривая изменения напряжения, кривая изменения активной мощности, определения ответственности.

Введение. С точки зрения определения участия субъектов в ответственности за нарушение требований качества электроэнергии (КЭ) при определении источников колебаний напряжения (КН) в системе электроснабжения потребителей, имеющих световую нагрузку, основным вопросом является расположение источника КН: на территории потребителя или во внешней сети. Ответ на этот вопрос, подтвержденный детерминированным расчетом, может служить основой экспертного заключения для решения правовых споров при оценке ущербов, вызванных низким качеством электрической энергии.

Речь идет о систематических КН, которые носят повторяющийся характер, и которые можно на каком-то интервале времени измерения T охарактеризовать числом изменений напряжения m , частотой повторения изменений напряжения $F_{\delta U}$ и другими показателями, соответствующими КН [1].

Источниками КН являются мощные электроприемники с импульсным, резкопеременным характером потребления активной и реактивной мощности: дуговые и индукционные печи; электросварочные машины; электродвигатели при пуске.

Постановка задачи. С точки зрения потребителя источник КН может располагаться в его электрических сетях либо в сетях других потребителей. В первом случае, если систематические КН превосходят допустимые значения, потребитель должен предпринять меры по снижению уровня колебаний. Во втором – КН у потребителя определены внешним фактором, так как поступают к нему по сетям поставщика электроэнергии. В этом случае ответственным за проведения мероприятий по снижению уровня КН является поставщик.

Целью работы является разработка метода определения места нахождения источника КН.

Информацию, необходимую для определения положения источника КН, можно получить путем анализа параметров текущего режима электрической сети. Как известно, регулирующий эффект активной нагрузки по напряжению практически всегда положителен [2].

$$\frac{\partial P_{load}}{\partial U} > 0. \quad (1)$$

Поэтому уменьшение напряжения, вызываемое внешними причинами, приведет к снижению активной мощности нагрузки. Соответственно, увеличение напряжения, вызываемое внешними причинами, приведет к увеличению активной мощности нагрузки.

Что касается реактивной мощности, то регулирующий эффект реактивной нагрузки по напряжению также положителен ($\partial Q_{load} / \partial U > 0$) если напряжение превышает критического значения ($U > U_{cr}$). При глубоких провалах напряжения ($U < U_{cr}$) регулирующий эффект реактивной нагрузки по напряжению становится отрицательным ($\partial Q_{load} / \partial U < 0$). Учитывая, что для шин 110 кВ критическое напряжение может достигать величины порядка $0,8U_{nom}$ [2], возможность использования изменения реактивной мощности в качестве критерия должна быть подтверждена дополнительными исследованиями.

Если изменение напряжения вызвано внутренними причинами, то для рассматриваемого объекта понижение напряжения является не причиной изменения других параметров режима, а следствием.

Результаты исследований. Представим питание потребителя в виде схемы замещения (рис. 1), в которой \underline{E}_{syst} – эквивалентная ЭДС системы; \underline{U} – напряжение на шинах приемной подстанции; Z_{syst} – эквивалентное сопротивление связи с системой; Z_{load} – эквивалентное сопротивление нагрузки предприятия.

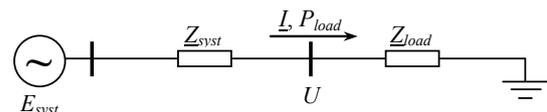


Рис. 1. Эквивалентная схема питания потребителя

Изменение напряжения \underline{U} на шинах приемной подстанции, вызванное внешними по отношению к электрической сети потребителя воздействием, можно рассматривать как следствие изменения ЭДС системы \underline{E}_{syst} . При допущении о неизменности сопротивления нагрузки ($Z_{load} = const$) снижение E_{syst} приводит к уменьшению тока I по линии и мощности нагрузки потребителя P_{load} , повышение E_{syst} – к увеличению I и P_{load} . На самом деле, при изменении напряжения \underline{U} сопротивление нагрузки Z_{load} может несколько меняться, но в общем случае это изменение будет соответствовать положительному регулируемому эффекту активной нагрузки по напряжению [4, 5].

Если источник КН расположен в электрической сети потребителя, то изменения напряжения \underline{U} на шинах приемной подстанции происходит по причине меняющейся нагрузки при постоянной ЭДС системы

($E_{\text{sys}} = \text{const}$). Величина напряжения U будет определяться потерей напряжения на сопротивлении связи с системой Z_{sys} [5]. Если пренебречь поперечной составляющей падения напряжения, что характерно для распределительных сетей, то можно записать:

$$U = E_{\text{sys}} - \frac{P_{\text{load}} \cdot r_{\text{sys}} + Q_{\text{load}} \cdot x_{\text{sys}}}{U}, \quad (2)$$

где P_{load} , Q_{load} – мощности активной и реактивной нагрузки потребителя.

В соответствии с (2) обязательным условием уменьшения напряжения U на шинах приемной подстанции при $E_{\text{sys}} = \text{const}$ является увеличение потери напряжения в эквивалентной связи с системой и, значит, числителя в дробной части формулы:

$$\left[(P_{\text{load}} + \Delta P_{\text{load}}) \cdot r_{\text{sys}} + (Q_{\text{load}} + \Delta Q_{\text{load}}) \cdot x_{\text{sys}} \right] - (P_{\text{load}} \cdot r_{\text{sys}} + Q_{\text{load}} \cdot x_{\text{sys}}) > 0, \quad (3)$$

где $\Delta P_{\text{load}} + j\Delta Q_{\text{load}}$ – приращение мощности нагрузки, вызвавшее КН.

Увеличение U будет наблюдаться в том случае, когда неравенство (3) поменяет свой знак. А это возможно, если приращения мощности будут отрицательными ($\Delta P_{\text{load}} < 0$; $\Delta Q_{\text{load}} < 0$).

Отсюда вытекают условия изменения мощности нагрузки, вызывающей КН. При отрицательном изменении напряжения ΔU :

$$\begin{cases} \Delta U < 0; \\ \Delta P_{\text{load}} \cdot r_{\text{sys}} + \Delta Q_{\text{load}} \cdot x_{\text{sys}} > 0, \end{cases} \quad (4)$$

при положительном изменении напряжения ΔU :

$$\begin{cases} \Delta U > 0; \\ \Delta P_{\text{load}} \cdot r_{\text{sys}} + \Delta Q_{\text{load}} \cdot x_{\text{sys}} < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Условие (5) является обязательным для возникновения КН при расположении источника в сетях потребителя, но не является достаточным. Вывод достаточного условия в поставленной задаче не требуется, так как целью является не установление факта КН (КН фиксируется путем измерений), а определение места расположения источника.

Причины возникновения КН при расположении источника как в питающих сетях, так и в сетях потребителя, связаны с изменениями потребления и активной и реактивной мощностей. В качестве критерия для определения места расположения источника КН выбираем изменение величины активной мощности, получаемой приемной подстанцией по эквивалентной связи с системой.

Источник КН является *внешним* для потребителя, если возникновение КН приводит к согласованным изменениям напряжения и потребляемой по линии активной мощности, что соответствует условию положительного регулирующего эффекта активной нагрузки по напряжению (1).

Источник КН является *внутренним* для потребителя, если возникновение КН приводит к встречным изменениям напряжения и потребляемой по линии активной мощности, что внешне напоминает условие отрицательного регулирующего эффекта активной нагрузки по напряжению:

$$\frac{\partial P_{\text{load}}}{\partial U} < 0. \quad (6)$$

Условия (1) и (6) соответствуют статическим характеристикам нагрузки и могут быть использованы

при отсутствии в нагрузке потребительской двигательной составляющей. В общем случае, с учетом динамических характеристик двигателей, критерии для определения места расположения источника КН требуют уточнения, так как кривые изменения напряжения $U(t)$ и активной мощности $P_{\text{load}}(t)$ могут иметь сдвиг по времени t . Коэффициент k_d , учитывающий отличия динамической характеристики от статической, обычно находится в пределах $k_d = 0.7 \div 1$ [3]. Физический смысл коэффициента – отношение времен разгона (или торможения) $k_d = t_{st}/t_{dyn}$, определенных по статической (t_{st}) и по динамической (t_{dyn}) характеристикам. В условиях регулярных КН в распределительных сетях, когда размах изменения напряжения δU_i не столь велик, чтобы приводить к отказам оборудования, и постоянные инерции на много ниже, чем на межсистемных связях, следует ожидать значения k_d близкие к единице. В тоже время, в интервалах усреднения, близких к экстремумам, вместо критерия (1) может быть ложно зафиксирован критерий (6). Вероятность ошибки возрастает с увеличением частоты повторения изменений напряжения $F_{\delta U_i}$.

Для учета возможного сдвига между экстремумами кривых изменения напряжения $U(t)$ и мощности $P_{\text{load}}(t)$ целесообразно производить параллельный анализ этих характеристик. Рассмотрим характеристику изменения среднеквадратичного напряжения на шинах потребителя U . Для упрощения анализа допустим, что кривая изменения напряжения $U(t)$ имеет произвольную форму непрерывного характера (рис. 2).

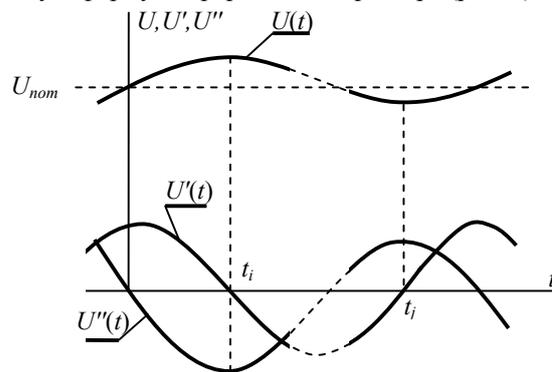


Рис. 2. Характеристики колебаний напряжения $U(t)$, первой $U'(t)$ и второй $U''(t)$ производных напряжения

Сглаженная форма колебаний, в той или иной степени, предполагается в любом случае, так как при получении информации будет производиться интегрирование мгновенных значений параметров режима за интервал усреднения τ . Минимальное значение τ должно быть достаточно для преобразования мгновенных значений напряжения u в среднеквадратичное U (порядка одного периода основной частоты).

В рассматриваемой задаче следует ориентироваться на интервал усреднения τ , что согласно с ГОСТ [1], соответствует требованиям для других показателей качества электрической энергии, которые представляют продолжительные изменения характеристик напряжения (коэффициенты несимметрии напряжений по обратной K_{2U} и нулевой K_{0U} последовательностям, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$).

Какой бы ни была кривая изменения напряжения $U(t)$, в условиях регулярных КН ей присуще наличие локальных экстремумов (см. рис. 2). Условия наличия экстремума известны [4]. *Необходимым условием экстремума* функции $U(t)$ в точке t_i является то, что ее производная в этой точке $U'(t_i)$ либо равна нулю, либо не существует.

Если в точке $t = t_i$ функция $U(t)$ имеет экстремум, причем это максимум, то при переходе через точку t_i производная меняет свой знак с плюса на минус; если в точке $t = t_j$ функция $U(t)$ имеет минимум, – с минуса на плюс. Если производная $U'(t)$ при переходе через точку t_i не меняет знак, то экстремума в точке $t = t_i$ нет.

Оценить знак экстремума можно при помощи второй производной. Если в точке t_i достигается экстремум, причем $U''(t_i) < 0$, то в точке $t = t_i$ функция $U(t)$ имеет максимум; если $U''(t_j) > 0$, то в точке $t = t_j$ функция $U(t)$ достигает минимума.

Известные методы анализа кривых, имеющих локальные экстремумы, можно использовать для оценки колебаний напряжения и мощности и, в частности, для определения места расположения источника КН в соответствии с критериями (1), (6) и с учетом динамических характеристик двигательной нагрузки.

