

**науково-практичний
журнал**

2015/6



ЕІЕ **Електротехніка і 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

Дискусії

Ювілеї

**За 2013р. журнал отримав індекс 6,11
від міжнародної наукометричної бази
Index Copernicus**



«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

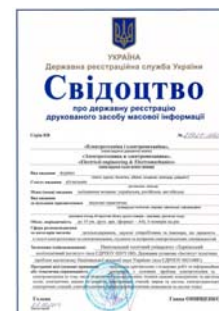
Видання засновано Національним технічним університетом

«Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») у 2002 р.

Співзасновник – Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму

Національної академії наук України» (ДУ «ІТПМ НАНУ»)

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



ELEKTROTEKHNIKA I ELEKTROMECHANIKA – ELEKTROTEHNİKA İ ELEKTROMECHANİKA – 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
Biró 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"
Veprik Yu.M. Professor, NTU "KhPI"
Gryb O.G. Professor, NTU "KhPI"
Guryn 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. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна
Dept. of Electrical Apparatus, NTU "KhPI", Frunze Str., 21, Kharkiv, 61002, Ukraine

тел. / phone: +38 057 7076281, +38 067 359 46 96, e-mail: a.m.grechko@mail.ru (Гречко Олександр Михайлович / Grechko O.M.)

ISSN (print) 2074-272X

ISSN (online) 2309-3404

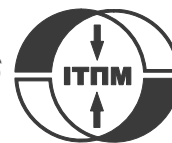
© Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", 2015
© ДУ "Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України", 2015

Підписано до друку 17.11.2015 р. Формат 60 x 90 %. Папір – офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,25.

Наклад 200 прим. Зам. № 66/172-06-2015. Ціна договірною.

Дизайн та оформлення обкладинки Вировець Л.П. e-mail: vsy_2007@ukr.net

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



ЗМІСТ

Електротехніка. Визначні події. Славесні імена

Баранов М.І. Антологія видасючихся досагненій в науке и технике. Часть 29: Первооткрыватели тайн глобальных природных световых явлений..... 3

Електричні машини та апарати

Будашко В.В. Імплементарний підхід при моделюванні енергетических процесов динамически позиціонуєщого судна..... 14
Голєнков Г.М., Пархоменко Д.І. Моделювання еквівалентной жєсткости магнитной пружини вибровозбудителя на основе коаксально-линейного двигателя..... 20
Милых В.І., Полякова Н.В. Автоматизированные расчєты в программной среде FEMM динамики электромагнитных процесов турбогенераторов..... 24
Пєтєгов І.В., Рымар С.В., Levin M.I., Lavreniuk A.V. Опредєление магнитных индукций в магнитопроводах силовых трансформаторов при совместном использовании анизотропной и изотропной электротехнических сталей..... 31

Електротехнічні комплекси та системи. Силова електроніка

Жємеров Г.Г., Тугай Д.В. Физический смысл понятия «реактивная мощность» применительно к трехфазным системам электроснабжения с нелинейной нагрузкой..... 36

Техніка сильних електричних та магнітних полів. Кабельна техніка

Антонєць Т.Ю., Вєприк Ю.М., Щєбенюк Л.А. Дослідження нагрівання силових кабелів із зшитото поліетиленовою ізоляцією на напругу до 110 кВ..... 43
Баранов М.І., Рудаков С.В. Разработка новых схем резистивной защиты высоковольтных конденсаторов мощных емкостных накопителей энергии от аварийных токов..... 47
Чаплыгин Е.А. Анализ процесов в индукторной системе с притягивающим экраном, возбуждаемой внешним круговым соленоидом..... 53

Електричні станції, мережі і системи

Вєприк Ю.Н., Небера О.А. Унифицированные модели элементов систем электроснабжения на основе уравнений в фазных координатах..... 56
Gryb O.G., Gapon D.A., Ierusalimova T.S., Borodin D.V., Diachenko A.V. Monitoring of electrical energy quality on the traction substation input 61

Дискусії

Gurevich V. Problems in testing digital protective relay for immunity to intentional destructive electromagnetic impacts. Continuation of the theme..... 66

Ювілеї

Райнин Валерий Ефимович (к 75-лєтєю со дня рождения)..... 70
Розов Володимир Юрійович (до 70-річчя з дня народження)..... 71
Національному технічному університету «Харківський політехнічний інститут» – 130 років..... 72

TABLE OF CONTENTS

Electrical Engineering. Great Events. Famous Names

Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 29: Discoverers of secrets of global natural light phenomena 3

Electrical Machines and Apparatus

Budashko V.V. Implementation approaches during simulation of energy processes for a dynamically positioned ship 14
Golenkov G.M., Parkhomenko D.I. Modeling of equivalent stiffness of a magnetic spring of vibration exciter based on coaxial-linear motor..... 20
Milykh V.I., Polyakova N.V. Automated calculations of the dynamics of turbogenerator electromagnetic processes in software environment FEMM..... 24
Pentegov I.V., Ryamar S.V., Levin M.I., Lavreniuk A.V. A determination of the flux density in core of distribution transformers, what built with the common using of grain and non grain oriented magnetic steels..... 31

Electrotechnical Complexes and Systems. Power Electronics

Zhemerov G.G., Tugay D.V. Physical meaning of the «reactive power» concept applied to three-phase energy supply systems with non-linear load 36

High Electric and Magnetic Field Engineering. Cable Engineering

Antonets T.Yu., Vepryk Yu.M., Shchebeniuk L.A. Heat tests of power cables with XLPE insulation at direct voltages up to 110 kV	43
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	47
Chaplygin E.A. Analysis of the processes in an inductor system with an attracting screen excited by the external circular solenoid	53

Power Stations, Grids and Systems

Vepryk Yu.N., Nebera O.A. Unified models of elements of power supply systems based on equations in phase coordinates	56
Gryb O.G., Gapon D.A., Ierusalimova T.S., Borodin D.V., Diachenko A.V. Monitoring of electrical energy quality on the traction substation input	61

Discussions

Gurevich V. Problems in testing digital protective relay for immunity to intentional destructive electromagnetic impacts. Continuation of the theme	66
---	----

Anniversaries

Rainin Valeriy Efimovich (on the 75th anniversary of his birth)	70
Rozov Volodymyr Yuriiovych (on the 70th anniversary of his birth)	71
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» – 130 years	72

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 постановою президії ВАК України від 10 лютого 2010 р. № 1-05/1. 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/>).

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, Российский Индекс Научного Цитирования – РИНЦ (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.urau.ua/>). Статті, оформлені згідно з Вимогами, будуть публікуватися у першу чергу.

М.И. Баранов

АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 29: ПЕРВООТКРЫВАТЕЛИ ТАИН ГЛОБАЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ СВЕТОВЫХ ЯВЛЕНИЙ

Наведено короткий науково-історичний нарис про розкриття вітчизняними і зарубіжними вченими-першопроходцями електрофізичних і електрохімічних таємниць ряду природних світлових явищ, що носять для людства глобальний планетарний характер і які супроводжують протікання в навколосезному атмосферному просторі полярного сяйва, веселки і фотосинтезу. Бібл. 31, рис. 15.

Ключові слова: історія, планета Земля, полярне сяйво, веселка, фотосинтез, видатні наукові досягнення.

Приведен краткий научно-исторический очерк про раскрытие отечественными и зарубежными учеными-первопроходцами электрофизических и электрохимических тайн ряда природных световых явлений, носящих для человечества глобальный планетарный характер и сопровождающих протекание в околоземном атмосферном пространстве полярного сияния, радуги и фотосинтеза. Библ. 31, рис. 15.

Ключевые слова: история, планета Земля, полярное сияние, радуга, фотосинтез, выдающиеся научные достижения.

Введение. С появлением и прогрессивным развитием на нашей планете наук ученые-естествоиспытатели стали активно трудиться над разгадкой тайн многих явлений, протекающих в околоземном пространстве. К числу таких физических явлений на первых этапах изучения ими природы, прежде всего, относились те, которые человеком-исследователем можно было наблюдать в земной атмосфере невооруженным глазом. Позже любознательных людей и специалистов стали интересовать физико-химические процессы, протекающие в растительном мире на микро- и макроуровнях и сопровождающие рост и развитие земной флоры. Они понимали, что в этих процессах определяющим внешним фактором является дневной свет, несущий с собой поток энергии. Каким образом этот природный энергетический поток приводит к рождению в клетках растений их строительного материала – углеводов (явление **фотосинтеза** [1]) ученым предстояло еще выяснить и подробно изучить. Аналогичные вопросы перед людьми вставали при наблюдении ими во время или после дождя в дневной атмосфере и другого не менее завораживающего человеческого взор цветного зрелища – **радуги**. Было ясно, что и здесь основной причиной подобного природного явления являются солнечные лучи света. Своей научной разгадки требовало и наблюдаемое людьми в течение столетий за полярными кругами (параллелями, отстоящими на север и юг от земного экватора на $66^{\circ}33'$ [1]) и другое красочное природное световое явление – **полярное сияние**, возникающее в земной атмосфере преимущественно в северных и южных приполярных областях Земли в виде быстро меняющегося многократного свечения отдельных участков ночного неба.

1. Краткие сведения о «солнечном ветре». В современной астрофизике под **«солнечным ветром»** (англ. название – **«solar wind»**) понимается поток суперинионизированных частиц (в основном от гелиево-водородной плазмы), быстро истекающий из солнечной короны со скоростью (300-1200) км/с в окружающее космическое пространство [2]. Он (этот «ветер») является одним из основных компонентов межпланетной среды в Солнечной системе. Читателю

не следует путать понятия «солнечный ветер» (поток ионизированных частиц, долетающий от Солнца до Земли за 2-3 земных суток) и «солнечный свет» (поток фотонов, долетающий от Солнца до Земли за примерно 8 мин. 16 сек.) [2]. На рис. 1 приведено в упрощенном виде изображение «солнечного ветра», воздействующего на земную магнитосферу, имеющую размер по радиусу около 70 тыс. км [3]. Сейчас в отношении иных звезд Вселенной широко употребляется термин «звёздный ветер». В этой связи по отношению к «солнечному ветру» можно говорить о том, что это «звёздный ветер Солнца» [2]. В настоящее время учеными-астрофизиками установлено, что многие природные физические явления на Земле связаны с «солнечным ветром» (в том числе и такие явления космической погоды как геомагнитные бури и полярные сияния) [4]. Напомним, что геомагнитная буря – возмущение магнитного поля Земли (по индукции до 1 мкТл при геомагнитном поле на земном экваторе до 50 мкТл и земных полюсах до 90 мкТл) длительностью от нескольких часов до нескольких суток [4]. Небезынтересно, что из-за «солнечного ветра» наше космическое светило – Солнце теряет каждую секунду до четырех миллионов тонн вещества [2].

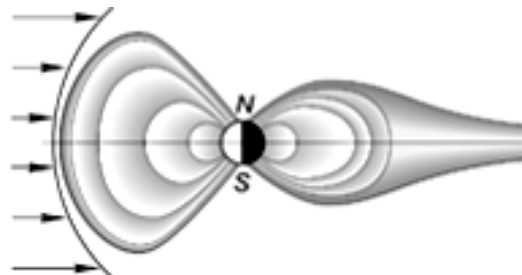


Рис. 1. Схематическое изображение потока «солнечного ветра» (показан слева стрелками) и магнитосферы Земли [2]

К указанному выше следует добавить, что около 20-ти лет тому назад ученые-астрофизики предположили, что в космосе есть ветер – **«космический ветер»**. И вот совсем недавно ученые из Европейского союза наук о Земле (EGO) обнаружили «плазматический ветер», который способствует утечке материала

© М.И. Баранов

из плазмосферы Земли – области космоса, расположенной над земной атмосферой [2, 4]. Исследователи из EGO с помощью космического аппарата *Cluster* в 2010 году обнаружили медленный, но устойчивый «ветер», который надувает (вносит) около 90 т плазмы во внешнюю магнитосферу Земли каждый день. Причем, это движение плазмы в сторону нашей планеты происходит постоянно, даже когда биполярное магнитное поле Земли не бомбардируется «солнечным ветром» – энергетическими частицами (ионами, протонами, электронами и др.), исходящими от Солнца. Отметим, что плазмосфера Земли – самое важное хранилище плазмы в магнитосфере нашей планеты, играющее важную роль в управлении поясами радиации Земли, которые опасны как для спутников, так и астронавтов (космонавтов), пролетающих через них [4].

При рассмотрении указанных «космического и солнечного ветров» нам не следует забывать и о *космических лучах* [1, 2], приходящих на Землю из необъятного космического пространства нашей Вселенной и представляющих собой поток элементарных частиц сверхвысоких энергий (до $10^{15} - 10^{18}$ эВ, что в миллионы раз больше энергии заряженных частиц – протонов, ускоряемых ныне физиками в самом мощном ускорителе мира – Большом адронном коллайдере), состоящий главным образом из атомных ядер и протонов (*первичное излучение*). Это излучение создает в атмосфере Земли *вторичное излучение*, включающее в себя все известные нам элементарные частицы [5-7]. Открыты космические лучи были в 1912 году В.Ф. Гессом в опытах по исследованию ионизированных газов, проводимых в Радиовом институте Австрии (г. Вена) и связанных с подъёмом в атмосфере Земли на воздушном шаре детектора ионизации [8]. При подъёме на воздушном шаре данного детектора-электроскопа он обнаружил, что по мере увеличения высоты над Землей растёт и ионизация атомов воздуха, регистрируемая его прибором. Такой рост ионизации с высотой мог быть вызван только высокоэнергетическими частицами внеземного происхождения. За данное научное открытие в 1936 году австрийскому физiku Виктору Гессу была присуждена Нобелевская премия по физике [7]. В 1947 году Ф. Хойлом была выдвинута гипотеза, что источником космических лучей являются сверхновые звезды (позже к этому пришли также Д. Тер Хаар и С. Хаякава) [7, 9]. На комплексное изучение возникающих каскадов вторичных частиц в земной атмосфере, вызванных космическими лучами сверхвысоких энергий, была направлена в бывшем СССР и ныне в Российской Федерации деятельность одной из сильнейшей в мире научной школы физиков-ядерщиков, сформировавшейся в середине 20-го столетия в МГУ им. М.В. Ломоносова и возглавляемой в то время академиком АН СССР Дмитрием Владимировичем Скобельцыным [7, 8].

Здесь следует отметить и то, что впервые поток плазмы солнечного происхождения («солнечный ветер») был зарегистрирован аппаратурой советской космической станции «Луна-1» в 1959 году, а полученные на ней научные данные были обработаны в Институте космических исследований АН СССР Константином Грингаузом [10]. Существование постоянного

истечения плазмы из короны Солнца было экспериментально установлено также в результате многомесячных измерений, выполненных аппаратурой американской автоматической межпланетной станции «Маринер-2» в 1962 году (данные этой станции были представлены в печати Марсией Нейгебауэр) [10].

2. Краткие сведения о солнечном излучении.

Известно, что Солнце, отстоящее от Земли примерно на 150 млн. км, состоит из водорода (71 %), гелия (27 %) и твердой материи (2 %) [11]. Плотность вещества Солнца составляет около 1408 кг/м^3 . Температура вблизи солнечного ядра составляет примерно $16 \cdot 10^6 \text{ К}$, а на его поверхности (фотосфере) – около 5770 К [5, 11]. Мощность лучистой энергии, излучаемой Солнцем, приблизительно составляет 63 МВт с каждого квадратного метра его поверхности [11]. Поэтому его полная мощность составляет около $3,72 \cdot 10^{20} \text{ МВт}$. Плотность потока мощности *солнечного излучения*, достигающего атмосферы Земли, составляет в среднем $1,367 \text{ кВт/м}^2$ [11]. Эту величину принято называть солнечной постоянной [5]. Различные процессы внутри Солнца и на его поверхности (например, солнечные пятна и вспышки) приводят к флуктуациям этой величины, не превышающим 0,1 % [11]. За счет Солнца на нашу планету поступает 99,98 % всей необходимой для существования на ней биологической жизни энергии (остальная энергия – геотермальная) [11]. В безоблачный день плотность потока мощности солнечного излучения, достигающего земной поверхности в местный полдень, обычно находится в интервале от 700 до 1300 Вт/м^2 в зависимости от широты, долготы, высоты над уровнем моря и времени года [11]. Солнечное излучение включает в себя ультрафиолетовое излучение, видимый свет и ближнее инфракрасное излучение. Максимальная интенсивность солнечного излучения приходится на диапазон видимого спектра (излучение с длиной электромагнитной волны от 400 до 800 нм [5]). Интенсивность ультрафиолетового и инфракрасного излучения, приходящего на Землю от Солнца, очень мала. При прохождении через земную атмосферу одна часть солнечного излучения рассеивается молекулами газов, аэрозольными частицами, каплями воды и кристаллами льда, а другая его часть достигает поверхности Земли. Молекулы газов и аэрозоли отвечают за большую часть поглощения солнечного излучения в земной атмосфере. Рассеивание солнечного излучения на каплях воды и кристаллах льда происходит во всем спектральном диапазоне. Молекулы же в основном рассеивают солнечное излучение коротких длин волн, а аэрозоли – более длинных. Считается, что когда Солнце находится у нас прямо над головой, оптическая масса атмосферы является минимальной и по определению имеет для этой местности атмосферную массу, равную 1,0. Когда же Солнце опускается к горизонту, то оптическая масса атмосферы увеличивается примерно в 11 раз и ее влияние на поглощение и рассеивание солнечного излучения становится значительно больше. Некоторые из этих природных световых процессов мы часто наблюдаем в атмосфере Земли. Молекулы земной атмосферы намного сильнее рассеивают короткие электромагнитные волны светового излучения, чем

более длинные (случай рэлеевского рассеивания [5]). Поэтому, когда Солнце находится высоко над горизонтом, то из-за прохождения солнечных лучей в сравнительно малой оптической массе земной атмосферы небо для нас выглядит сине-голубоватым. Когда же наше Солнце находится вблизи горизонта, то короткие электромагнитные волны солнечного излучения, проходя через толстый слой (сравнительно большую оптическую массу) атмосферы, испытывают полное рассеивание. Вот поэтому небосклон по утрам и вечерам выглядит для землян красноватым [5, 11]. Одна часть солнечного излучения, достигающего земной поверхности, отражается от нее, а другая часть – поглощается. Снег и лед имеют высокую отражательную способность (*альбедо*) для солнечных лучей, а темные и неровные участки поверхности Земли – более низкую. Определенная часть солнечного излучения, которая поглощается земной поверхностью, излучается обратно в атмосферу в ближнем инфракрасном диапазоне. Молекулы углекислого газа (CO_2), метана (CH_4) и водяного пара (H_2O), содержащиеся в атмосфере Земли, способны поглощать этот вид электромагнитного излучения, нагревая, в свою очередь, земную атмосферу в целом. Этим и определяется на Земле так называемый «парниковый эффект» [11].

3. Полярное сияние на Земле. Одним из первых ученых мира, обративших свой пылкий взор на физику северного *полярного сияния*, оказался выдающийся российский ученый и основоположник естествознания в Российской империи, академик Петербургской АН (РАН) и основатель Московского государственного университета – МГУ Михаил Васильевич Ломоносов (1711-1765 гг.) [7]. В своей работе «Сообщение о наблюдениях, подтверждающих электрическую природу северного сияния» (1753 год) он впервые в мире указал на электрическую природу этого крупномасштабного атмосферного явления [12]. В грубом виде он оценил даже высоту над поверхностью Земли, на которой возможно протекание этого природного светового явления [13]. Из научного наследия этого ученого следует, что он предпринимал попытки по нахождению физической связи между оптическими и электрическими явлениями в природе [12, 14]. На основе подобных подходов, ничего не зная в середине 18-го столетия о существовании и движении в нижних слоях магнитосферы Земли элементарных заряженных частиц (корпускул), он и попытался объяснить в общих чертах явление северного полярного сияния. Напомним, что в 1753 году им была разработана теория атмосферного электричества, основанная на движении микроскопических частиц окружающего эфира. Физическую природу происхождения в земной атмосфере этого рода электричества он связывал с движением теплых восходящих и холодных нисходящих потоков воздуха, приводящим к электризации воздушной атмосферы [12, 14]. Ему принадлежит «пальма» первенства в разработке теории цветов. Он был сторонником волновой природы дневного света (солнечного излучения).

После М.В. Ломоносова в исследованиях северного полярного сияния (южное полярное сияние в то

время из-за удаленности приантарктических районов было практически для европейских и американских ученых недоступно, а иных научных школ в мире тогда еще не существовало) наступило затишье на целых чуть ни 150 лет. Только в конце 19-го столетия «эстафетную палочку» в изучении полярного сияния на Земле подхватили скандинавские ученые-физики.

Норвежский физик Кристиан Биркеланд (рис. 2), являвшийся профессором университета в г. Осло (с 1898 года) и академиком Норвежской АН (с 1901 года), одним из первых оценил важность движения заряженных космических частиц в магнитном поле планеты для физики космоса [15, 16]. Исходя из этого, он объяснил возможность возникновения полярного сияния вблизи северного полюса Земли [7]. К. Биркеланд оказался первым ученым, который на основе законов физики сумел объяснить суть явления полярного сияния на Земле. Он организовал несколько научных экспедиций в область высоких широт Норвегии, где им была установлена сеть физических обсерваторий в районах северного полярного сияния для сбора данных о магнитном поле в этих районах. Результаты норвежской полярной экспедиции, проводимой К. Биркеландом в период 1899-1900 гг., содержали первые результаты наземных измерений постоянного магнитного поля и глобальной структуры электрических токов в полярном регионе Земли [15]. Заметим, что К. Биркеланд одним из первых предсказал существование и «солнечного ветра» (1916 год), состоящего из электронов и положительно заряженных ионов [16].



Рис. 2. Известный норвежский физик Кристиан Олаф Бернхард Биркеланд (1867-1917 гг.), внесший большой вклад в изучение северного полярного сияния на Земле [16]

О чем свидетельствуют современные научные познания и достижения в области физики полярных сияний? Северное (южное) полярное сияние у планет Солнечной системы это свечение (люминесценция) верхних слоёв атмосфер планет, обладающих магнитосферой, вследствие их (этих разряженных слоев) взаимодействия с заряженными частицами «*солнечного ветра*» [17]. Кстати, согласно [1] термин «*люминесценция*» происходит от двух лат. слов «*luminis*» – «свет» и «*escent*» – «слабое действие» и обозначает холодное свечение веществ, возбуждаемое каким-либо внешним источником энергии (например, радиоизлучением, электрическим разрядом или химической

реакцией). При столкновении высокоэнергетичных частиц плазменного потока «солнечного ветра» с верхней атмосферой планет происходит возбуждение атомов и молекул газов, входящих в её состав. Именно излучение возбуждённых атомов этих слоев атмосферы обычно в видимом диапазоне и наблюдается нами как полярное сияние. Причем, спектры полярных сияний зависят от состава атмосфер тех или иных планет. Например, если для Земли наиболее яркими линиями свечения являются линии излучения возбуждённых атомов (O) и молекул (O₂) кислорода, а также атомов (N) и молекул (N₂) азота в видимом диапазоне, то для Юпитера – линии излучения атомов (H) и молекул (H₂) водорода в ультрафиолете [17]. Для земных полярных сияний самыми интенсивными являются линии излучения атомарного кислорода (O) и ионизированных молекул азота (N₂). Высота появлений полярных сияний достаточно сильно зависит от параметров атмосферы планеты. Так, для Земли с её достаточно сложным составом атмосферы красное свечение кислорода наблюдается на высотах (200-400) км, а совместное свечение азота и кислорода – на высоте примерно 110 км. Кроме того, эти факторы обуславливают и форму полярных сияний – размытая верхняя и достаточно резкая нижняя границы [17]. Полярные сияния наблюдаются преимущественно в высоких широтах обоих земных полушарий в овальных зонах-поясах (авроральных овалах), окружающих магнитные полюса. Диаметр авроральных овалов для Земли составляет около 3000 км во время спокойного Солнца. Причем, на ее дневной стороне граница зоны отстоит от магнитного полюса на 10-16°, а на ночной – на 20-23° [17]. Поскольку магнитные полюса Земли отстают от ее географических полюсов на около 12°, то полярные сияния обычно наблюдаются в широтах 67-70°. Однако, во времена солнечной активности авроральный овал расширяется и полярные сияния могут наблюдаться и в более низких широтах – на 20-25° южнее или севернее границ их обычного проявления [17]. Установлено, что спектр полярных сияний на Земле меняется с высотой над ее поверхностью. В зависимости от преобладающих в спектре этого сияния линий излучения земные полярные сияния делятся на два типа [17]: высотные полярные сияния типа А с преобладанием атомарных линий свечения и полярные сияния типа В на относительно небольших высотах (80-90) км с преобладанием молекулярных линий свечения в спектре вследствие столкновительного гашения атомарных возбужденных состояний в сравнительно плотной атмосфере Земли на этих высотах. В ходе изучения полярных сияний астрофизиками было обнаружено, что свечение кислорода обусловлено излучением его возбужденных атомов в метастабильных состояниях с длинами волн 557,7 нм (зелёная линия, время жизни ~0,74 с) и дублетом 630 и 636,4 нм (красная область, время жизни ~110 с) [17]. Вследствие этого красный дублет излучается на высотах (150-400) км, где вследствие высокой разреженности атмосферы низка скорость гашения возбужденных состояний этих атомов при столкновениях. Ионизированные молекулы азота излучают свет в диапазоне 391,4 нм (ближний

ультрафиолет), 427,8 нм (фиолетовый цвет) и 522,8 нм (зелёный цвет). Исследователи этого природного феномена на основе результатов своих многочисленных наблюдений отмечают то одно обстоятельство, что каждое явление полярного сияния на Земле (рис. 3) обладает своей неповторимой цветной гаммой и формой в силу непостоянства химического состава газов ее атмосферы и погодных земных факторов [18].



Рис. 3. Внешний вид северного полярного сияния зимой на Аляске (США), содержащего зеленые «всполохи» света [17]

На рис. 4 приведен потрясающий человеческое воображение вид северного полярного сияния на Земле. При наблюдении с поверхности Земли полярное сияние проявляется в виде общего быстро меняющегося свечения неба или движущихся лучей, полос, корон и «занавесей». При наблюдении полярного сияния на Земле с космоса оно может принимать вид, показанный на рис. 5 (северное) и рис. 6 (южное) [17].



Рис. 4. Сказочная картина на Земле северного полярного сияния зимой на Севере России с преобладанием зеленого свечения (снимок сделан в пригороде г. Архангельска) [17]

Во время полярного сияния в земной атмосфере за короткое время выделяется огромное количество энергии. Так, за одно из зарегистрированных физиками в 2007 году возмущений атомов и молекул при подобном природном световом явлении в атмосфере Земли выделилась энергия, равная около $5 \cdot 10^{14}$ Дж [17]. Для сравнения заметим, что эта величина энергии примерно соответствует той, которая выделяется во время землетрясения магнитудой в 5,5 баллов [17].



Рис. 5. Внешний вид фрагмента северного полярного сияния на Земле, снятого с орбитального космического аппарата и содержащего преимущественно зеленое свечение [19]

Длительность земных полярных сияний составляет от десятков минут до нескольких суток. Раньше считалось, что полярные сияния в северном и южном полушариях Земли являются симметричными. Однако, одновременные наблюдения из космоса полярного сияния в мае 2001 года со стороны северного и южного полюсов показали, что северное и южное полярные сияния существенно отличаются друг от друга [19].

Из уникальных данных (рис. 6) видно, что светящийся авроральный овал кольцевой формы южного полярного сияния полностью охватывает наш самый южный континент – Антарктиду (слева сверху от зеленоватого кольца данного аврорального овала виднеется пятый земной континент – далекая Австралия).

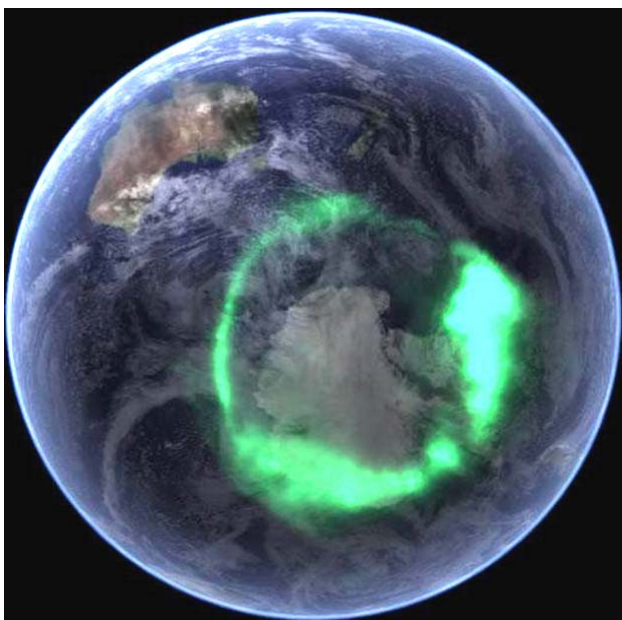


Рис. 6. Внешний вид полного южного полярного сияния на Земле, снятого с геостационарного искусственного спутника и содержащего неравномерное зеленое свечение [19]

Не менее потрясающий вид по сравнению с полярным сиянием на Земле имеет и южное полярное сияние на Сатурне (рис. 7), зарегистрированное с космоса 24, 26 и 28 января 2004 года американским космическим телескопом «Хаббл» [19, 20].

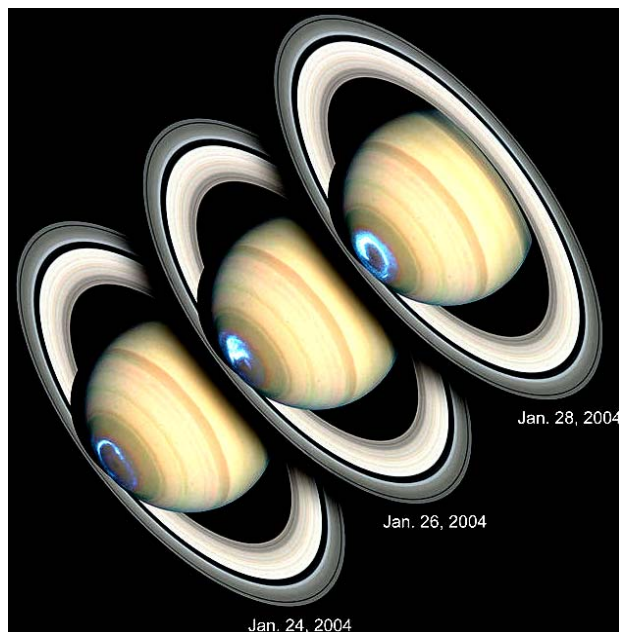


Рис. 7. Внешний вид динамики аврорального овала южного полярного сияния на Сатурне (комбинированный снимок астрономов США в ультрафиолете и видимом свете) [19]

4. Земная радуга. Из всемирной истории физической оптики следует, что в 1666 году выдающийся английский ученый и один из создателей классической механики и физики Исаак Ньютон (1643-1727 гг.) при помощи трехгранной стеклянной призмы (рис. 8) разложил видимый белый свет (солнечное излучение) на теперь хорошо известных всем нам семь цветов (в *цветной спектр*, содержащий красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый цвета) [7, 12].

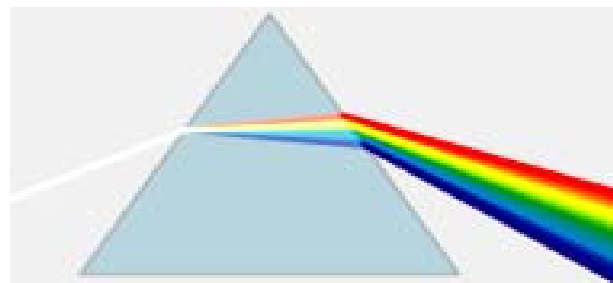


Рис. 8. Схематическое изображение преломления света при его переходе в среду с иной оптической плотностью [21]

Этими опытами И. Ньютон впервые в мире доказал сложность видимого дневного света и открыл **явление дисперсии света** (этот термин происходит от лат. слова «*dispersus*» – «*рассеянный*» [1]) – разложение белого света в спектр, вызванное зависимостью фазовой скорости распространения в среде входящих в него отдельных световых волн от их длины (частоты колебаний) [5]. Он впервые исследовал также для дневного света его **интерференцию** (это название происходит от лат. слов «*inter*» – «*между*» и «*ferens*» – «*несущий*» [1]) – явление, наблюдаемое при сложении когерентных световых волн и сопровождающееся усилением волн в одних точках пространства и их ослаблением в других в зависимости от разности фаз интерферирующих волн [5], а также и **дифракцию**

(этот термин происходит от лат. слова «*diffRACTUS*» – «разломанный» [1]) – явление огибания световыми волнами препятствий на пути их распространения [5]. Почему автор акцентирует внимание читателя на этих классических физических понятиях? Ответ здесь прост – все эти физические понятия имеют прямое отношение к предмету нашего рассмотрения – **радуге** [21], сложному природному световому явлению, наблюдаемому людьми в земной дневной атмосфере.