Допустим, что кривая изменения активной мощности $P(t)$ подобна кривой напряжения $U(t)$ и отсутствует сдвиг по времени ($\Delta t_{dyn} = t_{dyn} - t_{st} = 0$), определяемый отличием статических и динамических характеристик (рис. 3). Тогда локальным экстремумам кривой $U(t)$ будут соответствовать локальные экстремумы кривой $P(t)$. В точках экстремумов $t = t_i$, $t = t_j$ первые производные должны быть равны нулю:

$$U'(t_i) = U'(t_j) = P'(t_i) = P'(t_j) = 0. \quad (7)$$

Если источник КН находится в системе, максимумам $U(t)$ будут соответствовать максимумы $P(t)$ минимумам – минимумы (рис. 3,а). Знаки первых производных $U'(t)$ и $P'(t)$ должны быть одинаковы на протяжении всего интервала времени измерения T :

$$\begin{aligned} \text{sign}U'(t_i) &= \text{sign}P'(t_i); \\ \text{sign}U'(t_j) &= \text{sign}P'(t_j). \end{aligned} \quad (8)$$

Вторые производные в точках экстремумов должны совпадать по знаку:

$$\begin{aligned} \text{sign}U''(t_i) &= \text{sign}P''(t_i); \\ \text{sign}U''(t_j) &= \text{sign}P''(t_j). \end{aligned} \quad (9)$$

Если источник КН находится в сети потребителя, максимумам $U(t)$ будут соответствовать минимумы $P(t)$, минимумам – максимумы (рис. 3,б). Знаки первых производных $U'(t)$ и $P'(t)$ должны быть противоположны на протяжении всего интервала времени измерения T :

$$\begin{aligned} \text{sign}U'(t_i) &= -\text{sign}P'(t_i); \\ \text{sign}U'(t_j) &= -\text{sign}P'(t_j). \end{aligned} \quad (10)$$

Вторые производные в точках экстремумов должны быть противоположны по знаку:

$$\begin{aligned} \text{sign}U''(t_i) &= -\text{sign}P''(t_i); \\ \text{sign}U''(t_j) &= -\text{sign}P''(t_j). \end{aligned} \quad (11)$$

Учет динамических характеристик двигательной нагрузки дает сдвиг кривой мощности $P(t)$ относительно кривой напряжения $U(t)$ на время задержки $\Delta t_{dyn} = t_{dyn} - t_{st}$ (рис. 4). Соответственно локальные экстремумы кривой $P(t)$ будут сдвинуты относительно экстремумов кривой $U(t)$ на время Δt_{dyn} . По этой причине в зоне сдвига показанные выше зависимости (см. рис. 3) могут не соблюдаться и не будут работать критерии (1), (6).

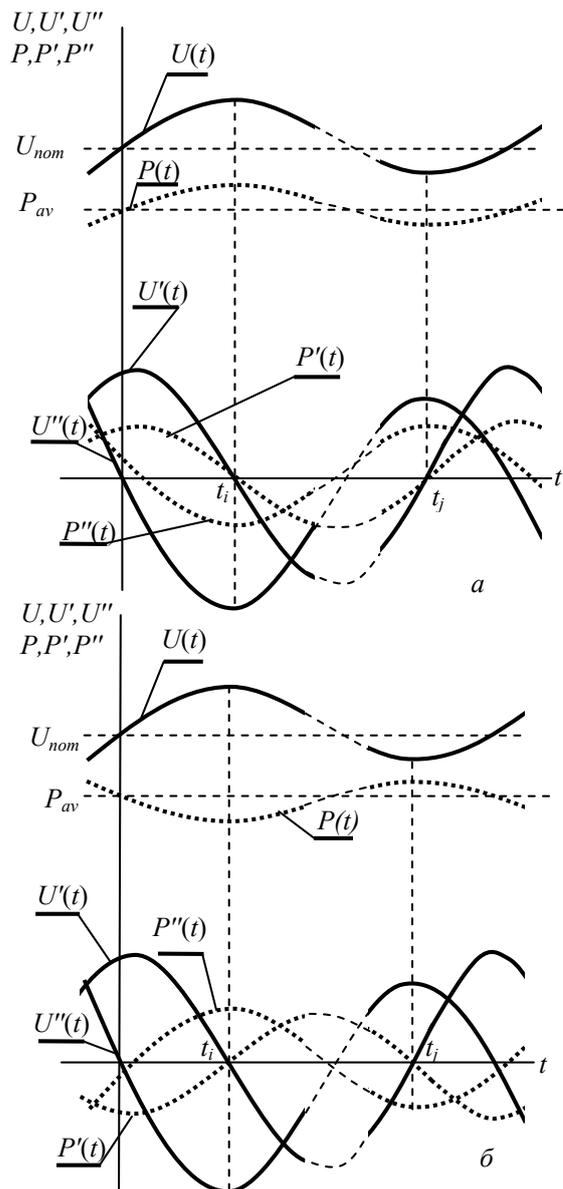


Рис. 3. Характеристики колебаний напряжения $U(t)$ и активной мощности $P(t)$, их первой $U'(t)$, $P'(t)$ и второй $U''(t)$ и $P''(t)$ производных при расположении источника КН: а – в системе электроснабжения; б – в сети потребителя

Следует отметить, что сдвиг может наблюдаться за счет двигательной нагрузки потребителя при расположении источника КН в системе. Если источник КН расположен в сетях потребителя, то КН являются следствием изменения мощности нагрузки (2). Постоянная электромагнитного переходного процесса в линии электропередачи распределительной сети незначительна, сдвиг можно не учитывать.

В общем случае для определения места расположения источника КН, видимо, следует производить параллельный анализ кривых напряжения $U(t)$ и активной мощности $P(t)$ на протяжении всего интервала времени измерения T , отслеживая и сопоставляя особенности их изменения.

При практическом анализе информация о параметрах режима, поступающая от регистратора в виде дискретной записи мгновенных значений токов и напряжений с интервалом дискретности, обеспечивающим заданный класс точности, и, соответственно,

конечным количеством замеров, (например в АНТЭС АР-3Ф – 100 замеров за период). Использовать информацию о среднеквадратичном напряжении и активной мощности можно для выделенного интервала усреднения τ . Методика определения места расположения источника КН предполагает использовать основные признаки изменения (7)÷(11) кривой мощности $P(t)$ относительно кривой напряжения $U(t)$ при их дискретной реализации.

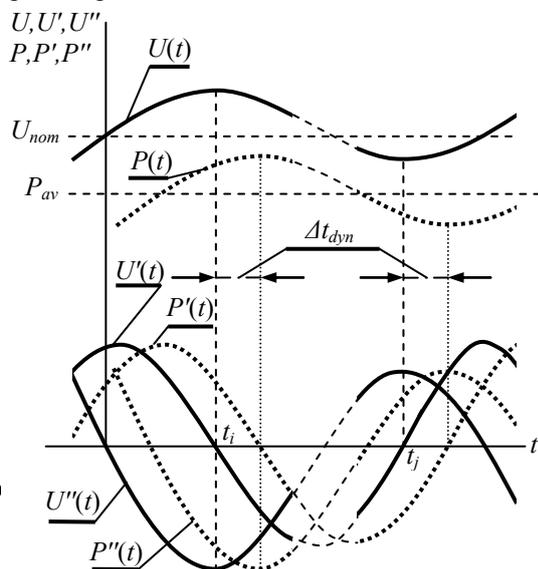


Рис. 4. Учет динамических характеристик двигательной нагрузки

Выводы.

1. Разработан метод определения места нахождения источника КН в электрической сети, который, работает по принципу оценки корреляции изменения мощности и напряжения в сети электроснабжения.

2. Метод позволяет учитывать сдвиг между экстремумами кривых изменения напряжения $U(t)$ и мощности $P_{load}(t)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. – [Введ. в Украине 01.01.2000]. – Минск: ИПК. Изд-во стандартов, 1998. – 30 с. – (Межгосударственный стандарт стран СНГ).
2. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
3. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.
4. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1986. – 723 с.
5. Сендерович Г.А., Дяченко А.В. Актуальность определения ответственности за нарушение качества электроэнергии по показателям колебаний напряжения // Электротехника и электромеханика. – 2016. - №2. - С. 54-60. doi: 10.20998/2074-272X.2016.2.10.

REFERENCES

1. GOST 13109-97. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tehnikeskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 13109-97. Electrical energy.

Technical equipment electromagnetic compatibility. Quality standards for electrical energy in general use power systems]. Minsk, IPK Publishing house of standards, 1998. 30 p. (Rus).

2. Idelchik V.I. *Elektricheskie sistemy i seti: Uchebnik dlia vuzov* [Electrical Systems and Grids: Textbook for high schools]. Moscow, Energoatomisdat Publ., 1989. 592 p. (Rus).
3. Venikov V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh: Ucheb. dlia elektroenerget. spets. vuzov* [Transitional electromechanical processes in electrical systems: Textbook for electric. specialist. high schools]. Moscow, High School Publ., 1985. 536 p. (Rus).
4. Bronshteyn I.N., Semendiyayev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov* [Mathematical handbook for engineers and university students]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 723 p. (Rus).
5. Senderovich G.A., Diachenko A.V. The relevance of determining responsibility for violation of power quality in terms of voltage fluctuations. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.2, pp. 54-60. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.2.10.

Сендерович Геннадий Аркадиевич¹, д.т.н., проф.,
Дяченко Александр Васильевич¹, аспирант,
¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 095 2098150,
e-mail: senderovich@mail.ru, alex.7491@mail.ru

G.A. Senderovich¹, A.V. Diachenko¹

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

A method for determining location of voltage fluctuations source in electric grid.

Purpose. The purpose of work is development of a method of definition of the location of a source of fluctuations of voltage.

Methodology. The reasons of emergence of fluctuations of voltage at an arrangement of a source both in power lines, and in the consumer's networks, are connected with changes of consumption and active and reactive capacities. As criterion for definition of the location of a source of fluctuations of voltage we choose change of size of the active power received by reception substation on equivalent communication with system. The source of fluctuations of voltage is external for the consumer if emergence of fluctuations of voltage leads to the coordinated changes of tension and consumed in the area of active power that corresponds to a condition of the positive regulating effect of active loading on voltage (1). The source of fluctuations of voltage is internal for the consumer if emergence of fluctuations of voltage leads to counter changes of tension and consumed in the area of active power that resembles a condition of the negative regulating effect of active loading on voltage superficially (6). **Results.** The method of definition of the location of a source of fluctuations of voltage in an electric network which, works by the principle of an assessment of correlation of change of power and tension in a power supply network is developed. The method allows to consider shift between extrema of curves of change of voltage of $U(t)$ and power of $P_{load}(t)$. **Originality.** The method of definition of an arrangement of a source of fluctuations of voltage is developed. **Practical value.** The answer to this question where the source of fluctuations of voltage (in the territory of the consumer is located or in an external network) confirmed with the determined calculation, can form a basis of the expert opinion for the solution of legal disputes at an assessment of the damages caused by poor quality of electric energy. References 5, figures 4.

Key words: quality of the electric power, indicators of quality of the electric power, fluctuation of voltage, source of fluctuation of voltage, curve of change of voltage, curve of change of active power, definition of responsibility.

Ю.А. Сиротин

ОРТОГОНАЛЬНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА ПРИ АССИМЕТРИЧНОЙ АКТИВНО-РЕАКТИВНОЙ НАГРУЗКЕ В ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ ЦЕПИ

Для 3-фазной схемы электропитания рассмотрено синусоидальный несимметричный режим. При асимметричной нагрузке и асимметричному активно-реактивному навантаженні для 4-проводной сети получено ортогональное разложение трехфазного тока. Четыре составляющие разложения классифицированы активностью/реактивностью та симметрией/асимметрией навантаження та мають однозначний електроенергетичний зміст. Для 4-проводной цепи с несимметричной нагрузкой при несимметричном напряжении полученное уравнение мощности развивает теорию токовых физических составляющих (Currents' Physical Components – CPC). Библ. 8, рис. 1.

Ключові слова: трифазне коло, активна і реактивна потужність, потужність зсуву, рівняння потужності, незбалансований струм та режим, активно-реактивне несимметричне навантаження, Currents' Physical Components (CPC).

Для 3-фазной схемы электропитания рассмотрен синусоидальный несимметричный режим. При несимметричном напряжении и асимметричной активно-реактивной нагрузке для 4-проводной сети получено ортогональное разложение трехфазного тока. Четыре составляющие разложения классифицированы активностью/реактивностью и симметрией/асимметрией нагрузки и имеют однозначный электроэнергетический смысл. Для 4-проводной цепи с несимметричной нагрузкой при несимметричном напряжении полученное уравнение мощности развивает теорию токовых физических составляющих (Currents' Physical Components – CPC). Библ. 8, рис. 1.

Ключевые слова: трехфазная цепь, активная и реактивная мощность, мощность сдвига, уравнение мощности, несбалансированный ток и режим, активно-реактивная несимметричная нагрузка, несимметричное напряжение, Currents' Physical Components (CPC).

Введение. Активно-реактивная несимметричная нагрузка потребляет не только электроэнергию (ЭЭ) активной мощности, но и ЭЭ неактивных составляющих полной мощности (ПМ), что приводит к дополнительным потерям. Эффективным решением задачи сокращения потерь и повышения точности учета ЭЭ является совместное применение компенсирующих устройств и дифференцированных средств учета потребляемой ЭЭ. Однако, даже в синусоидальном режиме, существующие средства учета измеряют ЭЭ, обусловленную только симметрией активных и реактивных элементов нагрузки (активную мощность и реактивную мощность сдвига). В реальных условиях асимметрии напряжения составляющие ПМ, обусловленные асимметрией активно-реактивных элементов нагрузки, приводят к дополнительным потерям, однако не измеряются, не учитываются и не компенсируются.

Постановка проблемы. Компенсация, измерение и учет составляющих ПМ – связанные, дополняющие друг друга задачи эффективного потребления ЭЭ. Эти задачи с единых позиций должны решаться в рамках общей теории мощности, используя ортогональное разложение 3-фазного тока [1-6]. Взаимная ортогональность компонент разложения позволяет однозначно оценить потери независимо ими обусловленные. Широко применяемая теория мощности Currents' Physical Components (CPC) [2, 4-6] использует методологию ортогонального разложения. В синусоидальном несбалансированном режиме 3-фазный ток содержит две ортогональные компоненты: сбалансированную и несбалансированную. Сбалансированная компонента (обусловлена симметрией активно-реактивных элементов нагрузки) ортогонально содержит активный и реактивный ток как для трех, так и для 4-проводной цепи. Асимметрия активно-реактивных элементов нагрузки, как при симметричном, так и при асимметричном напряжении приводит к возникновению тока небаланса.

К сожалению, даже в синусоидальном режиме CPC теория разработана либо для 3-проводных схем, либо для 4-проводных схем при симметричном на-

пряжении [2, 4-6]. Так, для 3-проводной схемы при несимметричном напряжении в CPC теории мощности ток небаланса раскладывается на две компоненты, используя метод симметричных компонент [6], что не разделяет асимметрию активных и реактивных элементов нагрузки в явном виде.

Цель работы – для несбалансированного режима при несимметричном напряжении в 3-фазной 4-проводной схеме получить ортогональное 4-компонентное разложение 3-фазного тока, классифицируемое симметрией/асимметрией отдельно активных и отдельно реактивных элементов нагрузки.

Периодические энергетические процессы. При рассмотрении 3-фазной 4-проводной цепи полагаем, что напряжения в фазах измеряются относительно нейтрали (рис. 1).

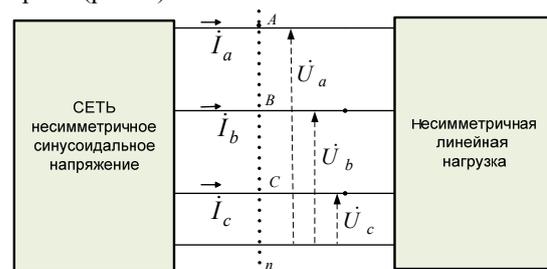


Рис. 1. 3-фазная 4-проводная схема электропитания с несимметричной нагрузкой - синусоидальный режим

В каждый момент времени мгновенные значения (м.з.) напряжений (относительно «нейтрального» проводника) и м.з. токов в фазах рассматриваются как 3-мерные вектора (матрицы столбцы) арифметического 3-мерного пространства $R^{(3)}$

$$\mathbf{u}(t) = [u_a(t) \ u_b(t) \ u_c(t)]^T, \quad \mathbf{i}(t) = [i_a(t) \ i_b(t) \ i_c(t)]^T, \quad (1)$$
здесь и дальше τ – знак транспонирования.

Установившийся энергетический режим в 3-фазном сечении $\langle A, B, C \rangle$ определен 3-мерными T -периодическими кривыми тока и напряжения:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}(t+T), \quad \mathbf{i}(t) = \mathbf{i}(t+T)$$

© Ю.А. Сиротин

Множество 3-мерных (3-фазных) T -периодических векторных кривых

$$\mathbf{x}(t) = [x_a(t) \ x_b(t) \ x_c(t)]^T, \quad t \in (v, v+T) \quad (2)$$

с конечным действующим значением (д.з.) – root mean square (rms)

$$\|\mathbf{x}\| = \sqrt{\frac{1}{T} \int_v^{v+T} \mathbf{x}(t)^T \mathbf{x}(t) dt} < \infty \quad (3)$$

образуют гильбертово пространство

$$L_2^{(3)}(T) = \{\mathbf{x}(t), \quad t \in (v, v+T) : \|\mathbf{x}\| < \infty\}. \quad (4)$$

Для векторных кривых $\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t) \in L_2^{(3)}(T)$ определено скалярное произведение (СП)

$$\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle = \frac{1}{T} \int_v^{v+T} \mathbf{x}(t)^T \mathbf{y}(t) dt = \frac{1}{T} \int_v^{v+T} (\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t)) dt \quad (5)$$

как интегральное среднее скалярных произведений м.з. в 3-мерном пространстве $R^{(3)}$.

В частности, для активной мощности

$$\langle \mathbf{i}, \mathbf{u} \rangle = \frac{1}{T} \int_v^{v+T} \underbrace{\mathbf{i}(t)^T \mathbf{u}(t)}_{p(t)} dt = \frac{1}{T} \int_v^{v+T} (\mathbf{i}(t), \mathbf{u}(t)) dt = P. \quad (6)$$

Мгновенная мощность

$$p(t) = \mathbf{i}^T \mathbf{u} = i_a(t)u_a(t) + i_b(t)u_b(t) + i_c(t)u_c(t) \quad (7)$$

равна скорости передачи электроэнергии через сечение $\langle A, B, C \rangle$. В пространстве (4) справедливо неравенство Коши-Шварца

$$\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle \leq \|\mathbf{x}\| \cdot \|\mathbf{y}\|. \quad (8)$$

В частности, активная мощность не превосходит кажущуюся (полную) мощность

$$P = \langle \mathbf{i}, \mathbf{u} \rangle \leq \|\mathbf{u}\| \cdot \|\mathbf{i}\|.$$

Синусоидальный режим и 3-комплексы.

3-мерные кривые м.з. синусоидальных процессов напряжения и тока

$$\mathbf{u}(t) = \sqrt{2} \Re e [U e^{j\omega t}], \quad \mathbf{i}(t) = \sqrt{2} \Re e [I e^{j\omega t}]. \quad (9)$$

T -периодичны ($T\omega = 2\pi$) и полностью определены 3-комплексами напряжения и тока

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a e^{j\psi_a} \\ U_b e^{j\psi_b} \\ U_c e^{j\psi_c} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a e^{j\varphi_a} \\ I_b e^{j\varphi_b} \\ I_c e^{j\varphi_c} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

– векторами комплексных д.з. (complex rms) напряжения и тока.

3-комплексы (10) вычисляются по 3-мерным кривым м.з. синусоидальных процессов напряжения и тока

$$\mathbf{U} = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_v^{v+T} \mathbf{u}(t) e^{-j\omega t} dt, \quad \mathbf{I} = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_v^{v+T} \mathbf{i}(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (11)$$

Множество 3-комплексов образует 3-мерное комплексное пространство $C^{(3)}$ с комплексным СП

$$(\mathbf{X}, \mathbf{Z}) = \mathbf{X}^T \mathbf{Z}^* = \dot{X}_a \dot{Z}_a^* + \dot{X}_b \dot{Z}_b^* + \dot{X}_c \dot{Z}_c^*. \quad (12)$$

Здесь и дальше * – знак комплексного сопряжения. При этом для rms справедливо

$$\|\mathbf{x}\|^2 = \mathbf{X}^T \mathbf{X}^* = \sum_m \dot{X}_m \dot{X}_m^* = \sum_m X_m^2 = |\mathbf{X}|^2 = X^2.$$

В частности,

$$\|\mathbf{u}\| = |\mathbf{U}| = U, \quad \|\mathbf{i}\| = |\mathbf{I}| = I. \quad (13)$$

Для пары синусоидальных процессов $\mathbf{x}(t),$

$\mathbf{z}(t) \in L_2^{(3)}(T)$ справедливо равенство

$$\langle \mathbf{x}, \mathbf{z} \rangle = \Re e [\mathbf{X}^T \mathbf{Z}^*] = \Re e [\mathbf{Z}^T \mathbf{X}^*]. \quad (14)$$

Тем самым, если 3-комплексы ортогональны, то ортогональны и соответствующие 3- мерные кривые. Обратное утверждение не верно.

Из (14) следует, что в синусоидальном режиме активная мощность адекватно представляется в терминах 3-комплексов напряжения и тока

$$P = \langle \mathbf{i}, \mathbf{u} \rangle = \Re e [\mathbf{I}^T \mathbf{U}^*] = \Re e [\mathbf{U}^T \mathbf{I}^*]. \quad (15)$$

Временной сдвиг 3-мерной кривой м.з. синусоидального напряжения $\mathbf{u}_\perp(t) = \mathbf{u}(t - T/4)$ равносильен повороту 3-комплекса напряжения в пространстве $C^{(3)}$ на 90°

$$\mathbf{u}_\perp(t) = \sqrt{2} \Re e [U_\perp e^{j\omega t}] = \sqrt{2} \Re e [-jU e^{j\omega t}]. \quad (16)$$

При этом $\|\mathbf{u}_\perp\| = \|\mathbf{u}\|$. Так как

$$\langle \mathbf{u}_\perp, \mathbf{u} \rangle = \Re e [-jU^T U^*] = \Re e [-j|U|^2] = 0,$$

то 3-мерные кривые напряжения ортогональны ($\mathbf{u} \perp \mathbf{u}_\perp$).

Интегральное определение реактивной мощности (известное как мощность сдвига) представляется в терминах 3-комплексов напряжения и тока

$$Q = \langle \mathbf{i}, \mathbf{u}_\perp \rangle = \Re e [-jU^T I^*] = \text{Im} [U^T I^*]. \quad (17)$$

Мощности (15) и (17) связаны комплексной мощностью – СП 3-комплексов напряжения и тока

$$\dot{S} = U^T I^* = \Re e [U^T I^*] + j \text{Im} [U^T I^*] = P + jQ. \quad (18)$$

В синусоидальном режиме при симметричной нагрузке справедливо уравнение мощностей

$$P^2 + Q^2 = \|\mathbf{i}\| \cdot \|\mathbf{u}\|. \quad (19)$$

Эквивалентные проводимости тока нагрузки.

В синусоидальном режиме 3-комплексы тока и напряжения позволяют определить эквивалентные проводимости тока в сечении $\langle A, B, C \rangle$

$$\dot{Y}_m = G_m - jB_m = \frac{\dot{I}_m}{U_m}, \quad m \in \{a, b, c\} \quad (20)$$

и представить 3-комплекс 3-фазного тока в матричном виде

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \dot{U}_a \dot{Y}_a \\ \dot{U}_b \dot{Y}_b \\ \dot{U}_c \dot{Y}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_a & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Y}_b & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Y}_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \hat{Y} \mathbf{U} \quad (21)$$

с помощью диагональной матрицы

$$\hat{Y} = \text{diag} \{ \dot{Y}_a, \dot{Y}_b, \dot{Y}_c \}. \quad (22)$$

Для 4-проводной цепи с нагрузкой типа звезда эквивалентные проводимости (20) тока в сечении $\langle A, B, C \rangle$ равны проводимостям фаз нагрузки.

Активная мощность и мощность сдвига адекватно представляются квадратичными формами 3-комплекса напряжения

$$P = \Re e [U^T \hat{Y}^* U^*], \quad Q = \text{Im} [U^T \hat{Y}^* U^*]. \quad (23)$$

Активная мощность (мощность сдвига) зависит только от проводимостей активных (реактивных) элементов нагрузки

$$P = \sum_m G_m |\dot{U}_m|^2, \quad Q = \sum_m B_m |\dot{U}_m|^2. \quad (24)$$

Потери полного 3-фазного тока на один Ом

$$\|\mathbf{i}\|^2 = \Re e [\mathbf{I}^T \mathbf{I}^*] = \sum_m (G_m^2 + B_m^2) |\dot{U}_m|^2. \quad (25)$$

Активный и реактивный ток. Для 3-мерной кривой синусоидального тока (9) справедливо

$$\mathbf{i}(t) = \sqrt{2} \Re e [\hat{Y} U e^{j\omega t}], \quad \mathbf{I} = \hat{Y} \mathbf{U}. \quad (26)$$

Алгебраическая форма комплексных эквивалентных проводимостей (20) позволяет разложить диагональную матрицу (22)

$$\hat{Y} = \hat{G} - j\hat{B}, \quad (27)$$

$$\hat{G} = \text{diag}\{G_a, G_b, G_c\}, \quad \hat{B} = \text{diag}\{B_a, B_b, B_c\} \quad (28)$$

и разделить 3-комплекс тока на две составляющие, ассоциированные с активными и реактивными элементами нагрузки

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_A + \mathbf{I}_R, \quad \mathbf{I}_A = \hat{G}\mathbf{U}, \quad \mathbf{I}_R = -j\hat{B}\mathbf{U} = \hat{B}\mathbf{U}_\perp. \quad (29)$$

Разложение 3-мерной кривой тока (26)

$$\mathbf{i}(t) = \mathbf{i}_A(t) + \mathbf{i}_R(t) \quad (30)$$

на активный ток и реактивный ток

$$\mathbf{i}_A(t) = \sqrt{2}\Re e[\hat{G}\mathbf{U}e^{j\omega t}], \quad \mathbf{i}_R(t) = \sqrt{2}\Re e[\hat{B}\mathbf{U}_\perp e^{j\omega t}] \quad (31)$$

ортогонально в пространстве 3-мерных кривых (4).