На рис. 9 приведен общий вид земной радуги, наблюдаемой обычно в солнечный день в воздушной атмосфере Земли, содержащей водяные капельки [21].



Рис. 9. Земная первичная радуга в присутствии водяной мелкодисперсной пыли, образующейся в солнечный день в воздушной атмосфере от водопада Такакау (Канада) [21]

Как образуется радуга? Данные рис. 10 поясняют основы физики этого сложного светового явления [5].

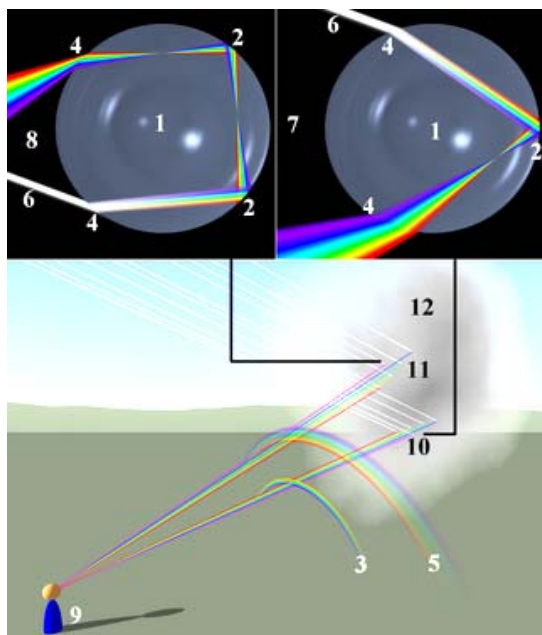


Рис. 10. Схема образования земной радуги (1 – сферическая капля воды; 2 – внутреннее отражение; 3 – первичная радуга; 4 – преломление; 5 – вторичная радуга; 6 – входящий луч света; 7 – ход лучей при формировании первичной радуги; 8 – ход лучей при формировании вторичной радуги; 9 – наблюдатель радуги; 10 – область формирования первичной радуги; 11 – область формирования вторичной радуги; 12 – объемное облако из сферических мелких капелек воды) [21]

Прежде всего, укажем то, что радуга это комплексное (оптическое плюс метеорологическое) атмосферное явление, наблюдаемое при освещении Солнцем (иногда

Луной) множества водяных капелек (дождя или тумана) [21]. Радуга выглядит как разноцветная дуга или окружность, состоящая из указанных цветов спектра (от ее внешнего края красный и далее оранжевый, желтый, зелёный, голубой, синий и фиолетовый). При этом следует иметь в виду то, что на самом деле спектр в радуге непрерывен. Его цвета плавно переходят друг в друга через множество промежуточных оттенков. Причем, центр окружности, описываемой радугой, лежит на прямой, проходящей через наблюдателя и Солнце (см. рис. 10). При наблюдении радуги Солнце всегда находится за спиной наблюдателя. Для наблюдателя, находящегося на земной поверхности, радуга обычно выглядит как разноцветная дуга (часть окружности). Чем выше точка ее наблюдения – тем она полнее (с высокой горы или самолёта можно увидеть и полную ее цветную окружность) [21]. Когда Солнце поднимается над горизонтом выше 42° , радуга с поверхности Земли становится не видной. Установлено, что радуга представляет собой *каустику*, возникающую при преломлении и отражении внутри сферических водяных капель плоскопараллельного пучка света. Оптически прозрачная капля воды поразному отклоняет дневной свет разных цветов (длин волн). Отметим, что показатель преломления воды для более длинноволновой (красной) волны света меньше, чем для коротковолновой (фиолетовой) волны света [5]. Поэтому красный свет в водяной капле (см. рис. 10) отклоняется на $137^\circ 30'$, а фиолетовый свет – на $139^\circ 20'$ [21]. Именно в результате этого белый солнечный свет каплей воды разлагается в спектр (*явление дисперсии света*) [5]. Поэтому наблюдатель, который стоит спиной к источнику света – Солнцу, будет видеть разноцветное свечение, исходящее из насыщенного водяными капельками атмосферного пространства обычно по концентрическим дугам окружности. При этом солнечные лучи разного цвета, идущие от дуги радуги, будут образовывать конус с вершиной в зрачке наблюдателя и осью, проходящей через наблюдателя и Солнце [21]. Причем, характер этого свечения будет зависеть от числа отражений дисперсионного пучка света, состоявшихся внутри сферической капли воды. Если в сферических каплях воды происходит одно такое внутреннее отражение света (поз. 7 на рис. 10), то будет наблюдаться только **первичная радуга** [21]. В первичной радуге красный цвет находится снаружи дуги (см. рис. 9), угловой радиус которой для наблюдателя составляет около $40\text{--}42^\circ$. В случае, когда в сферических каплях воды происходит два внутренних отражения света (поз. 8 на рис. 10), то нами будет наблюдаться и **вторичная радуга** [21]. На основе многочисленных наблюдений физиками было установлено, что во вторичной радуге наблюдается «перевернутый» порядок следования цветов: снаружи ее находится фиолетовый цвет, а внутри – красный. Для вторичной радуги угловой радиус ее цветной дуги по отношению к наблюдателю составляет примерно $50\text{--}53^\circ$. Небо между указанными двумя видами земной радуги (первичной и вторичной радугами) обычно заметно более тёмное, чем вне одиночной первичной радуги. Эта область в теории радуги получила название «*полосы Александра*» [21].

На рис. 11 приведен тот редкий случай, когда в дневной воздушной атмосфере Земли, содержащей мелко-дисперсные капельки воды, одновременно проявляются первичная и вторичная радуги [5, 21].



Рис. 11. Редкое фото, на котором одновременно видны первичная (слева) и вторичная (справа) радуги в дневной воздушной атмосфере Земли, насыщенной каплями воды [21]

Научное объяснение явлению радуги в земной атмосфере впервые дал выдающийся французский математик и физик Рене Декарт (1596-1650 гг.) в 1637 году [7, 22]. Он объяснил радугу на основании законов преломления и отражения солнечного света в сферических каплях выпадающего дождя. В 1667 году И. Ньютон, открывший явление дисперсии белого света при его переходах и преломлениях в средах с различной оптической плотностью, дополнил указанную теорию Р. Декарта [22]. Несмотря на то, что теория радуги Декарта – Ньютона была создана около 350 лет тому назад, она в целом физически правильно на основе законов лишь геометрической оптики объясняет основные особенности радуги: положение ее главных цветных дуг, их угловые размеры относительно наблюдателя и расположение цветов в радуге. В действительности же, физическая проблема такого сложного природного светового явления в атмосфере Земли как радуга не ограничивается лишь рамками геометрической оптики. Ее решение требует привлечения всех наших знаний о природе света [23]. При протекании в земной атмосфере этого явления проявляются как волновые свойства света, включающие его интерференцию, дифракцию и поляризацию, так и его корпускулярные свойства. Поэтому для точного описания феномена земной радуги потребовались самые мощные современные методы математической физики. В заключение этого раздела отметим, что последовательная количественная теория земной радуги была разработана лишь в самое недавнее время [24]. Ее автором стал Х.М. Нуссенцвейг – профессор физики из университета г. Сан-Пауло (Бразилия) [24].

5. Фотосинтез в атмосфере Земли. На нашей планете явление фотосинтеза является основным природным источником образования практически всех органических веществ из неорганического сырья. Слово «фотосинтез» означает буквально «создание чего-то под действием солнечного света». Согласно [1] **фотосинтез** – образование в клетках зеленых

растений и водорослей, а также в некоторых микроорганизмах углеводов из углекислого газа (CO_2) и воды (H_2O) под действием солнечного света в диапазоне его видимого спектра электромагнитного излучения, поглощаемого светочувствительным пигментом (главным образом *хлорофиллом*). Зеленые растения (биологи называют их *автотрофами*) являются основой биологической жизни на планете Земля. Именно с них на нашей планете начинаются практически все пищевые цепи. Они (зеленые растения) превращают электромагнитную энергию, падающую на них в форме солнечного света, в химическую энергию, запасаемую в синтезированных ими углеводах, из которых важнейшим для жизнедеятельности животных и микроорганизмов является органическое соединение из класса моносахаридов в виде шестиуглеродного сахара – глюкозы (название этого термина происходит от греч. слова «*glykys*» – «сладкий» [1]) [25]. Вот именно этот процесс преобразования в природе энергии и называется фотосинтезом. Поедая зеленые растения, водоросли и указанные микроорганизмы, все другие живые организмы на нашей планете получают доступ к этой аккумулированной в них энергии. Таким путем на Земле создается пищевая цепь, поддерживающая планетарную экосистему [25]. Зеленые растения в процессе фотосинтеза поглощают из окружающей их атмосферы углекислый газ (CO_2), образовавшийся при дыхании животных, и выделяют кислород (O_2) – продукт жизнедеятельности этих растений [25]. Поэтому воздух, которым дышат все живые организмы, благодаря фотосинтезу насыщается кислородом. Кроме того, как оказалось в дальнейшем фотосинтез играет важнейшую роль в круговороте углерода в нашей природе, входящего в состав всего сущего на Земле [26]. Процесс фотосинтеза необходим для поддержания всех форм жизни на Земле [26].

На мой взгляд, удивительным фактом в мировом естествознании оказалось то, что при всей своей важности явления фотосинтеза для планеты Земля, ее флоры и фауны ученые-биологи, по-видимому, из-за сложности этого природного светового явления очень долго не приступали к его изучению. После первых экспериментов по косвенному изучению явления фотосинтеза, проведенных в 1624 году фламандским (нидерландским) врачом Ван Гельмонтом (при выращивании в течение ряда лет дерева в кадке с землей неизменного объема он пришел к выводу, что древесный строительный материал, из которого образовались ствол и ветви с листьями этого дерева, произошел из воды, использованной для полива) [26], на несколько столетий наступило затишье в разгадке тайн этого природного светового явления, носящего для нас глобальный планетарный характер. Отметим, что в то далекое от нас время в Нидерландах в семье мастера очков Ханса Янсена уже был изобретен простейший оптический микроскоп, являвшийся одним из физических инструментов при исследовании явлений природы [20]. Только в 1905 году известный английский физиолог растений Фредерик Блэкман (рис. 12) провел соответствующие экспериментальные исследования и установил основные процессы, протекающие при явлении фотосинтеза [26]. Он показал,

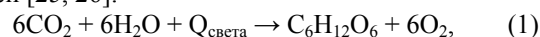
что для зеленых растений [26]: фотосинтез начинается уже при слабом солнечном освещении; скорость фотосинтеза возрастает с увеличением светового потока, но, начиная с определенного уровня, дальнейшее усиление освещения уже не приводит к повышению активности явления фотосинтеза. Ф. Блэкман установил, что повышение температуры при слабом освещении не влияет на скорость фотосинтеза у растений. При одновременном повышении температуры и освещения скорость фотосинтеза для растений возрастает значительно больше, чем при одном лишь усилении освещения [26]. На основании этих экспериментов Ф. Блэкман заключил, что при фотосинтезе в зеленых растениях происходят два процесса: один из них в значительной степени зависит от уровня солнечного освещения, но не от температуры, тогда как второй сильно определяется температурой независимо от уровня дневного света [18]. Эти два процесса получили названия «*световой* и *темновой фаз*». Именно это научное озарение Ф. Блэкмана легло в основу современных представлений о фотосинтезе на Земле [26].



Рис. 12. Известный английский ученый-ботаник Фредерик Блэкман (1866-1947 гг.), заложивший научные основы при изучении явления фотосинтеза в зеленых растениях [27]

Фотосинтез в атмосфере Земли применительно к зеленым растениям начинается с того, что излучаемые Солнцем фотоны дневного света попадают в особые пигментные молекулы – молекулы *хлорофилла*, находящиеся в их листьях [28]. Согласно [5] фотон (название этого термина происходит от греч. слова «*phōtos*» – «*свет*» [1]) является квантом электромагнитного поля или нейтральной элементарной частицей с нулевой массой и спином 1 [5]. Что касается *хлорофилла* (это специальное название произошло от двух греч. слов «*chlōros*» – «*зеленый*» плюс «*phyllon*» – «*лист*» [1]), то он представляет собой зеленый пигмент высших и низших растений, содержащийся в мембранах клеточных органелл соответственно их *хлоропластов* и *хроматофор* [28]. В этой связи можно говорить о том, что у высших растений органом фотосинтеза является их лист, а органоидами фотосинтеза – *хлоропласты*. В мембраны тилакоидов *хлоропластов* встроены фотосинтетические пигменты: *хлорофиллы* и *каротиноиды* [25]. В последние годы учеными-биологами было установлено, что существует несколько разных типов *хлорофилла*: *a*, *b*, *c* и *d*. Главным из них является *хлорофилл a*. В молекуле *хлорофилла* можно выделить порфириновую «головку»

с атомом магния Mg в центре и фитольный «хвост». Порфириновая «головка» представляет собой плоскую структуру. Она является гидрофильной и поэтому лежит на той поверхности мембраны, которая обращена к водной среде стромы [25]. Фитольный «хвост» является гидрофобным и за счет этого он и удерживает молекулу *хлорофилла* в мембране тилакоида *хлоропласта*. Молекулы *хлорофилла* поглощают красный и сине-фиолетовый цвета солнечного света, а отражают его зеленый цвет. Поэтому они из-за этой особенности в отражении волн солнечного излучения придают растениям характерную зеленую окраску. Молекулы *хлорофилла* в мембранах тилакоидов *хлоропластов* (хроматофор) высших (низших) растений организованы в фотосистемы. У всех растений и сине-зеленых водорослей имеются фотосистема-1 и фотосистема-2, а у фотосинтезирующих бактерий – только фотосистема-1. В ходе многолетних опытных исследований было установлено, что только фотосистема-2 может разлагать воду (H₂O) с выделением молекул кислорода (O₂) и отбирать электроны у атомов ее водорода (H) [26]. Биологическая роль *хлорофилла* заключается в поглощении электромагнитной энергии солнечного света и трансформации ее в химическую энергию органических веществ (углеводов), образующихся в листьях при явлении фотосинтеза [29]. Это важнейшее явление для земной природы описывается следующей интегральной физико-химической реакцией [25, 26]:



где $Q_{\text{света}}$ – электромагнитная энергия солнечного света, поступающая из атмосферы в листья растения.

Из (1) видно, что в конечном счете в результате фотосинтеза в листьях высших (низших) зеленых растений (рис. 13) из неорганических веществ (углекислого газа – CO₂ и воды – H₂O) образуется органическое соединение в виде глюкозы (C₆H₁₂O₆) и в атмосферу Земли выделяются молекулы кислорода (O₂).



Рис. 13. Аэроснимок зеленого леса (джунглей) в Центральной Америке в период затяжного тропического дождя [26]

В настоящее время основные представления ученых-биологов ведущих биохимических научных центров мира о протекании явления фотосинтеза в листьях зеленых высших (низших) растений базируются на том, что фотосинтез это сложный многоступенчатый процесс, реакции которого на микроскопическом уровне подразделяются на две группы: *реакции световой фазы* и *реакции темновой фазы* [25, 28].

• **Световая фаза фотосинтеза.** Данная фаза рассматриваемого нами природного светового явления происходит только в присутствии света в мембранах тилакоидов *хлоропластов* (*хроматофор*) при участии *хлорофилла*, белков-переносчиков электронов и фермента АТФ-синтетазы [25, 26]. Следует подчеркнуть, что в основе микропроцессов этой фазы фотосинтеза лежат, как и для большинства всех остальных биологических процессов в природе, *электрохимические* и *электрофизические процессы* [28]. Подтверждением тому является то, что под действием кванта белого света электроны *хлорофилла* листьев всех растений возбуждаются, покидают эту молекулу и попадают на внешнюю сторону мембраны тилакоида, которая в итоге заряжается отрицательно (рис. 14).

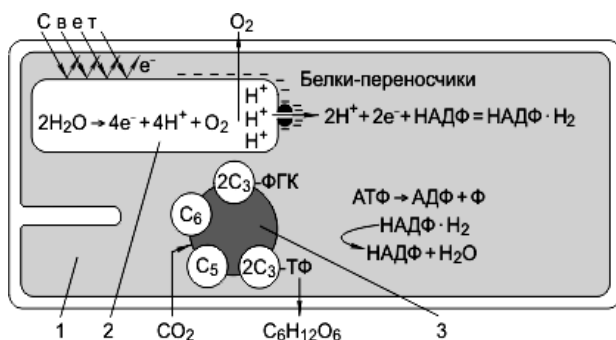
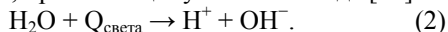


Рис. 14. Схемы процессов при протекании на Земле световой и темновой фаз фотосинтеза в мембранах тилакоидов *хлоропластов* листьев высших зеленых растений (1 – строма *хлоропласта*; 2 – элемент мембраны тилакоида *хлоропласта*; 3 – молекула фосfogлицериновой кислоты) [25]

Для пояснения данных, приведенных на рис. 14, напомним, что термин «строма» происходит от греч. слова «*strōma*» – «подстилка» [1] и обозначает биологическую основу в нашем случае *хлоропласта* листа. Далее окисленные (потерявшие электроны из-за внешнего энергетического действия света) молекулы *хлорофилла* восстанавливаются путем отбора электронов у воды (H_2O), находящейся во внутритилакоидном пространстве листа. Это приводит к распаду (фотолизу) воды, протекающему по схеме вида [25]:

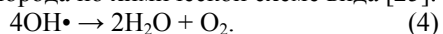


В дальнейшем отрицательно заряженные ионы гидроксила OH^- , образовавшиеся по (2) в тилакоидах *хлоропластов*, отдают свои электроны и превращаются в реакционноспособные радикалы $OH^\bullet$ по схеме:



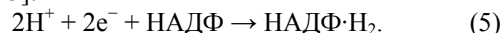
где e^- – свободный отрицательно заряженный электрон, поступающий в тилакоиды *хлоропластов*.

Затем радикалы $OH^\bullet$ согласно (3) объединяются между собой, что приводит к образованию воды и свободного кислорода по химической схеме вида [25]:



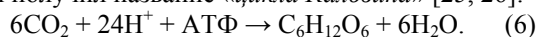
Свободный кислород (O_2), образующийся из-за протекания реакции (4), при этом удаляется во внешнюю воздушную среду, а протоны (ядра ионизированных атомов водорода H^+) накапливаются внутри тилакоидов *хлоропластов* листьев растений (см. рис. 14) в так называемом «протонном резервуаре» [25, 28]. В результате протекания в листьях растений реакций (2) – (4) мембраны их тилакоидов с одной сто-

роны за счет протонов H^+ заряжается положительно, а с другой стороны за счет электронов e^- – отрицательно. Когда разность электрических потенциалов между наружной и внутренней сторонами мембран тилакоидов *хлоропластов* достигает уровня 200 мВ, протоны H^+ начинают проталкиваться через каналы фермента АТФ-синтетазы и происходит фосфорилирование молекул аденозиндифосфата (АДФ) до молекул аденозинтрифосфата (АТФ), являющихся одними из основных переносчиков химической энергии в биологической клетке земных растений и животных [25, 26]. При этом ионизированный атомарный водород H^+ идет в дальнейшем на восстановление специфического белка-переносчика НАДФ (никотинамидадениндинуклеотидфосфата), априори присутствующего в тилакоидах *хлоропластов* листьев, до белка-переносчика НАДФ·Н₂ (см. данные рис. 14) по реакции вида [25]:



Таким образом, в световую фазу фотосинтеза в листьях высших (низших) растений под действием солнечного света по (2) происходит фотолиз воды, который сопровождается тремя важнейшими физико-химическими процессами: 1) синтезом АТФ; 2) образованием НАДФ·Н₂; 3) образованием кислорода O_2 . Свободный кислород (O_2) диффундирует в земную атмосферу. Молекулы белков-переносчиков АТФ и НАДФ·Н₂ транспортируются в стромы *хлоропластов* и участвуют в процессах темновой фазы фотосинтеза.

• **Темновая фаза фотосинтеза.** Для реакций этой фазы, протекающих в стромах *хлоропластов*, не нужна электромагнитная энергия солнечного света. Поэтому они происходят не только на свету, но и в темноте. Реакции темновой фазы фотосинтеза представляют собой цепочку последовательных преобразований углекислого газа (CO_2), поступающего в строму *хлоропласта* (см. рис. 14) из атмосферного воздуха, и приводящую к образованию в тилакоидах *хлоропластов* листьев растений глюкозы ($C_6H_{12}O_6$) и других органических веществ. Первой реакцией в этой цепочке является фиксация углекислого газа (CO_2). Акцептором углекислого газа в тилакоидах *хлоропластов* листьев растений является пятиуглеродный сахар рибулозобифосфат (РиБФ) [25, 28]. Катализирует протекание данной реакции фермент рибулозобифосфат-карбоксилаза (РиБФ-карбоксилаза) [25]. В результате карбоксилирования рибулозобифосфата образуется неустойчивое шестиуглеродное соединение, которое сразу же распадается на две молекулы фосfogлицериновой кислоты (ФГК), приведенной на рис. 14 [25]. Затем происходит цикл химических реакций, в которых через ряд промежуточных продуктов фосfogлицериновая кислота в итоге и преобразуется в глюкозу ($C_6H_{12}O_6$) [28]. В этих реакциях используется химическая энергия, запасенная в молекулах АТФ и НАДФ·Н₂, образованных, как было выше показано, в световую фазу фотосинтеза. Цикл этих реакций получил название «цикла Кальвина» [25, 26]:



Укажем, что основной механизм фотосинтеза углеводов в листьях зеленых растений был открыт выдающимся американским биологом Мелвином

Кальвином (рис. 15), проделавшим в 1940-е годы в биохимической лаборатории Калифорнийского университета (г. Беркли, США) серию экспериментов, ставшими классическими в области фотосинтеза [26]. Заметим, что в 1948 году он стал профессором этого университета, а за год до этого был назначен директором отдела биоорганики в Радиационной лаборатории им. Э. Лоуренса (г. Беркли, США), где им были использованы последние технологические достижения военных исследований времен Второй мировой войны (например, новые методы хроматографии для изучения темновой фазы фотосинтеза) [26]. М. Кальвин за фундаментальные достижения в раскрытии тайн явления фотосинтеза был удостоен Нобелевской премии в области химии за 1961 год [26, 30]. Отметим и то, что в ходе современных тонких физико-химических исследований явления фотосинтеза в листьях высших (низших) зеленых растений было установлено, что кроме глюкозы ($C_6H_{12}O_6$) при протекании этого сложного природного процесса образуются другие мономеры сложных органических соединений – аминокислоты, глицерин, жирные кислоты и нуклеотиды [25, 28].



Рис. 15. Выдающийся американский ученый-биолог Мелвин Кальвин (1911-1997 гг.), прославившийся изучением в XX веке явления фотосинтеза у земных зеленых растений [26]

А каков коэффициент полезного действия (КПД) рассматриваемого нами явления фотосинтеза в листьях высших (низших) земных зеленых растений? В данном случае под КПД будем понимать отношение количества энергии, запасенной в продуктах фотосинтеза или в образовавшейся фитомассе урожая, к количеству электромагнитной энергии, содержащейся в поглощенной при его (фотосинтезе) протекании активной солнечной радиации [30]. При этом под фотосинтетически активной солнечной радиацией (ФАСР) обычно понимается участок солнечного спектра, поглощаемый фотосинтетическими пигментами (как правило, *хлорофиллом*) зеленого листа растения и расположенный в диапазоне длин световых волн (380-740) нм [30]. Кстати, используемый здесь уже не один раз термин «*пигмент*» происходит от лат. слова «*pigmentum*» – «*краска*» и обозначает красящее вещество, содержащееся в растительных тканях и обуславливающее в нашем случае процесс протекания в них явления фотосинтеза [1]. Если рассматривать планету Земля в целом, то указанный КПД для фотосинтеза в

фитосреде составляет всего около 0,2 % [30]. Для разных растений и различных условий их выращивания КПД поглощенной ими ФАСР составляет следующие величины [30]: для кукурузы (2,5-5,7) %, а для ячменя (2,6-4,0) %. В этой связи задача повышения КПД использования солнечной энергии при фотосинтезе в растительном мире является одной из важнейших в физиологии, а также в селекции сельскохозяйственных культур. Поэтому можно говорить о том, что в среднем при фотосинтезе лист растений использует лишь около 1 % падающей на него солнечной энергии. Продуктивность же при фотосинтезе в листьях высших (низших) растений составляет около 1 г органического вещества на 1 м² поверхности в час [26].

В заключении укажем, что благодаря фотосинтезу в листьях растений, являющемуся основным источником образования на нашей планете многих органических веществ, ежегодно из атмосферы Земли поглощаются миллиарды тонн углекислого газа (CO_2) и выделяются миллиарды тонн кислорода (O_2) [25]. Кроме того, из этого двухатомного кислорода при сильноточных электрических разрядах в воздушной атмосфере во время грозы (мировая статистика в наблюдениях линейных молний свидетельствует о том, что каждую секунду на Земле происходит не менее 100 грозных разрядов [31]), а также под действием ультрафиолетовых лучей солнечного излучения вокруг Земли образуется озоновый слой, состоящий главным образом из трехатомного кислорода (O_3) и защищающий живые организмы и всю биосферу нашей планеты от вредного воздействия на них коротковолновой ультрафиолетовой солнечной радиации [5, 28].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
2. https://commons.wikimedia.org/wiki/Solar_Wind.
3. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: Изд-во «Точка», 2014. – 400 с.
4. <http://ikfia.ysn.ru/struktura/research-subdivision/143-lab-theory>.
5. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.
6. Гинзбург В.Л. Космические лучи: 75 лет исследований и перспективы на будущее // Земля и Вселенная. – 1988. – №3. – С. 3-9.
7. Храмов Ю.А. История физики. – К.: Изд-во «Феникс», 2006. – 1176 с.
8. <http://elementy.ru/lib/430665>.
9. Мурзин В.С. Введение в физику космических лучей. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 316 с.
10. <http://www.astronet.ru/db/msg/1188678>.
11. <http://attex.net/RU/se2.php>.
12. Выдающиеся физики мира. Рекомендательный указатель. – М.: Типография б-ки им. В.И. Ленина, 1958. – 435 с.
13. Радковский М.И. Ломоносов и его исследования в области атмосферного электричества // Электричество. – 1939. – №1. – С. 69-72.
14. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Х.: Изд-во НТУ «ХПИ», 2008. – 252 с.
15. https://ru.wikipedia.org/wiki/Биркеланд,_Кристиан.
16. Храмов Ю.А. Биркеланд Кристиан // Физики: Биографический справочник / Под ред. А.И. Ахиезера. – М.: Наука, 1983. – 400 с.

17. https://ru.wikipedia.org/wiki/Полярное_сияние.
18. Мизун Ю.Г. Полярные сияния. – М.: Наука, 1983. – 136 с.
19. <http://www.vseprokosmos.ru/planets26.html>.
20. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 2-х томах. Том 2. – Х.: НТМТ, 2013. – 333 с.
21. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Радуга>.
22. <http://howitworks.iknowit.ru/paper1015.html>.
23. http://ufn.ru/ufn78/ufn78_7/Russian/r787e.pdf.
24. Nussenzweig H.M. The theory of the rainbow // *Scientific American*. – 1977. – vol.236. – no.4. – pp. 116-127.
25. <http://www.licey.net/bio/biology/lection12>.
26. <http://elementy.ru/trefil/21192>.
27. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC405861/?page=1>.
28. Лебедев С.И. Фотосинтез. – К.: УАСХН, 1960. – 275 с.
29. <http://bibliofond.ru/view.aspx?id=56346>.
30. <http://fizrast.ru/fotosintez/intensivnost.html>.
31. Юман М.А. Молния. – М.: Мир, 1972. – 327 с.

REFERENCES

1. *Bol'shoj iljustrirovannyj slovar' inostrannyh slov* [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. (Rus).
2. Available at: https://commons.wikimedia.org/wiki/Solar_Wind (accessed 21 May 2012). (Rus).
3. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki. Tom 3: Teorija i praktika elektrofizicheskikh zadach* [Selected topics of electrophysics. Vol. 3: Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2014. 400 p. (Rus).
4. Available at: <http://ikfia.ysn.ru/struk-tura/research-subdivision/143-lab-theory> (accessed 10 April 2014). (Rus).
5. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).
6. Ginzburg V.L. Cosmic rays: 75 years of research and future prospects. *Zemlia i Vselennaia – Earth and Universe*, 1988, no.3, pp. 3-9. (Rus).
7. Khramov Yu.A. *Istoriia fiziki* [History of Physics]. Kiev, Feniks Publ., 2006. 1176 p. (Rus).
8. Available at: <http://elementy.ru/lib/430665> (accessed 23 July 2013). (Rus).
9. Murzin V.S. *Vvedenie v fiziku kosmicheskikh luchej* [Introduction to the physics of space rays]. Moscow, MSU Publ., 1988. 316 p. (Rus).
10. Available at: <http://www.astronet.ru/db/msg/1188678> (accessed 06 December 2013). (Rus).
11. Available at: <http://attex.net/RU/se2.php> (accessed 21 May 2012). (Rus).
12. *Vydaiushchiesia fiziki mira. Rekomendatel'nyi ukazatel'* [Outstanding Physics in the World. Advisory pointer]. Moscow, Library them. V.I. Lenin Publ., 1958. 435 p. (Rus).
13. Radovskij M.I. Lomonosov and his research in the field of atmospheric electricity. *Elektrichestvo – Electricity*, 1939, no.1, pp. 69-72. (Rus).
14. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 1: Elektrofizika i vydajushchiesia fiziki mira* [Selected topics electrophysics: Monographs in 2 vols. Vol.1: Electrophysics and outstanding physics of the world]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2008. 252 p. (Rus).
15. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Биркеланд_Кристиан (accessed 15 August 2012). (Rus).
16. Khramov Yu.A. *Birkeland Kristian. Fiziki: Biograficheskij spravocnik / Pod red. A.I. Ahiezer* [Kristian Birkeland. Physics: Biographical Directory. Edited by A.I. Ahiezer]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 400 p. (Rus).
17. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Полярное_сияние (accessed 10 April 2014). (Rus).
18. Mizun Yu.G. *Poliarnye siianiia* [Aurora polaris]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 136 p. (Rus).
19. Available at: <http://www.vseprokosmos.ru/planets26.html> (accessed 12 May 2011). (Rus).

20. Baranov M.I. *Antologija vydaiushchikhsia dostizhenii v nauke i tekhnike: Monografiia v 2-kh tomakh. Tom 2.* [An anthology of outstanding achievements in science and technology: Monographs in 2 vols. Vol.2]. Kharkov, NTMT Publ., 2013. 333 p. (Rus).
21. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Радуга> (accessed 10 April 2014). (Rus).
22. Available at: <http://howitworks.iknowit.ru/paper1015.html> (accessed 12 May 2011). (Rus).
23. Available at: http://ufn.ru/ufn78/ufn78_7/Russian/r787e.pdf (accessed 18 September 2013). (Rus).
24. Nussenzweig H.M. The Theory of the Rainbow. *Scientific American*, 1977, vol.236, no.4, pp. 116-127.
25. Available at: <http://www.licey.net/bio/biology/lection12> (accessed 18 September 2013). (Rus).
26. Available at: <http://elementy.ru/trefil/21192> (accessed 10 April 2014). (Rus).
27. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC405861/?page=1> (accessed 21 May 2012). (Rus).
28. Lebedev S.I. *Fotosintez* [Photosynthesis]. Kiev, UARES Publ., 1960. 275 p. (Rus).
29. Available at: <http://bibliofond.ru/view.aspx?id=56346> (accessed 11 April 2013). (Rus).
30. Available at: <http://fizrast.ru/fotosintez/intensivnost.html> (accessed 18 September 2013). (Rus).
31. Yuman M.A. *Molnii* [A lightning]. Moscow, Mir Publ., 1972. 327 p. (Rus).

Поступила (received) 10.06.2015

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 «Molniiya»
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 29: Discoverers of secrets of global natural light phenomena.

Purpose. Scientifically-historical description of features of opening by scientists-discoverers of the world of electrophysics and electrochemical secrets of such natural light phenomena as *Aurora Borealis*, rainbow and photosynthesis, carrying global planetary character for the habitants of planet Earth. **Methodology.** Scientific approaches at treatment and systematization of physical knowledges about «solar wind» and sun radiation, causing flowing in the atmosphere of Earth of the indicated light phenomena. Methods of historical method at research of progressive development in the world of basic scientific knowledges about the examined natural light phenomena. **Results.** Basic information, touching forming of scientific bases of electrophysics and electrochemical processes, flows at a display in the earthly atmosphere of aurora north (south) polaris, primary (second) rainbow and photosynthesis domestic and foreign scientists in the leaves of higher (lower) plants, is resulted. **Originality.** First in area of history of scientific and technological bases of electrophysics and electrochemical processes, characteristic for aurora polaris, rainbow and photosynthesis in an earthly magnetic sphere and air atmosphere are presented in the short systematized form and historical development. **Practical value.** Scientific popularization of electrophysics and electrochemical knowledges and distinguished scientific achievements in area of such global for a planet Earth of the natural atmospheric light phenomena as *aurora Borealis*, rainbow and photosynthesis. References 31, figures 15.

Key words: history, planet Earth, *Aurora Borealis*, rainbow, photosynthesis, distinguished scientific achievements.

В.В. Бодашко

ИМПЛЕМЕНТАРНЫЙ ПОДХОД ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДИНАМИЧЕСКИ ПОЗИЦИОНИРУЮЩЕГО СУДНА

У результаті аналізу енергетичних процесів у судових енергетичних установках комбінованих пропульсивних комплексів в різних експлуатаційних режимах створена стратегія побудови математичних моделей зазначених комплексів. Стратегія заснована на імплементації векторів збурюючих впливів, які змінюють гідродинамічні характеристики судна на векторну площину енергетичних характеристик. Запропонований підхід до моделювання енергетичної установки судна, яке знаходиться у режимі динамічного позиціонування, дозволив врахувати: а) особливості налаштувань ПІД-регуляторів частотних електроприводів підрулюючих пристроїв; б) автоматичних регуляторів напруги середньо-оборотних дизель-генераторів; в) експлуатаційні характеристики всіх керованих об'єктів комплексу й судна при передачі потужності до гребних гвинтів. Бібл. 10, рис. 7.

Ключові слова: суднова енергетична установка, комбінований пропульсивний комплекс, динамічне позиціонування, математичне моделювання, електропривод, передача потужності, ефективність, регулювання.

В результате анализа энергетических процессов в судовых энергетических установках комбинированных пропульсивных комплексов в различных эксплуатационных режимах создана стратегия построения математических моделей указанных комплексов. Стратегия основана на имплементации векторов возмущающих воздействий, изменяющих гидродинамические характеристики судна, на векторную плоскость энергетических характеристик. Предложенный подход к моделированию энергетической установки судна, находящегося в режиме динамического позиционирования, позволил учесть: а) особенности настроек ПИД-регуляторов частотных электроприводов подруливающих устройств; б) автоматических регуляторов напряжения среднеоборотных дизель-генераторов; в) эксплуатационные характеристики всех управляемых объектов комплекса и судна при передаче мощности к гребным винтам. Библ. 10, рис. 7.

Ключевые слова: судовая энергетическая установка, комбинированный пропульсивный комплекс, динамическое позиционирование, математическое моделирование, передача мощности, эффективность, регулирование.

Введение. Растущий спрос на мощные судовые дизель-электрические комбинированные пропульсивные комплексы (КПК) и потребность в применении типовых решений в условиях эксплуатационной неопределенности для многих задач мореплавания, приводят к возрастанию сложности конструкций судовых энергетических установок (СЭУ) [1]. Такое усложнение увеличивает вероятность их частичного или полного обесточивания в различных эксплуатационных режимах и погодных условиях, что может привести к непредсказуемым последствиям для судна и экипажа. Структуры известных СЭУ – это многошинные конструкции с неравномерным распределением импеданса, которые строятся по технологии гибких (управляемых) систем переменного тока (FACTS – Flexible Alternative Current Transmission Systems) и представляют собой единые электроэнергетические системы (WSCC – Western System Coordinating Council). Подчеркнем, что: а) в отличие от береговых электроэнергетических систем, где обесточивание, например, может привести к социальному взрыву, в автономных электроэнергетических системах обесточивание связано с безопасностью людей [2]; б) современные тенденции развития и организации СЭУ по технологии FACTS направлены на увеличение живучести судов. Существенные отклонения от номинальных параметров СЭУ КПК в сложных эксплуатационных режимах приводят к непредвиденным косвенным потерям и разрушению жизненно важных судовых инфраструктур [3].

СЭУ КПК, при воздействии на судно внешних факторов и изменяющихся в связи с этим эксплуатационных условий, могут демонстрировать разнообразные нелинейные поведения. В свою очередь, при эксплуатации подобных КПК, реакции на возмущения

могут соответствовать, как нормальному, так и аномальному или аварийному (предаварийному) режимам, что заставляет разработчиков искать пути по снижению негативных последствий, а в идеале – по их предотвращению [4]. Оценивая риски выхода КПК из стабильного состояния при внешних возмущениях, возникает необходимость прогноза его поведения в обычных и нормальных условиях при помощи средств моделирования.

Постановка задачи. Судовой дизель-электрический КПК имеет зоны энергетически оптимальных настроек систем управления в зависимости от конкретных эксплуатационных условий. Стандартным способом обеспечения качества динамических режимов КПК является коррекция параметров системы «судно – винты – асинхронные (АД), синхронные двигатели (СД) – преобразователи частоты (ПЧ), циклоконвертеры (СЦ) – среднеоборотные дизель-генераторы (СОДГ)». Учитывая, что упор винта фиксированного шага (ВФШ) определяется режимом работы судна и не может быть изменён в необходимую сторону, единственным способом обеспечения необходимого качества процессов управления остаётся оптимизация настроек регуляторов частоты вращения АД и СОДГ, максимально удовлетворяющая основным эксплуатационным режимам [7].

В известных моделях СЭУ КПК с нестабильным напряжением на шинах и малыми расстояниями между потребителями обычно пренебрегают параметрами судовой сети. При соизмеримых по мощности генераторах и потребителях, акцент ставится на создание динамических моделей энергетических систем, встраиваемых в систему управления. Однако интеллектуальные системы управления электродвигателями

© В.В. Бодашко

КПК, самонастраивающиеся (фаззи, фаззи-нейро, нейро) ПИД-регуляторы различных параметров [8] только начинают завоевывать свои позиции в СЭУ.

Таким образом, для оценки и повышения эффективности передачи мощности в дизель-электрической СЭУ КПК целесообразно создание и применение в системе управления модели, основанной на нейронных сетях с применением принципа «добычи данных» (data mining), базирующегося на DMI-моделях отдельных компонентов комплекса [5]. Если рассматривать КПК как гибкую систему, состоящую из некоторого числа взаимозаменяемых компонентов, то задачей исследования является построение такой модели динамики КПК, которая обладала бы прогнозирующими свойствами, и легко встраивалась в известные системы управления [6].

Целью статьи является постановка и решение задачи создания математической модели СЭУ КПК, учитывающей динамику всех ее объектов, в том числе и судна, в режимах передачи мощности от СОДГ на гребные винты, отличающейся от известных моделей учетом изменяющихся гидродинамических свойств судна с возможностью оценки их влияния на энергетические процессы в СЭУ КПК.

В результате анализа схемы (рис. 1), можно показать, что в установившемся режиме работы судна, когда изменение направления вектора движения определяется внешними возмущениями, применение частично инвариантных к основным возмущениям регуляторов частоты и напряжения на шинах СОДГ позволит включить «интегральную составляющую управления» на всех участках распределительных щитов, что гарантирует равномерную загрузку (астатизм) всех параллельно-подключённых СОДГ.

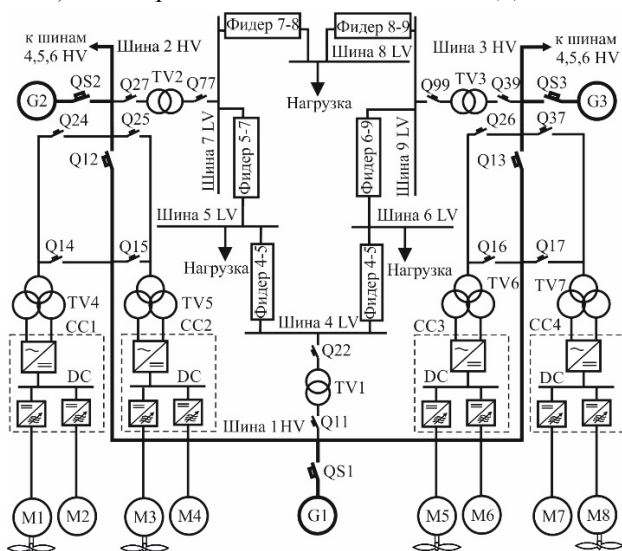


Рис. 1. Фрагмент однолинейной схемы единой многошинной электроэнергетической системы офшорного (supply vessel) судна: G1-G3 – высоковольтные СОДГ; QS1-QS3 – генераторные автоматы; Q12-Q99 – автоматические шинные выключатели; TV1-TV3 – понижающие трансформаторы; TV4-TV7 – понижающие трёх-обмоточные трансформаторы (Y/Δ/Y); M1-M8 – АД подруливающих устройств (ПУ) и грузовых насосов; CC1-CC4 – преобразователи частоты со звеном постоянного тока (DC); HV (high voltage) – высокое напряжение (3,3 ≤ HV ≤ 11 kV); LV (low voltage) – низкое напряжение (220 ≤ LV ≤ 690 V)

Для судов с подобными СЭУ характерным является эксплуатационный режим работы с удержанием позиции судна в заданной точке – режим динамического позиционирования (dynamic position – DP). С целью обеспечения живучести судна, режим DP, когда радиус-вектор движения является определяющим фактором для СЭУ, последняя предполагает необходимость подключения к судовой сети «двигательной нагрузки» в точки с различным импедансом. Это связано с тем, что силовые агрегаты СЭУ координатно рассредоточены по всему судну. Следует помнить, что переход гребного электродвигателя из режима работы на «свободной воде» в режим стоянки под током, предполагает использование всережимных регуляторов оборотов [9].

В зависимости от точки подключения, пространственный вектор потребляемого гребным электродвигателем (АД или СД) тока будет вращаться в dq -координатах с частотой, определяемой фазой нагрузки, которая в свою очередь, зависит от разности импеданса в точке подключения и ближайшей высоковольтной шины СОДГ (рис. 2).

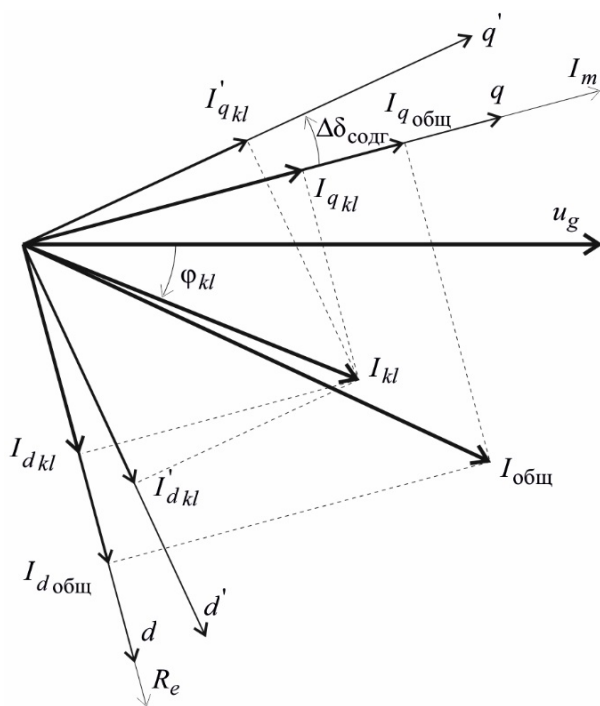


Рис. 2. Векторная диаграмма для участка kl (k, l – натуральное число) высоковольтной шины с подключёнными к ней АД и СОДГ: u_g – напряжение на шинах, о.е.; $I_{общ}$ – общий потребляемый АД ток, о.е.; $\Delta\delta_{содг}$ – угол нагрузки; φ_{kl} – фаза тока статора АД

Уравнения модели одного СОДГ, подключённого к шинам, можно описать системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\psi}{dt} = (W(n) + FX^{-1})\psi + Nu_g + gu_f; \\ \frac{dn}{dt} = \frac{1}{t}(t_{m_содг} - \psi^t(M^t KM)X^{-1}\psi); \\ \Delta \frac{d\delta}{dt} = \omega_N(n - n_1), \end{cases} \quad (1)$$

где ψ – вектор потокосцепления обмотки статора; u_f – напряжение возбуждения, о.е.; n – частота вращения

вала генератора, о.е.; δ – угол нагрузки, рад; ω_N – номинальная электрическая угловая скорость, рад/с; r_{ss} – сопротивление обмотки статора АД, о.е.; r_{lk} – сопротивление шины между точками lk , о.е.; T_d , T_q – продольная и поперечная составляющие постоянной времени демпферной обмотки СОДГ, с; t_f – постоянная времени обмотки возбуждения, с; x_d , x_q – продольная и поперечная составляющие значения реактивного сопротивления рассеяния обмоток статора, о.е.; k_{ud} , k_{uq} , k_{uf} – продольная и поперечная составляющие значения коэффициента насыщения демпферной и статорной обмоток СОДГ и обмотки возбуждения; μ_d , μ_f – коэффициенты взаимоиנדукции между обмоткой статора и демпферной, между обмоткой возбуждения и демпферной,

$$W(n) = \begin{bmatrix} 0 & \omega_N n & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_N n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad N = \begin{bmatrix} \omega_N & 0 \\ 0 & \omega_N \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$F = \begin{bmatrix} \omega_N(r_{ss} + r_{kl}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_N(r_{ss} + r_{kl}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/t_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/t_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/t_f \end{bmatrix};$$

$$X = \begin{bmatrix} -x_d & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -x_q & 0 & 1 & 0 \\ -(1-k_{\mu d})x_d & 0 & 1 & 0 & \mu_d \\ 0 & -(1-k_{\mu q})x_d & 0 & 1 & 0 \\ -(1-k_{\mu f})x_d & 0 & \mu_f & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$g = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{t_f} \end{bmatrix}^T.$$

Тогда, из выражения (1), вектор потокосцепления ψ СОДГ связан с величинами, характеризующими обмотку статора выражением:

$$h(\psi) = \psi_s^T K i_s = \psi^T (M^T K M) X^{-1} \psi, \quad (2)$$

где

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}; \quad M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$M^T K M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Совместное решение выражений (1) и (2) позволяет определить постоянные интегрирования, характеризующие уставки ПИД-регуляторов СОДГ при их параллельной работе. Регуляторы настраиваются так, что один из регуляторов контролирует частоту и напряжение, а другой поставляемые активную и реактивную мощности с уставками, взятыми относительно

мощности первого генератора. Таким способом достигается равномерное распределение нагрузки:

$$c = x_d(\mu_f(\mu_d + k_{\mu d} - 1) - \mu_d + 1 - k_{\mu d} + k_{\mu f}(k_{\mu q} - 1)).$$

Значения тока статора i_s , активной (P) и реактивной (Q) мощностей находятся из выражений:

$$\begin{cases} i_s = M X^{-1} \psi; \\ P = u_g^T i_s = u_g^T M X^{-1} \psi; \\ Q = -u_g^T K i_s = -u_g^T K M X^{-1} \psi. \end{cases} \quad (3)$$

В случае увеличения общей нагрузки, подключённый на параллельную работу генератор в начальный момент, соизмеримый с постоянными времени СОДГ, может автоматически «взять на себя» весь излишек затребованной потребителями мощности. Это связано с тем, что, остальные генераторы, работающие в установившемся режиме, будут поставлять постоянные мощности в зависимости от уставок, что может привести к неожиданному рассогласованию нагрузки между генераторами. Во избежание такого рассогласования, в зависимости от потребляемого тока и из расчёта расхождения между мощностью конкретного генератора и подключённого, блок распределения нагрузки, путём воздействия на ПИД-регуляторы СОДГ по частоте вращения и напряжению, устранил возникшее рассогласование.

На судах с 6-8 ПУ, для устранения деградиционных эффектов, таких, например, как эффект Коанда, возникающих вблизи корпуса судна, АД, работающие в зоне надсинхронных частот, получают питание от преобразователей с системами импульсно-фазового управления (СИФУ). В таких системах вместо распределения управляющих сигналов по фазам, осуществляется их одновременная подача на электроды силовых коммутаторов. Если применить синхронизацию по любой из фаз с необходимой скважностью, то за счет действия таких СИФУ расширяется зона устойчивого регулирования, практически до максимально-возможных пределов ($0^\circ < \alpha < 180^\circ$). Экспериментально доказано, что такой эффект достигается одновременным использованием современных безынерционных, например – пьезоэлектрических, датчиков, практически мгновенно реагирующих на отклонение упора ПУ от рассчитанных значений.

Угол управления α , который в указанных зонах является углом открытия, в случае превышения значения π , становится углом управления интенсивностью нарастания упора в квадратичной зависимости. Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) здесь становится средством сглаживания пульсаций, потому что является составляющей звена постоянного тока (DC), половина уровня напряжения на котором определяется следующим образом:

$$U_{dc_N} = \frac{1}{\text{modind_N}} \cdot \frac{U_m \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (B), \quad (4)$$

где U_m – максимальное значение линейного напряжения питания; $\text{modind_N} = 1,01$ – значение случайной величины оптимальных углов переключения, как функции индекса модуляции для устранения нечётных гармоник из основной.

На 55 секунде моделирования происходит «запрос» мощности от системы управления электродвигателями азимутальных ПУ вследствие возникшего возмущающего воздействия. Кратковременное превышение общей потребляемой электродвигателями ПУ мощности более 100 % приводит к запуску резервного генератора. Последующее уменьшение запроса мощности (130 с) позволяет системе распределения нагрузки (PMS) перевести один генератор в «горячий резерв», а второй в режим работы на гиперболе постоянной мощности.

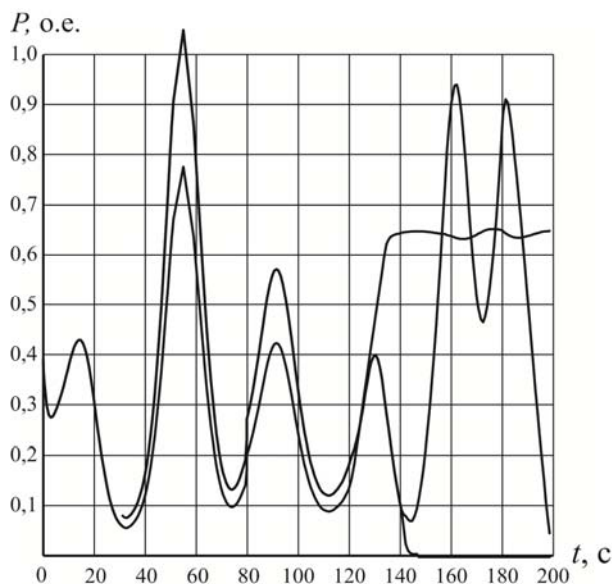


Рис. 6. Характеристики потребляемой активной мощности 4-мя генераторами СЭУ КПК

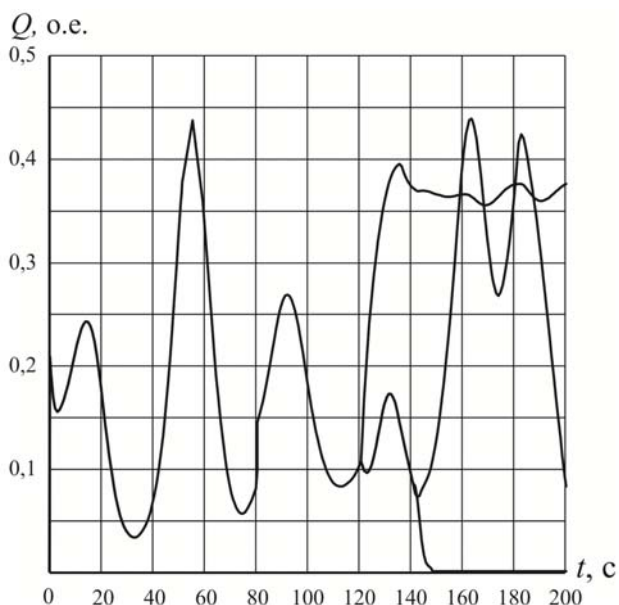


Рис. 7. Характеристики потребляемой реактивной мощности 4-мя генераторами СЭУ КПК

Выводы

1. Предложенная концепция построения математической модели СЭУ КПК, учитывающей динамику всех ее объектов, в том числе и судна в режимах передачи мощности от СОДГ на гребные винты, подтвердила свою работоспособность с помощью программного комплекса Ships_CPC.

2. Исследование влияния настроек основных регуляторов системы управления на энергетические процессы в СЭУ КПК, подтвердило широкие возможности разработки и применения различных эффективных стратегий функционирования систем стабилизации напряжения СОДГ.

3. Программный комплекс Ships_CPC разрабатывался по технологии Open system, что означает его возможность реорганизовываться, перенастраиваться и интегрироваться под технологические процессы управления энергетической системой судна любой сложности с перспективой на завершение в форме универсальной структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Radan D. Integrated control of marine electrical power systems // Thesis for the degree of philosophiae doctor, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Trondheim, Norway, 2008. – 231 p. Available at: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:123798/FULLTEXT01.pdf> (accessed 19 September 2015).
2. M.J. Sanjari, O. Alizadeh Mousavi, G.B. Gharehpetian. Assessing the risk of blackout in the power system including HVDC and FACTS devices // International Transactions on Electrical Energy Systems. – 2013. – vol.23. – no.1. – pp. 109-121. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/enhanced/doi/10.1002/etep.1619>. (accessed 21 September 2015). doi: 10.1002/etep.1619.
3. Очеретяный Ю.А., Живица В.И., Белый В.Н., Онищенко О.А., Вайнфельд Э.И. Концепция системы компьютерного мониторинга и технической диагностики рефрижераторной установки судна // Судовые энергетические установки. – 2011. – №28. – С. 5-11.
4. Будашко В.В., Онищенко О.А. Удосконалення системи управління підрулюючим пристроєм комбінованого пропульсивного комплексу // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – №38(1081). – С. 45-51.
5. Будашко В.В., Онищенко О.А. Математические основы имитационного моделирования системы управления энергетической установкой бурового судна // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2014. – №29. – С. 6-13.
6. Le Luo, Lan Gao, Hehe Fu. The control and modeling of diesel generator set in electric propulsion ship // International Journal of Information Technology and Computer Science. – 2011. – vol.3. – no.2. – pp. 31-37. Available at: <http://www.mecspress.org/ijites/ijites-v3-n2/IJITCS-V3-N2-5.pdf> (accessed 21 September 2015). doi: 10.5815/ijites.2011.02.05.
7. Будашко В.В., Онищенко О.А., Юшков Е.А. Физическое моделирование многофункционального пропульсивного комплекса // Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса). – 2014. – №2. – С. 88-92.
8. Hansen J.F. Modelling and control of marine power systems // Doktor ingeniør thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Engineering cybernetics, Trondheim, Norway, 2000. – 119 p. Available at: http://www.itk.ntnu.no/databaser/dr_ing_avhandling/vedlegg/110_pdf.pdf (accessed 21 September 2015).
9. Будашко В.В., Юшков Е.А. Математическое моделирование всережимных регуляторов оборотов подруливающих устройств судовых энергетических установок комбинированных пропульсивных комплексов // Электронное моделирование. – 2015. – Т.37. – №2. – С. 101-114.
10. WAMIT® / User manual // WAMIT, Inc.: Incorporated and Massachusetts Institute of Technology. – 2006. – 394 p. Available at: <http://www.engr.mun.ca/~bveitch/courses/8000/software/wamit/wamit.pdf> (accessed 21 September 2015).

REFERENCES

1. Radan D. *Integrated control of marine electrical power systems*. Thesis for the degree of philosophiae doctor, Trondheim, Norway, 2008. 231 p. Available at: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:123798/FULLTEXT01.pdf> (accessed 19 September 2015).
2. M.J. Sanjari, O. Alizadeh Mousavi, G.B. Gharehpetian. Assessing the risk of blackout in the power system including HVDC and FACTS devices. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2013, vol.23, no.1, pp. 109-121. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/enhanced/doi/10.1002/etep.1619>. (accessed 21 September 2015). doi: 10.1002/etep.1619.
3. Ocheretianyi Yu.A., Zhivitsa V.I., Belyi V.N., Onishchenko O.A., Vainfel'd E.I. Concept of computer monitoring and technical diagnostics for refrigeration unit of the ship. *Sudovye energeticheskie ustanovki – Ship Power Plants*, 2011, no.28, pp. 5-11. (Rus).
4. Budashko V.V., Onishchenko O.A. Improving management system combined thruster propulsion systems. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.38(1081), pp. 45-51. (Ukr).
5. Budashko V.V., Onishchenko O.A. Mathematical principles of simulation of power plant's control system at drillship. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Kamchatka State Technical University*, 2014, no.29, pp. 6-13. (Rus).
6. Le Luo, Lan Gao, Hehe Fu. The control and modeling of diesel generator set in electric propulsion ship. *International Journal of Information Technology and Computer Science*, 2011, vol.3, no.2, pp. 31-37. Available at: <http://www.mecspress.org/ijitcs/ijitcs-v3-n2/IJITCS-V3-N2-5.pdf> (accessed 21 September 2015). doi: 10.5815/ijitcs.2011.02.05.
7. Budashko V.V., Onishchenko O.A., Yushkov E.A. Physical modeling of multi-propulsion complex. *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoi akademii (m. Odesa) – Collection of scientific works of the Military Academy (Odessa City)*, 2014, no.2 pp. 88-92. (Rus).
8. Hansen J.F. *Modelling and control of marine power systems*. Doktor ingenior thesis, Trondheim, Norway, 2000. 119 p. Available at: http://www.itk.ntnu.no/databaser/dr_ing_avhandlinger/vedlegg/110_pdf.pdf (accessed 21 September 2015).
9. Budashko V.V., Yushkov Y.A. Mathematic modeling of all-range controllers speed of thrusters for ship power plants in combined propulsion complexes. *Electronnoe modelirovanie – Electronic Modeling*, 2015, vol.37, no.2, pp. 101-114. (Rus).
10. WAMIT® / User manual // WAMIT, Inc.: Incorporated and Massachusetts Institute of Technology. – 2006. – 394 p. Available at: <http://www.engr.mun.ca/~bveitch/courses/8000/software/wamit/wamit.pdf> (accessed 21 September 2015).

Поступила (received) 23.09.2015

Будашко Виталий Витальевич, к.т.н., доц.,
Одесская национальная морская академия,
65029, Одесса, ул. Дидрихсона, 8,
тел./phone +38 048 7332367, e-mail: bvv@te.net.ua

V.V. Budashko

Odessa National Maritime Academy,
8, Didrikhson Str., Odessa, 65029.

Implementation approaches during simulation of energy processes for a dynamically positioned ship.

Purpose. Creation of a mathematical model of the ship's power plant (SPP) combined propulsion complexes (CPC) that takes into account the behavior of all objects, including the ship itself, the transfer of power from the medium speed diesel generators on the propellers, which will allow to take into account the hydrodynamic properties of the vessel and their impact on the energy processes in SPP CPC. **Methodology.** The analysis of energy processes in the SPP CPC in different operating conditions resulted in creation of a strategy for constructing mathematical models of SPP CPC. This strategy is based on the implementation on the vector plane resulting power characteristics of SPP vectors disturbances, leading to the deviation of the hydrodynamic characteristics of the ship during operation dynamic positioning. The result allowed to consider not only the features of setting PID-governors of frequency converters of electric thrusters but the automatic voltage regulators of medium speed diesel generators as well. **Results.** Within the research work a software package Ships_CPC in Mat-Lab/Simulink was developed under the state budget project «Concepts, technologies and ways of improving ship power plants combined propulsion complexes» at the Department of Electromechanics and Electrical Engineering of Odessa National Maritime Academy. **Originality.** This complex represents a set of functional blocks of the components SPP CPC, built on the principle of «input-output». The simulation results demonstrate the ability to use software package Ships_CPC to study the effect of various settings on the energy regulators of processes SPP CPC, which can develop and integrate the different strategies of automatic voltage regulators. **Practical value.** Since software complex Ships_CPC was developed under Open system technology, it can reorganize, re-tune and integrate in processes of any difficulties with further completion in the form of a universal structure. References 10, figures 7.

Key words: ship power plants, combined propulsion complex, dynamic positioning, mathematical modeling, transfer of power, efficiency, regulation.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ЖЕСТКОСТИ МАГНИТНОЙ ПРУЖИНЫ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ КОАКСИАЛЬНО-ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Представлено результати комп'ютерного моделювання та експериментального дослідження статичних електро-механічних тягових характеристик магнітної пружини вібробуджувача на основі коаксіально-лінійного електричного двигуна з постійними магнітами. На основі отриманих тягових характеристик була визначена еквівалентна жорсткість магнітної пружини в залежності від значень струму в обмотці. Бібл. 7, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: коефіцієнт пружності, магнітна пружина, вібробуджувач, коаксіально-лінійний двигун.

Представлены результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования статических электро-механических тяговых характеристик магнитной пружины вибровозбудителя на основе коаксиально-линейного электрического двигателя с постоянными магнитами. На основании полученных тяговых характеристик была определена эквивалентная жесткость магнитной пружины в зависимости от значений тока в обмотке. Библ. 7, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: коэффициент жесткости, магнитная пружина, вибровозбудитель, коаксиально-линейный двигатель.

Введение. В строительном производстве существует ряд технологических процессов, которые базируются на вибрационном воздействии. Примерами таких процессов могут быть вибропогружение (виброизвлечение) строительных элементов в грунт (из грунта), виброуплотнение бетонных смесей, виброперемещение сыпучих материалов и т.п. [1].

Известно [2], что амплитуда колебаний рабочего органа колебательной системы достигает наибольшего значения на резонансной частоте, т.е. при совпадении собственной частоты колебаний системы с частотой вынуждающей колебания силы. А возмущающее усилие, которое создает вибровозбудитель, растет пропорционально частоте. Таким образом, при работе на резонансной частоте вибровозбудитель достигает наибольшей эффективности.

Во время технологического процесса, собственная частота колебаний системы может изменяться в связи с изменением влияющих на систему факторов. Например, при погружении сваи, с ростом глубины погружения возрастает лобовое сопротивление грунта. А во время вибротранспортировки могут перемещаться сыпучие материалы различных масс. В связи с этим, для достижения наибольшей эффективности, собственная частота колебаний вибрационной системы нуждается в корректировке во время работы.

Изменение собственной частоты колебаний существующих дебалансных вибровозбудителей с электрическим и гидравлическим приводом усложненно и требует специальных конструктивных решений. Кроме того, такие вибровозбудители имеют известные недостатки [3]: низкий КПД из-за дополнительных преобразований энергии, малый ресурс из-за воздействия эксцентрикового момента на валы и подшипники и т.д.

В ряде случаев для возмущения вибрации применяются электромагнитные вибровозбудители [4]. Конструктивно они значительно проще и надежнее, чем дебалансные, но уступают им по энергетическим характеристикам. С ростом амплитуды колебаний, в связи с увеличением воздушного зазора, энергетические характеристики еще более ухудшаются.