Так как величина

$$\mathbf{I}_A^T \mathbf{I}_R^* = (\hat{G}\mathbf{U})^T (-j\hat{B}\mathbf{U})^* = j \sum_m U_m^2 G_m B_m \quad (32)$$

чисто мнимая, то 3-мерные кривые (31) ортогональны $\langle \mathbf{i}_A, \mathbf{i}_R \rangle = \Re e[\mathbf{I}_A^T \mathbf{I}_R^*] = 0 \Rightarrow \mathbf{i}_A \perp \mathbf{i}_R$. (33)

В силу ортогональности разложения (29) для потерь на один Ом справедливо равенство Пифагора

$$\|\mathbf{i}\|^2 = \|\mathbf{i}_A\|^2 + \|\mathbf{i}_R\|^2. \quad (34)$$

Потери активного и реактивного тока

$$\|\mathbf{i}_A\|^2 = \Re e[\mathbf{I}_A^T \mathbf{I}_A^*] = \sum_m G_m^2 |\dot{U}_m|^2, \quad (35)$$

$$\|\mathbf{i}_R\|^2 = \Re e[\mathbf{I}_R^T \mathbf{I}_R^*] = \sum_m B_m^2 |\dot{U}_m|^2 \quad (36)$$

определяют потери полного тока (25). При этом

$$\|\mathbf{i}_A\|^2 \leq \|\mathbf{i}\|^2, \quad \|\mathbf{i}_R\|^2 \leq \|\mathbf{i}\|^2.$$

Активный ток обеспечивает поставку ЭЭ с активной мощностью полного тока (24)

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{u}, \mathbf{i}_A \rangle &= \Re e[\mathbf{U}^T \mathbf{I}_A^*] = \Re e[\mathbf{U}^T \hat{G}\mathbf{U}^*] = \\ &= \sum_m G_m |\dot{U}_m|^2 = \langle \mathbf{i}, \mathbf{u} \rangle = P. \end{aligned} \quad (37)$$

Реактивный ток обеспечивает передачу ЭЭ мощности сдвига полного тока (24)

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{i}_R, \mathbf{u}_\perp \rangle &= \Re e[-j\mathbf{U}^T \mathbf{I}_R^*] = \text{Im}[\mathbf{U}^T \hat{B}\mathbf{U}^*] = \\ &= \sum_m B_m |\dot{U}_m|^2 = \langle \mathbf{i}, \mathbf{u}_\perp \rangle = Q. \end{aligned} \quad (38)$$

В разложении (30) активный (реактивный) ток обусловлен суммарно симметрией и асимметрией активных (реактивных) элементов нагрузки.

Сбалансированная компонента тока. Синусоидальный режим *сбалансирован*, если 3-комплексы тока и напряжения (10) коллинеарны (параллельны $\mathbf{I} \parallel \mathbf{U}$) [7, 8]

$$\mathbf{I} \parallel \mathbf{U} \Leftrightarrow \mathbf{I} = \beta \mathbf{U} \quad (\beta = \beta' + j\beta'', \quad \beta \neq 0). \quad (39)$$

Режим *реально* сбалансирован [7, 8], если $\text{Im}[\beta] = \beta'' = 0$. Если нагрузка симметрична, то режим сбалансирован при любом несимметричном напряжении.

Для несбалансированного режима 3-комплекс компонентов тока, сбалансированного с 3-фазным напряжением, равен проекции 3-комплекса тока на 3-комплекс напряжения в пространстве $C^{(3)}$

$$\mathbf{I}_S = (\mathbf{I}^T \mathbf{v}^*) \mathbf{v} = \frac{(\mathbf{I}^T \mathbf{U}^*) \mathbf{U}}{|\mathbf{U}|^2}. \quad (40)$$

Здесь и дальше:

$$\mathbf{v} = [\dot{v}_a \quad \dot{v}_b \quad \dot{v}_c]^T, \quad |\mathbf{v}|^2 = v_a^2 + v_b^2 + v_c^2 = 1 \quad (41)$$

– орт 3-комплекса напряжения

$$\mathbf{U} = |\mathbf{U}| \mathbf{v}, \quad \dot{U}_m = U \dot{v}_m \quad (m \in \{a, b, c\}). \quad (42)$$

В терминах проводимостей 3-комплекс тока баланса (40)

$$\mathbf{I}_S = \frac{(\mathbf{I}^T \mathbf{U}^*) \mathbf{U}}{|\mathbf{U}|^2} = \underbrace{(\mathbf{S}^* / U^2)}_{\dot{y}_s} \cdot \mathbf{U} = \dot{y}_s \mathbf{U}. \quad (43)$$

Здесь и дальше:

$$\dot{y}_s = \mathbf{S}^* / U^2 = \dot{Y}_a v_a^2 + \dot{Y}_b v_b^2 + \dot{Y}_c v_c^2 \quad (44)$$

– эквивалентная комплексная проводимость сбалансированной компоненты тока;

$$\mathbf{S}^* = (\mathbf{U}^T \mathbf{I}^*)^* = \mathbf{I}^T \mathbf{U}^* = \mathbf{U}^T \hat{Y} \mathbf{U}^*$$

– комплексно-сопряженная комплексная мощность.

В терминах орта 3-комплекса напряжения (42) активная и реактивная мощность имеют эквивалентные формы представления:

$$P = \Re e[\dot{S}] = \mathbf{U}^T \hat{G} \mathbf{U}^* = U^2 \sum_m G_m v_m^2; \quad (45)$$

$$Q = \text{Im}[\dot{S}] = \mathbf{U}^T \hat{B} \mathbf{U}^* = U^2 \sum_m B_m v_m^2. \quad (46)$$

Эквивалентная комплексная проводимость (44) 3-кривой тока баланса

$$\mathbf{i}_s(t) = \sqrt{2}\Re e[\dot{y}_s \mathbf{U} e^{j\omega t}], \quad \mathbf{I}_s = \dot{y}_s \mathbf{U} \quad (47)$$

во всех фазах одинакова и равна средневзвешенной сумме эквивалентных комплексных проводимостей фаз (20). Весовые множители определены ортом 3-комплекса напряжения (42).

Если напряжение симметрично прямой последовательности (III), то

$$\mathbf{v} = (1/\sqrt{3})[1 \quad \alpha^* \quad \alpha]^T, \quad v_a^2 = v_b^2 = v_c^2 = 1/3, \quad (48)$$

где $\alpha = e^{j120^\circ} = -1/2 + j\sqrt{3}/2$.

Если нагрузка асимметрична

$$\dot{y}_s \neq \dot{Y}_a, \quad \dot{y}_s \neq \dot{Y}_b, \quad \dot{y}_s \neq \dot{Y}_c, \quad (49)$$

то режим несбалансирован при любом напряжении.

Комплексная проводимость тока баланса (47)

$$\dot{y}_s = \mathbf{g}_s - j\mathbf{b}_s, \quad (50)$$

определяет проводимости, ассоциированные с симметрией активных и реактивных элементов нагрузки

$$\mathbf{g}_s = G_a v_a^2 + G_b v_b^2 + G_c v_c^2; \quad (51)$$

$$\mathbf{b}_s = B_a v_a^2 + B_b v_b^2 + B_c v_c^2. \quad (52)$$

Эти проводимости равны средневзвешенным суммам проводимостей фаз. Если нагрузка асимметрична, то

$$\mathbf{g}_s \neq G_a, \quad \mathbf{g}_s \neq G_b, \quad \mathbf{g}_s \neq G_c; \quad (53)$$

$$\mathbf{b}_s \neq B_a, \quad \mathbf{b}_s \neq B_b, \quad \mathbf{b}_s \neq B_c. \quad (54)$$

Проводимости (51, 52) характеризуют симметрию активных и реактивных элементов нагрузки по фазам для 3-фазного напряжения.

3-комплекс (43) сбалансированной компоненты имеет две составляющие: активную и реактивную

$$\mathbf{I}_{sA} = \mathbf{g}_s \mathbf{U}, \quad \mathbf{I}_{sR} = -j\mathbf{b}_s \mathbf{U} = \mathbf{b}_s \mathbf{U}_\perp \quad (56)$$

и обеспечивает разложение сбалансированного тока

$$\mathbf{i}_s(t) = \mathbf{i}_{sA}(t) + \mathbf{i}_{sR}(t) \quad (57)$$

на составляющие, ассоциированные с активными и реактивными элементами нагрузки:

$$\mathbf{i}_{sA}(t) = \sqrt{2}\Re e[\mathbf{I}_{sA} e^{j\omega t}] = \sqrt{2}\Re e[\mathbf{g}_s \mathbf{U} e^{j\omega t}], \quad (58)$$

$$\mathbf{i}_{sR}(t) = \sqrt{2}\Re e[\mathbf{I}_{sR} e^{j\omega t}] = \sqrt{2}\Re e[\mathbf{b}_s \mathbf{U}_\perp e^{j\omega t}]. \quad (59)$$

3-кривые (58) и (59) ортогональны, так как

$$\langle \mathbf{i}_{sA}, \mathbf{i}_{sR} \rangle = \Re e[j \sum_m U_m^2 \mathbf{g}_s \mathbf{b}_s] = 0. \quad (60)$$

В силу ортогональности разложению (57) для компонент тока справедливо равенство Пифагора

$$\mathbf{i}_{sA}(t) \perp \mathbf{i}_{sR}(t) \Rightarrow I_{sA}^2 + I_{sR}^2 = I_s^2; \quad (61)$$

$$I_{sA}^2 = \mathbf{g}_s^2 U^2, \quad I_{sR}^2 = \mathbf{b}_s^2 U^2.$$

Из (58) следует

$$\langle \mathbf{u}, \mathbf{i}_{sA} \rangle = \operatorname{Re}[\mathbf{U}^T \mathbf{I}_{sA}^*] = \operatorname{Re}[\mathbf{U}^T \mathbf{g}_s \mathbf{U}^*] = P. \quad (62)$$

Так как сбалансированный активный ток *реально* параллелен напряжению ($\mathbf{I}_{sA} \parallel \mathbf{U} \Rightarrow \mathbf{I}_{sA} = \mathbf{g}_s \mathbf{U}$), то он обеспечивает поставку электроэнергии активной мощности (62) с минимальными потерями [7]

$$\|\mathbf{i}_{sA}\| \leq \|\mathbf{i}_A\| \leq \|\mathbf{i}\|. \quad (63)$$

При этом $P = \langle \mathbf{u}, \mathbf{i}_{sA} \rangle = \|\mathbf{u}\| \cdot \|\mathbf{i}_{sA}\|$.

Сбалансированный реактивный ток обеспечивает поставку ЭЭ мощности сдвига

$$\langle \mathbf{u}_\perp, \mathbf{i}_{sR} \rangle = \operatorname{Re}[-j \mathbf{U}^T \mathbf{I}_{sR}^*] = \langle \mathbf{u}_\perp, \mathbf{i} \rangle = Q. \quad (64)$$

Так как сбалансированный реактивный ток *реально* параллелен напряжению $\mathbf{I}_{sR} \parallel \mathbf{U}_\perp \Rightarrow \mathbf{I}_{sR} = \mathbf{b}_s \mathbf{U}_\perp$, то он обеспечивает поставку электроэнергии реактивной мощности сдвига с минимальными потерями $\|\mathbf{i}_{sR}\| \leq \|\mathbf{i}_R\| \leq \|\mathbf{i}\|$. При этом

$$|Q| = |\langle \mathbf{u}_\perp, \mathbf{i}_{sR} \rangle| = \|\mathbf{u}_\perp\| \cdot \|\mathbf{i}_{sR}\|. \quad (65)$$

Несбалансированный ток и асимметрия проводимостей нагрузки. В несбалансированном режиме несбалансированная составляющая 3-комплекса тока (ток небаланса) определена как ортогональное дополнение сбалансированной составляющей (40)

$$\mathbf{I}_D = \mathbf{I} - \mathbf{I}_S, \quad (\mathbf{I}_D \perp \mathbf{I}_S). \quad (66)$$

Несбалансированная компонента (66) может быть представлена с помощью векторного произведения в пространстве 3-комплексов $C^{(3)}$ [7, 8].