Коаксиально-линейный двигатель с магнитной пружиной. Перспективным приводом для вибра-

ционных систем является электрический коаксиально-линейный двигатель с магнитной пружиной (КЛД-МП) (рис. 1) [5].

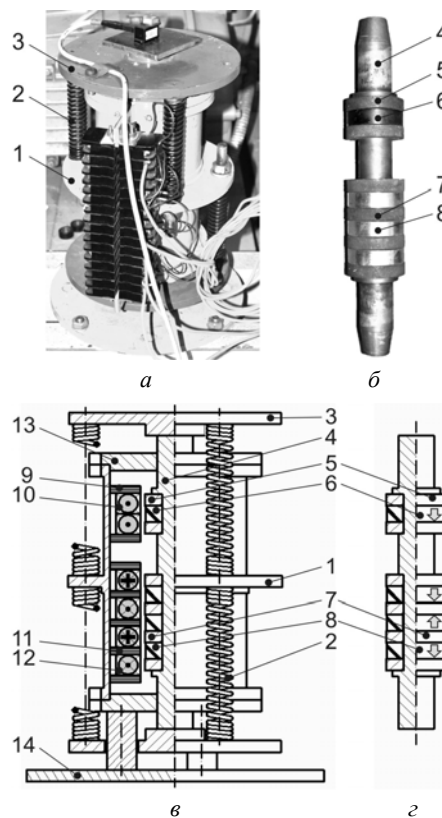


Рис. 1. Коаксиально-линейный двигатель с магнитной пружиной: а – внешний вид КЛД-МП; б – внешний вид бегуна КЛД-МП; в – конструкция КЛД-МП; г – конструкция бегуна КЛД-МП

На рис. 1 обозначено: 1 – корпус двигателя; 2 – пружины; 3 – массивные диски; 4 – шток бегуна; 5 – концентраторы магнитного потока (полюсы) магнитной пружины; 6 – постоянный магнит магнитной пружины; 7 – концентраторы магнитного потока (полюсы) вибровозбудителя; 8 – постоянные магниты вибровозбудителя; 9 – магнитопровод индуктора магнитной пружины; 10 – обмотка магнитной пружины;

11 – магнитопровод индуктора вибровозбудителя; 12 – обмотка вибровозбудителя; 13 – подшипниковые шиты; 14 – опорная плита.

Работу коаксиально-линейного двигателя с магнитной пружиной можно описать следующим образом. Обмотка индуктора вибровозбудителя (см. рис. 1) подключается к источнику переменного тока. При протекании переменного тока в обмотке вибровозбудителя возникает пульсирующее знакопеременное электромагнитное поле, которое при взаимодействии с полем системы постоянных магнитов на бегуне создает электромагнитную силу. Под воздействием этой силы бегун смещается в определенную сторону, сжимая соответствующие пружины. При изменении направления тока в обмотке, бегун совершает движение в противоположную сторону под воздействием электромагнитной силы и накопленной в пружинах энергии. Таким образом, возникает возвратно-поступательное движение бегуна с частотой питающего напряжения.

Обмотка индуктора магнитной пружины подключена к источнику постоянного тока. Протекание тока в обмотке приводит к образованию электромагнитного поля в индукторе магнитной пружины. Взаимодействие электромагнитных полей индуктора и бегуна с постоянными магнитами создает электромагнитное тяговое усилие, которое действует на бегун так же, как и усилие, развиваемое механической пружиной. Значение тягового усилия, следовательно, и эквивалентной жесткости магнитной пружины, определяется силой и направлением тока в обмотке.

Цель и задачи исследования. Исследование влияния значения тока и его направления на эквивалентную жесткость магнитной пружины коаксиально-линейного двигателя с постоянными магнитами и магнитной пружиной.

Материал исследования. Исследование эквивалентной жесткости магнитной пружины проводилось путем определения статических электромеханических тяговых характеристик [6] с помощью методов компьютерного моделирования и экспериментального исследования физической модели КЛД-МП.

Для определения статических электромеханических тяговых характеристик расчетным путем в пакете COMSOL Multiphysics [7] была разработана компьютерная модель магнитной пружины КЛД-МП (рис. 2), где: 1 – шток бегуна; 2 – воздушная среда; 3 – корпус; 4 – концентраторы магнитного потока (полюсы); 5 – постоянный магнит; 6 – катушки; 7 – магнитопровод индуктора. Конструктивные и физические параметры компьютерной модели магнитной пружины указаны в табл. 1.

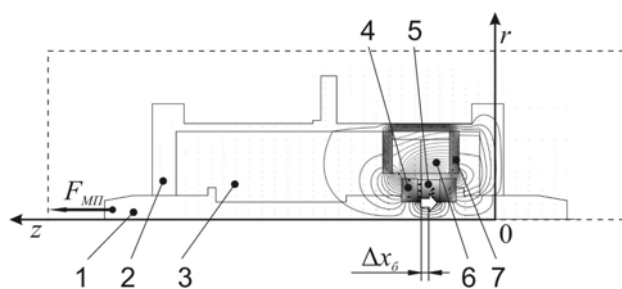


Рис. 2. Компьютерная модель магнитной пружины

Таблица 1
Конструктивные и физические параметры магнитной пружины КЛД-МП

п/п	Наименование параметра	Значение
1	Магнитопровод статора (Сталь 3): - внешний диаметр магнитопровода, мм - внутренний диаметр магнитопровода, мм - длина спинки магнитопровода, мм - относительная магнитная проницаемость Зубец статора (Сталь Э2312): - высота зубца, мм - ширина зубца, мм - относительная магнитная проницаемость	$D_{se} = 120$ $d_s = 110$ $l_{МП} = 48$ $\mu_r = 1000$ $h_z = 26$ $b_z = 6$ табл. знач.
2	Катушка индуктора: - внешний диаметр катушки, мм - внутренний диаметр катушки, мм - ширина катушки, мм	$D_e = 100$ $d_e = 58$ $b_e = 18$
3	Бегун (шток – бронза): - относительная магнитная проницаемость Концентратор магнитного потока (Сталь 3): - внешний диаметр концентратора, мм - внутренний диаметр концентратора, мм - ширина концентратора, мм - относительная магнитная проницаемость Постоянный магнит (NdFeB): - внешний диаметр магнита, мм - внутренний диаметр магнита, мм - ширина магнита, мм - направление намагничивания – аксиальное - остаточная индукция, Тл - относительная магнитная проницаемость	$\mu_r = 1$ $D_p = 51$ $d_p = 22$ $b_p = 10$ $\mu_r = 1000$ $D_{ПМ} = 50$ $d_{ПМ} = 22$ $b_{ПМ} = 14$ ax $B_{r(ПМ)} = 1,2$ $\mu_r = 1,06$

Моделирование статических электромеханических тяговых характеристик магнитной пружины КЛД-МП производилось методом конечных элементов. Задача решалась как осесимметричная, в цилиндрической системе координат, в плоскости roz для векторного потенциала A , который имеет одну ϕ -компоненту – $A = (0, A\phi, 0)$, в магнитостатическом приближении. Расчетная область ограничивается прямоугольником на $2l_{МП}$ (см. табл. 1) большим во все стороны чем габариты КЛД-МП (см. рис.2), на границах которой принимается условие $A\phi = 0$.

Моделирование проводилось в пределах положения бегуна Δx_b от 0 до 12 мм, что соответствует максимальному смещению бегуна в одну сторону, с шагом изменения положения 1 мм. В начальном положении ($\Delta x_b = 0$) центр магнитной системы на бегуне равноудален от обоих зубцов магнитопровода индуктора.

Плотность тока в проводнике обмотки магнитной пружины задавалась равной $J = 0$; $J = 2,53$ и $5,05$ А/мм². Эти значения плотности тока соответствуют значениям тока в обмотке физической модели магнитной пружины КЛД-ПМ $I = 0$; $I = 1$ и $I = 2$ А. Моделирование проводилось для обоих направлений тока.

Моделирование проводилось в магнитостатическом приближении с использованием тензора натяжения Максвелла

$$T = -\frac{1}{2}n(H \cdot B) + (n \cdot H)B, \quad (1)$$

где n – вектор нормали; H – вектор напряженности магнитного поля; B – вектор магнитной индукции; T – тензор напряженности.

Выражение электромагнитной силы имеет вид

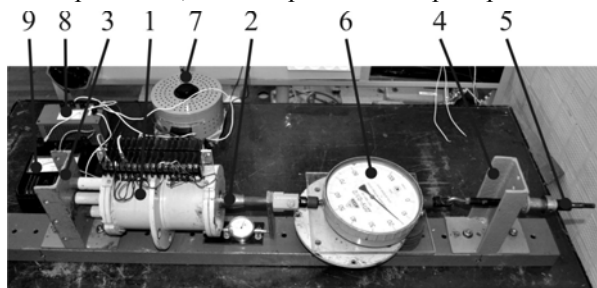
$$F = \oint_S T dS, \quad (2)$$

где S – поверхность, охватывающая объём активной зоны индуктора.

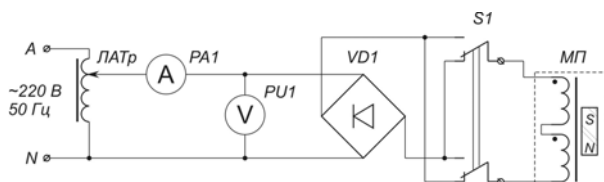
Таким образом, задача нахождения силы сводится к расчету компонент электромагнитного поля, которые для осесимметричной задачи описываются одной составляющей магнитного векторного потенциала.

В пакете COMSOL Multiphysics такая процедура нахождения продольной силы автоматизирована.

Экспериментальное исследование физической модели магнитной пружины КЛД-МП проводилось на стенде (рис. 3,а), где: 1 – корпус КЛД-МП; 2 – шток бегуна; 3 – кронштейн для крепления двигателя; 4 – кронштейн для фиксации тяги; 5 – тяга и регулировочная гайка; 6 – динамометр; 7 – автотрансформатор; 8 – выпрямитель; 9 – измерительный прибор.



а



б

Рис. 3. Стенд для экспериментального исследования магнитной пружины КЛД-МП:

а – внешний вид; б – принципиальная электрическая схема

Принципиальная электрическая схема стенда изображена на рис. 3,б, где: МП – обмотка магнитной пружины; ЛАТр – лабораторный автотрансформатор; РА1 – амперметр; ПУ1 – вольтметр; VD1 – полупроводниковый однофазный мостовой выпрямитель; S1 – переключатель направления тока.

Экспериментальный стенд (см. рис. 3) устроен следующим образом. Двигатель 1 болтовыми соединениями жестко закрепляется на кронштейне стенда 3. С помощью дополнительных элементов шток бегуна 2 соединяется со штоком динамометра 6. Корпус динамометра лежит на гладкой поверхности опорной платформы. Свободное ушко динамометра сопряжено с тягой 5, которая проходит через сквозное отверстие кронштейна 4. С помощью регулировочной гайки производится установка необходимого положения бегуна КЛД-МП.

Значение тока в обмотке магнитной пружины КЛД-МП с помощью автотрансформатора задавалось равным $I = 0$; $I = 1$; и $I = 2$ А. Направление тока устанавливалось с помощью переключателя S1.

Перед началом экспериментального исследования бегун устанавливался в начальное положение ($\Delta x_6 = 0$). После подачи тока на обмотку магнитной пружины бегун несколько смещался в ту или иную сторону, что компенсировалось с помощью регулировочной гайки. После компенсации смещения показания динамометра фиксировались и устанавливалось новое положение

бегуна (бегун смещался на 1 мм). Действуя таким образом, было проведено экспериментальное исследование статических электромеханических тяговых характеристик магнитной пружины КЛД-МП в пределах положения бегуна Δx_6 от 0 до 12 мм.

Результаты исследований. В результате компьютерного моделирования и экспериментального исследования было получено семейство тяговых характеристик $F_{мп} = f(\Delta x_6, I)$ магнитной пружины КЛД-МП (рис. 4).

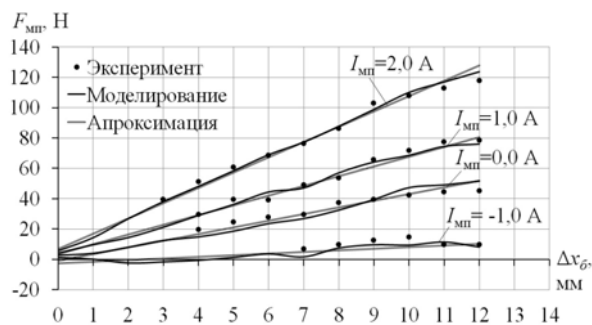


Рис. 4. Семейство тяговых характеристик $F_{мп} = f(\Delta x_6, I)$ магнитной пружины

По виду графиков (см. рис. 4) тяговых характеристик $F_{мп} = f(\Delta x_6, I)$ магнитной пружины видно, что тяговое усилие линейно возрастает с перемещением бегуна вдоль индуктора и пропорционально значению тока в обмотке. Эта зависимость при заданных значениях тока аппроксимируется линейными выражениями:

$$F_{МП(I=-1,0A)} = 1,074\Delta x_6 - 2,6601; \quad (3)$$

$$F_{МП(I=0,0A)} = 4,4\Delta x_6; \quad (4)$$

$$F_{МП(I=1,0A)} = 6,4196\Delta x_6 + 3,518; \quad (5)$$

$$F_{МП(I=2,0A)} = 10,088\Delta x_6 + 6,7879. \quad (6)$$

Выражения (3) – (6) позволяют получить зависимость $F_{мп} = f(I)$ тягового усилия от тока в обмотке магнитной пружины при определенном положении бегуна. Например, кривая зависимости $F_{мп} = f(I)$ для положения бегуна $\Delta x_6 = 12$ мм показана на рис. 5.

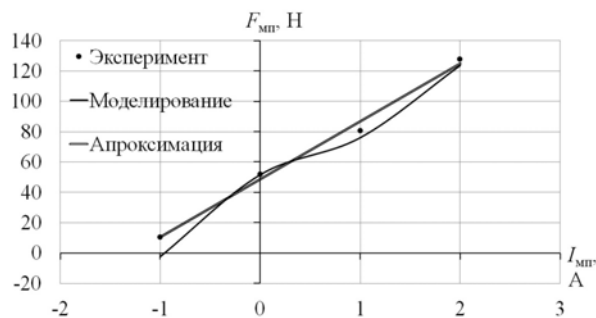


Рис. 5. Зависимость $F_{мп(\Delta x_6=12)} = f(I)$ для положения бегуна $\Delta x_6 = 12$ мм

Показанная кривая зависимости $F_{мп} = f(I)$ (см. рис. 5) аппроксимируется линейным выражением

$$F_{МП(\Delta x_6=12)} = 38,153I + 48,457 \text{ (Н)}. \quad (7)$$

Таким образом, выражение эквивалентного коэффициента жесткости магнитной пружины КЛД-МП можно записать следующим образом:

$$c_{МП} = \frac{F_{МП(\Delta x_6)} - F_{МП(\Delta x_6=0)}}{\Delta x_6 - 0} = \frac{38,153I + 48,457 - 0}{12 \cdot 10^{-3}} = 3179,416I + 4045,583 \text{ (Н/м)}, \quad (8)$$

где $F_{мп(\Delta x \delta)}$ – тяговое усилие магнитной пружины при текущем положении бегуна, Н.

Воспользовавшись выражением (8) можно получить график зависимости $c_{мп} = f(I)$ эквивалентного коэффициента жесткости магнитной пружины КЛД-МП от значения тока в обмотке (рис. 6.).

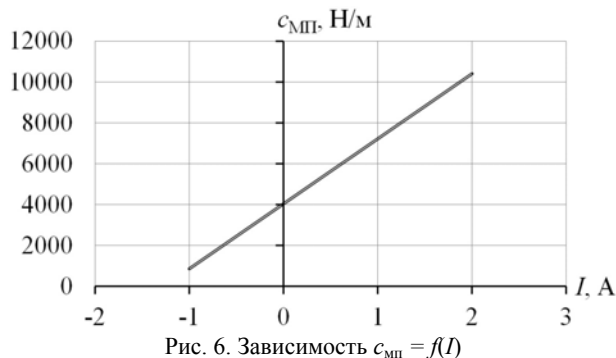


Рис. 6. Зависимость $c_{мп} = f(I)$

По виду кривой зависимости $c_{мп} = f(I)$ (см. рис.6) видно, что эквивалентный коэффициент жесткости магнитной пружины КЛД-МП принимает ненулевое значение и при отсутствии тока в обмотке.

Учитывая это, выражение (8) эквивалентного коэффициента жесткости магнитной пружины в общем виде может быть записано следующим образом:

$$c_{мп} = k_{мп}I + c_{мп,0}, \quad (9)$$

где $k_{мп}$ – коэффициент пропорциональности, Н/А·м; $c_{мп,0}$ – эквивалентный коэффициент жесткости магнитной пружины без тока в обмотке, Н/м.

Значения коэффициента пропорциональности $k_{мп}$ и эквивалентного коэффициента жесткости $c_{мп,0}$ магнитной пружины без тока в обмотке определяются конструктивными и физическими параметрами КЛД-МП.

Выводы. Разработана методика определения статических электромеханических тяговых характеристик магнитной пружины КЛД-МП путем компьютерного моделирования и экспериментального исследования физической модели.

Получено выражение эквивалентного коэффициента жесткости магнитной пружины КЛД-МП, которое позволяет рассчитать значение коэффициента жесткости в пределах допустимых значений тока в обмотке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартынов В.Д., Алешин Н.И., Морозов Б.П. Строительные машины и монтажное оборудование: Учебник для студентов вузов по специальности «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование». – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
2. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний: Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1980. – 408 с.
3. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти томах. Т.4. Вибрационные процессы и машины. Под ред. Лавендела Э.Э. – М.: Машиностроение, 1981. – 509 с.
4. Бауман В.А., Быховский И.И., Гольдштейн Б.Г. Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов. – М.: Машиностроение, 1969. – 544 с.
5. Пат. 24757 Україна, МПК E02D 7/10, E02D 7/18, E02D 7/20. Вібробуджувач / Богаєнко М.В., Бондар Р.П., Голєнков Г.М., Голуб В.П., Макогон С.А., Пархоменко Д.І., Попков В.С. – №u200702975; заявл. 21.03.2007; опубл. 10.07.2007, Бюл. №10.
6. Голєнков Г.М., Пархоменко Д.І. Електромеханічні тягові характеристики лінійного двигуна з постійними магнітами та магнітним підвісом // Технічна електродинаміка. – 2014. – №6. – С. 56-59.

7. COMSOL Multiphysics®. The Platform for Physics-Based Modeling and Simulation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.comsol.com/comsol-multiphysics.

REFERENCES

1. Martynov V.D., Aleshin N.I., Morozov B.P. *Stroitel'nye mashiny i montazhnoe oborudovanie: Uchebnik dlia studentov vuzov po spetsial'nosti «Pod'emno-transportnye, stroitel'nye, dorozhnye mashiny i oborudovanie»* [Construction machines and assembly equipment: Textbook for students in specialty «Lifting-and-vehicles, building, road machines and equipment»]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 352 p. (Rus).
2. Biderman V.L. *Teoriia mekhanicheskikh kolebani: Uchebnik dlia vuzov* [Theory of mechanical vibrations: Textbook for universities]. Moscow, Vysshiaia shkola Publ., 1980. 408 p. (Rus).
3. *Vibratsii v tekhnike: Spravochnik. V 6-ti tomakh. T.4. Vibratsionnye protsessy i mashiny. Pod red. Lavendela E.E.* [Vibration in technique: Handbook in 6 vols. Vol.4. Vibrating processes and machines. Edited by Lavendel E.E.]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1981. 509 p. (Rus).
4. Bauman V.A., Bykhovskii I.I., Gol'dshtein B.G. *Vibratsionnye mashiny v stroitel'stve i proizvodstve stroitel'nykh materialov* [Vibrating machines in the construction and production of construction materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1969. 544 p. (Rus).
5. Bohayenko M.V., Bondar R.P., Golenkov G.M., Holub V.P., Makohon S.A., Parkhomenko D.I., Popkov V.S. *Vibrozbudzhuvach* [Vibration exciter]. Patent UA, no.24757, 2007. (Ukr).
6. Golenkov G.M., Parkhomenko D.I. The electromechanical propulsion performance characteristics of coaxial-linear motor with constant magnets and magnet bracket. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical Electrodynamics*, 2014, no.6, pp. 56-59. (Ukr).
7. COMSOL Multiphysics®. The Platform for Physics-Based Modeling and Simulation. Available at: www.comsol.com/comsol-multiphysics (accessed 13 September 2004).

Поступила (received) 02.09.2015

Голєнков Геннадий Михайлович¹, к.т.н., доц., Пархоменко Дмитрий Игоревич¹, инженер,

¹ Киевский национальный университет строительства и архитектуры,

03680, Киев, Воздухофлотский проспект, 31, тел/phone +38 044 2415580,

e-mail: gennadiymikhaylovich@mail.ua, parkhomenkodm@gmail.com

G.M. Golenkov¹, D.I. Parkhomenko¹

¹ Kyiv National University of Construction and Architecture, 31, Povitroflotsky Avenue, Kyiv-037, 03680 Ukraine.

Modeling of equivalent stiffness of a magnetic spring of vibration exciter based on coaxial-linear motor.

Purpose. The research of the influence of value and direction of current on the equivalent spring magnetic force based on coaxial-linear motor (CLM – MS). **Methodology.** We carried out investigation of the equivalent harshness of magnetic spring with determination of electromechanical propulsion performance characteristics by the methods of computer modeling and experimental research of physical model of CLM – MS. The modeling of magnetic spring of CLM – MS is carried out by the finite-element method. The challenge is met as an axisymmetric challenge in cylindrical co-ordinates in magnetostatic approach. The experimental investigation of the propulsion performance characteristics of magnetic spring is carried out on the test bench. **Results.** After the computer modeling and the experimental investigation of the electromechanical propulsion performance characteristics of magnetic spring the expressions of equivalent stiffness coefficient depending on the current in winding are obtained. The results of computer modeling are confirmed experimentally. **Originality.** The determination of equivalent stiffness coefficient of magnetic spring of vibration exciter based on coaxial-linear motor. **Practical value.** The obtained determination of equivalent stiffness coefficient of magnetic spring may be used in process of designing of vibration machines with devices for change of natural oscillation frequency. References 7, tables 1, figures 6.

Key words: stiffness coefficient, magnetic spring, vibration exciter, coaxial-linear motor.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ РАСЧЕТЫ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ FEMM ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Представлені принципи автоматизованих розрахунків у програмному середовищі пакету FEMM для аналізу динаміки електромагнітних процесів в турбогенераторах. Це реалізовано у вигляді скрипта на алгоритмічній мові Lua. Часові функції електромагнітних величин отримуються за допомогою багатопозиційних розрахунків магнітного поля із забезпеченням його обертання разом із ротором турбогенератора. Бібл. 9, рис. 5.

Ключові слова: програма FEMM, турбогенератор, магнітне поле, електромагнітні процеси, динаміка змінення, автоматизовані розрахунки, Lua скрипт.

Представлены принципы автоматизированных расчетов в программной среде пакета FEMM для анализа динамики электромагнитных процессов в турбогенераторах. Это реализовано в виде скрипта на алгоритмическом языке Lua. Временные функции электромагнитных величин получаются посредством многопозиционных расчетов магнитного поля с обеспечением его вращения вместе с ротором турбогенератора. Библ. 9, рис. 5.

Ключевые слова: программа FEMM, турбогенератор, магнитное поле, электромагнитные процессы, динамика изменения, автоматизированные расчеты, Lua скрипт.

Введение. Для расчетов двумерных магнитных полей (МП) различных электротехнических устройств широко используется программа FEMM [1], основанная на методе конечных элементов. Она эффективна и для электрических машин (ЭМ) классической конструкции при практически плоскопараллельном МП в пределах их активной части, например, турбогенераторов (ТГ) [2]. Эта программа освободила расчетчиков ЭМ от разработки математических моделей МП и программирования, и их высокую производительность обеспечивает ее удобный интерфейс.

Основное время пользователей программы FEMM тратится на «ручное» построение *графических моделей*, отображающих конструкцию ЭМ, и *физических моделей*, отображающих свойства материалов и токонесущих обмоток и постоянных магнитов, а также на «извлечение» результатов расчета.

Решению проблемы построения расчетных моделей ЭМ способствует интегрированный в программу FEMM алгоритмический язык Lua. Опыт реализации этого на примере ТГ есть в [3]. Из остающихся проблем выделяется большой расход времени при многовариантных расчетах МП и электромагнитных параметров ЭМ. Это необходимо, например, для исследования динамики электромагнитных процессов, таких как в [4-6]. При этом требуется варьирование токами обмоток, геометрией и размерами, взаимным положением неподвижных и подвижных частей.

Целью данной работы является представление принципов составления скрипта Lua для автоматизированных расчетов динамики электромагнитных процессов в ЭМ в программной среде FEMM на примере турбогенератора – одного из наиболее крупных и ответственных представителей их семейства [7].

Требованиями к такой программе являются универсальность с точки зрения геометрии и размеров ТГ, а также установившихся режимов их работы (холостой ход, нагрузка, короткое замыкание) при минимуме вводимой информации – только в числовой форме. К решаемым задачам относятся как автоматизированное управление процессом расчетов МП при его вращении вместе с ротором, так и формирование

и сохранение результатов расчетов. В данной работе показано «извлечение» дискретных временных функций: магнитное потокоцепление (МПС) фазной обмотки статора; силы, действующие на токонесущие и ферромагнитные элементы конструкции; магнитная индукция (МИ) в неподвижных точках; электромагнитный момент (ЭММ). Если надо, то этот перечень можно расширить в рамках созданной программы.

Основой разработанного скрипта Lua является заранее подготовленная для среды FEMM расчетная модель электромагнитной системы ТГ (графическая и физическая ее составляющие). Это делается в «ручном» режиме в соответствии с инструкциями к программе FEMM, а в нашем случае это сделано посредством скрипта Lua, опубликованного в [3].

Целесообразность и эффективность достаточно сложных скриптов Lua заключается в том, что программы пишутся один раз, а используется бесчисленное число раз и любым количеством пользователей. Кроме того, при небольших доработках скрипты можно применить для расчетов других типов ЭМ и прочих электротехнических устройств.

Объект исследования. Для иллюстраций здесь, как и в [3], взяли ТГ мощностью 340 МВт, параметры которого есть далее в файле исходных данных.

Для расчета МП в программе FEMM модель электромагнитной системы ТГ в его поперечном сечении выглядит, как на рис. 1. Здесь разной штриховкой проводников в пазах статора показаны фазные зоны его обмотки $A-A'$, $B-B'$ и $C-C'$. При работе с моделью ТГ используется прямоугольная система координат x , y и в исходной позиции принято: МДС фазной обмотки $A-A'$ и продольная ось ротора d ориентированы по оси y ; с осью x будут совпадать оси симметрии пазов или зубцов статора – в зависимости от значения относительного укорочения обмотки статора β_s . Это регулируется в программе по ширине фазной зоны обмотки статора в зубцовых делениях z_s , формула для которой есть в [3], а также прописана в представляемом далее скрипте.

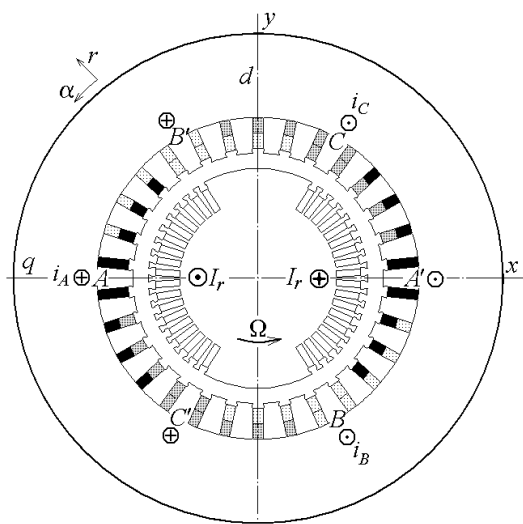


Рис. 1. Модель электромагнитной системы ТГ в его поперечном сечении

Вид заранее подготовленной (тип файла – Femme Document) и вызванной на экран компьютера в среде FEMM расчетной модели ТГ представлен на рис. 2.

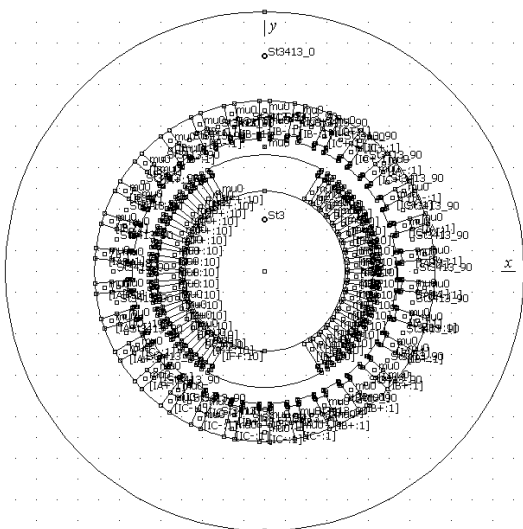


Рис. 2. Исходная физико-геометрическая модель ТГ

При формировании физико-геометрической модели ТГ его элементы объединены в группы с целью оперирования с ними, как с отдельными единицами области расчета. Конкретно, пронумерованы следующие группы: 1 – сердечник статора; 2, 3, 4, 5, 6, 7 – фазные зоны A, B, C, A', B', C' обмотки статора, соответственно (рис. 1), 9 – все элементы ротора, 0 – все остальное (зазор), 8 – резерв.

Теоретические основы. Временные функции электромагнитных величин и, в том числе, силовых действий получаются посредством многопозиционных расчетов МП, как это теоретически обосновано в [4-6], для задаваемого с шагом Δt временного ряда

$$t_k = \Delta t(k-1); \quad k=1, 2, \dots, na \quad (1)$$

с обеспечением вращения ротора посредством его установки в угловые позиции

$$\alpha_k = \Delta \alpha(k-1); \quad k=1, 2, \dots, na, \quad (2)$$

и синхронного вращения МП статора симметричной системой фазных токов в стержнях его обмотки:

$$i_{As} = I_m \cos(\omega t_k + \beta); \quad i_{Bs} = I_m \cos(\omega t_k - \frac{2}{3}\pi + \beta);$$

$$i_{Cs} = I_m \cos(\omega t_k + \frac{2}{3}\pi + \beta), \quad k=1, 2, \dots, na, \quad (3)$$

где na – минимальное число позиций, позволяющее сформировать конкретные временные функции на их периоде изменения; $\Delta \alpha = \Omega \cdot \Delta t$ – угловой шаг вращения ротора; Ω – угловая скорость; I_m – амплитуда токов в параллельных ветвях фазной обмотки статора; ω – угловая частота; β – угловое смещение оси, по которой действует МДС трехфазной обмотки статора, по отношению к продольной оси ротора d [8].

В итоге искомые временные функции разных величин представлялись дискретным числовым рядом

$$\Gamma(t_k), \quad k=1, 2, \dots, na, \quad (4)$$

где Γ – пока некий обобщенный символ функции.

Временные функции $\Gamma(t)$ разных величин в ТГ имеют разные периоды повторения. Такие величины, как МИ в неподвижных точках, МПС и ЭДС обмотки статора имеют максимальный период T , равный периоду токов статора (3). Причем эти функции подчинены условию асимметрии $\Gamma(t+T/2) = -\Gamma(t)$.

Поэтому для выявления функций с периодом T необходимо их сформировать максимум на временном интервале в полпериода, т.е. $T/2$.

Кроме того, в симметричной трехфазной системе ТГ еще можно уменьшить число расчетов ввиду повторяемости функций $\Gamma(t)$ трех фаз с фазовым сдвигом на $T/3$. Поэтому расчеты МП с временным шагом Δt достаточно провести на временном интервале $(0 \dots T/6)$ с поворотом ротора на 60° . Тогда получатся части функции $\Gamma(t)$ от трех фаз обмотки или в трех фазных зонах – в зависимости от рассматриваемой величины, а именно, $\Gamma_A(t)$, $\Gamma_B(t)$ и $\Gamma_C(t)$.

Для получения функции на полупериоде, например, для принятой за базу фазы $A - \Gamma_A(t)$, она сохраняется на интервале $(0 \dots T/6)$ и формируется ее продолжение на интервал $(T/6 \dots T/3)$, как $\Gamma_A(t+T/6) = -\Gamma_B(t)$, а на интервал $(T/3 \dots T/2)$ – как $\Gamma_A(t+T/3) = \Gamma_C(t)$.

Изложенное вносит определенность в формирование функций в представляемом далее скрипте Lua с учетом теоретических основ для их вычисления, которые указываются ниже ссылками на источники.

Дискретная функция фазной ЭДС статора $E_s(t_k)$ получается через аналогичную функцию МПС $\Psi_s(t_k)$. Они, а также временные функции МИ $B_A(t_k)$ в неподвижных точках затора имеют указанный период T , а необходимая теория оперирования с ними и результаты расчетов по программе представлены в [4, 8, 9].

Электродинамические усилия, действующие в пазу статора непосредственно на стержни обмотки с током (в FEMM их называют силами Лоренца), представляются угловой и радиальной составляющими и модулем, т.е. $F_{A\alpha}(t_k)$, $F_{Ar}(t_k)$, $F_A(t_k)$.

Силовые действия на ферромагнитный сердечник ТГ вычисляются через тензор магнитного натяжения Максвелла. В программе представлены конкретно функции угловой составляющей силы $F_{T\alpha}(t_k)$, приложенной к зубцовому делению сердечника статора, а также радиальной силы $F_{Tr}(t_k)$, действующей на сердечник статора в пределах полюсного деления.

Все указанные силы имеют период повторения T_2 , равный $T/2$, и их временные функции подчинены условию симметрии $\Gamma(t+T/2) = \Gamma(t)$. Поэтому, после расчетов МП на временном интервале $(0...T/6)$ с поворотом ротора на 60° , получаются части функции $\Gamma(t)$ в трех фазных зонах B', A, C' , а именно, $\Gamma_B(t)$, $\Gamma_A(t)$ и $\Gamma_C(t)$. И они объединяются на периоде в результирующую функцию $\Gamma(t)$ для фазной зоны таким образом: $\Gamma_A(t) = \Gamma_B(t)$, $\Gamma_A(t+T/6) = \Gamma_A(t)$, $\Gamma_A(t+T/3) = \Gamma_C(t)$.

Электромагнитный момент определяется также через тензор магнитного натяжения, а его функция $M_{em}(t_k)$ формируется для получения среднего значения M_{av} и переменной составляющей $dM_{em}(t_k)$. Последняя имеет период повторения T_6 , равный $T/6$, т.е. при указанном повороте ротора получаются ее три периода.

Для электромагнитного момента и предыдущих сил теорию и результаты можно найти в [4, 5].

В созданном скрипте Lua также формируются функции переменной составляющей МИ в точках, связанных с вращающимся ротором [4], проводится гармонический анализ всех периодических величин [4-6], определяется ряд электрических и энергетических параметров ТГ, их фазовые соотношения [8, 9]. Но в данной статье это не представлено для ограничения ее объема. Для этого же в представленном скрипте однотипные действия приводятся выборочно.

Общая характеристика языка Lua. Текстовые файлы скриптов и файлов данных можно писать в редакторе *Блокнот*.

Язык Lua, как и другие языки программирования, позволяет создавать циклы, условные операторы, процедуры, выполнять вычисления по математическим формулам, по стандартным и созданным самостоятельно функциям. Например, есть стандартные функции: *ceil* – целая часть результата; *sqr* – корень квадратный; *sin*, *cos*, *tan*, *atan* – синус, косинус, тангенс, арктангенс и др. При вычислении по тригонометрическим функциям углы задаются в радианах, а при работе с геометрическими объектами Lua оперирует углами в градусах. Есть встроенное число π – Pi.

В скрипте Lua команды, начинающиеся с *mo_* или *mi_*, являются стандартными процедурами. Их описание можно найти через кнопку *Help* в рабочем окне FEMM, войдя затем в раздел *Lua Scripting* [1].

Приведем часто встречающиеся у нас команды: 1) *mo_selectblock(x,y)* – выбор ближайшего к точке (x,y) блока; 2) *mo_groupselectblock(n)* – выбор группы блоков с номером n; 3) *mo_blockintegral(k)* – вычисление интегральной величины для выделенного блока, заданной номером k; 4) *mo_clearblock()* – очистка выделения ранее выбранных блоков; 5) $A, B_x, B_y = mo_getpointvalues(x,y)$ – извлечение векторного магнитного потенциала (ВМП) и составляющих МИ для заданной координатами (x,y) точки.

Строки программы или их правая часть, начинающиеся с двойного дефиса --, являются комментариями и не влияют на ее работу.

Значения различных параметров ТГ и обслуживающих локальных констант и переменных можно задавать непосредственно в программе Lua, а также

вводить из заранее подготовленных текстовых файлов. Рациональным является и принят в этой работе подход, когда все параметры, характеризующие данную задачу и возможно меняющиеся для разных вариантов ТГ, вводятся из заранее подготовленного файла.

В операторах *write*, для записи результатов в файл, опция *"\r\n"* дает переход на новую строку, а использование символов типа *%5.2f* является форматом (format) печати, т.е. в данном случае под число выделяется 5 позиций, а две – под дробную часть.

Файл исходных данных для скрипта Lua. Внешнее имя файла данных скрипт Lua запрашивает после его запуска оператором с «подсказкой»:
File_dan=prompt("Введите имя файла")

Необходимое имя набирается с клавиатуры и вводится нажатием *Enter*. После этого скрипт открывает файл для чтения (*"r"*) и присваивает ему внутреннее имя, например, *f_d* с расширением *txt*, т.е.
f_d = openfile(File_dan .. ".txt", "r")

Оператор чтения *read(f_d, "*n", "*l")* из очередной строки считает значения стольких числовых или строковых данных, сколько раз в нем фигурирует опция *"*n"*, а опцией *"*l"* будет сделан перевод на новую строку, т.е. оставшийся в строке любой текст игнорируется и используется расчётчиком как комментарий (у нас отделяется символом :).

Файл данных начинается со строк любых комментариев. Они не участвуют в работе программы, но при вводе информации главной программой должны быть прочитаны – «сняты» как текстовые строки.

Программой вводятся числовые исходные данные либо текстовые отрезки в двойных кавычках (*" "*) соответствующих строковых данных.

Единица измерения геометрических размеров указываются в задании для главного процессора программы FEMM – обычно принимаются миллиметры.

Пример данных в файле DanF_TG340.txt:

Данные для расчетов вращающегося магнитного поля турбогенератора

и вращающегося ротора и извлечения временных функций электромагнитных величин

"TG340FN" : name_TG – имя расчетной модели ТГ
"06.06.2015" : data_dan – дата данных
"FemF_TG340" : name_fem – имя модели в FEMM
"RezF_TG340" : name_rez – имя файла результатов
3 : ms – число фаз обмотки статора
1 : p – число пар полюсов
50 : fs – номинальная частота
-160.47 : beta – начальная фаза токов статора в (3), град
2206 : Ir – ток возбуждения ротора, А
11547 : Is – фазный ток статора, А
0.8 : bs – относительное укорочение обмотки статора
30 : Qs – число пазов статора
10 : Ns – число последовательных витков в фазе стат.
1 : as – число параллельных ветвей обмотки статора
5.308 : la – активная длина турбогенератора, м
699 : rv – средний радиус верхн. слоя обм. статора, мм
778 : m – средний радиус нижнего слоя обм. статора, мм
565 : rl – радиус в зазоре у поверхности ротора, мм

598.75 : r2 – средний радиус в зазоре, мм
632.5 : r3 – радиус в зазоре у расточки статора, мм
60 : na – число точек времени и позиц. на 1/6 периода

Отметим, что кривые намагничивания стале сердечников ротора и статора (зубцы и ярмо – отдельно), коэффициент заполнения сердечника статора с учетом пакетирования; а также уровень конечно-элементной дискретизации области расчета уже содержит в себе FEMM модель ТГ [3].

Структура программы расчета динамики электромагнитных процессов турбогенератора. В укрупненном виде основные логические части программы имеют такую последовательность.

1. Задание файла исходных данных.
2. Ввод исходных данных из этого файла.
3. Организация файла для результатов расчета.
4. Сохранение FEMM-модели ТГ под новым именем.
5. Вычисление дополнительных параметров ТГ на основе исходных данных и локальных констант.
6. Вывод желаемых данных в файл результатов.
7. Организация массивов для искомых функций.
8. Задание тока возбуждения в FEMM модель ТГ.
9. Организация функций для разных результатов.
10. Запуск цикла поворотов ротора и МП статора для расчета динамики разных величин (параметр nb).
11. Пересчет и задание токов фаз обмотки статора в FEMM-модель ТГ
12. Расчет МП в каждой из позиций ротора.
13. Извлечение значений рассчитываемых функций и запоминание их в массивах.
14. Запись таблиц результатов в файл.

Скрипт Lua. Далее приводится программа, которая после ее вызова в среде FEMM формирует временные функции электромагнитных параметров ТГ и делает необходимую их обработку на основе численных расчетов МП.

```
--Задание файла исходных данных
File_dan=prompt("Введите имя файла")
--Открытие файла данных
f_d = openfile(File_dan .. ".txt","r")
--Считывание четырех строк заголовка
for i=1,4,1 do str=read(f_d,"*1") end
-- ДАННЫЕ из файла File_dan.txt
name_TG=read(f_d,"*n","*1") --имя ТГ
data_dan=read(f_d,"*n","*1") --дата
name_fem=read(f_d,"*n","*1") --имя FEMM
--Имя файла для записи результатов
name_rez=read(f_d,"*n","*1")
ms=read(f_d,"*n","*1") --число фаз
p=read(f_d,"*n","*1") --пары полюсов
fs=read(f_d,"*n","*1") --частота
```

Таким же способом считываются все данные из указанного выше файла данных вплоть до na, т.е.:

```
na=read(f_d,"*n","*1") --число позиций
closefile(f_d) --закрытие файла данных
--Организация файла результатов
writeto(name_rez) --name_rez имя файла
--Имя геометрической модели ТГ-тип fem
name_fem=name_fem .. ".fem"
mi_saveas(name_fem) --запомнить модель
```

--РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ:

```
gr=Pi/180 --множитель градус=>радиан
mu0=4*Pi*1e-7 --магнитная постоянная
beta=beta*gr --значение угла beta, рад
ts=360/Qs --угол зубц. шага статора
tp=Qs/(2*p) --полюсный шаг в зуб. дел.
qsp=tp/ms --число пазов на полюс и фазу
zs=ceil(qsp+tp*(1-bs)) --ширина фазной
--зоны по крайним стержням статора
qsn=0.5*(qsp-tp*(1-bs)) --число пазов
--нижнего слоя обм. ст-ра над осью q
qsv=qsp-qsn --число пазов верхнего
--слоя обмотки статора над осью q
--Угол первого нижнего стержня фазы A
anl=180-(qsn-0.5)*ts
--Угол первого верхнего стержня фазы A
avl=180-(qsv-0.5)*ts
Im=Is*2^0.5/as --амплитуда фазного
-- тока в параллельной ветви
da=60/na --шаг угла поворота ротора
Kt = 3*na --число моментов времени
-- и позиций ротора на полупериоде
nal=na+1 --добавление крайней точки
--для полного цикла расчетной зоны
--Массив радиусов в зазоре
rdn={} rdn[1]=r1 rdn[2]=r2 rdn[3]=r3
--Запись некоторых параметров ТГ
write("Общие данные ТГ","\r\n")
write(format(" Is= %5.0f",Is),
format(" beta= %7.2f",beta/gr),
format(" Ir= %5.0f",Ir),"\r\n")
write("Число интерв. na=",na,
format("; шаг da=%6.3f",da),"\r\n")
```

Аналогично выводится в файл и другая необходимая информация.

```
--Организация 1- и 2-мерных массивов
Fr={} Fa={} Fs={} --вспомогательные
--массивы для сбора разных величин
Ps={} --массив значений МПС фазы A
--Двухмерный массив МИ Br на трех
--радиусах в неподвижных точках зазора
Brd={} for nb=1,Kt+1 do Brd[nb]={} end
--Двухмерные массивы радиальн., углов.
--и модуля силы на три паза статора
n=Kt+1
Frs={} for nb=1,n,1 do Frs[nb]={} end
Fas={} for nb=1,n,1 do Fas[nb]={} end
Fss={} for nb=1,n,1 do Fss[nb]={} end
Mem={} --массив для ЭМ-момента
--Двухмерные массивы тензоров сил,
--действующих на дугах в зазоре
Frtn={} for nb=1,n do Frtn[nb]={} end
Fatn={} for nb=1,n do Fatn[nb]={} end
--Задание тока возбуждения в FEMM
mi_modifycircprop("IF+",1,Ir)
mi_modifycircprop("IF-",1,-Ir)
--в FEMM есть имена меток IF+,IF-
--НАШИ ФУНКЦИИ
--Электродинамические силы (Лоренца),
--приходящиеся на паз статора
function F_Lor_st(nn,nb)
--nn,nb - номера паза и позиции ротора
d=(nn-1)*0.2 --сдвиги пазов по углу
-- Сдвиги для четных и нечетных zs
z1=zs/2 z2=ceil(z1)
if z1==z2 then e=0.5 else e=0 end
```

```

--Цикл перебора фазных зон A, B, C
for nz=1,3,1 do
--Угловая координата паза в фазных зонах
ak=Pi/2+ts*gr*(nz-2-d)*qsp-e)
--Координаты стержней верхнего слоя
s=sin(ak) c=cos(ak) xv=-rv*s yv=rv*c
xn=-rn*s yn=rn*c --и нижнего слоя
--Разметка стержней в общем пазу
mo_selectblock(xv,yv)
mo_selectblock(xn,yn)
--Извлечение x- и y-компонент силы
Fx=mo_blockintegral(11)
Fy=mo_blockintegral(12)
mo_clearblock() --очищение выделения
--Пересчет сил на единицу длины, кН/м
g=1e-3/la Fx=Fx*g Fy=Fy*g
Fs[nz]=sqrt(Fx*Fx+Fy*Fy) --модуль силы
--Перевод в радиальн. и угл. составл.
Fr[nz]=Fy*c-Fx*s Fa[nz]=-Fy*s-Fx*c
end --перебора пазов статора по nz
--Сбор сил в массивы для паза фазы A
Frs[nn][nb]=Fr[2] Frs[nn][k1]=Fr[1]
Frs[nn][k2]=Fr[3] Fas[nn][nb]=Fa[2]
Fas[nn][k1]=Fa[1] Fas[nn][k2]=Fa[3]
Fss[nn][nb]=Fs[2] Fss[nn][k1]=Fs[1]
Fss[nn][k2]=Fs[3] end --ф-ции F_Lor_st

--Силы тензора магнитных натяжений
--в зазоре на заданной дуге
function F_Tensor(nn,nb,rr,an,ak,ndt)
--nn,nb - номера паза и позиции ротора
--rr,an,ak,ndt - радиус и граничные
-- углы дуги, число шагов по ней
--Средний угол, ширина и шаг по дуге
alav=gr*(ak+an)/2 daz=gr*(ak-an)
dat=daz/ndt
--Перевод ts в радианы и дуга в метрах
tsr=ts*gr ld=dat*rr*1e-3
--Цикл перебора фазных зон A, B, C
for nz=1,3,1 do
Fa[nz]=0 Fr[nz]=0 --обнуление
--Средн. и нач. углы в фазных зонах
avz=alav+tsr*(nz-2)*qsp anz=avz-daz/2
--Цикл перемещения по элементам дуги
for k=1,ndt,1 do akz=anz+dat*(k-0.5)
--Координаты точки на дуге
c=cos(akz) s=sin(akz) x=-rr*s y=rr*c
--Извлечение составляющих индукции
A, Bx, By = mo_getpointvalues(x,y)
--Радиальная и угловая составляющие МИ
Br=By*c-Bx*s Ba=-By*s-Bx*c
--Радиальн. и углов. тензоры натяжения
ftr=0.5*(Br*Br-Ba*Ba)/mu0
fta=(Br*Ba)/mu0
--Отклонен. угла akz от средн. угла дуги
ada=akz-avz c=cos(ada) s=sin(ada)
--Угловая и радиальная суммарные силы
Fa[nz]=Fa[nz]-ld*(fta*c+ftr*s)
Fr[nz]=Fr[nz]+ld*(ftr*c-fta*s)
end --угловой зоны - цикла k
--Сбор сил в массивы на их полупериоде
Frtn[nn][nb]=Fr[2] Frtn[nn][k1]=Fr[1]
Frtn[nn][k2]=Fr[3] Fatn[nn][nb]=Fa[2]
Fatn[nn][k1]=Fa[1] Fatn[nn][k2]=Fa[3]
end --nz цикла по зонам
end --конец функции F_Tensor

```

```

--РАСЧЕТ ДИНАМИКИ РАЗНЫХ ВЕЛИЧИН В ТГ
--Цикл поворотов ротора и МП статора и
--сдвиги в массивах для фазных зон 2,3
for nb=1,na1,1 do k1=nb+na k2=k1+na
al=(nb-1)*da*gr --угол позиций d оси
--Начальная фаза и фазные токи статора
af=(beta+al) c=2*Pi/3 Ia=Im*cos(af)
Ib=Im*cos(af-c) Ic=Im*cos(af+c)
--Поворот ротора на da в новую позицию
if nb>1 then mi_selectgroup(9)
mi_moverotate(0,0,da) end
--Задание токов статора в FEMM-модель,
-- где уже есть метки токов в фазных
-- зонах: IA+, IA-, IB+, IB-, IC+, IC-
mi_modifycircprop("IA+",1,Ia)
mi_modifycircprop("IA-",1,-Ia)
mi_modifycircprop("IB+",1,Ib)
mi_modifycircprop("IB-",1,-Ib)
mi_modifycircprop("IC+",1,Ic)
mi_modifycircprop("IC-",1,-Ic)
--Расчет МП в новой позиции ротора
--и переход к работе с результатами
mi_analyze(1) mi_loadsolution()
--ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ФУНКЦИЙ
--Формирование массива МПС фазы A
--по МПС фазных зон обмотки статора
-- Цикл перебора номеров фазных зон:
-- A+, B+, C+, A-, B-, C-
for nf=2,7,1 do
--Разметка блока очередной фазной зоны
mo_groupselectblock(nf)
--Площадь по всем стержням фазной зоны
S = mo_blockintegral(5)
--Интеграл ВМП по площади фазной зоны
A = mo_blockintegral(1)
mo_clearblock() --очистка блока
--МПС фазной зоны обмотки
Fa[nf-1] =Ns*A/S
end -- nf - перебора фазных зон
--Сбор МПС фазных обмоток в массив
--для обмотки A на полупериоде функции
if nb<na1 then Ps[nb] = Fa[1]-Fa[4]
Ps[k1] = -Fa[2]+Fa[5] end
Ps[k2] = Fa[3]-Fa[6]
--Массивы для МИ Br на 3-х радиусах
--Цикл по радиусам
for nr=1,3,1 do rk=rdn[nr]
alk=90 --исходный угол фазы A
--Цикл по фазным зонам
for nz=1,3,1 do
--Номер в массиве и смена знака МИ
nn=(nz-1)*na+nb zn = 1
if nz==3 then zn = -1 end
--Углы расположения для фаз A, B, C
alk=alk-zn*(nz-1)*60 alr=alk*gr
--Координаты точки
s=sin(alr) c=cos(alr) x=-rk*s y=rk*c
--ВМП и x- и y-составл. магн.индукции
A, Bx, By = mo_getpointvalues(x,y)
Br=By*c-Bx*s --радиальная составляющая
Brd[nr]=zn*Br end end -- nz и nr
--Электромагнитный момент ротора
--Выбор группы блоков ротора - номер 9
mo_groupselectblock(9)
--Извлечение эл.маг.момента
Mem[nb]=mo_blockintegral(22)
mo_clearblock() --очистка блока

```



```

--Электродинамические силы,
--приходящиеся на три паза статора
--через вызов функции F_Lor_st
mvi=F_Lor_st(1,nb) mvi=F_Lor_st(2,nb)
mvi=F_Lor_st(3,nb) --mvi - условность
--Силы тензора магнитных натяжений
--в зазоре на зубцовом делении статора
--Начальный и конечный его углы
aln=90-0.5*ts alk=aln+ts
mvi=F_Tenzor(1,nb,r3,aln,alk,60)
--Силы тензора магнитных натяжений
--в зазоре на полюсное деление статора
mvi=F_Tenzor(2,nb,r3,0,180,360)
end --цикла nb-КОНЕЦ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА
--ЗАПИСЬ ТАБЛИЦ РЕЗУЛЬТАТОВ в ФАЙЛ
write("Ps-массив МПС фазной обмотки",
"\r\n")
nput=0 --Счетчик перевода строки файла
for n=1, Kt+1, 1 do nput=nput+1
write(format("%9.4f", Ps[n]))
if nput==10 then write("\r\n")
nput=0 end
end --цикла n - печати МПС фазы A
write("\r\n")
write(" Mem - ЭММ за время оборота
на треть полюсного деления", "\r\n")
Mav=0 --обнуление сумматора момента
for n=1,na,1 do Mav=Mav+Mem[n] end
write(" Средние значения электромагн.
момента и мощности, кН*м, МВт", "\r\n")
Mav=Mav/na Pem=2*Pi*fs*Mav
write(format("Mav=%8.3f", Mav*1e-3),
format("Pem=%8.3f", Pem*1e-6), "\r\n")
write("dMem-массив переменной
составляющей ЭММ Mem, кН*м", "\r\n")
for n=1,nal,1 do
Mem[n]=Mem[n]-Mav end --расчет dMem
nput=0 --счетчик перевода строки файла
for n=1,nal,1 do nput=nput+1
write(format("%10.3f", 1e-3*Mem[n]))
if nput==10 then write("\r\n") nput=0
end --перевод строки
end --цикла печати dMem
writeto() --Закрытие файла результатов
mi_close() --Закрытие документа
--препроцессора магнетизма

```

Аналогично или в иной форме организуется вывод массивов остальных результатов расчета. Распечатки МИ, а также сил, действующих на проводники обмотки статора и элементы сердечника статора, формируются в виде таблиц.

Результаты расчетов в режиме нагрузки ТГ представлены на рис. 3 – 5 временными функциями ряда величин – все в пределах главного для ТГ периода T . Для сил на рисунках указаны преимущественные направления на фрагментах электромагнитной системы ТГ. Как уже указывалось, в реально работающей программе получается значительно больше информации, примеры которой можно найти в [4-6] и в других работах – их перечень есть в [2].

Указания по использованию программы. Для использования скрипта расчета динамических процессов в ТГ необходимо:

1. Файл скрипта с расширением *.lua и файл с исходными данными с расширением *.txt должны находиться в одной папке на диске компьютера.

2. Запускаем программу FEMM – модель ТГ. Редактор Lua запускается из «окна» FEMM «кнопкой» *Open Lua Script* в меню *File*. Потом в открывшемся окне – нажатием имени своего файла – скрипта Lua.

3. Дальнейшие действия программа выполняет автоматически. Результаты расчета находятся в текстовом файле с заданным выше именем и читаются редактором *Блокнот*.

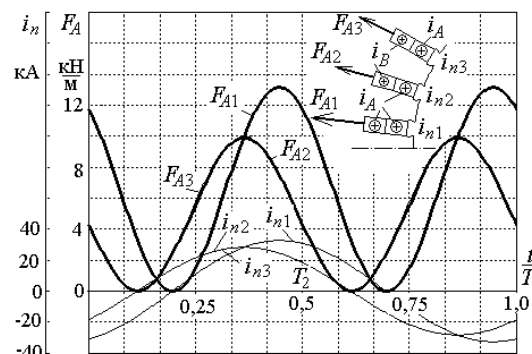


Рис. 3. Электродинамические силы и суммарные токи i_n , приходящиеся на указанные паза статора

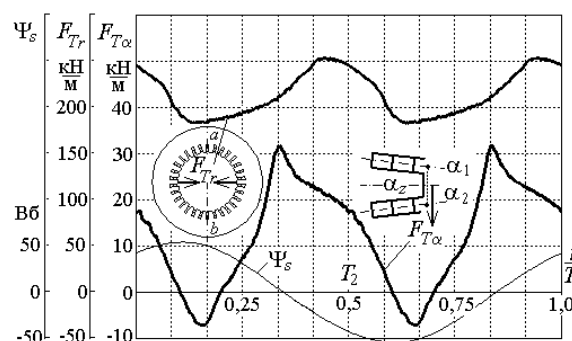


Рис. 4. Силы, действующие на указанные части сердечника статора (на зубцовое деление и на полюсное деление), и МПС фазной обмотки Ψ_s

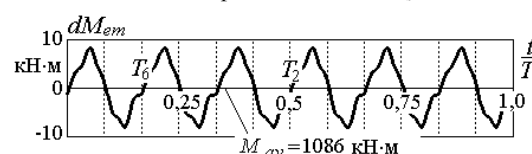


Рис. 5. Переменная составляющая ЭММ на фоне среднего значения момента M_{av}

Вывод. Представленные теоретические основы и скрипт Lua дают широкие возможности пользователям программы FEMM в получении динамики изменения электромагнитных параметров ТГ в виде их дискретных временных функций. Этот скрипт является универсальным с точки зрения структуры электромагнитной системы ТГ в рамках их распространенной конструкции. На базе рассмотренных принципов анализа динамики процессов в ТГ могут быть разработаны аналогичные скрипты для других типов ЭМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 11 Oct 2010 Self-Installing Executable. Режим доступа: www.femm.info/wiki/OldVersions.

2. Милых В.И., Полякова Н.В. Численно-полевые расчеты электромагнитных параметров турбогенераторов // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – №38(1081). – С. 3-18.
3. Милых В.И., Полякова Н.В. Автоматизированное формирование расчетных моделей турбогенераторов для программной среды FEMM // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №4. – С. 7-14.
4. Милых В.И., Полякова Н.В. Динамика силовых действий в турбогенераторах с разными зубцово-пазовыми структурами в номинальном режиме работы // Технічна електродинаміка. – 2014. – №3. – С. 56-63.
5. Милых В.И., Полякова Н.В. Динамические электромагнитные и силовые процессы в турбогенераторе // Електрика. – 2015. – №1. – С. 24-28.
6. Милых В.И., Полякова Н.В. Расчетный и гармонический анализ магнитных полей в активной зоне турбогенератора в режиме нагрузки // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – №6. – С. 40-45.
7. Титов В.В., Хуторецкий Г.М., Загородная Г.А. и др. Турбогенераторы. – Л.: Энергия, 1967. – 895 с.
8. Милых В.И., Полякова Н.В. Система направлений и фазовых соотношений электромагнитных величин при численных расчетах магнитных полей в турбогенераторе // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №5. – С. 33-38.
9. Милых В.И., Полякова Н.В. Организация численного расчета магнитного поля турбогенератора в режиме нагрузки с обеспечением заданных его выходных параметров // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №1. – С. 36-41.

REFERENCES

1. Meeker D. *Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit 11 Oct 2010 Self-Installing Executable*. Available at: www.femm.info/wiki/OldVersions (accessed 10 March 2014).
2. Milykh V.I., Polyakova N.V. Numerically-field calculations of the electromagnetic parameters of turbogenerators. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.38(1081), pp. 3-18. (Rus).
3. Milykh V.I., Polyakova N.V. Automated formation of calculation models of turbogenerators for software environment FEMM. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.4, pp. 7-14. (Rus).
4. Milykh V.I., Polyakova N.V. Dynamics of force action in turbogenerators with different tooth-slot structures in nominal mode. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 2014, no.3, pp. 56-63. (Rus).
5. Milykh V.I., Polyakova N.V. Dynamic power and electromagnetic processes in turbogenerator. *Elektrika – Electrician*, 2015, no.1, pp. 24-28. (Rus).
6. Milykh V.I., Polyakova N.V. Theoretical and harmonic analysis of magnetic fields in the active zone of a turbogenerator under load conditions. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.6, pp. 40-45. (Rus).

7. Titov V.V., Hutoreckij G.M., Zagorodnaja G.A., Vartan'jan G.P., Zaslavskij D.I., Smotrov I.A. *Turbogeneratory* [Turbogenerators]. Leningrad, Energiia Publ., 1967. 895 p. (Rus).
8. Milykh V.I., Polyakova N.V. A system of directions and phase relationships for electromagnetic parameters at numerical calculations of magnetic fields in a turbogenerator. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2011, no.5, pp. 33-38. (Rus).
9. Milykh V.I., Polyakova N.V. Organization of numerical calculation of turbogenerator magnetic field under load with specified output parameters control. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.1, pp. 36-41. (Rus).

Поступила (received) 13.07.2015

Милых Владимир Иванович¹, д.т.н., проф.,
Полякова Наталья Владимировна¹, инженер,
¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 057 7076514, e-mail: mvikemkpi@gmail.com

V.I. Milykh¹, N.V. Polyakova¹

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

Automated calculations of the dynamics of turbogenerator electromagnetic processes in software environment FEMM.

Attention is paid to the popular FEMM (Finite Element Method Magnetics) program which is effective in the numerical calculations of the magnetic fields of electrical machines. The principles of the automated calculations providing the analysis of the dynamics of electromagnetic processes in turbo-generators are presented. This is realized in the form of a script on the algorithmic language Lua integrated with FEMM. The temporal functions of electromagnetic quantities are obtained by multi-position calculations of the magnetic field with ensuring its rotation together with the turbo-generator rotor. The developed program is universal in terms of the geometry and dimensions of turbo-generators, as well as the modes of their work with a minimum of input data in numerical form. This paper shows "extraction" of discrete temporal functions: the magnetic flux linkage of the phase stator winding; forces acting on the current-carrying and ferromagnetic elements of the structure; the magnetic induction at the fixed points; electromagnetic moment. This list can be expanded as part of the created program, as well as the use of the program can be extended to other types of electrical machines. The obtaining of a change period of any functions is provided by rotating the rotor to 60°. References 9, figures 5.

Key words: program FEMM, turbogenerator, magnetic field, electromagnetic processes, dynamics of changes, automated calculations, Lua script.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ИНДУКЦИЙ В МАГНИТОПРОВОДАХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АНИЗОТРОПНОЙ И ИЗОТРОПНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ

Розроблено методику розрахунку значень магнітних індукцій у частинах шихтованих магнітопроводів силових трансформаторів при спільному використанні різних типів електротехнічних сталей, зокрема – анізотропної й ізотропної, що дозволяє надалі розраховувати втрати в магнітопроводах трансформаторів (втрати холостого ходу) і струм холостого ходу. Бібл. 10, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: трансформатор, шихтований магнітопровід, анізотропна сталь, ізотропна сталь, магнітна індукція, втрати холостого ходу, підвищений коефіцієнт корисної дії.

Разработана методика расчета значений магнитных индукций в частях шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов при совместном использовании разных типов электротехнических сталей, в частности – анизотропной и изотропной, позволяющая в дальнейшем рассчитывать потери в магнитопроводах трансформаторов (потери холостого хода) и ток холостого хода. Библ. 10, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: трансформатор, шихтованный магнитопровод, анизотропная сталь, изотропная сталь, магнитная индукция, потери холостого хода, повышенный коэффициент полезного действия.

Введение. Статья продолжает исследования, начатые авторами в работах [1, 2] по развитию трехфазных шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов напряжением до 1000 В с повышенным коэффициентом полезного действия (КПД).

В работе [2] показано, что совместное использование в шихтованных магнитопроводах разных типов электротехнических сталей (ЭТС) – анизотропной и изотропной, позволяет улучшить технико-экономические характеристики трансформаторов. Так, заменив анизотропную сталь на изотропную в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма (см. затемненные области в ярмах на рис. 1), можно существенно уменьшить потери мощности в магнитопроводе и при этом снизить стоимость всего трансформатора. В работе [2] так же проведен анализ по определению оптимального количественного соотношения этих сталей в магнитопроводах.

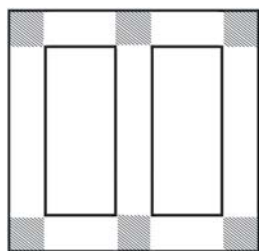


Рис. 1. Стержневой шихтованный магнитопровод трехфазного трансформатора

В настоящей статье показано, как определить значения магнитных индукций в частях шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов при совместном использовании разных ЭТС, в частности – анизотропной и изотропной.