Из (21) и (47) следует

$$\mathbf{I}_D = \mathbf{I} - \mathbf{I}_S = \hat{\mathbf{Y}} \mathbf{U} - \dot{\mathbf{y}}_s \mathbf{U} = \underbrace{(\hat{\mathbf{Y}} - \dot{\mathbf{y}}_s)}_{\hat{\mathbf{Y}}_D} \mathbf{U} = \hat{\mathbf{Y}}_D \mathbf{U}. \quad (67)$$

Матричная форма 3-комплекса тока небаланса

$$\mathbf{I}_D = \hat{\mathbf{Y}}_D \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{Y}}_{Da} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{\mathbf{Y}}_{Db} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\mathbf{Y}}_{Dc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix}. \quad (68)$$

использует комплексную диагональную матрицу

$$\hat{\mathbf{Y}}_D = \operatorname{diag}\{\dot{\mathbf{Y}}_{Da}, \dot{\mathbf{Y}}_{Db}, \dot{\mathbf{Y}}_{Dc}\} \quad (69)$$

эквивалентных проводимостей тока небаланса

$$\dot{\mathbf{Y}}_{Dm} = \dot{\mathbf{Y}}_m - \dot{\mathbf{y}}_s, \quad m \in \{a, b, c\}. \quad (70)$$

Если напряжение симметрично ПП, то (48) и

$$\dot{\mathbf{Y}}_{Dm} = (2\dot{\mathbf{Y}}_m - \sum_{k \neq m} \dot{\mathbf{Y}}_k) / 3, \quad m \in \{a, b, c\}. \quad (71)$$

Комплексные проводимости (70) характеризуют рассеяние по фазам проводимостей нагрузки относительно проводимости баланса. Небаланс (асимметрия) определяет несбалансированный ток

$$\mathbf{i}_u(t) = \sqrt{2} \Re e[\mathbf{I}_D e^{j\omega t}], \quad (72)$$

который ортогонален напряжению

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{u}, \mathbf{i}_u \rangle &= \operatorname{Re}[\mathbf{U}^T (\hat{\mathbf{Y}}_D \mathbf{U})^*] = \operatorname{Re}[U^2 \sum_m v_m^2 (\dot{\mathbf{Y}}_m - \dot{\mathbf{y}}_s)] = \\ &= \operatorname{Re}[U^2 (\underbrace{\sum_m v_m^2 \dot{\mathbf{Y}}_m}_{\dot{\mathbf{y}}_s} - \dot{\mathbf{y}}_s)] = 0. \end{aligned} \quad (73)$$

При этом из (67) следует разложение

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_S + \mathbf{I}_D, \quad \mathbf{i}(t) = \mathbf{i}_s(t) + \mathbf{i}_u(t). \quad (74)$$

Рассеяние (небаланс) по фазам отдельно активных и реактивных элементов нагрузки

$$\mathbf{g}_{Dm} = \mathbf{G}_m - \mathbf{g}_s, \quad \mathbf{b}_{Dm} = \mathbf{B}_m - \mathbf{b}_s, \quad m \in \{a, b, c\} \quad (75)$$

представляется диагональными матрицами проводимостей активных и реактивных элементов нагрузки:

$$\hat{\mathbf{g}}_D = \operatorname{diag}\{\mathbf{g}_{Da}, \mathbf{g}_{Db}, \mathbf{g}_{Dc}\},$$

$$\hat{\mathbf{b}}_D = \operatorname{diag}\{\mathbf{b}_{Da}, \mathbf{b}_{Db}, \mathbf{b}_{Dc}\}.$$

Небаланс по фазам (асимметрия проводимостей фаз) отдельно активных и реактивных элементов нагрузки определяет разложение 3-комплекса тока небаланса на две компоненты

$$\mathbf{I}_D = \mathbf{I}_{DA} + \mathbf{I}_{DR}, \quad (76)$$

$$\mathbf{I}_{DA} = \hat{\mathbf{g}}_D \mathbf{U} = [\mathbf{g}_{Da} \dot{U}_a \quad \mathbf{g}_{Db} \dot{U}_b \quad \mathbf{g}_{Dc} \dot{U}_c]^T, \quad (77)$$

$$\mathbf{I}_{DR} = -j \hat{\mathbf{b}}_D \mathbf{U} = -j [\mathbf{b}_{Da} U_a \quad \mathbf{b}_{Db} U_b \quad \mathbf{b}_{Dc} U_c]^T. \quad (78)$$

Справедливо разложение несбалансированного тока

$$\mathbf{i}_u(t) = \mathbf{i}_{uA}(t) + \mathbf{i}_{uR}(t), \quad (79)$$

где $\mathbf{i}_{uA}(t) = \sqrt{2} \Re e[\mathbf{I}_{DA} e^{j\omega t}] = \sqrt{2} \Re e[\hat{\mathbf{g}}_D \mathbf{U} e^{j\omega t}]$, (80)

$$\mathbf{i}_{uR}(t) = \sqrt{2} \Re e[\mathbf{I}_{DR} e^{j\omega t}] = \sqrt{2} \Re e[\hat{\mathbf{b}}_D \mathbf{U} e^{j\omega t}] \quad (81)$$

– составляющие, обусловленные асимметрией активных и реактивных элементов нагрузки.

3-мерные кривые (80) и (81) ортогональны, так как

$$\langle \mathbf{i}_{uA}, \mathbf{i}_{uR} \rangle = \operatorname{Re}[\mathbf{I}_{DA}^T \mathbf{I}_{DR}^*] = \operatorname{Re}[j \sum_m U_m^2 \mathbf{g}_{Dm} \mathbf{b}_{Dm}] = 0.$$

В силу ортогональности разложения (79) справедливо тождество Пифагора

$$\mathbf{i}_{uA}(t) \perp \mathbf{i}_{uR}(t) \Rightarrow I_{DA}^2 + I_{DR}^2 = I_D^2, \quad (82)$$

$$I_{DA}^2 = U^2 (v_a^2 \mathbf{g}_{Da}^2 + v_b^2 \mathbf{g}_{Db}^2 + v_c^2 \mathbf{g}_{Dc}^2), \quad (83)$$

$$I_{DR}^2 = U^2 (v_a^2 \mathbf{b}_{Da}^2 + v_b^2 \mathbf{b}_{Db}^2 + v_c^2 \mathbf{b}_{Dc}^2). \quad (84)$$

Таким образом, для разложения тока использованы два дихотомических фактора:

- один фактор обусловлен активностью и реактивностью элементов нагрузки;
- другой фактор обусловлен симметрией и асимметрией элементов нагрузки по фазам.

Разложение 3-фазного тока и уравнение мощности несбалансированного режима. Сочетание значений двух факторов, классифицирующих нагрузку:

- («активность/реактивность» – первый фактор)

$$\mathbf{i} = \mathbf{i}_A + \mathbf{i}_R;$$

- («симметрия / асимметрия» – второй фактор)

$$\mathbf{i} = \mathbf{i}_s + \mathbf{i}_u,$$

позволило получить четыре взаимно ортогональных составляющих 3-фазного тока

$$\mathbf{i}_{sA}, \quad \mathbf{i}_{uA}, \quad \mathbf{i}_{sR}, \quad \mathbf{i}_{uR},$$

которые обеспечивают разложение на четыре взаимно ортогональные 3-фазные компоненты тока

$$\mathbf{i} = \mathbf{i}_A + \mathbf{i}_R = \underbrace{(\mathbf{i}_{sA} + \mathbf{i}_{uA})}_{\mathbf{i}_A} + \underbrace{(\mathbf{i}_{sR} + \mathbf{i}_{uR})}_{\mathbf{i}_R}. \quad (85)$$

Так как разложение тока (85) ортогонально, то справедливо тождество (уравнение потерь на один Ом)

$$\|\mathbf{i}\|^2 = \|\mathbf{i}_{sA}\|^2 + \|\mathbf{i}_{uA}\|^2 + \|\mathbf{i}_{sR}\|^2 + \|\mathbf{i}_{uR}\|^2. \quad (86)$$

Умножение уравнения (86) на квадрат д.з. (rms) напряжения $\|\mathbf{u}\|^2$ дает уравнение для мощностей синусоидального несбалансированного режима

$$S_T^2 = P^2 + Q^2 + D_G^2 + D_B^2. \quad (87)$$

Здесь:

$$S_T = \|\mathbf{i}\| \cdot \|\mathbf{u}\| \quad (88)$$

– (total) кажущая мощность;

$$P = \|\mathbf{i}_{sA}\| \cdot \|\mathbf{u}\| = \langle \mathbf{i}, \mathbf{u} \rangle \quad (89)$$

– активная мощность баланса, обусловленная симметрией активных элементов нагрузки;

$$|Q| = \|\mathbf{i}_{sR}\| \cdot \|\mathbf{u}_\perp\| = |\langle \mathbf{i}, \mathbf{u}_\perp \rangle| \quad (90)$$

– реактивная мощность баланса, обусловленная симметрией активных элементов нагрузки;

$$D_G = \|\mathbf{i}_{uA}\| \cdot \|\mathbf{u}\| \quad (91)$$

– мощность небаланса, обусловленная асимметрией активных элементов нагрузки;

$$D_B = \|\mathbf{i}_{uR}\| \cdot \|\mathbf{u}\| \quad (92)$$

– мощность небаланса, обусловленная асимметрией реактивных элементов нагрузки;

Уравнение мощности (87) обобщает уравнение для синусоидального несимметричного режима [7]

$$I^2 \cdot U^2 = P^2 + Q^2 + D_u^2, \quad (93)$$

так как $D_u^2 = D_G^2 + D_B^2$.

Практическая ценность полученного ортогонального разложения тока и уравнений мощности заключается в возможности их использования не только для разделительного измерения и учета неактивных составляющих ПМ, но и для решения задачи компенсации в синусоидальном несбалансированном режиме.

Выводы. Для 3-фазной 4-проводной сети с синусоидальным несбалансированным режимом, при несимметричном напряжении получено 4-х компонентное ортогональное разложение 3-фазного тока. Компоненты, имея явный энергетический смысл, независимо классифицируют состояние нагрузки. Полученное разложение расширяет теорию CPC на 4-проводные схемы с несимметричным напряжением путем разложения тока небаланса на две составляющие, обусловленные активностью и реактивностью асимметрии элементов нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 1459-2010 IEEE Standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. doi: 10.1109/ieeestd.2010.5439063.
2. Czarnecki L.S. Orthogonal decomposition of the currents in a 3-phase nonlinear asymmetrical circuit with a nonsinusoidal voltage source // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1988. – vol.37. – no.1. – pp. 30-34. doi: 10.1109/19.2658.
3. Ferrero A., Superti-Furga G. A new approach to the definition of power components in three-phase systems under nonsinusoidal conditions // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1991. – vol.40. – no.3. – pp. 568-577. doi: 10.1109/19.87021.
4. Lev-Ari H., Stankovic A.M. A decomposition of apparent power in polyphase unbalanced networks in nonsinusoidal operation // IEEE Transactions on Power Systems. – 2006. – vol.21. – no.1. – pp. 438-440. doi: 10.1109/tpwrs.2005.860903.
5. Czarnecki L.S., Haley P.M. Unbalanced power in four-wire systems and its reactive compensation // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. – vol.30. – no.1. – pp. 53-63. doi: 10.1109/tpwrd.2014.2314599.
6. Czarnecki L.S., Bhattarai P.D. Currents' physical components (CPC) in three-phase systems with asymmetrical voltage // Przegląd Elektrotechniczny. – 2015. – no.6. – pp. 40-47. doi: 10.15199/48.2015.06.06.
7. Сиротин Ю.А. Векторная мгновенная мощность и энергетические режимы трехфазных цепей // Технічна електродинаміка. – 2013. – №6. – С. 57-65.
8. Sirotnin Iu.A. Non-pulsed mode of supply in a three-phase system at asymmetrical voltage // Przegląd Elektrotechniczny. – 2013. – no.7. – pp. 54-58.

REFERENCES

1. 1459-2010 IEEE Standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. doi: 10.1109/ieeestd.2010.5439063.
2. Czarnecki L.S. Orthogonal decomposition of the currents in a 3-phase nonlinear asymmetrical circuit with a nonsinusoidal voltage source. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1988, vol.37, no.1, pp. 30-34. doi: 10.1109/19.2658.
3. Ferrero A., Superti-Furga G. A new approach to the definition of power components in three-phase systems under nonsinusoidal conditions. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1991, vol.40, no.3, pp. 568-577. doi: 10.1109/19.87021.
4. Lev-Ari H., Stankovic A.M. A decomposition of apparent power in polyphase unbalanced networks in nonsinusoidal operation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, vol.21, no.1, pp. 438-440. doi: 10.1109/tpwrs.2005.860903.
5. Czarnecki L.S., Haley P.M. Unbalanced power in four-wire systems and its reactive compensation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, vol.30, no.1, pp. 53-63. doi: 10.1109/tpwrd.2014.2314599.
6. Czarnecki L.S., Bhattarai P.D. Currents' physical components (CPC) in three-phase systems with asymmetrical voltage. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2015, no.6, pp. 40-47. doi: 10.15199/48.2015.06.06.
7. Sirotnin Iu.A. Vectorial instantaneous power and energy modes in three-phase circuits. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamic*, 2013, no.6, pp. 57-65. (Rus).
8. Sirotnin Iu.A. Non-pulsed mode of supply in a three-phase system at asymmetrical voltage. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2013, no.7, pp. 54-58.

Поступила (received) 29.02.2016

Сиротин Юрий Александрович, д.т.н., проф.,
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
e-mail: yuri_sirotnin@ukr.net

Iu.A. Sirotnin

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Orthogonal components of the three-phase current at asymmetrical active - reactive load in 4-wire circuit.

Purpose. For the unbalanced sinusoidal mode with asymmetric voltage in 3-phase 4-wire circuits to receive the orthogonal 4-component decomposition of 3-phase current, are classified symmetry/asymmetry of active and reactive load elements separately. **Methodology.** The methodology is based on the vector approach, which with one voice allows to analyze the energy characteristics of a 4-wire and 3-wire circuits as balanced and unbalanced modes. At asymmetrical voltage the matrix representation methodology of the equivalent conductivities is used. **Results.** For 3-phase 4-wire network with a sinusoidal unbalanced mode with asymmetric voltage obtained 4-component orthogonal decomposition of the 3-phase current. The components have a clear electro-energetic sense and are classified irrespective by the load condition. **Originality.** The resulting decomposition current develops the theory Currents' Physical Components (CPC) for 4-wire circuit with asymmetric voltage. For the first time the unbalanced current is classified by activity and reactivity of asymmetry load elements. **Practical value.** Practical value of the obtained orthogonal decomposition current and the power equation is a possibility of their utilization for the increase both quality of delivery and quality of consumption of electrical energy. References 8, figures 1.

Key words: three-phase circuit, active and reactive power, power shift, power equation, unbalanced current and mode, active-reactive asymmetrical load, asymmetrical voltage, currents' physical components (CPC).

Е.И. Сокол, О.Г. Гриб, С.В. Швец

СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ОПЕРАТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

У статті приділена увага питанням використання сетецентричного підходу при формуванні активно-адаптивної системи оперативного обслуговування елементів енергосистеми в умовах ідеології Smart Grid. Визначений точносний критерій відсіювання варіантів технічної реалізації цієї системи, що реалізує концепцію «обслуговування на основі відклику». Бібл. 8.

Ключові слова: сетецентричне управління, точносний критерій, оперативне обслуговування, елемент технічної реалізації, вихідна змінна підсистеми.

В статье уделено внимание вопросам использования сетецентрического подхода при формировании активно-адаптивной системы оперативного обслуживания элементов энергосистемы в условиях идеологии Smart Grid. Определен точностной критерий отсева вариантов технической реализации этой системы, реализующей концепцию «обслуживания на основе отклика». Библ. 8.

Ключевые слова: сетецентрическое управления, точностной критерий, оперативное обслуживание, элемент технической реализации, выходная переменная подсистемы.

Введение и постановка проблемы. Сегодня в Украине наблюдается возрастающий интерес к интенсивно развивающемуся в последнее десятилетие во всем мире направлению научно-технологического инновационного преобразования электроэнергетики на базе новой концепции Smart Grid. Государственные структуры в большинстве стран рассматривают Smart Grid как идеологию национальных программ развития электроэнергетики, энергетические компании – как базу для обеспечения устойчивой инновационной модернизации своей деятельности [1-3].

Вместе с тем, целый ряд проблем совершенствования управления энергосистемой, учитывающий современный опыт реформирования энергетики, разработан недостаточно [4]. Развитие комплексной концепции формирования адаптивного управления структурой энергосистемы и информационно-интеллектуальных основ повышения эффективности управленческих технологий в рамках обеспечения клиенто-ориентированного подхода в концепции Smart Grid является важной и актуальной проблемой реформ в энергетике Украины.

Анализ последних исследований и публикаций. Технология Smart Grid способствует созданию такой энергосистемы следующего поколения, которая позволит предприятиям электроэнергетики эффективно управлять производством и потреблением электроэнергии. Интеллектуальная электросеть – это система доставки электроэнергии от генерирующих энергию предприятий до потребителей, интегрированная с коммуникационными и информационными технологиями и обеспечивающая улучшенную прозрачность функционирования энергосистемы, качественное обслуживание заказчиков и предоставляющая экологические преимущества [5].

Несмотря на то, что понятие интеллектуальная электросеть может толковаться по-разному, очевидно, что интеллектуальная коммуникационная сеть является основой интеллектуальной энергосистемы. Предприятия электроэнергетики вкладывают средства в коммуникационные сети для улучшения

ситуационной осведомленности о ресурсах энергосистемы с целью автоматизации, интеграции систем и управления ими [6].

Ценность интеллектуальной энергии заключается в том, что предприятия электроэнергетики смогут «сгладить» потребность в электроэнергии в моменты максимальной нагрузки, отказаться от использования горячих резервов и снизить потребность в долгосрочных капиталовложениях в создание дополнительных генерирующих предприятий, а также сократить необходимость других инвестиций, например в реорганизацию системы для повышения производительности [7].

Платформу усовершенствованной энергосистемы составляют интеллектуальные элементы, находящиеся на уровне цифровых технологий, которые предприятия электроэнергетики добавляют в традиционную и современную аналоговую инфраструктуру энергетической системы.

В современных энергосистемах наиболее остро стоит проблема обеспечения надежности, безопасности и экономичности энергоустановок на основе организации оперативного управления. Целью этого процесса является бесперебойное снабжение потребителей электроэнергией надлежащего качества, включая задание суточных графиков работы электростанций, ведение текущих режимов, вывод оборудования в ремонт и ликвидацию аварийных состояний энергосистемы [8]. Развитие методов оптимизации позволит решить важную задачу оптимальной организации системы оперативного обслуживания энергосистемы и управления ее структурой как составляющей оперативного управления в рамках клиенто-ориентированного подхода концепции Smart Grid.

Цель исследований – разработка точностных критериев отбора вариантов технической реализации эффективной активно-адаптивной системы оперативного обслуживания элементов энергосистемы в условиях сетецентрического управления.

© Е.И. Сокол, О.Г. Гриб, С.В. Швец

Основные материалы исследований. В развитии энергосистем наблюдается их эволюция от простейших форм, использующих элементарные сетевые технологии и копирующих традиционные модели информационных взаимодействий в энергетике, к более сложным формам в рамках концепции Smart Grid с элементами сетецентрического характера. Это направление основывается на интернет-технологиях последнего поколения, и реализуют модели энергетической деятельности, которые прежде не могли быть реализованы. Существующие научные разработки в этой области пока не сформировали комплексной модели обеспечения безопасности функционирования многоуровневой совокупности программно-технических комплексов оперативно-диспетчерского и автоматического управления энергосистемами с гибкими управляемыми элементами интеллектуальной (активно-адаптивной) сети с увеличением объемов автоматизации и повышением количественных и качественных характеристик сбора, обработки, хранения, распределения информации.

Применительно к энергетике сетецентризм применяется в качестве термина, связанного с оперативным управлением энергосистемой в едином информационно-коммуникационном управленческом пространстве, рассматривающем объединение разнородных объектов, действующих как системным, так и дискретным образом как неких распределенных сегментов единой управленческой сети. В данном случае сетецентричность – принцип организации системы оперативного управления энергосистемой, позволяющий реализовать режим ситуационной осведомленности благодаря формированию и поддержанию единой для всех ярусов управления целостной, контекстной информационной среды и включения в процесс ее непрерывной актуализации возможно большего числа источников первичной информации.

Сетецентрический подход построения информационной системы в электроэнергетике должен быть основан на создании равноправных территориально-распределенных узлов, выполняющих различные функции, и предоставляющий пользователям возможность работы с приложениями и базами данных с помощью браузера из любого места и с любого устройства, подключенного к глобальным телекоммуникационным сетям. Сетецентрическая система должна позволять связывать в единый интерфейс системы и базы данных управления, мониторинга и выработки управляющих решений для их использования различными программными приложениями независимо от местоположения объектов и субъектов управления.

Украинская информационная система требует более высокого уровня структурно-параметрической организации элементов энергосистемы и должна развиваться на основе принципов функционирования больших систем. Однако это требует перестройки не только присоединяемых локальных элементов энергосистемы, но и всей глобальной информационной сети (совокупности распределенных энергетических объектов).

Решение задачи осложняет наличие слабых и в то же время протяженных информационно-управленческих связей на больших территориях, что ограничивает возможность сбора и анализа больших потоков информации. То есть в нашей стране, ее регионах и городах требуется технико-организационное обеспечение качественно нового уровня структурно-параметрической организации элементов энергосистем, в том числе с учетом перспективных задач развития.

Принимая во внимание вышесказанное, в рамках совершенствования структурно-параметрической организации энергосистем на основе активно-адаптивных электрических сетей как основной сетевой инфраструктуры новой электроэнергетики необходимо предусмотреть:

- создание единой адаптивной информационно-управленческой сети в рамках интеллектуальной электроэнергетической системы Украины, в целях устойчивого достижения намеченных стратегических показателей развития электроэнергетики;

- развитие, интеграцию и обеспечение доступности отраслевых баз данных на основе собранной информации и внедрения интеллектуальных электроэнергетических сетей;

- разработку и внедрение комплекса информационного мониторинга, позволяющего планировать и распределять ресурсы по поставленным задачам, а также обеспечивать контроль над достижением результатов с учетом приоритетов территориального управления;

- определение условий, общих принципов, методик регулирования энергетического рынка на основе «Smart Grid – возможностей», обеспечивающих высокую результативность государственного регулирования и рыночного саморегулирования – на базе интеллектуальной электроэнергетической системы Украины с активно-адаптивной сетью энергосистем, позволяющих решать задачи внедрения новых рыночных отношений организационно-хозяйственного характера, включая новые форматы действий энергетических потребителей;

- внедрение механизмов обратной связи между органами государственного управления и энергетическими компаниями на основе принципиально нового класса распределенных интеллектуальных управленческих сред на основе Smart Grid и соответствующих организационных изменений методов управления.

Конкретное внедрение принципа сетецентризма в структурно-параметрическую организацию элементов энергосистем предусматривает выполнение определенных условий. Первое условие – это, прежде всего, наличие устойчивого типа связи у руководителя любого ранга в любой точке, где бы он ни находился в данный момент. Второе условие – должна существовать возможность доступа к информации отклика энергосистемы на текущие изменения ее состояния под воздействием различных факторов. Следующее условие – возможность

повторного воспроизведения для анализа указаний и принятия необходимых решений, для отображения полученной информации в виде различных приложений. Одним словом, информация о состоянии энергосистемы должна быть представлена в виде, удобном для анализа, распознавания, передачи, распределения и хранения.

Сетецентрическая система управления с развитием технической составляющей общих процессов постоянно совершенствуется и развивается. Нужно отметить, что сетецентрической системы управления в полном объеме нет, а есть только элементы этой системы, но они постоянно совершенствуются.

Специфика организации оперативного управления энергосистем подразумевает наличие адаптивного оперативного обслуживания. Среди мероприятий оперативного обслуживания энергосистемы следует выделить комплекс работ по ведению требуемого режима работы элементов энергосистемы, производству переключений, осмотров оборудования, подготовке к производству ремонта, техническому обслуживанию оборудования.