Целью статьи является разработка методики расчета значений магнитных индукций в частях шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов при совместном использовании разных ЭТС. На основании этих данных, в дальнейшем, можно рассчитывать потери в магнитопроводах трансформаторов (потери холостого хода) и ток холостого хода (х.х.).

Такие трансформаторы обладают высокими технико-экономическими, энергетическими и технологическими характеристиками, что **актуально** для современного энергетического рынка.

Количественное соотношение основной и дополнительной ЭТС в частях магнитопровода. При проектировании трансформаторов можно задаваться его электромагнитными нагрузками, такими, как магнитная индукция в магнитопроводе и плотность тока в его обмотках. Нас интересует эквивалентное амплитудное значение магнитной индукции в стержнях магнитопровода $B_{m,st}$, определяемое по закону электромагнитной индукции:

$$B_{m,st} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_1}{\omega \cdot S_{st} \cdot w_1}, \quad (1)$$

где U_1 – действующее значение фазного напряжения на первичной обмотке трансформатора; ω – угловая частота питающей сети; f – частота питающей сети; S_{st} – площадь поперечного сечения стержня магнитопровода; w_1 – количество витков первичной обмотки.

В качестве иллюстрации приведем два варианта шихтовки магнитопровода типа «Sandwich» [3], которые были рассмотрены в работах [2]. На рис. 2 и 3 показаны два слоя расположения пластин ЭТС *a* и *б*, которые поочередно накладываются друг на друга при сборке магнитопровода. Пластины 2 и 3 на рис. 2 и пластины 2 на рис. 3 выполнены из анизотропной стали, а пластины 1 и 4 на рис. 2 и пластины 1, 3 и 4 на рис. 3 – из изотропной стали. При этом зоны перехода магнитного потока из стержней в ярма полностью состоят из изотропной стали.

Площадь поперечного сечения ярма S_a магнитопровода трансформатора может отличаться от площади поперечного сечения стержня S_{st} . Введем в рассмотрение коэффициент k_a , равный отношению площадей $k_a = S_a/S_{st}$. При этом эквивалентное амплитудное значение магнитной индукции в ярмах магнитопровода (с учетом формулы (1)) будет равно $B_{m,a} = B_{m,st}/k_a$, и с некоторым приближением в зонах

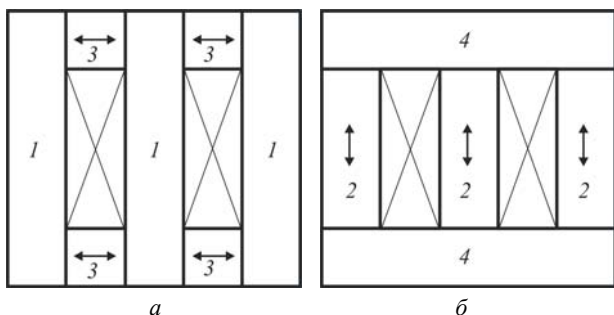


Рис. 2. Конструкция стержневого шихтованного магнитопровода трехфазного трансформатора с шихтовкой типа «Sandwich» с вертикальными (а) и горизонтальными (б) анизотропными вставками

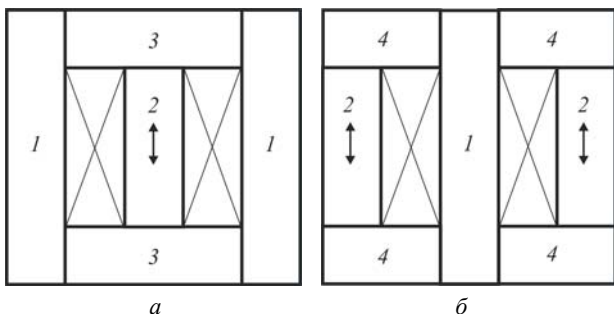


Рис. 3. Конструкция стержневого шихтованного магнитопровода трехфазного трансформатора с шихтовкой типа «Sandwich» только с вертикальными анизотропными вставками

перехода магнитного потока из стержней в ярма магнитопровода (углах) $B_{m,y} = B_{m,st}/k_a$. Основной ЭТС будем считать ту сталь, которая преобладает в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма.

Необходимо задаться значением коэффициентов, определяющих процентное соотношение количества пластин основной (индекс «о») и дополнительной (индекс «д») ЭТС в стержнях, ярмах (без зон перехода магнитного потока из стержней в ярма) и зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма магнитопровода. Если в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма магнитопровода присутствует только основная сталь, то коэффициенты в этих зонах будут равны: $k_{pl,y,o} = 100\%$, $k_{pl,y,d} = 100\% - k_{pl,y,o} = 0\%$ (заметим, что 0% основной стали в этих зонах для рассматриваемых магнитопроводов быть не может). Если в стержнях магнитопровода основной стали $N\%$, то $k_{pl,st,o} = N\%$, а $k_{pl,st,d} = 100\% - N\%$, а в ярмах $k_{pl,a,o} = 100\% - N\%$ и $k_{pl,a,d} = N\%$ (если в стержнях и в ярмах присутствует основная и дополнительная стали, то для ярем количественное соотношение основной и дополнительной ЭТС при $k_{pl,y,o} = 100\%$ обратно их количественному соотношению в стержнях, что связано с технологией шихтовки магнитопровода). Обычное процентное соотношение количества пластин основной и дополнительной ЭТС выбирается из ряда значений: 100; 80; 75; 66,7; 50; 33,3; 25; 20%. Для рис. 2, $k_{pl,y,o} = 100\%$, $k_{pl,y,d} = 0\%$, а коэффициенты $k_{pl,st,o}$, $k_{pl,st,d}$, $k_{pl,a,o}$ и $k_{pl,a,d}$ могут приниматься из этого ряда; для рис. 3, $k_{pl,y,o} = k_{pl,a,o} = 100\%$, $k_{pl,y,d} = k_{pl,a,d} = 0\%$, а коэффициенты $k_{pl,st,o}$, $k_{pl,st,d}$ так же выбираются из данного ряда.

Учет скин-эффекта. Запишем выражения, которые при расчете потерь в магнитопроводе трансформатора

учитывают эффект вытеснения (скин-эффект) магнитного потока по толщине листов ЭТС к их краям.

Для удобства автоматизированных расчетов выражения будут записываться в виде функций.

Запишем аппроксимационную функцию кривой намагничивания – зависимость напряженности магнитного поля H , А/м, в листе ЭТС от амплитудного значения магнитной индукции B_m , Тл [4] (B различно для каждого типа стали):

$$H(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) = \alpha_c \cdot \text{sh}(\beta_c \cdot B_m) + \chi_c \cdot B_m, \quad (2)$$

где α_c , β_c , χ_c – коэффициенты аппроксимации, с размерностями соответственно А/м, Тл⁻¹, м/Гн.

Эквивалентная глубина проникновения магнитного потока в лист ЭТС [5, 6]:

$$a'_c(\mu'_{c,p}) = \frac{1}{k_R} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_c}{\omega \cdot \mu'_{c,p}}}, \quad (3)$$

где $\mu'_{c,p}$ – магнитная проницаемость на поверхности стального листа, Гн/м; ρ_c – удельное электрическое сопротивление ЭТС, зависящее от среднего значения температуры T , К, в магнитопроводе, Ом·м,

$\rho_c = 4,8 \cdot 10^{-7} [1 + 9,792 \cdot 10^{-4} (T - 293^0 \text{ K}) / (1^0 \text{ K})]$, где k_R – коэффициент уменьшения глубины проникновения для нелинейной ферромагнитной среды, по Нейману $k_R \approx 1,4$ [6 – 8].

Здесь и далее апострофы стоят у переменных, которые в дальнейшем переопределяются.

Коэффициент ξ' [5, 6], равный отношению толщины листа стали b_c к эквивалентной глубине проникновения a'_c магнитного потока в лист:

$$\xi'(\mu'_{c,p}) = b_c / a'_c(\mu'_{c,p}). \quad (4)$$

Амплитудное значение магнитной индукции на поверхности стального листа $B'_{m,p}$ [4]:

$$B'_{m,p}(B_m, \mu'_{c,p}) = \frac{\xi'(\mu'_{c,p}) \cdot B_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\text{ch} \xi'(\mu'_{c,p}) + \cos \xi'(\mu'_{c,p})}{\text{ch} \xi'(\mu'_{c,p}) - \cos \xi'(\mu'_{c,p})}. \quad (5)$$

Запишем трансцендентное уравнение для нахождения значений магнитной проницаемости на поверхности стального листа $\mu'_{c,p}$:

$$F(B_m, \mu'_{c,p}, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) = \frac{B'_{m,p}(B_m, \mu'_{c,p})}{H[B'_{m,p}(B_m, \mu'_{c,p}, \alpha_c, \beta_c, \chi_c)]} - \mu'_{c,p} = 0,$$

которое можно решить численно (например, в пакете MathCAD [9] функцией root):

$$\mu_{c,p}(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) = \text{root}[F(B_m, \mu'_{c,p}, \alpha_c, \beta_c, \chi_c), \mu'_{c,p}], \quad (6)$$

при некотором начальном значении $\mu'_{c,p}$, например, 0,01 Гн/м.

Имея функцию $\mu_{c,p}$, запишем функции, необходимые для определения индукций в частях магнитопровода при совместном использовании разных ЭТС: эквивалентной глубины проникновения магнитного потока в лист ЭТС

$$a_c(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) = a'_c[\mu_{c,p}(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c)]; \quad (7)$$

коэффициента ξ

$$\xi(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) = b_c / a'_c(\mu_{c,p}(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c)); \quad (8)$$

амплитудного значения магнитной индукции на поверхности стального листа

$$B_{m,p}(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) = B'_{m,p}[B_m, \mu_{c,p}(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c)]; \quad (9)$$

угла θ опережения по фазе вектора амплитудного значения магнитной индукции на поверхности листа стали B_{mp} вектора комплексной амплитуды магнитной индукции в листе стали B_m [10]

$$\theta(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) = \arcsin \frac{\operatorname{sh} \xi(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) - \dots}{\sqrt{\operatorname{ch}[2 \cdot \xi(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c)] - \dots}} \dots \frac{-\sin \xi(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c)}{-\cos[2 \cdot \xi(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c)]} \quad (10)$$

мгновенного значения магнитной индукции на поверхности листа стали [10]

$$B_p(\omega t, B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) = -B_{m,p}(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) \cdot \cos[\omega t - \theta(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c)]. \quad (11)$$

Мгновенное значение напряженности магнитного поля в магнитопроводе (без учета составляющей, обусловленной потерями на гистерезис) равно [10]:

$$H'_{mg}(\omega t, B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) = \alpha_c \cdot \operatorname{sh}[\beta_c \cdot B_p(\omega t, B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c)] + \chi_c \cdot B_p(\omega t, B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c), \quad (12)$$

а ее действующее значение определяется по формуле:

$$H_{mg}(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int_0^\pi [H'_{mg}(\omega t, B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c)]^2 d\omega t}. \quad (13)$$

Определение магнитных индукций в частях магнитопровода. Основные условия при определении магнитных индукций в пластинах основной и дополнительной ЭТС в магнитопроводе: *напряженность магнитного поля в пластинах рассматриваемой части магнитопровода одинакова; сумма значений магнитных потоков в основной и дополнительной стальных в рассматриваемой части магнитопровода, равна расчетному магнитному потоку в этой части магнитопровода.*

Стержни магнитопровода. В стержнях магнитопровода действующие значения напряженности магнитного поля для основной и дополнительной ЭТС равны:

$$H'_{st,o}(B'_{m,st,o}) = H_{mg}(B'_{m,st,o}, \alpha_{c,o}, \beta_{c,o}, \chi_{c,o}); \quad (14)$$

$$H'_{st,d}(B'_{m,st,d}) = H_{mg}(B'_{m,st,d}, \alpha_{c,d}, \beta_{c,d}, \chi_{c,d}), \quad (15)$$

где $B'_{m,st,o}$, $B'_{m,st,d}$ – амплитудные значения магнитной индукции в основной и дополнительной стали стержней; $\alpha_{c,o}$, $\beta_{c,o}$, $\chi_{c,o}$ и $\alpha_{c,d}$, $\beta_{c,d}$, $\chi_{c,d}$ – коэффициенты аппроксимации кривой намагничивания соответственно для основной и дополнительной ЭТС.

Согласно указанным условиям, напряженности магнитного поля в стержнях магнитопровода для основной и дополнительной ЭТС равны между собой:

$$H'_{st,o}(B'_{m,st,o}) = H'_{st,d}(B'_{m,st,d}), \quad (16)$$

а амплитудное эквивалентное значение магнитной индукции в стержнях магнитопровода, определяемое по выражению (1), из требования сохранения расчетного магнитного потока в стержне, равно:

$$B_{m,st} = k_{pl,st,o} \cdot B'_{m,st,o} + k_{pl,st,d} \cdot B'_{m,st,d}. \quad (17)$$

Из выражения (17) выразим магнитную индукцию $B'_{m,st,d}$ и запишем ее в виде функции от магнитной индукции $B'_{m,st,o}$:

$$B'_{m,st,d}(B'_{m,st,o}) = (B_{m,st} - k_{pl,st,o} \cdot B'_{m,st,o}) / k_{pl,st,d}. \quad (18)$$

На основании равенства (16) запишем уравнение:

$$F_{st}(B'_{m,st,o}) = H'_{st,o}(B'_{m,st,o}) - H'_{st,d}[B'_{m,st,d}(B'_{m,st,o})] = 0,$$

которое можно численно решить относительно значения $B'_{m,st,o}$, получая амплитудное значение магнитной индукции в основной ЭТС стержней магнитопровода:

$$B_{m,st,o} = \operatorname{root}[F_{st}(B'_{m,st,o}), B'_{m,st,o}], \quad (19)$$

при начальном значении $B'_{m,st,o}$, равном $B_{m,st}$.

Амплитудное значение магнитной индукции в дополнительной ЭТС стержней (с учетом функции (18))

$$B_{m,st,d} = B'_{m,st,d}(B_{m,st,o}), \quad (20)$$

а действующие значения напряженности магнитного поля в стержнях магнитопровода для основной и дополнительной ЭТС (с учетом выражений (14) и (15)):

$$H_{st,o} = H'_{st,o}(B_{m,st,o}); \quad (21)$$

$$H_{st,d} = H'_{st,d}(B_{m,st,d}). \quad (22)$$

Ярма магнитопровода (без зон перехода магнитного потока из стержней в ярма). Аналогично записываются уравнения и для действующих значений напряженности магнитного поля в ярмах магнитопровода для основной и дополнительной ЭТС:

$$H'_{a,o}(B'_{m,a,o}) = H_{mg}(B'_{m,a,o}, \alpha_{c,o}, \beta_{c,o}, \chi_{c,o}); \quad (23)$$

$$H'_{a,d}(B'_{m,a,d}) = H_{mg}(B'_{m,a,d}, \alpha_{c,d}, \beta_{c,d}, \chi_{c,d}), \quad (24)$$

где $B'_{m,a,o}$, $B'_{m,a,d}$ – амплитудные значения магнитной индукции в основной и дополнительной стали ярма,

$$B'_{m,a,d}(B'_{m,a,o}) = (B_{m,a} - k_{pl,a,o} \cdot B'_{m,a,o}) / k_{pl,a,d}. \quad (25)$$

Уравнение

$$F_a(B'_{m,a,o}) = H'_{a,o}(B'_{m,a,o}) - H'_{a,d}[B'_{m,a,d}(B'_{m,a,o})] = 0,$$

решается численно относительно значения $B'_{m,a,o}$, получая амплитудное значение магнитной индукции в основной ЭТС ярма магнитопровода:

$$B_{m,a,o} = \operatorname{root}[F_{st}(B'_{m,a,o}), B'_{m,a,o}], \quad (26)$$

при начальном значении $B'_{m,a,o} = B_{m,a}$.

Амплитудное значение магнитной индукции в дополнительной ЭТС ярма равно:

$$B_{m,a,d} = B'_{m,a,d}(B_{m,a,o}). \quad (27)$$

Действующие значения напряженности магнитного поля в ярмах магнитопровода для основной и дополнительной ЭТС:

$$H_{a,o} = H'_{a,o}(B_{m,a,o}); \quad (28)$$

$$H_{a,d} = H'_{a,d}(B_{m,a,d}). \quad (29)$$

Зоны перехода магнитного потока из стержней в ярма магнитопровода. Действующие значения напряженности магнитного поля в этих зонах для основной и дополнительной ЭТС равны:

$$H'_{y,o}(B'_{m,y,o}) = H_{mg}(B'_{m,y,o}, \alpha_{c,o}, \beta_{c,o}, \chi_{c,o}); \quad (30)$$

$$H'_{y,d}(B'_{m,y,d}) = H_{mg}(B'_{m,y,d}, \alpha_{c,d}, \beta_{c,d}, \chi_{c,d}), \quad (31)$$

где $B'_{m,y,o}$, $B'_{m,y,d}$ – амплитудные значения магнитной индукции в основной и дополнительной стали в данных зонах,

$$B'_{m,y,d}(B'_{m,y,o}) = (B_{m,y} - k_{pl,y,o} \cdot B'_{m,y,o}) / k_{pl,y,d}. \quad (32)$$

Из уравнения

$$F_y(B'_{m,y,o}) = H'_{y,o}(B'_{m,y,o}) - H'_{y,d}[B'_{m,y,d}(B'_{m,y,o})] = 0,$$

определяется амплитудное значение магнитной индукции в основной ЭТС в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма:

$$B_{m,y,o} = \operatorname{root}[F_{st}(B'_{m,y,o}), B'_{m,y,o}], \quad (33)$$

при начальном значении $B'_{m,y,o} = B_{m,y}$.

Амплитудное значение магнитной индукции в дополнительной ЭТС в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма магнитопровода:

$$B_{m,y,d} = B'_{m,y,d}(B_{m,y,o}). \quad (34)$$

Действующие значения напряженности магнитного поля в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма магнитопровода для основной и дополнительной ЭТС:

$$H_{y,o} = H'_{y,o}(B_{m,y,o}); \quad (35)$$

$$H_{y,d} = H'_{y,d}(B_{m,y,d}). \quad (36)$$

Полученные формулы позволяют рассчитывать значения магнитных индукций в частях шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов с повышенным КПД при совместном использовании различ-

ных марок ЭТС. В дальнейшем эти значения магнитных индукций можно использовать при расчете потерь в магнитопроводах трансформаторов и расчете значений тока х.х. Так, за основу можно взять разработанные авторами методы в работах [4, 10].

Пример расчета. Рассчитаем амплитудные значения магнитных индукций и действующие значения напряженностей магнитного поля в частях магнитопровода трансформатора с шихтовкой магнитопровода типа «Sandwich» по рис. 2, у которого в стержнях основная сталь составляет 50%, $k_{pl.st.o} = 50\%$, $k_{pl.st.d} = 50\%$; в ярмах (без зон перехода магнитного потока из стержней в ярма) $k_{pl.a.o} = 50\%$, $k_{pl.a.d} = 50\%$; в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма $k_{pl.y.o} = 100\%$, $k_{pl.y.d} = 0\%$.

В качестве основной выберем изотропную ЭТС марки М12, в качестве дополнительной – анизотропную ЭТС марки М6. Для анизотропной ЭТС марки М6 и изотропной ЭТС марки М12 с толщиной листов 0,356 мм коэффициенты аппроксимации кривых намагничивания α_c , β_c , χ_c приведены в табл. 1 (для М6 – вдоль прокатки листа).

Таблица 1

Коэффициенты аппроксимации кривой намагничивания электротехнических сталей

Марка ЭТС	α_c , А/м	β_c , Тл ⁻¹	χ_c , м/Гн
М6	$3,88 \cdot 10^{-10}$	15,22	19,81
М12	$8,416 \cdot 10^{-5}$	11,02	50,48

Пусть эквивалентное значение магнитной индукции в стержнях магнитопровода равно $B_{m.st} = 1,318$ Тл; коэффициент $k_a = 1,15$; эквивалентное значение магнитной индукции в ярмах и зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма магнитопровода равны $B_{m,a} = B_{m,y} = 1,147$ Тл.

Используя полученные выше выражения, найдем амплитудные значения магнитной индукции в основной и дополнительной стали в стержнях, ярмах (без зон перехода магнитного потока из стержней в ярма) и зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма магнитопровода: $B_{m.st.o} = 1,005$ Тл, $B_{m.st.d} = 1,632$ Тл, $B_{m,a.o} = 0,798$ Тл, $B_{m,a.d} = 1,495$ Тл, $B_{m,y.o} = 1,147$ Тл, $B_{m,y.d} = 0$ Тл. При этом действующие значения напряженности магнитного поля в стержнях, ярмах и углах магнитопровода для основной и дополнительной ЭТС: $H_{st.o} = H_{st.d} = 39,64$ А/м, $H_{a.o} = H_{a.d} = 30,58$ А/м, $H_{y.o} = 49,17$ А/м, $H_{y.d} = 0$ А/м.

Обратим внимание на то, что магнитные потоки в части магнитопровода перераспределяется по разным ЭТС таким образом, что магнитная индукция имеет большие значения в дополнительной анизотропной стали М6, и меньшие – в основной изотропной стали М12. Это связано с тем, что магнитному потоку легче проходить через анизотропную ЭТС с большей магнитной проводимостью, и тяжелее – через изотропную ЭТС с меньшей магнитной проводимостью.

Следующий этап исследования может быть посвящен расчету оптимальных соотношений анизотропной и изотропной ЭТС в частях магнитопровода.

Выводы.

Разработанная методика расчета значений магнитных индукций в различных частях шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов с повы-

шенным КПД при совместном использовании разных электротехнических сталей – анизотропной и изотропной, позволяет получить значения магнитных индукций в различных сталях с учетом их взаимного влияния и в дальнейшем рассчитывать потери в магнитопроводах трансформаторов (потери холостого хода) и ток холостого хода.

Магнитные потоки в части магнитопровода распределяется по разным электротехническим сталям таким образом, что магнитная индукция имеет большие значения в анизотропной стали, и меньшие – в изотропной стали. Это связано с тем, что магнитному потоку легче проходить через анизотропную сталь с большей магнитной проводимостью, и тяжелее – через изотропную сталь с меньшей магнитной проводимостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Levin M.I., Pentegov I.B., Rymar S.B., Lavreniuk A.V. Анализ конструкций шихтованных магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов // Электротехника і електромеханіка. – 2014. – №1. – С. 40-44.
2. Levin M.I., Pentegov I.B., Rymar S.B., Lavreniuk A.V. Новые подходы при построении магнитопроводов силовых трансформаторов // Электротехніка і електромеханіка. – 2015. – №1. – С. 20-24.
3. Pat. US 8686824 B2 USA, Int. Cl. H 01 F 27/24; H 01 F 17/04. Economical Core Design for Electromagnetic Devices / Michael Levin, Andrii V. Lavreniuk (Toronto (CA)); Mirus International Inc. (Ontario (CA)). – № US 12/883310; Appl. Date 16.09.2010; Publ. Date 01.04.2014.
4. Pentegov I.B., Rymar S.B. Метод определения потерь в стали трансформатора, ориентированный на использование в САПР // Техническая электродинамика. – 1995. – №6. – С. 35-40.
5. Ламмеранер Й., Штафль М. Вихревые токи. Пер. с чешск. – М.-Л.: Энергия, 1967. – 208 с.
6. Туровский Я. Техническая электродинамика. Пер. с польского. – М.: Энергия, 1974. – 488 с.
7. Нейман Л.Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1988. – №1. – С. 127-135.
8. Pentegov I.B. Возможности использования ВКБ-метода при исследовании поверхностного эффекта в ферромагнитных телах // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1988. – №1. – С. 127-135.
9. Кирьянов Д.В. MathCAD 14. – С.-Пб.: БХВ-Петербург, 2007. – 704 с.
10. Pentegov I.B., Rymar S.B. Метод расчета тока холостого хода трансформатора, ориентированный на использование в САПР // Техническая электродинамика. – 1996. – №1. – С. 39-45.

REFERENCES

1. Levin M.I., Pentegov I.V., Rymar S.V., Lavreniuk A.V. Analysis of three-phase power transformer laminated magnetic core designs. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical Engineering & Electromechanics*, 2014, no.1, pp. 40-44. (Rus).
2. Levin M.I., Pentegov I.V., Rymar S.V., Lavreniuk A.V. New approaches at construction of magnetic conductors for mains transformers. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no.1, pp. 20-24. (Rus).
3. Levin M., Lavreniuk A.V. *Economical core design for electromagnetic devices*. Patent US, no.8686824, 2014.
4. Pentegov I.V., Rymar S.V. Method of determination of transformer iron loss for using in automated design systems. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 1995, no.6, pp. 35-40. (Rus).

5. Lammeraner J., Shtafil M. *Vikhrevye toki* [Eddy currents. Transl. with the Czech]. Moscow-Leningrad, Energiia Publ., 1967. 208 p. (Rus).
6. Turovskii Ya. *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical electrodynamics. Transl. with the polish]. Moscow, Energiia Publ., 1974. 488 p. (Rus).
7. Neiman L.R. *Poverkhnostnyi effekt v ferromagnitnykh telakh* [Surface-effect in ferromagnetic bodies]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1949. 190 p. (Rus).
8. Pentegov I.V. The possibility of using the WKB-method in the study of surface effects in ferromagnetic solids. *Izvestia AN SSSR. Energetika i transport – News of USSR Academy of Sciences. Energy and Transport*, 1988, no.1, pp. 127-135. (Rus).
9. Kiryanov D.V. *MathCAD 14* [MathCAD 14]. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2007. 704 p. (Rus).
10. Pentegov I.V., Rymar S.V. Method of determination of transformer iron loss for using in automated design systems a calculation method of transformer exciting current for using in automated design. *Tekhnichna elektrodinamika – Technical electrodynamics*, 1996, no.1, pp. 39-45. (Rus).

Поступила (received) 30.09.2015

Пентегов Игорь Владимирович¹, д.т.н., проф., в.н.с.,
Рымар Сергей Владимирович¹, д.т.н., с.н.с., в.н.с.,
Levin Michael I.², P. Engineer,
Lavreniuk Andrii V.³, PhD., R&D Engineer,

¹ Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины,
03680, Киев-150, ул. Боженко, 11,
тел/phone +38 044 2061388, 2052533

e-mail: magn@i.com.ua, elmag@paton.kiev.ua
² 67, Sunnycree Rd., Toronto, Canada, M2R 1V4,
тел/phone +1 (416) 6677061,
e-mail: michael@mirusinternational.com

³ MIRUS International Inc.,
31, Sun Pac Blvd., Brampton, Ontario, Canada, L6S 5P6,
тел/phone +1 (905) 4941120,
e-mail: andrii@mirusinternational.com

I.V. Pentegov¹, S.V. Rymar¹, M.I. Levin², A.V. Lavreniuk³

¹ Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine,

11, Bozhenko Str., Kiev, 03680, Ukraine.

² 67, Sunnycree Rd., Toronto, Canada, M2R 1V4.

³ Mirus International Inc.,

31, Sun Pac Blvd., Brampton, Ontario, Canada, L6S 5P6.

A determination of the flux density in core of distribution transformers, what built with the common using of grain and non grain oriented magnetic steels.

Purpose. The development of calculation method to determinate the flux densities in different parts of the magnetic cores of distribution transformers, what built from different types magnetic steel (mixed core). **Methodology.** The method is based on the scientific positions of Theoretical Electrical Engineering – the theory of the electromagnetic field in nonlinear mediums to determine the distribution of magnetic flux in mixed core of transformer, what are using different types of steel what have the different magnetic properties. **Results.** The developed method gives possible to make calculation of the flux density and influence of skin effect in different parts of the magnetic cores of distribution transformer, where are used mix of grain oriented (GO) and non grain oriented (NGO) steels. Was determinate the general basic conditions for the calculation of flux density in the laminations from grain and non grain oriented steels of the magnetic core: the strength of magnetic field for the laminations of particular part of mixed core is the same; the sum of the magnetic fluxes in GO and NGO steels in particular part of mixed core is equal with the designed magnetic flux in this part of mixed core. Discover, the magnetic flux in mixed core of the transformer has specific distribution between magnetic steels. The flux density is higher in laminations from GO steel and smaller in laminations from the NGO steel. That is happened because for magnetic flux is easier pass through laminations from GO steel, what has better magnetic conductance than laminations from NGO steel. **Originality.** The common using of different types of magnetic steels in cores for distribution transformers gives possibility to make design of transformer with low level of no load losses, high efficiency and with optimal cost. **Practical value.** The determination of the flux density in different parts of magnetic core with GO and NGO steels gives possibility make accurate calculation of no load losses and magnetizing current of the transformer. References 10, tables 1, figures 3.

Key words: distribution transformer, magnetic core, grain oriented steel (GO), non grain oriented steel (NGO), flux density, no load losses, high efficiency.

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ ПОНЯТИЯ «РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ» ПРИМЕНительно К ТРЕХФАЗНЫМ СИСТЕМАМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ

Авторы статті ставлять собі за мету дати відповіді на питання, здатні розкрити фізичний зміст терміну «реактивна потужність» з обґрунтуванням прийнятих припущень стосовно трифазних трипровідних і чотирипровідних систем електропостачання. Методика. Використовувалася еквівалентна графічна заміна складної розгалуженої схеми системи електропостачання спрощеною розрахунковою схемою, методи теорії електричних кіл, сучасні теорії миттєвої активної і реактивної потужностей, комп'ютерне моделювання в середовищі Matlab. Результати. Дано відповіді на шість основних питань, які розкривають фізичний зміст поняття «реактивна потужність». Сформульовано декілька визначень терміну «реактивна потужність». Обґрунтовані допущення, що дозволяють запропонувати універсальну розрахункову формулу для визначення відносної сумарної потужності втрат у трифазній системі електропостачання як суму чотирьох складових, обумовлених: мінімально можливими втратами, реактивною потужністю, пульсаціями миттєвої активної потужності і протіканням струму в нульовому проводі. Наукова новизна. Запропоновано визначення, що розкриває фізичний зміст терміну «реактивна потужність» для трифазних систем електропостачання, що відповідає положенням сучасних теорій миттєвої активної і реактивної потужностей. Практичне значення. Розвинені положення методу оцінки енергетичної ефективності систем електропостачання з нелінійним навантаженням, засновані на розрахунку додаткових складових потужності втрат. Подальший розвиток методу дозволить внести доповнення до практики розрахунку, вибору та експлуатації силових активних фільтрів. Бібл. 10, табл. 3, рис. 5.

Ключові слова: система електропостачання, реактивна потужність, потужність додаткових втрат, мінімально можливі втрати, Matlab-модель трифазної системи електропостачання.

Авторы статьи задаются целью дать ответы на вопросы, способные раскрыть физический смысл термина «реактивная мощность» с обоснованием принимаемых допущений применительно к трехфазным трехпроводным и четырехпроводным системам электроснабжения. Методика. Использовалась эквивалентная графическая замены сложной разветвленной схемы системы электроснабжения упрощенной расчетной схемой, методы теории электрических цепей, современные теории мгновенной активной и реактивной мощностей, компьютерное моделирование в среде Matlab. Результаты. Даны ответы на шесть основных вопросов, раскрывающих физический смысл понятия «реактивная мощность». Сформулированы несколько определений термина «реактивная мощность». Обоснованы допущения, позволяющие предложить универсальную расчетную формулу для определения относительной суммарной мощности потерь в трехфазной системе электроснабжения как суммы четырех составляющих, обусловленных: минимально возможными потерями, реактивной мощностью, пульсациями мгновенной активной мощности и протеканием тока в нулевом проводе. Научная новизна. Предложено определение, раскрывающее физический смысл термина «реактивная мощность» для трехфазных систем электроснабжения, отвечающее положениям современных теорий мгновенной активной и реактивной мощностей. Практическое значение. Развита положения метода оценки энергетической эффективности систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой, основанные на расчете дополнительных составляющих мощности потерь. Дальнейшее развитие метода позволит внести дополнения в практику расчета, выбора и эксплуатации силовых активных фильтров. Библ. 10, табл. 3, рис. 5.

Ключевые слова: система электроснабжения, реактивная мощность, мощность дополнительных потерь, минимально возможные потери, Matlab-модель трехфазной системы электроснабжения.

Введение. Через пять лет можно будет отмечать 100-летний юбилей растянувшегося на длинный период рождения термина «реактивная мощность» («reactive power») [1-7].

Несмотря на солидный возраст термина, его внутренне содержание до настоящего времени остается нечетким и противоречивым. Это отчасти объясняется тем, что для ответа на вопрос в чем заключается физический смысл понятия реактивная мощность необходимо предварительно ответить на несколько других вопросов, а именно:

1) какова структура рассматриваемой системы электроснабжения (СЭ);

2) как определяется период повторяемости процессов в рассматриваемой СЭ;

3) в каких точках СЭ измеряются мгновенные значения токов и напряжений;

4) в какой системе координат определяется обобщенные векторы мгновенных напряжений, токов и реактивной мощности трехфазной СЭ;

5) как рассчитываются мгновенные значения активной мощности и модуля вектора мгновенной реактивной мощности;

6) какова единица измерения модуля вектора мгновенной реактивной мощности.

К перечисленным шести вопросам необходимо добавить обоснования нескольких допущений:

- мощность потерь энергии в линии, обусловленная протеканием активной составляющей тока, и мощность потерь, обусловленная протеканием реактивных токов, взаимно независимы;

- влиянием индуктивностей кабелей на величину потерь энергии можно пренебречь в виду его малости. В других случаях индуктивность кабелей можно перенести в нагрузку;

- в симметричной трехфазной СЭ с резистивной нагрузкой минимальные потери энергии, т.е. максимально возможный КПД, $\eta_{\max}$, однозначно определяются

отношением мощности к.з. на зажимах нагрузки к полезной мощности, равной среднему значению мощности нагрузки, вычисленному в периоде повторяемости;

- мощность потерь в СЭ, обусловленных потоком энергии от источника в нагрузку, пропорциональна квадрату средней полезной мощности нагрузки;

- мощность дополнительных потерь, обусловленных реактивной мощностью, равна произведению мощности минимальных потерь, соответствующих максимально возможному КПД, на отношение квадрата среднеквадратического значения реактивной мощности к квадрату средней полезной мощности;

- мощность дополнительных потерь, обусловленных пульсациями активной мощности равна произведению мощности минимально возможных потерь на отношение квадрата среднеквадратического значения переменной составляющей мгновенной активной мощности к квадрату средней активной мощности;

- в режимах работы четырехпроводной СЭ, в которых отличен от нуля ток нулевого провода, возникает четвертая составляющая суммарных потерь, пропорциональная произведению сопротивления нулевого провода на квадрат среднеквадратического значения нулевого тока.

В настоящей работе приведены ответы авторов статьи на перечисленные вопросы и обоснования принятых допущений, что позволило предложить универсальную расчетную формулу для определения суммарной мощности потерь как суммы четырех составляющих.

Ответы на предварительные вопросы.

1. Эквивалентная схема рассматриваемой СЭ представлена на рис. 1.

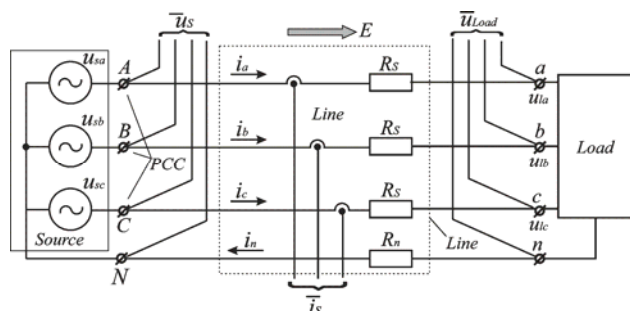


Рис. 1. Эквивалентная схема трехфазной СЭ

Поток энергии в системе направлен из источника (Source) в нагрузку (Load) посредством четырехпроводной линии (Line). Сопротивление фазного кабеля линии равно R_s , а нулевого R_n . При анализе целесообразно рассматривать три значения сопротивления нулевого провода: $R_n = 0, R_s, \infty$. Источник представляет собой трехфазную систему почти синусоидальных напряжений симметричную или несимметричную. В кривой напряжений могут содержаться высшие гармоники. Нагрузка (Load) в общем случае содержит линейные и нелинейные элементы, источники тока и напряжения. Как правило, каждую фазу нагрузки можно представить источником тока. При больших длинах кабелей к нагрузке можно отнести индуктивность кабелей.

2. Период повторяемости кривых токов, напряжений, активной и реактивной мощности СЭ – это наи-

меньший отрезок времени, в котором укладывается целое число периодов повторяемости указанных величин. В зависимости от целей расчетов или экспериментов может быть выбран любой произвольный период повторяемости в интервале времени от нуля до бесконечности. Наиболее популярный вариант – выбор периода повторяемости, равного периоду или части периода напряжения питающей сети. Однако такой подход может быть связан со значительными погрешностями из-за неучета низкочастотных пульсаций мгновенной активной мощности.

3. Как следует из эквивалентной схемы СЭ, представленной на рис. 1, напряжения источника u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} измеряются в точке общего присоединения (PCC), а напряжения нагрузки u_{La}, u_{Lb}, u_{Lc} измеряются на клеммах нагрузки.

4. Обобщенные векторы напряжений $\vec{u}_S, \vec{u}_L$, тока $\vec{i}$ и реактивной мощности $\vec{q}_S$ определяются в одной из пространственных декартовых систем координат [8], например, abc :

$$\vec{u}_S = \vec{i} \cdot u_{sa} + \vec{j} \cdot u_{sb} + \vec{k} \cdot u_{sc}, \quad (1)$$

$$\vec{u}_L = \vec{i} \cdot u_{La} + \vec{j} \cdot u_{Lb} + \vec{k} \cdot u_{Lc}, \quad (2)$$

$$\vec{i}_S = \vec{i} \cdot i_{sa} + \vec{j} \cdot i_{sb} + \vec{k} \cdot i_{sc}, \quad (3)$$

$$\vec{q}_S = \vec{u}_S \times \vec{i}_S = \begin{bmatrix} q_{sa} \\ q_{sb} \\ q_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sb} & u_{sc} \\ i_b & i_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sc} & u_{sa} \\ i_c & i_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sa} & u_{sb} \\ i_a & i_b \end{bmatrix}^T, \quad (4)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орты направления по осям a, b, c системы координат.

5. Мгновенная активная мощность источника определяется двумя способами:

$$p_S = u_{sa} \cdot i_a + u_{sb} \cdot i_b + u_{sc} \cdot i_c, \quad (5)$$

$$p_S = |\vec{u}_S| \cdot |\vec{i}| \cdot \cos \varphi, \quad (6)$$

а мгновенная активная мощность нагрузки

$$p_L = u_{La} \cdot i_a + u_{Lb} \cdot i_b + u_{Lc} \cdot i_c, \quad (7)$$

$$p_L = |\vec{u}_L| \cdot |\vec{i}| \cdot \cos \varphi, \quad (8)$$

где

$$\cos \varphi = \frac{u_a}{|\vec{u}|} \cdot \frac{i_a}{|\vec{i}|} + \frac{u_b}{|\vec{u}|} \cdot \frac{i_b}{|\vec{i}|} + \frac{u_c}{|\vec{u}|} \cdot \frac{i_c}{|\vec{i}|}. \quad (9)$$

Модуль вектора мгновенной реактивной мощности источника

$$q_S = |\vec{q}_S| = |\vec{u}_S| \cdot |\vec{i}| \cdot |\sin \varphi|. \quad (10)$$

Как следует из (5)-(8) мгновенная активная мощность и, следовательно, средняя за период повторяемости активная мощность могут изменять знак, причем положительная активная мощность соответствует положительному направлению потока энергии, – из источника в нагрузку, – а отрицательная активная мощность соответствует противоположному направлению потока энергии.

Модуль вектора мгновенной реактивной мощности всегда положителен, это находится в согласии с допущением, что от реактивной мощности в трехфазной СЭ скорость передачи энергии и направление потока энергии не зависят.

Помимо модуля вектора мгновенной реактивной мощности для определения мощности потерь в СЭ требуется среднее и среднеквадратическое за период повторяемости значение реактивной мощности.

Отметим, что в настоящей статье рассматривается режим работы СЭ с однонаправленным потоком энергии, т.е., с постоянным знаком мгновенной активной мощности во всем периоде повторяемости. Режим работы, в котором знак мгновенной активной мощности в периоде повторяемости принимает как положительные, так и отрицательные значения, требует отдельного рассмотрения.

6. При анализе СЭ используются величины, представленные в табл.1. Размерность модуля реактивной мощности – ватт (W). Могут использоваться безразмерные величины в долях полезной средней за период повторяемости активной мощности нагрузки, P_{usf} , которая во всех расчетах и экспериментах поддерживается равной заданной величине.

Таким образом, сформулирован ответ на все шесть вопросов. Перейдем к допущениям.

Обоснования принятых допущений.

1. В пространственной декартовой системе координат вектор активного тока при неизменном векторе напряжений источника не изменяется. Векторы активных и реактивных токов взаимно перпендикулярны.

2. Потери в индуктивностях кабелей отсутствуют. Однако ввод индуктивностей приводит к увеличению реактивной мощности и потерь в омических сопротивлениях линии. Это увеличение, в ряде случаев, составляет доли процента, что подтверждают эксперименты. Индуктивность кабелей можно перенести на нагрузку без изменения точек подключения.

3. Это теорема о максимально возможном КПД СЭ (аналогична теореме Tevenin).

В [9] получено аналитическое выражение для максимально возможного КПД СЭ в виде

$$\eta_{\max} = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{P_{sc}/P_{usf}}}, \quad (11)$$

где P_{sc} – мощность резистивного короткого замыкания на клеммах нагрузки (см. рис.1).

Относительные минимальные потери в СЭ, соответствующие максимально возможному КПД [6]

$$\Delta P_{\min}^* = \frac{\Delta P_{\min}}{P_{usf}} = \frac{1}{\eta_{\max}} - 1. \quad (12)$$

На рис. 2 приведены кривые, рассчитанные по (11), а в табл. 2 – значения КПД при заданных величинах P_{sc}/P_{usf} .

4. 5. Четвертое и пятое допущения можно объединить одним допущением о существовании пропорции

$$\frac{P_{usf}^2}{\Delta P_{\min}} = \frac{Q_{RMS}^2}{\Delta P_q}. \quad (13)$$

Откуда

$$\Delta P_q = \frac{Q_{RMS}^2 \cdot \Delta P_{\min}}{P_{usf}^2}. \quad (14)$$

Сопротивления, в которых выделяется тепловая энергия под действием активного и реактивного токов, одни и те же. Мощности в (13), (14) приняты в

квадратах потому, что потери пропорциональны квадратам токов, которые, в свою очередь, пропорциональны мощностям.

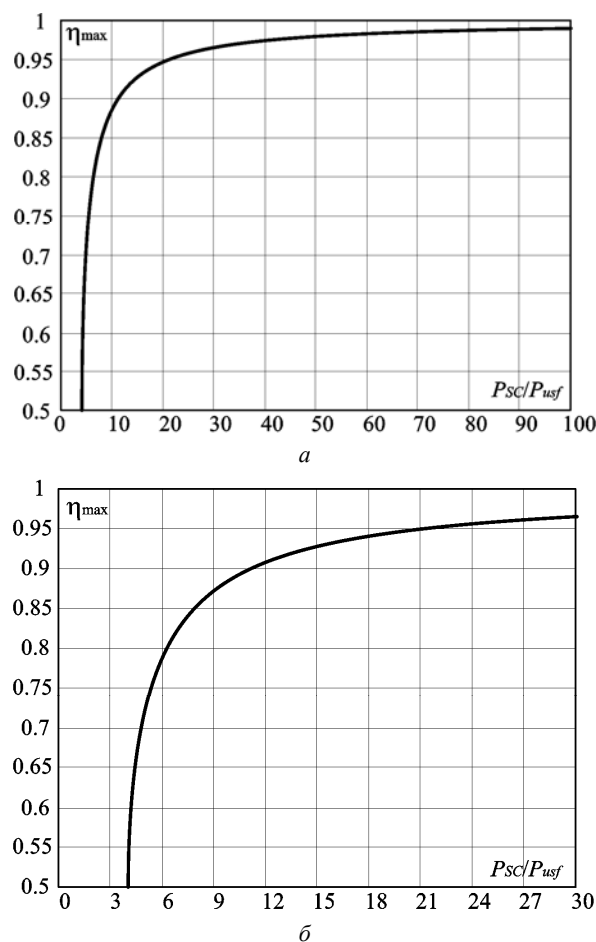


Рис. 2. Максимально возможный КПД

6. Зависимость мощности дополнительных потерь, обусловленных пульсациями мгновенной активной мощности, от среднеквадратического (действующего) значения, вычисленного в периоде повторяемости, переменной составляющей активной мощности, может быть получено аналитически.

Покажем это. Графики активной мощности без пульсаций и с пульсациями представлены на рис. 3, а и рис. 3, б соответственно.

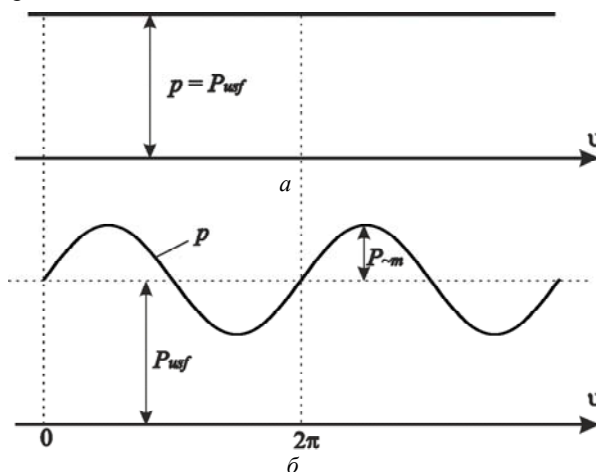


Рис. 3. Графики активной мощности без пульсаций (а) и с пульсациями (б)

Величины, используемые в статье

№	Наименование	Сокращенное наименование	Обозначение	Расчетная формула	Размерность	Примечания
1	Вектор мгновенной реактивной мощности	–	$\vec{q}$	(4, 9, 10)	–	–
2	Модуль вектора мгновенной реактивной мощности	Мгновенная реактивная мощность	$ \vec{q} $	(10)	W	–
3	Мгновенная реактивная мощность	–	q	(10)	W	$q = \vec{q} $
4	Относительная реактивная мощность	–	q^*	$q^* = \frac{q}{P_{usf}}$	безразмерная	–
5	Средняя за период повторяемости реактивная мощность	Средняя реактивная мощность	Q_{AV}	$Q_{AV} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} q dt$	W	–
			Q_{AV}^*	$Q_{AV}^* = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} q^* dt$	безразмерная	–
6	Среднеквадратическая в периоде повторяемости реактивная мощность	Среднеквадратическая реактивная мощность	Q_{RMS}	$Q_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} q^2 dt}$	W	–
			Q_{RMS}^*	$Q_{RMS}^* = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} q^{*2} dt}$	безразмерная	–

Таблица 2

Максимально возможный КПД

k_{sc}	4	6	8	10	12	14	16	18
η_{max}	0.5	0.789	0.854	0.887	0.909	0.923	0.933	0.941
ΔP_{min}^*	1	0.276	0.171	0.127	0.101	0.083	0.072	0.063
P_{sour}^*	2	1.276	1.171	1.127	1.101	1.083	1.072	1.063
k_{sc}	20	25	30	40	50	60	75	100
η_{max}	0.947	0.958	0.965	0.974	0.980	0.983	0.986	0.99
ΔP_{min}^*	0.056	0.043	0.036	0.026	0.021	0.017	0.014	0.01
P_{sour}^*	1.056	1.043	1.036	1.026	1.021	1.017	1.014	1.01

Мгновенная активная мощность нагрузки трехфазной СЭ при отсутствии пульсаций

$$p = P_{usf} = \text{const}, \quad (15)$$

при наличии пульсаций

$$p = P_{usf} + P_m \cdot \sin \vartheta. \quad (16)$$

Полагаем, что активный ток кабеля пропорционален мгновенной активной мощности. Мощность потерь в кабеле от активной составляющей тока при отсутствии пульсаций

$$\Delta p_{\sim} = \Delta P_{\sim} = R_S \cdot k \cdot p^2 = R_S \cdot k \cdot P_{usf}^2, \quad (17)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

При наличии пульсаций

$$\Delta p_{\sim} = R_S \cdot k \cdot (P_{usf} + P_m \cdot \sin \vartheta)^2. \quad (18)$$

Период повторяемости графика активной мощности в соответствии с рис. 3 равен 2π . Из соотношения (18) в периоде повторяемости с учетом независимости мощности потерь от частоты пульсаций активной мощности

$$\Delta P_{\sim} = \frac{1}{2\pi} R_S \cdot k \cdot \left(\int_0^{2\pi} [P_{usf}^2 + 2 \cdot P_{usf} \cdot P_m \cdot \sin \vartheta] d\vartheta + \int_0^{2\pi} P_m^2 \cdot \sin^2 \vartheta d\vartheta \right). \quad (19)$$

С учетом равенства нулю второго интеграла в скобках определим разность в мощности потерь в рассматриваемых двух вариантах графика мгновенной активной мощности

$$\begin{aligned} \Delta P_{puls} &= \Delta P_{\sim} - \Delta P_{\sim} = \\ &= \frac{1}{2\pi} R_S \cdot k \cdot \int_0^{2\pi} 2 \cdot P_m \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos 2\vartheta) d\vartheta = \quad (20) \\ &= R_S \cdot k \cdot \frac{P_m^2}{2} = R_S \cdot k \cdot P_{pulsRMS}^2. \end{aligned}$$

Из соотношения (20) следует, что дополнительная мощность потерь, обусловленная пульсациями мгновенной активной мощности, пропорциональна квадрату среднеквадратического (действующего) значения переменной составляющей активной мощности.

7. Допущение о мощности потерь в нулевом проводе четырехпроводной СЭ очевидно.

Таким образом, обоснованы все семь принимаемых в работе допущений. Корректность принятых допущений может быть проверена на соответствующей Matlab-модели. Поскольку существует, по крайней мере, 72 заслуживающих внимания варианта сочетаний наборов параметров моделей [7], разработка моделей, моделирование и сопоставительный анализ результатов требует длительного периода времени.

После моделирования и анализа пяти вариантов СЭ авторы сочли возможным предложить универсальную расчетную формулу для определения четырех составляющих суммарной мощности потерь [10]

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma} &= \Delta P_{min}^* \times \\ &\times (1 + Q_{RMS}^2 + P_{pulsRMS}^2) + \Delta P_{n^*} \Big|_{P_{usf} = \text{const}} \quad (21) \end{aligned}$$

В соотношении (21) все величины взяты в долях заданного неизменного значения полезной мощности нагрузки, P_{usf} . По сравнению с соотношением (27) в [10] в (21) введены уточненные индексы, более соответствующие физическому смыслу величин. Соотношение (21) является основным расчетным соотношением. В нем:

$$\Delta P_{\Sigma}^* = \Delta P_{\Sigma} / P_{usf} - \quad (22)$$

относительная суммарная мощность потерь в рассматриваемой СЭ в долях полезной мощности нагрузки;

$$\Delta P_{\min}^* = \Delta P_{\min} / P_{usf} - \quad (23)$$

относительная минимально возможная мощность потерь в СЭ при отсутствии пульсаций активной мощности и при равенстве нулю мгновенной реактивной мощности во всем периоде повторяемости;

$$Q_{RMS}^* = Q_{RMS} / P_{usf} - \quad (24)$$

относительная среднеквадратическая в периоде повторяемости реактивная мощность;

$$P_{pulsRMS}^* = P_{pulsRMS} / P_{usf} - \quad (25)$$

относительное среднеквадратическое значение переменной составляющей мгновенной активной мощности;

$$\Delta P_n^* = \frac{R_n}{P_{usf} \cdot T} \int_t^{t+T} i_n^2 dt = \frac{\Delta P_n}{P_{usf}} - \quad (26)$$

среднее за период повторяемости относительное значение мощности потерь в нулевом проводе.

Проверка корректности универсальной формулы (21). Универсальная формула (21) получена при ряде допущений и поэтому является приближенной. Степень приближения расчета суммарной мощности потерь и ее составляющих определяется путем сравнения результатов полученных по (21) и результатов измерения токов, напряжений, активной, реактивной мощностей, мощности потерь и КПД СЭ в Matlab-модели.

В [10] была описана Matlab-модель трехфазной СЭ, позволяющая выполнять необходимые измерения и производить анализ электромагнитных процессов

в режиме реального времени. Графическая часть Matlab-модели представлена на рис. 4. Модель позволяет снимать данные для любого из 72 вариантов набора параметров. Остановимся на варианте СЭ с симметричным источником трехфазных синусоидальных напряжений, представленными на рис. 4 блоками 1-3, и симметричной нелинейной нагрузкой представленной в каждой фазе параллельным включением резисторов Rla, Rlb, Rlc (блоки 11-13) и регулируемых источников тока Ja, Jb, Jc (блоки 8-10).

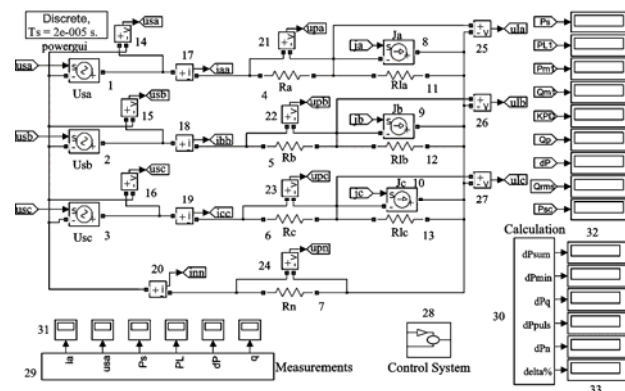


Рис. 4. Matlab-модель эквивалентной схемы трехфазной СЭ

Для моделирования был выбран вариант, когда в кривой тока содержатся нечетные гармоники включительно по 37. Параметры элементов модели: $k_{sc} = P_{sc} / P_{usf} = 5, 10, 15, 20, 25, 30$; $U_m = 311.13 \text{ V}$; $f_s = 50 \text{ Hz}$; $P_{usf} = \text{const} = 400.1 \text{ kW}$; $R_n = \infty, 0, R_s$. Постоянство средней полезной мощности $P_{usf} = \text{const}$ поддерживалось с помощью коэффициента k_l , на который умножались значения сопротивлений нагрузки.

Сопоставление результатов расчета по (21) и эксперимента на Matlab-модели представлено в табл. 3. Жирным шрифтом в табл. 3 выделены результаты расчета по формуле (21), а в последней колонке приведена относительная погрешность использования расчетной формулы.

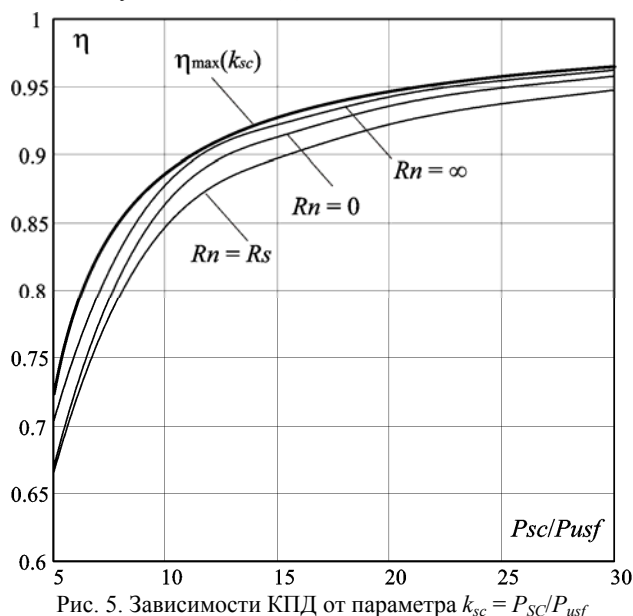
Таблица 3

Сопоставление результатов расчета и экспериментов

R_n	k_{sc}	k_l	η	Q_{rms}^*	$P_{pulsRMS}^*$	$\Delta P_{1\Sigma}^*$	$\Delta P_{2\Sigma}^*$	$\Delta P_{\min}^*$	ΔP_q^*	ΔP_{puls}^*	ΔP_n^*	$\delta \Delta P_{\Sigma}, \%$
∞	5	0.9595	0.7024	0.2992	0.04268	0.4236	0.4169	0.382	0.0342	0.00071	0	1.59
	10	0.9887	0.8783	0.2964	0.04258	0.13858	0.13841	0.127	0.01116	0.00023	0	0.126
	15	0.993	0.9222	0.2958	0.04245	0.08434	0.08429	0.07738	0.00677	0.00014	0	0.054
	20	0.995	0.9428	0.2951	0.04243	0.06072	0.0607	0.05574	0.004854	0.0001	0	0.03
	25	0.9963	0.9547	0.2949	0.04235	0.04744	0.04743	0.04356	0.00379	0.000078	0	0.027
	30	0.9969	0.9625	0.2947	0.04233	0.03894	0.03893	0.03576	0.00311	0.000064	0	0.026
0	5	0.8945	0.6684	0.4904	0.04425	0.49617	0.4746	0.382	0.09186	0.00078	0	4.34
	10	0.9711	0.8644	0.4785	0.04318	0.1569	0.15634	0.127	0.02908	0.00024	0	0.36
	15	0.9824	0.9132	0.4748	0.04284	0.0951	0.09497	0.07738	0.01744	0.00014	0	0.136
	20	0.9876	0.936	0.473	0.04268	0.06836	0.06832	0.05574	0.01247	0.0001	0	0.061
	25	0.9903	0.9493	0.4719	0.04258	0.05337	0.05334	0.04356	0.0097	0.000079	0	0.056
	30	0.992	0.958	0.4712	0.04252	0.04379	0.04376	0.03576	0.00794	0.000065	0	0.055
R_s	5	0.8875	0.6646	0.3688	0.04439	0.50455	0.45896	0.382	0.05195	0.00075	0.02429	9.03
	10	0.9495	0.8474	0.4145	0.04393	0.18008	0.17256	0.127	0.02182	0.00025	0.02348	4.17
	15	0.9644	0.8976	0.4313	0.04353	0.1141	0.1108	0.07738	0.01439	0.00015	0.01885	2.91
	20	0.9725	0.9225	0.4402	0.04327	0.084	0.0821	0.05574	0.0108	0.000104	0.01545	2.28
	25	0.9775	0.9376	0.4456	0.04309	0.06655	0.06532	0.04356	0.00865	0.000081	0.01303	1.84
	30	0.981	0.9477	0.4492	0.04296	0.05514	0.05427	0.03576	0.00722	0.000066	0.01123	1.57

Анализ данных табл. 3 подтверждает высокую точность расчета по (21) для трехфазных трехпроводных, а также четырехпроводных СЭ при допущении $R_n = 0$. В случае использования формулы (21) для трехфазной четырехпроводной СЭ при учете сопротивления нулевого провода, она дает достаточно точный для инженерных расчетов результат, однако требует уточнения при исследованиях, в связи с тем, что не учитывает взаимное влияние электромагнитных процессов в линейных проводах и нулевом проводе.

На рис. 5 представлены зависимости КПД от параметра $k_{sc} = P_{sc}/P_{usf}$ для трех значений сопротивления нулевого провода, а также зависимость максимально возможного КПД от указанного параметра, построенная по (11). Анализ кривых показывают, что компенсация дополнительных составляющих мощности потерь для рассматриваемой СЭ с малыми значениями отношения мощности резистивного короткого замыкания к полезной мощности нагрузки ($5 < k_{sc} < 10$), позволит увеличить КПД более чем на 5 %.



Выполненный анализ зависимости вычисленных в периоде повторяемости значений среднеквадратической реактивной мощности и средней, за тот же период времени, мощности потерь в СЭ, позволяет сформулировать несколько определений реактивной мощности, зависящих от ответов на шесть вопросов, сформулированных в начале статьи, и от принятых допущений.

Приведем несколько возможных определений.

1) В трехмерной системе координат вектор мгновенной реактивной мощности равен векторному произведению пространственного вектора напряжения на пространственный вектор тока СЭ.

2) Мгновенная реактивная мощность равна модулю вектора мгновенной реактивной мощности. Среднее и среднеквадратическое значения реактивной мощности вычисляются путем интегрирования в периоде повторяемости кривой мгновенной реактивной мощности.

3) В трехфазной СЭ одновременно протекают два практически независимых процесса обмена энергией. Первый процесс — это обмен энергией между источником и нагрузкой. Скорость первого обмена численно

равна мгновенной или средней за период повторяемости активной мощности. Знаком активной мощности определяется направление потока энергии. Второй процесс — это обмен энергией между фазами нагрузки, скорость которого равна мгновенной реактивной мощности. Второй обмен фактически не влияет на обмен энергией между источником и нагрузкой, однако порождает дополнительные потери энергии в линии, пропорциональные, как следует из (21), квадрату среднеквадратического значения реактивной мощности.

4) Реактивная мощность — это расчетная величина, определяющая скорость обмена энергией между фазами нагрузки трехфазной СЭ, отношение квадрата среднеквадратического значения которой к квадрату полезной мощности, умноженное на величину минимально возможной мощности потерь, равно одной из составляющих мощности дополнительных потерь в СЭ.

5) Возможны, по крайней мере, 72 варианта сочетаний параметров и режимов работы СЭ, приводящих к появлению реактивной мощности. Можно сделать предположение, что формула (21) с допустимой погрешностью справедлива для всех 72 вариантов. Путем сопоставления результатов моделирования и расчетов подтверждается справедливость формулы (21) для пяти вариантов.

6) В случае доказательства справедливости формулы (21) для остальных вариантов можно сформулировать теорему минимума потерь в СЭ: «Минимальная мощность потерь в СЭ достигается, если мгновенная реактивная мощность равна нулю во всем периоде повторяемости, а в графике мгновенной активной мощности отсутствуют пульсации». Численная величина этой минимально возможной мощности потерь в СЭ однозначно зависит от отношения мощности резистивного короткого замыкания на клеммах нагрузки к средней за период повторяемости мощности нагрузки и определяется по табл. 2 и через максимально возможный КПД по соотношению (11).

Отметим, что возможность обмена энергией между фазами трехфазной СЭ при отсутствии потока энергии из источника в нагрузку или в обратном направлении показана в [9] для случая подключения к источнику трехфазной батареи конденсаторов или блока трехфазных реакторов.

Выводы. Сформулированы допущения, позволяющие предложить универсальную расчетную формулу (21) для определения суммарной мощности потерь в трехфазной СЭ как суммы четырех составляющих: минимально возможной мощности потерь в СЭ; мощности потерь, пропорциональной квадрату среднеквадратического значения реактивной мощности; мощности потерь, пропорциональной квадрату среднеквадратического значения переменной составляющей активной мощности; мощности потерь в нулевом проводе четырехпроводной СЭ.

Проверка корректности расчетной формулы (21) проверена путем моделирования на Matlab-модели трехфазной СЭ для пяти вариантов сочетания параметров СЭ. Результаты расчета и измерения на модели для выбранных вариантов практически совпадают. Требуется проверка формулы при других сочетаниях параметров СЭ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lyon W.V. Reactive power and unbalanced circuits // *Electrical world*. – June, 1920. – vol.75. – no.25. – pp. 1417-1420.
2. Budeanu C.I. Puissances réactives et fictives // *Ins. Romaine de l'Energie*. – 1927. – no.2.
3. Fryze S. Active and Apparent power in non-sinusoidal systems // *Przeglad Elektrot.* – 1931. – no.7. – pp. 193-203.
4. Fryze S. Wirk-, Blind- und Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen mit Nichtsinusoidalem Verlauf von Strom und Spannung // *Elect. Zeitschrift.* – 1932. – vol.53. – no.25. – pp. 596-599.
5. Маевский О.А. Энергетические показатели вентиляционных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
6. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits // *Int. Power Electronics Conf.*, Tokyo, Japan. – 1983. – pp. 1375-1386.
7. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г., Ильина О.В., Тугай Д.В. Компенсация пульсаций мгновенной активной мощности в цепях с резистивной нагрузкой // *Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки»*. – 2006. – Ч. 6. – С. 36-41.
8. Жемеров Г.Г., Колесник В.Ю., Ильина О.В. Соотношения для преобразования координат обобщенных векторов напряжений и токов трехфазной системы электроснабжения. Справочное пособие. – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – 40 с.
9. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Ильина О.В., Ковальчук О.И., Сокол Е.И. КПД трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения с асимметричной нагрузкой // *Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність»*. – 2010. – №1. – С. 22-31.
10. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Мощность потерь и реактивная мощность в трехфазных системах электроснабжения при симметричных синусоидальных напряжениях источника // *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит*. – 2014. – №9(127). – С. 12-23.
9. Zhemerov G.G., Il'ina N.A., Il'ina O.V., Koval'chuk O.I., Sokol E.I. Efficiency three-phase four-wire power supply system with an asymmetric load. *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vypusk «Silova elektronika i energoefektivnist» – Technical electrodyamics. Thematic issue «Power electronics & energy efficiency»*, 2010, vol.1, pp. 22-31. (Rus).
10. Zhemerov G.G., Tugay D.V. Power losses and reactive power in three-phase power supply systems with symmetrical sinusoidal voltage source. *Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit – Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2014, no.9(127), pp. 12-23. (Rus).