Внедрение сетецентрических принципов управления энергосистемой позволит построить адаптивное оперативное обслуживание на основе концепции «обслуживания системы на основе отклика» (ОСО). Реализация концепции ОСО направлена на обслуживание конкретного объекта (цифровой подстанции, линии электропередачи, подсистемы мониторинга состояния элементов энергосистемы и т.д.), находящегося в конкретном районе и в конкретное время, и который в настоящий момент требует оперативного обслуживания в соответствии с откликом энергосистемы.

Техническая реализация эффективной активно-адаптивной системы оперативного обслуживания энергосистемы (СОЭ), построенной на принципах сетецентризма, базируется на превосходстве систем связи, позволяющих в реальном масштабе времени получать и передавать огромными пакетами информацию различным потребителям, включая централизованную и распределенную передачу. Особенность данной системы заключается еще и в том, что информация висит в системе, и это позволяет обращаться к ней без дополнительных затрат времени.

Система управления, реализуемая в СОЭ, должна базироваться на разработанных и внедренных в практику программных продуктах на интеллектуальном уровне, так называемых единых расчетных моделях (задачах) объединенных в единую систему.

Эти составляющие являются основой постановки задачи на разработку сетецентрической СОЭ и являются краеугольным камнем сетецентризма. В единой совокупности при синтезе СОЭ идут исполнительные цифровые элементы, средства связи, способы и формы применения СОЭ.

Воплощение сетецентрической концепции ОСО в предлагаемой СОЭ неразрывно связано с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА) – квадрокоптера. Это продиктовано быстрым

развитием различных методов диагностики энергетического оборудования, как силового, так и коммутирующего, и оборудования управления и защит в связи с высокой стоимостью прямых и косвенных потерь в результате возникновения аварий.

Развитие современных методов диагностики позволяет с высокой степенью вероятности определить реальное состояние оборудования и спрогнозировать его изменение в ближайшее время. Однако, современная диагностическая аппаратура очень дорога, что затрудняет комплектацию ею каждого объекта. Следует отметить, что правильная организация работ позволяет значительно снизить затраты на диагностику.

Примером такой организации может стать внедрение специальной СОЭ, имеющей в своем составе БПЛА для проведения тепловизионного обследования оборудования подстанций, оптического контроля опорно-стержневой и подвесной изоляции, обследования технического состояния автотрансформаторов и трансформаторов и ряда других работ.

Наличие БПЛА предопределяет способы формирования управленческих решений относительно адаптации структуры энергосистемы к результатам деятельности СОЭ в рамках концепции ОСО. Отсев допустимых вариантов подразумевает применение теории многокритериальной оптимизации с позиции дискретного программирования. Число возможных вариантов обычно достаточно велико и выбрать приемлемое решение путем прямого перебора достаточно сложно. Определим основные положения процедуры отсева вариантов построения СОЭ, которая реализует управленческие решения в рамках принятой ОСО.

Основу данной процедуры составляет алгоритм оценки вариантов СОЭ по критерию точности. В нашем случае именно понятие точности является весьма важным при принятии управленческих решений, так как использование БПЛА в качестве источника информации о состоянии элементов энергосистемы вносит некоторую степень неопределенности.

Точность функционирования СОЭ в целом будем оценивать по значениям величин отклонений выходных переменных от заданных программных значений подсистем n -го уровня, вычисленных в соответствии с уравнениями их состояния в момент времени $t_n + 1 = T$:

$$\Delta y_{nh}^{h\alpha}(v_i) = \left| y_{nh}^{h\alpha}(v_i)_T - y_{nh(0)}^{h\alpha}(T) \right|,$$

$$(h \in I_n, \alpha = 1, \dots, \alpha_{nh}^h),$$

где $y_{nh}^{h\alpha}(v_i)_T$ – значение α -й компоненты выходной переменной h -й подсистемы n -го уровня СОЭ в момент времени T для варианта $v_i \in V$; $y_{nh(0)}^{h\alpha}(T)$ – заданное программное значение выходной переменной подсистемы n -го уровня СОЭ; $\Delta y_{nh}^{h\alpha}(v_i)$ – величина отклонения выходной переменной подсистемы n -го уровня СОЭ.

При этом множество вариантов технической реализации проектируемой СОЭ определяется как:

$$V = \{v_i\} = \prod_{i=1}^M V_i.$$

Значения выходных переменных подсистем n -го уровня СОЭ зависят от видов законов управления, определяемых стратегией ОСО; от точностных характеристик элементов технической реализации соответствующего закона управления, определяемых множеством I_n (для $h \in I_n$) подсистем n -го уровня СОЭ; выходных переменных $y_{n-k} = (t_n)$ подсистем $n-k$ -ых уровней $\forall k \in K_{nh}$. Переменные $y_{n-k} = (t_n)$ также зависят от точностных характеристик элементов технической реализации закона управления подсистемы $n-k$ -го уровня выходных переменных предшествующего уровня СОЭ. Поэтому точность функционирования всей системы в целом зависит от работы подсистем всех уровней, т.е. от вариантов множества V .

Возможны два случая оценки точностной характеристики системы: первый – когда необходимо найти вариант системы $v_i \in V$, минимизирующий величину $\Delta y_{nh}^{h\alpha}(v_i)$, второй – когда эта величина не должна быть больше заданной:

$$\Delta y_{nh}^{h\alpha}(v_i) \leq \varepsilon_{nh}^{h\alpha}, \quad (h \in I_n, \alpha = 1, \dots, \alpha_{nh}^h), \quad (1)$$

где $\varepsilon_{nh}^{h\alpha}$ – неотрицательная величина, характеризующая степень близости α -й выходной координаты h -й подсистемы n -го уровня СОЭ и ее программного значения.

Более подробно рассмотрим второй случай, так как при проектировании обычно задаются некоторые ограничения на компоненты выходных переменных подсистем, функционирующих на последнем промежутке времени.

Пусть каждый q -й тип элементов технической реализации СОЭ характеризуется номинальным значением параметра p_q^0 и множеством $\Delta p_{q(\zeta_q)}$ ($\zeta_q \in 1, \dots, \zeta_q^0$) возможных вариантов этого параметра, определяемых различными модификациями множества $E_q(\Delta p_q) = \{\Delta p_{q(\zeta_q)} \forall \zeta_q \in 1, \dots, \zeta_q^0\}$. Тогда отдельному варианту реализации СОЭ будет соответствовать таблица заданных погрешностей:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta p_{1(1)}, \dots, \Delta p_{1(\zeta_1)}, \dots, \Delta p_{1(\zeta_1^0)} \\ \dots \\ \Delta p_{q(1)}, \dots, \Delta p_{q(\zeta_q)}, \dots, \Delta p_{q(\zeta_q^0)} \\ \dots \\ \Delta p_{m(1)}, \dots, \Delta p_{m(\zeta_m)}, \dots, \Delta p_{m(\zeta_m^0)} \end{array} \right\}.$$

Обозначим вектор параметров размерности $q_{il}(\zeta_i)$ через

$$p_{il}(\zeta_i) = \{p_q^0 \pm \Delta p_q \forall q \in I_{il}(\zeta_i)\},$$

соответствующий элементам технической реализации СОЭ множества $I_{il}(\zeta_i)$ для закона управления $u_{il}(\zeta_i)$.

Решение системы дифференциальных уравнений для l -й подсистемы i -го уровня запишем в виде:

$$y_{il}^j(t, v_j^{il}) = F_{il}^j(\zeta_i)(u_{il}(\zeta_i)(t), p_{il}(\zeta_i), y_{il}^j(0)) \quad (2)$$

$$(k \in K_{il}, q \in I_{i-k}^l),$$

где через v_j^{il} обозначена часть варианта $v_j \in V$, от которого зависит значение выходной переменной l -й подсистемы i -го уровня; $y_{il}^{j\alpha} = y_{i-k,q}^{l\alpha}(t_i)$ ($k \in K_{il}$) – начальные условия для исходных дифференциальных уравнений, являющиеся значениями выходных переменных подсистемы $i-k$ -ых уровней $\forall k \in K_{il}$, связанных l -й подсистемой i -го уровня ($\alpha = 1, \dots, \alpha_{il}^j$); $F_{il}^j(\zeta_i)$ – векторная функция, компоненты которой есть непрерывные функции своих аргументов, принадлежащие классу задач дискретной оптимизации.

Компоненты векторной функции $F_{il}^j(\zeta_i)$ имеют отличные от нуля первые производные в некоторой окрестности точки $(y_{i-k,q}^l(t_i), p_{il}(\zeta_i)(0))$, определяемой номинальными значениями параметров и начальных условий. Необходимо из множества возможных вариантов создания СОЭ $v_i \in V$, которые характеризуются как видами законов управления в каждой из подсистем, так и погрешностями элементов технической реализации, отобрать такие, которые удовлетворяют критерию (1).

Непосредственное построение всех вариантов множества V с оценкой их по точностному критерию (1) приводит к необходимости интегрировать систему исходных дифференциальных уравнений и получать решения типа (2) для всех подсистем. Это связано с большим объемом вычислений, что не позволяет выбрать приемлемый вариант системы в заданные сроки. В связи с этим возникает необходимость разработки правил предварительного отсева как видов законов управления в соответствии со стратегией ОСО, так и элементов технической реализации СОЭ. Это связано с необходимостью декомпозиции требований на всю систему в целом, определяемых соотношением (1), к требованиям на отдельные подсистемы вида:

$$\Delta y_{il}^{j\alpha} = \left| y_{il}^{j\alpha}(v_j^{il}) \Big|_{t_{i+1}} - y_{il}^{j\alpha}(t+1) \right| \leq \varepsilon_{il}^{j\alpha}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{il}^{j\alpha}$ – степень близости α -й компоненты выходной переменной l -й подсистемы i -го уровня; $y_{il}^{j\alpha}(v_j^{il}) \Big|_{t_{i+1}}$ – определяется из уравнений, описывающих поведение l -й подсистемы i -го уровня.

Для такой декомпозиции необходимо получить соотношения, связывающие точность функционирования отдельной подсистемы с вариациями параметров ОСО, а также с точностными характеристиками подсистем нижних уровней, влияющих на эту подсистему.

Для того чтобы выходные переменные каждой l -й подсистемы i -го уровня, описываемые векторной функцией, компонентами которой являются

непрерывно дифференцируемые выпуклые или вогнутые функции, определенные на некотором множестве параметров $P_{il}(\zeta_l)$ и начальных условий

$y_{il}^j(0)$, удовлетворяли ограничениям вида (3), достаточно, чтобы отклонения вектора параметров и начальных условий от номинальных значений

$$P_{il}(\zeta_l)(0) = \{P_{il}^q(\zeta_l)(0)\} \quad (q = 1, \dots, q_{il}(\zeta_l)),$$

$$y_{il}^j(0) = \{y_{il}^{j\alpha}(0)\} \quad (\alpha = 1, \dots, \alpha_{il}^j),$$

удовлетворяли неравенствам

$$\Delta p_{il}^q(\zeta_l) = |P_{il}^q(\zeta_l) - P_{il}^q(\zeta_l)(0)| \leq \varepsilon_{il}^q(\zeta_l); \quad (q = 1, \dots, q_{il}(\zeta_l)),$$

$$\Delta y_{il}^{j\alpha} = |y_{il}^{j\alpha} - y_{il}^{j\alpha}(0)| \leq \varepsilon_{il}^{j\alpha}; \quad (\alpha = 1, \dots, \alpha_{il}^j),$$

где $\varepsilon_{il}^q(\zeta_l); (q = 1, \dots, q_{il}(\zeta_l))$ и $\varepsilon_{il}^{j\alpha}; (\alpha = 1, \dots, \alpha_{il}^j)$ – принадлежат области:

$$D_{il}(\zeta_l) = \bigcap_{\alpha=1}^{\alpha_{il}^j} D_{il}^{\alpha}(\zeta_l),$$

в которой $D_{il}^{\alpha}(\zeta_l)$ – выпуклая область пространства переменных $\Delta p_{il}(\zeta_l)$ и $\Delta y_{i-k,q}^p$, образованная пересечением $2^{\alpha_{il}^j + q_{il}(\zeta_l)}$ полупространств:

$$\sum_{q \in J_{il}(\zeta_l)} \frac{\Delta p_q}{\delta_{il}^{\alpha q}(\zeta_l)} + \sum_{q \in I_{i-k}^{\alpha}(\zeta_l)} \sum_{\lambda=1}^{\alpha_{i-k,q}^{\lambda}} \frac{\Delta y_{i-k,q}^{\lambda}}{\delta_{il}^{\alpha \lambda}(\zeta_l)} \leq 1,$$

$$\sum_{q \in J_{il}(\zeta_l)} \frac{\Delta p_q}{\gamma_{il}^{\alpha q}(\zeta_l)} + \sum_{q \in I_{i-k}^{\alpha}(\zeta_l)} \sum_{\lambda=1}^{\alpha_{i-k,q}^{\lambda}} \frac{\Delta y_{i-k,q}^{\lambda}}{\gamma_{il}^{\alpha \lambda}(\zeta_l)} \leq 1.$$

Здесь

$$\delta_{il}^{\alpha r}(\zeta_l) = \begin{cases} \tilde{\delta}_{il}^{\alpha r}(\zeta_l), & \text{if } y_{r(+)}^{\alpha} \leq y_{il(0)}^{j\alpha} + \varepsilon_{il}^{j\alpha}, \\ \tilde{\gamma}_{il}^{\alpha r}(\zeta_l) = \frac{\varepsilon_{il}^{j\alpha} \tilde{\delta}_{il}^{\alpha r}(\zeta_l)}{y_{il(0)}^{j\alpha} - y_{r(+)}^{\alpha}}, & \\ \text{if } y_{r(+)}^{\alpha} > y_{il(0)}^{j\alpha} + \varepsilon_{il}^{j\alpha}, & \end{cases} \quad (5)$$

а величина $\gamma_{il}^{\alpha r}(\zeta_l)$ определяется как:

$$\gamma_{il}^{\alpha r}(\zeta_l) = \begin{cases} -\delta_{il}^{\alpha r}(\zeta_l), & \text{if } y_{r(-)}^{\alpha} \leq y_{il(0)}^{j\alpha} + \varepsilon_{il}^{j\alpha}, \\ \frac{\varepsilon_{il}^{j\alpha} \tilde{\delta}_{il}^{\alpha r}(\zeta_l)}{y_{r(-)}^{\alpha} - y_{il(0)}^{j\alpha}}, & \text{if } y_{r(-)}^{\alpha} > y_{il(0)}^{j\alpha} + \varepsilon_{il}^{j\alpha}, \end{cases} \quad (6)$$

$$\tilde{\delta}_{il}^{\alpha r}(\zeta_l) = -\frac{\varepsilon_{il}^{j\alpha}}{h_{il}^{\alpha r}}, \quad (7)$$

$$y_{r(+)}^{\alpha} = y_{il}^{j\alpha}(P_1(0), \dots, P_{r-1}(0), P_r + \tilde{\delta}_{il}^{\alpha r}(\zeta_l), P_{r+1}(0), \dots, y_{il}^j(0)) \quad \forall r \in 1, \dots, q_{il}(\zeta_l) + \alpha_{il}^j, \quad (8)$$

$$y_{r(-)}^{\alpha} = y_{il}^{j\alpha}(P_1(0), y_{il}^1(0), \dots, y_{il}^{j,r-1}(0), y_{il}^{jr}(0) - \tilde{\delta}_{il}^{\alpha r}(\zeta_l), y_{il}^{j,r+1}(0), \dots) \quad \forall r \in 1, \dots, q_{il}(\zeta_l) + \alpha_{il}^j, \quad (9)$$

$$h_{il}^{\alpha r} = \left. \frac{\partial y_{il}^{j\alpha}}{\partial p^r} \right|_0 \quad \forall r \in 1, \dots, q_{il}(\zeta_l) + \alpha_{il}^j. \quad (10)$$

Системы неравенств (4) строятся путем последовательной замены в первом неравенстве величины δ на величину γ вначале в одном члене, затем в двух и т.д. Через величину $y_{r(+)}^{\alpha}$ обозначены значения выходной переменной, когда значения параметров или начальных условий увеличены на величину $\tilde{\delta}_{il}^{\alpha r}(\zeta_l)$, а $y_{r(-)}^{\alpha}$ – уменьшены на эту же величину. Через $h_{il}^{\alpha r}$ обозначены функции чувствительности выходных переменных по параметрам и начальным условиям в номинальных точках.

Область $D_{il}(\zeta_l)$ допустимых вариаций параметров и начальных условий рассмотрим в положительном органте (из-за симметричной формы задания ограничений на вариации параметров $\Delta p_{il}(\zeta_l)$ и начальных условий $\Delta y_{il}^j(0)$). Она определяется неравенствами (4) и запишется в виде:

$$D_{il}(\zeta_l) = \bigcap_{\alpha=1}^{\alpha_{il}^j} D_{il}^{\alpha}(\zeta_l),$$

где

$$D_{il}^{\alpha}(\zeta_l) : \sum_{q \in J_{il}(\zeta_l)} \frac{\Delta p_q^{\alpha}(\zeta_l)}{a_{il}^{\alpha q}(\zeta_l)} + \sum_{\lambda=1}^{\alpha_{il}^j} \frac{\Delta y_{il}^{j\lambda}}{a_{il}^{\alpha \lambda}(\zeta_l)} \leq 1,$$

$$a_{il}^{\alpha r}(\zeta_l) = \min\{|\delta_{il}^{\alpha r}(\zeta_l)|, |\gamma_{il}^{\alpha r}(\zeta_l)|\}; \quad (r = 1, \dots, q_{il}(\zeta_l) + \alpha_{il}^j),$$

а величины $\delta_{il}^{\alpha r}(\zeta_l)$ и $\gamma_{il}^{\alpha r}(\zeta_l)$ определяются соотношениями (5), (6).

На основе приведенных соотношений сформируем условие отсева вариантов СОЭ для действующей ОСО.

Если закон управления $u_{i-k,q}(\zeta_l)$ q -й подсистемы $i-k$ -го уровня при номинальных значениях параметров приводит к таким вариациям выходных переменных $\Delta y_{i-k}^l(\zeta_l)$, которые не принадлежат области:

$$D_{il}^{(0)} = \bigcup_{\zeta_l=1}^{\xi_{il}} D_{il}(\zeta_l),$$

при минимальных вариациях параметров законов управления $u_{il}(\zeta_l) \in U_{il}$, т.е.:

$$\Delta y_{i-k}^l(\zeta_l) \notin D_{il}^{(0)} = \bigcup_{\zeta_l=1}^{\xi_{il}} D_{il}(\zeta_l) | \Delta p_{il}(\zeta_l)_{\min}, \quad (11)$$

то он не будет образовывать вариантов системы с законами управления из множества U_{il} , удовлетворяющими неравенству (3).

Выводы. Таким образом, в условиях сетечентрической организации управления оперативного обслуживания энергосистемы отсева

вариантов подсистем i - k -го уровня $\forall k \in K_{il}$ при проверке условия (11) позволяет получить максимальное число принципиально возможных вариантов создания СОЭ с учетом принятой ОСО за счет сужения множества вариантов технической реализации l -й подсистемы i -го уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Smart Grid – Концептуальные положения // Энергорынок. – 2010. – №3(75) – С. 67-72.
2. Шидловський А.К., Випанасенко С.І., Ворохов Л.П. Тенденції розвитку енергетики України: Навчальний посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2005. – 104 с.
3. Кириленко О.В., Денисюк С.П., Рибіна О.Б., Баталов А.Г. Перспективи інтеграції ОЕС України в європейську систему УСТЕ // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2006. – Ч.1. – С. 63-68.
4. Бойцов Ю.А., Васильев А.П. Решение задачи рациональной организации системы оперативного обслуживания электрических сетей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2008. – № 1-2. – С. 56-63.
5. Бурмистров В.Н., Дрогунов С.В. Перспективные инновационные направления развития энергетики // Электрика. – 2011. – №5. – С. 9-12.
6. Massel L.V., Ivanov R.A. Possibility of application of situational awareness in energy research / Proceedings of the Workshop on Computer Science and Informational Technologies (CSIT-2010), Russia, Moscow – St.Petersburg, 13-19 September, 2010. – vol.1, Ufa State Aviation Technical University, 2010. – pp. 185-187.
7. Новини та пріоритети розвитку енергетики: дайджест // Новини енергетики. – 2005. – № 9. – С. 50.
8. Титов Н.Н. Повышение надежности и качества функционирования автоматизированных систем диспетчерского управления электроэнергетическими системами. – Х.: Факт, 2013. – 200 с.

REFERENCES

1. Kobets B.B., Volkov I.O. Smart Grid – Conceptual provisions. *Energorynok – Energy Market*, 2010. no.3(75), pp. 67-72. (Rus).
2. Shidlovskii A.K., Vypanasenko S.I., Vorohov L.P. *Tendentsiyi rozvytku enerhetyky Ukrayiny* [Trends in Energy Ukraine]. Donetsk, National Mining University Publ., 2005. 104 p. (Ukr).
3. Kirilenko O.V., Denysyuk S.P., Rybina O.B., Batalov A.G. Features Integration of IPS Ukraine into the European system USTE. *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vypusk «Silova elektronika i energoefektivnist» – Technical electrodynamics. Thematic issue «Power electronics & energy efficiency»*, 2006, vol.1, pp. 63-68. (Ukr).
4. Bojtsov Y.A., Vasiljev A.P. The solution of a problem of rational architecture of system of operative service of electrical networks. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki – Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*, 2008, no.1-2, pp. 56-63. (Rus).
5. Burmistrov V.N., Drogunov S.V. Perspective innovative directions of development of power. *Elektrika – Electrics*, 2011, no.5, pp. 9-12. (Rus).
6. Massel L.V., Ivanov R.A. Possibility of application of situational awareness in energy research. *Proceedings of the Workshop on Computer Science and Informational Technologies (CSIT-2010)*, Russia, Moscow – St.Petersburg, 13-19 September, 2010. Vol.1, Ufa State Aviation Technical University, 2010. pp. 185-187.
7. News and priorities of energy: Digest. *Novyny enerhetyky – News energy*, 2005, no.9, p. 50. (Ukr).

8. Titov N.N. *Povyshenie nadezhnosti i kachestva funkcionirovaniia avtomatizirovannykh sistem dispetcherskogo upravleniia elektroenergeticheskimi sistemami* [Increase of reliability and quality of functioning of the automated systems of dispatching management of electrical power systems]. Kharkiv, Fact Publ., 2013. 200 p. (Rus).

Поступила (received) 29.03.2016

Сокол Евгений Иванович¹, д.т.н., проф.,
Гриб Олег Герасимович¹, д.т.н., проф.,
Швец Сергей Викторович², к.т.н., доц.,
¹ Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
² Харьковский национальный университет
городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,
61002, Харьков, ул. Маршала Бажанова, 17,
тел/phone +38 067 7680838, e-mail: se_sx@bk.ru

Ye.I. Sokol¹, O.G. Gryb¹, S.V. Shvets²

¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

² O.M. Beketov National University of Urban Economy
in Kharkiv,
17, Marshal Bazhanov Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Network centrism optimization of expeditious service of elements of the power supply system.

Purpose. Development of precision selection criteria of options of technical realization of effective active and adaptive system of expeditious service of elements of a power supply system in the conditions of network-centric management. **Methodology.** In development of power supply systems their evolution from the elementary forms using elementary network technologies and models of interactions in power to more irregular shapes within the concept of Smart Grid with elements of network-centric character is observed. This direction is based on Internet-technologies of the last generation, and realize models of power activity which couldn't be realized before. **Results.** The number of possible options of active and adaptive system of expeditious service of elements of a power supply system is usually rather big and it is difficult to choose the acceptable option by direct search. Elimination of admissible options of the technical realization constructed on the principles of a network centrism means application of the theory of multicriteria optimization from a position of discrete programming. The basis of procedure of elimination is made by algorithm of an assessment of system by criterion of accuracy. **Originality.** The case of an assessment of the precision characteristic of system at restrictions for the set accuracy is connected with need of decomposition of requirements of all system in general and on separate subsystems. For such decomposition the ratios connecting the accuracy of functioning of a separate subsystem with variations of parameters of all system, and also with precision characteristics of subsystems of the lower levels influencing this subsystem are received. **Practical value.** In the conditions of the network-centric organization of management of expeditious service of elements of a power supply system elimination of options of subsystems when using precision criterion allows to receive the maximum number of essentially possible options of system of service taking into account the accepted service strategy. References 8.

Key words: network-centric managements, precision criterion, expeditious service, element of technical realization, output variable of a subsystem.

00008

Матеріали приймаються за адресою:

Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПІ", вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна

Електронні варіанти матеріалів по e-mail: a.m.grechko@mail.ru

Довідки за телефонами: +38 050 653 49 82 Клименко Борис Володимирович

+38 067 359 46 96 Гречко Олександр Михайлович

Передплатний індекс: 01216