Поступила (received) 01.09.2015

Жемеров Георгий Георгиевич¹, д.т.н., проф.,
Тугай Дмитрий Васильевич², к.т.н., доц.,

¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 057 7076312, e-mail: zhemerov@gmail.com

²Харьковский национальный университет
городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,
61002, Харьков, ул. Революции, 12,
тел/phone +38 057 7073111, e-mail: tugaydv@yandex.ru

G.G. Zhemerov¹, D.V. Tugay²

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

²O.M. Beketov National University of Urban Economy
in Kharkiv,
12, Revolution Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Physical meaning of the «reactive power» concept applied to three-phase energy supply systems with non-linear load.

Purpose. The contradictions in the use of the term «reactive power» require justification by clarifying its physical meaning. The aim of the paper is to reveal the physical meaning of the term «reactive power» applied to three-phase three-wire and four-wire energy supply systems. **Methodology.** We have applied the modern theory of instantaneous active and reactive power, the graphical filling complex branched energy supply system of simplified design scheme, the theory of electrical circuits, computer Matlab-simulation. **Results.** We have provided answers to six basic questions that reveal the physical meaning and definition of the concept of «reactive power». We have justified the assumptions suggesting a universal calculation formula to determine the relative total power loss in the three-phase energy supply system as the sum of four components caused by: a minimal losses, reactive power, active power pulsations and instantaneous current flow in the neutral wire. **Originality.** We have developed the definition that reveals the physical meaning of the term «reactive power» for three-phase energy supply systems corresponding to modern theories of instantaneous active and reactive power. **Practical value.** We have proposed energy efficiency method ideas of energy supply systems with non-linear load based on the additional components of the power losses calculation. The further development of the method will allow to amend the design, selection and operation of the power active filters practices. References 10, tables 3, figures 5. **Key words:** energy supply system, reactive power, power of additional losses, the minimum possible losses, Matlab-model of three-phase energy supply system.

REFERENCES

1. Lyon W.V. Reactive power and unbalanced circuits. *Electrical world*, June 1920, vol.75, no.25, pp. 1417-1420.
2. Budeanu C.I. Puissances réactives et fictives. *Ins. Romaine de l'Energie*, Bucharest, 1927, no.2.
3. Fryze S. Active and Apparent power in non-sinusoidal systems. *Przeglad Elektrot.*, 1931, no.7, pp. 193-203.
4. Fryze S. Wirk-, Blind- und Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen mit Nichtsinusoidalem Verlauf von Strom und Spannung. *Elect. Zeitschrift.*, 1932, vol.53, no.25, pp. 596-599.
5. Maevskiy O.A. *Energeticheskie pokazateli ventilnykh preobrazovateley* [Energy indicators of semiconductor converters]. Moscow, Energiya Publ., 1978. 320 p. (Rus).
6. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits. *Int. Power Electronics Conf.*, Tokyo, Japan, 1983, pp.1375-1386.
7. Domnin I.F., Zhemerov G.G., Il'ina O.V., Tugay D.V. Compensation of instantaneous power pulsations in electric circuits with a resistive load. *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vypusk «Problemy suchasnoyi elektrotekhniki» – Technical electrodyamics. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering»*. 2006, chapter 6, pp. 36-41. (Rus).
8. Zhemerov G.G., Kolesnik V.Yu., Il'ina O.V. *Sootnosheniya dlya preobrazovaniya koordinat obobshchennykh vektorov napryazheniy i tokov trekhfaznoy sistemy elektrosnabzheniya. Spravochnoe posobie* [Relations for the generalized voltages and currents vectors coordinate transformation of three-phase energy supply system. Reference manual]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2009. 40 p. (Rus).

ДОСЛІДЖЕННЯ НАГРІВАННЯ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ІЗ ЗШИТОЮ ПОЛІЕТИЛЕНОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ НА НАПРУГУ ДО 110 КВ

Розглянуто ряд суттєвих особливостей СПЕ-кабелів, які впливають на тепловий режим як робочому, так і в аварійному режимах в експлуатації, а саме: 1) більші, ніж у традиційних маслом наповнених кабелів, значення площі перерізу жил і товщини ізоляції, що зумовлює суттєву залежність динаміки нагрівання від теплоємності жили і ізоляції для СПЕ-кабелів після включення; 2) більша, ніж у традиційних маслом наповнених кабелів, допустима температура ізоляції (90 °C); 3) суттєва залежність теплопровідності і теплоємності поліетиленової ізоляції від температури; 4) наявність елементів конструкції з високим питомим тепловим опором (до 50 °C·м/Вт), що суттєво змінює динаміку нагрівання СПЕ-кабелю, а отже його перевантажувальну здатність. Представлено експериментальні дані щодо визначення різниці температури між елементами конструкції кабелів і оточуючим повітряним середовищем. Досліджено нагрівання кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією для трьох кабелів, розташованих в площині на різних відстанях один від одного. Встановлено, що температура ізоляції, прилеглої до жили, в режимі перевантаження зростає суттєво швидше, ніж температура ізоляції, прилеглої до екрану. Запропоновано використовувати адіабатний режим нагрівання кабелю струмом перевантаження, кратним номінальному, визначеному для окремого кабелю за гранично допустимої тривалої температури ізоляції, прилеглої до струмопровідної жили кабелю. Це забезпечує значне скорочення часу випробування в умовах виробництва. Робота направлена на створення методу визначення допустимого струму цих кабелів в конкретних умовах експлуатації. Бібл. 7, рис. 3.

Ключові слова: силовий кабель, СПЕ-кабель, випробування на нагрів.

Рассмотрен ряд существенных особенностей СПЭ-кабелей, которые влияют на тепловой режим как в рабочих, так и в аварийных режимах эксплуатации, а именно: 1) большие, чем у традиционных маслом наполненных кабелей, значения площади сечения жил и толщины изоляции, что обуславливает существенную зависимость динамики нагревания от теплоемкости жилы и изоляции для СПЭ-кабелей после включения; 2) большая, чем у традиционных маслом наполненных кабелей, допустимая температура изоляции (90 °C); 3) существенная зависимость теплопроводности и теплоемкости полиэтиленовой изоляции от температуры; 4) наличие элементов конструкции с высоким удельным тепловым сопротивлением (до 50 °C·м/Вт), что существенно изменяет динамику нагрева СПЭ-кабеля, а следовательно его перегрузочную способность. Представлены экспериментальные данные по определению разности температуры между элементами конструкции кабелей и окружающей воздушной средой. Три кабеля расположены в одной плоскости на различных расстояниях между ними. Исследовано нагревание кабелей со шшитой полиэтиленовой изоляцией. Предложено использование адиабатного режима нагрева кабеля током перегрузки, кратным номинальному. Работа нацелена на создание метода определения допустимого тока таких кабелей в конкретных условиях эксплуатации. Библ. 10, рис. 7.

Ключевые слова: силовой кабель, СПЭ-кабель, испытание на нагрев.

Постановка проблеми. Практика застосування високовольтних кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією (СПЕ-кабелі), які є інноваційною продукцією вітчизняної кабельної техніки, свідчить про те, що найчастіше застосовують прокладання одножильних кабелів паралельно в одній площині. Такий спосіб прокладання є традиційним для високовольтних маслом наповнених кабелів. Однак до теплової асиметрії, яку зумовлює цей спосіб прокладання, для СПЕ-кабелів додається ряд суттєвих особливостей, які впливають на тепловий режим як робочому, так і в аварійному режимах в експлуатації:

- більші, ніж у традиційних маслом наповнених кабелів, значення площі перерізу жил і товщини ізоляції, що зумовлює суттєву залежність динаміки нагрівання від теплоємності жили і ізоляції для СПЕ-кабелів після включення; згадана залежність визначає перевантажувальну здатність кабелю;

- більша, ніж у традиційних маслом наповнених кабелів, допустима температура ізоляції (90 °C), що, по-перше, зумовлює великі значення допустимого струму [1]; по-друге, значно збільшує втрати енергії за робочих температур, що вимагає окремого розгляду в економічному аспекті [2];

- суттєва залежність теплопровідності і теплоємності поліетиленової ізоляції від температури

(наприклад, питома теплоємність поліетилену при температурі 20 °C дорівнює 2300 Дж/кг·°C, а при 80 °C 3750 Дж/кг·°C);

- наявність елементів конструкції з високим питомим тепловим опором (до 50 °C·м/Вт), що суттєво змінює динаміку нагрівання СПЕ-кабелю, а отже його перевантажувальну здатність.

Тому дослідження нагрівання високовольтних кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією, прокладених паралельно в одній площині, є необхідним для прийняття технічних рішень щодо їх тривалості і перевантажувальної спроможності.

Аналіз літератури. Поєднання високої робочої напруженості електричного поля (до 8 кВ/мм і більше) з тривалою підвищеною температурою ізоляції (до 90 °C і більше) зумовлюють застосування тривалих і дорогих випробувань (long-term test) [3], за якими СПЕ-кабелі піддають сотням циклів нагріву (кожний по 8 годин) з одночасною дією підвищеної напруги $1,7U_n$; в процесі циклів контролюють всі основні параметри:

- електричні (тангенс кута діелектричних втрат, рівень часткових розрядів);

- теплові (температура в елементах конструкції кабелю і на його поверхні).

В той же час пропускна спроможність силових кабелів визначається виключно розрахунком в номінальних умовах, тобто в стаціонарному режимі навантаження (100 % -ний коефіцієнт навантаження) [4]. Відповідно, номінальний струм I_n – необмежене тривалий, за якого встановлюється максимальна температура жили при номінальних умовах оточуючого середовища. Практично застосовані розрахункові моделі для визначення I_n включають велику кількість припущень і експериментально визначених оцінок конкретних параметрів моделі. Рекомендація щодо доцільності прямого експериментального чи опосередкованого визначення значень параметрів моделі для розрахунку допустимого струму конкретних кабелів присутня практично в усіх міжнародних і відповідних національних стандартах серії 60287.

Оскільки способи виконання цих рекомендацій не нормовані, а в умовах експлуатації кабель практично ніколи не працює в стаціонарному гранично допустимому режимі, то для перевірки працездатності конкретних кабелів використовують або спеціальні лабораторії [5, 6], або кабель приймають під гарантії виробника. Останнє означає необхідність створення у виробника відповідних лабораторій для перевірки працездатності конкретних кабелів. Очевидно, що нормовані випробування є необхідними. Але для інноваційної продукції, яка суттєво відрізняється від традиційної, використання тільки нормованих методів випробувань є недостатнім.

Наприклад, в [7] авторами запропоновано метод використання універсальних і уніфікованих розрахункових моделей процесів тепло і масообміну в високовольтних кабелях з пластмасовою ізоляцією для дослідження їх пропускної спроможності шляхом інтервального оцінювання параметрів моделей. Показано, що для розрахунку пропускної спроможності силового високовольтного кабелю з пластмасовою ізоляцією необхідне спільне вирішення моделей, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю. Наведено рішення для одножильного кабелю перерізом 625 мм² на напругу 220 кВ. Встановлено, що оптимальний діапазон товщини ізоляції від 9,5 мм до 10,5 мм і при зменшенні товщини ізоляції практично не зростає пропускна спроможність кабелю. Очевидно, що при прокладанні трьох одножильних кабелів в лінії умови їх охолодження відрізняються від умов охолодження одножильного кабелю, що має бути враховане при визначенні їх пропускної і перевантажувальної спроможності. При випробуваннях кабелів, призначених для прокладання трьох одножильних кабелів в площині, мають бути враховані також теплова та електрична асиметрія кабелів в умовах випробування.

Мета роботи – аналіз впливу розташування трьох одножильних СПЕ-кабелів в площині на нагрівання цих кабелів в умовах випробування для визначення їх пропускної і перевантажувальної спроможності.

Одержані результати. Експериментальна оцінка впливу відстані між кабелями на асиметрію струмів

і температур виконана на трьох однофазних одножильних кабелях АПвЕраПв 1×70/16–35 з однаковим напрямом струму (схеми розташування кабелів і термопар див. на рис. 1).

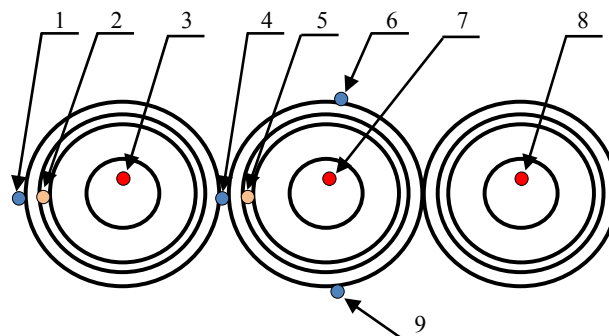


Рис. 1. Схема розміщення трьох кабелів і термопар для вимірювання температури в елементах конструкції при прокладанні впритул в горизонтальній площині:

- 1, 4, 6, 9 – термопари на поверхні кабелів;
- 2, 5 – термопари в мідних екранах;
- 3, 7, 8 – термопари на жилах

На рис. 2 наведено результати вимірювань температури в процесі нагрівання струмом в жилі елементів конструкції, при прокладанні впритул в горизонтальній площині – температура повітря в приміщенні 10 °С, джерела живлення ідентичні, мідні екрани ізолювані. Важливо те, що температура жили середнього кабелю є меншим значенням струму є суттєво більшою і різниця з часом нагрівання збільшується: після години нагрівання становить (15 ± 1) °С.

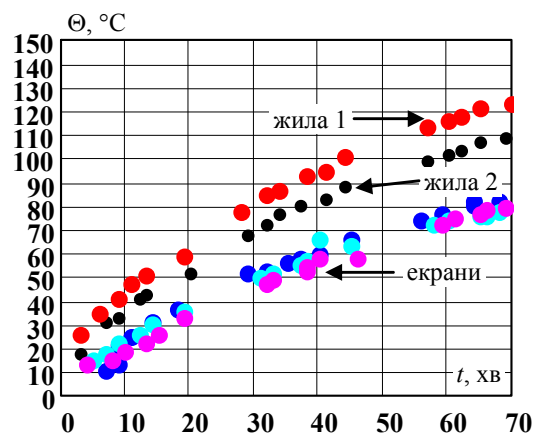


Рис. 2. Результати вимірювань температури елементів конструкції СПЕ-кабелю в процесі нагрівання струмом перевантаження (407 А в крайніх кабелях і 400 А в середньому) при прокладанні впритул в горизонтальній площині

Пропускна спроможність кабелю, визначена за нормативними моделями і середніми параметрами оточуючого середовища, прийнятими в нормативній документації, надає лише попередню інформацію про його нагрівання, корисну для порівняння його пропускної спроможності з іншими кабелями такого ж типу. Для конкретних застосувань і для інноваційних конструкцій кабелю необхідно визначати пропускну спроможність за тепловими обмеженнями в конкретних умовах експлуатації.

На рис. 3 наведено порівняння результатів вимірювань температури в процесі нагрівання номінальним струмом елементів конструкції при прокладанні впритул і на відстані діаметра кабелю в площині. Видно, що найбільша асиметрія спостерігається при прокладці впритул. Це пов'язано з електромагнітними взаємними впливами струмів в трьох кабелях. Електромагнітний зв'язок контурів жил характеризується коефіцієнтом взаєміндукції між двома жилами M_{1-2} і зумовлює появу електрорушійних сил, які змінюють струм в жилах.

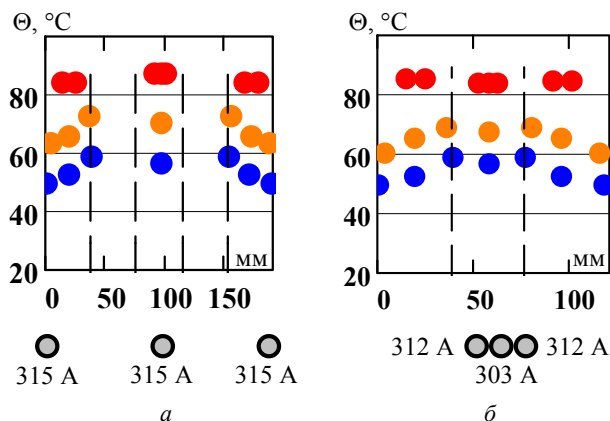


Рис. 3. Результати вимірювання температури при нагріванні трьох однофазних одножильних кабелів АПвЭгаПу 1×70/16–35 при розташуванні в горизонтальній площині на відстані одного діаметра (а) і впритул (б) з однаковим напрямком струму (схеми розташування кабелів і термодатчиків див. на рис. 1): верхні точки – температура жил; нижні точки – температура на поверхні кабелів; середні точки – температура в мідних екранах

Якщо позначити струми в кабелях I_1 , I_2 , I_3 , то струм в крайніх кабелях однаковий ($I_1 = I_3$), активний електричний опір r всіх жил однаковий. Тоді значення I_1 , I_2 , I_3 можуть бути знайдені з системи двох комплексних рівнянь:

$$I_1(r + j\omega L_1) + I_2 j\omega M_{1-2} + I_3 j\omega M_{1-3} = \Delta U; \quad (1)$$

$$I_2(r + j\omega L_2) + I_1 j\omega M_{1-2} + I_3 j\omega M_{1-3} = \Delta U; \quad (2)$$

де L_1 , L_2 , L_3 – індуктивності кабелів [9]:

$$L_1 = L_3 = (\mu_0/2\pi)[\ln(h_{1-3}/R) + 0,25]; \quad (3)$$

$$L_2 = (\mu_0/2\pi)[\ln(h_{1-2}/R) + 0,25]; \quad (4)$$

де h_{1-3} , h_{1-2} – відстані між центрами жил першого і третього; першого і другого кабелів, відповідно; R – радіус жили кабелю; M_{1-2} , M_{1-3} – взаємні індуктивності між першим і другим кабелем; першим і третім кабелем, відповідно, значення яких зменшуються при збільшенні відстані між центрами жил сусідніх кабелів [1].

З (1) і (2) відношення струмів в крайньому I_1 і середньому I_2 кабелях:

$$I_1/I_2 = (r + j\omega L_2 - j\omega M_{1-2})/(r + j\omega L_1 - j\omega M_{1-2} + \Delta), \quad (5)$$

де $\Delta = (j\omega M_{1-3} - j\omega M_{1-2})$.

Нехтуючи Δ порівняно з $j\omega M_{1-2}$ отримуємо висновок, що для трьох однофазних однакових кабелів, розташованих в одній площині, однонаправлені струми в крайніх кабелях більші за струм в середньому кабелі: $I_1 > I_2$.

Для трьох кабелів АПвЭгаПу 1×70/16–35 завдовжки 10 м в площині впритул і паралельно один

до одного у вигляді петлі радіусом 1,6 м відношення I_1/I_2 визначене коефіцієнтом k_{1-2} :

$$k_{1-2} = (r + j\omega L_2 - j\omega M_{1-2})/(r + j\omega L_1 - j\omega M_{1-2}), \quad (6)$$

де $r = 5 \cdot 10^{-4}$ Ом/м; $\omega L_1 = 1,43 \cdot 10^{-4}$ Ом/м; $\omega L_2 = 1,87 \cdot 10^{-4}$ Ом/м; при значенні взаємного реактивного опору в діапазоні $\omega M_{1-2} = (3 \cdot 10^{-6} \dots 2 \cdot 10^{-5})$ Ом/м значення коефіцієнта $k_{1-2} = 0,962 \dots 0,972$. Відповідно, при значенні струму в крайній жилі 312 А струм в середній знаходиться в діапазоні від 300 А до 303 А. Експериментальні дані підтвердили результати розрахунку: $I_1 = 312$ А; $I_2 = 303$ А. Таким чином, чим більші значення h_{1-3} , h_{1-2} , тим менший вплив електромагнітного зв'язку контурів жил на асиметрію струмів в умовах випробування.

Отже, при розташуванні в площині на відстані одного діаметра трьох одножильних СПЕ-кабелів з однонаправленими струмами (в межах гранично допустимого номінального струму) і за відсутності повздовжних струмів в електропровідних екранах, може бути практично забезпечена симетрія струмів в кабелях. В такому разі нагрівання всіх трьох кабелів залежить тільки від взаємодії теплових полів в кабелях і навколо них. Тривало допустима температура 90 °С досягається тільки в середньому кабелі. В крайніх кабелях температура на 5 °С менша.

При перевантаженні кабелів (див. рис. 2) температура жили середнього кабелю суттєво перевищує температуру в крайніх кабелях навіть за умови меншого струму в середньому кабелі. Перші пів години нагрівання різниця становить 10 °С, але з часом зростає і через півтори години становить вже 15 °С. Важливо те, що при цьому температуру мідних екранів в межах похибки вимірювань (± 2 °С) можна вважати практично однаковою і зростає вона суттєво повільніше, ніж температура жил. Це означає, що температура ізоляції, прилеглої до жили, в режимі перевантаження зростає суттєво швидше, ніж температура ізоляції, прилеглої до екрану, і внутрішні механічні напружки в ізоляції зростають.

Наведені результати одержані для кабелю з найменшою серед СПЕ-кабелів товщиною ізоляції 8,4 мм. Наприклад, для кабелів на напругу 220 кВ товщина ізоляції 23 мм. Тому при випробуваннях СПЕ-кабелів для порівняння їх короточасної перевантажувальної спроможності доцільно забезпечити адіабатний режим нагрівання кабелю струмом перевантаження, кратним номінальному, визначеному для окремого кабелю за гранично допустимої тривало температури ізоляції, прилеглої до струмопровідної жили кабелю.

Висновки.

1. Для СПЕ-кабелів, які є інноваційною продукцією вітчизняної кабельної техніки і які суттєво відрізняються від традиційних маслом наповнених кабелів, використання тільки нормованих методів випробувань є недостатнім.

2. Для СПЕ-кабелів температура ізоляції, прилеглої до жили, в режимі перевантаження зростає суттєво швидше, ніж температура ізоляції, прилеглої до екрану, тому динаміка нагрівання жили має бути

визначена експериментально і може бути використана як показник короточасної перевантажувальної спроможності конкретного кабелю.

3. В умовах випробування при розташуванні в площині трьох однофазних однакових СПЕ-кабелів однонапрямлені струми в крайніх кабелях завжди більші за струм в середньому кабелі: $I_1 > I_2$.

4. При розташуванні в площині на відстані одного діаметра трьох одножильних однофазних СПЕ-кабелів з однонапрямленими струмами (в межах гранично допустимого номінального струму) і за відсутності повздовжніх струмів в електропровідних екранах, може бути практично забезпечена симетрія струмів в кабелях.

5. При випробуваннях СПЕ-кабелів для порівняння їх короточасної перевантажувальної спроможності доцільно забезпечити адіабатний режим нагрівання кабелю струмом перевантаження, кратним номінальному, визначеному для окремого кабелю за гранично допустимої тривало температури ізоляції.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Карпушенко В.П., Щебенюк Л.А., Антонетс Ю.О., Науменко О.А. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. Х.: Регіон-інформ, 2000. – 376 с.
2. IEC 60287-1-1: 2001. Electric cables. Calculation of the current rating. Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – General. – 65 p.
3. СИГРЭ № 303 «Revision of qualification procedures for high voltage and extra high voltage AC extruded underground cable systems», 2006.
4. IEC 60287-2-1: 2001. Electric cables. Calculation of the current rating. Part 2-1: Thermal resistance – Calculation of thermal resistance. – 84 p.
5. IEC 62067: Ed. 1.1b: 2006. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ($U_m = 170$ kV) up to 500 kV ($U_m = 550$ kV) – Test methods and requirements. – 90 p.
6. HD 632 S1: 1998. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 36 kV ($U_m = 42$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV) Part 2: Additional test methods.
7. Щебенюк Л.А., Антонетс Т.Ю. До визначення пропускної спроможності високовольтних силових кабелів з пластмасовою ізоляцією // Вісник НТУ «ХПІ». – 2011. – №3. – С. 152-157.

REFERENCES

1. Karpushenko V.P., Shchebeniuk L.A., Antonets Yu.O., Naumenko O.A. *Sylovi kabeli nyz'koyi ta seredn'oyi napruhy. Konstruyuvannya, tekhnolohiya, yakist'* [Power cables of low and medium voltage. Designing, technology, quality]. Kharkiv, Region-inform Publ., 2000. 376 p. (Ukr).
2. IEC 60287-1-1: 2001. Electric cables. Calculation of the current rating. Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – General. – 65 p.

3. SIGRE № 303 «Revision of qualification procedures for high voltage and extra high voltage AC extruded underground cable systems», 2006.

4. IEC 60287-2-1: 2001. Electric cables. Calculation of the current rating. Part 2-1: Thermal resistance – Calculation of thermal resistance. – 84 p.

5. IEC 62067: Ed. 1.1b: 2006. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ($U_m = 170$ kV) up to 500 kV ($U_m = 550$ kV) – Test methods and requirements. – 90 p.

6. HD 632 S1: 1998. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 36 kV ($U_m = 42$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV) Part 2: Additional test methods.

7. Shchebeniuk L.A., Antonets T.Yu. To determine the capacity of high-voltage power cables with plastic insulation. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2011, no.3, pp. 152-157. (Ukr).

Надійшла (received) 26.10.2015

Антонетс Тарас Юрійович¹, аспірант,
Веприк Юрій Миколайович¹, д.т.н., проф.,
Щебенюк Леся Артемівна¹, к.т.н., проф.,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21,
e-mail: veprik@email.ua

T.Yu. Antonets¹, Yu.M. Veprik¹, L.A. Shchebeniuk¹

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

Heat tests of power cables with XLPE insulation at direct voltages up to 110 kV.

In this paper, experiment for determining the temperature difference between the elements of cable and in the open air is considered. The formation of a three cables laid in a plane with different spacing between adjacent cables. Tests to heat of cables for XLPE-polyethylene are used as a solid dielectric insulation. The line to XLPE-cables in group running horizontally, provided that the cables are of equal diameter and emit equal losses. It is limited to the following: the air flow around the cables may be necessary restricted by proximity to next cables. When single-core cables are installed in parallel the load current may not share equally between the parallel cables. This is because a significant proportion of the impedance of large conductors is due to self reactance and mutual reactance. Hence the spacing and relative location of each cable will have an effect on the current sharing. Calculation for each cable configuration is necessary. Possibility of using for determining the thermal properties of XLPE-cables a sheath applied over the cable surface with coefficient convection heat transfer between cable surface and the air region about it of equal zero. The work is devoted to creation of a method for calculation of the current rating of high-voltage cables in conditions function. References 7, figures 3.

Key words: power cable, XLPE-cables, heat test.

РАЗРАБОТКА НОВЫХ СХЕМ РЕЗИСТИВНОЙ ЗАЩИТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ МОЩНЫХ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ОТ АВАРИЙНЫХ ТОКОВ

Приведені результати розробки нових схем резистивного захисту високовольтних імпульсних конденсаторів потужних ємкісних накопичувачів енергії від руйнівної дії на них аварійних імпульсних струмів амплітудою до сотень кілоампер, що протікають за відсутності подібного захисту через дані конденсатори при електричному пробі їх внутрішньої або зовнішньої ізоляції. Бібл. 14, рис. 3.

Ключові слова: потужний ємкісний накопичувач енергії, аварійний струм, резистивна схема захисту високовольтних конденсаторів, високовольтні постійні графіто-керамічні резистори.

Приведены результаты разработки новых схем резистивной защиты высоковольтных импульсных конденсаторов мощных емкостных накопителей энергии от разрушающего действия на них аварийных импульсных токов амплитудой до сотен килоампер, протекающих при отсутствии подобной защиты через данные конденсаторы при электрическом пробое их внутренней или наружной изоляции. Библ. 14, рис. 3.

Ключевые слова: мощный емкостный накопитель энергии, аварийный ток, резистивная схема защиты высоковольтных конденсаторов, высоковольтные постоянные графито-керамические резисторы.

Введение. Сейчас в технике высоких напряжений, больших импульсных токов и сильных импульсных электрических (магнитных) полей, а также в экспериментальной физике, сильноточной электронике и современных электротехнологиях достаточно широкое применение нашли мощные емкостные накопители энергии (ЕНЭ), зарядно-разрядные цепи которых содержат параллельно-последовательно соединенные высоковольтные импульсные конденсаторы с металлическими (изоляционными) корпусами общим числом в десятки и сотни штук [1-4]. Накопленный отечественный опыт при эксплуатации подобных ЕНЭ непосредственно указывает на необходимость выполнения защиты их конденсаторов от аварийных токов – токов короткого замыкания при электрическом пробое изоляции конденсаторов ЕНЭ на стадии их заряда или разряда [5-7]. Отсутствие подобной защиты в мощных ЕНЭ может приводить к катастрофическим последствиям для них действия аварийных импульсных токов амплитудой в сотни килоампер на пробитые электрическим сильноточным разрядом конденсаторы ЕНЭ: взрывному разрушению металлических (изоляционных) корпусов конденсаторов; возгоранию жидкого диэлектрика конденсаторов и окружающих поврежденные конденсаторы конструкций; травматическому поражению обслуживающего персонала и выходу из строя используемого при исследованиях и испытаниях дорогостоящего электрофизического оборудования из-за ударного воздействия на них разлетающихся продуктов взрыва конденсаторов и др. В этой связи разработка и создание схем защиты высоковольтных импульсных конденсаторов мощных ЕНЭ от аварийных токов являются актуальными задачами.

Постановка задачи. Одним из возможных вариантов практической реализации рассматриваемой защиты высоковольтных конденсаторов мощных ЕНЭ является тот, который базируется на применении в составе их зарядно-разрядных цепей резистивных защитных схем [5, 6]. Рассмотрим зарядно-разрядную цепь мощного ЕНЭ, содержащую высоковольтные импульсные конденсаторы и защитные резисторы,

выполненные на основе высоковольтных объемных постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 на номинальное постоянное напряжение ± 25 кВ, изготавливаемых в промышленных масштабах при рассеиваемой мощности 60 Вт для постоянного тока различного номинала R_{03} по активному сопротивлению в РФ [8, 9]. Принимаем, что указанные защитные резисторы установлены непосредственно на высоковольтных выводах конденсаторов ЕНЭ. Такое размещение защитных резисторов позволяет минимизировать габаритные размеры соответствующих многочисленных защитных устройств мощных ЕНЭ и конструкционно выполнить их наиболее технологичным путем, а также снизить их паразитное влияние на протекающие в сильноточной разрядной цепи ЕНЭ с электрической нагрузкой электромагнитные процессы. Следует указать то, что такие собственные электрические параметры разрядных цепей мощных ЕНЭ как активное сопротивление R_C и индуктивность L_C реально могут изменяться в широких пределах [1, 10]: по R_C – от десятков миллиом до единиц Ом, а по L_C – от единиц микрогенри до десятков миллигенри. В этой связи использование защитных резистивных схем для малоиндуктивных и низкоомных сильноточных разрядных цепей мощных высоковольтных ЕНЭ на практике сопряжено с выполнением жестких требований по их электрическим параметрам R_C и L_C . Требуется разработать инженерно-технические подходы по приближенному выбору основных параметров новых резистивных схем защиты высоковольтных конденсаторов мощных ЕНЭ от аварийных токов, содержащих графито-керамические резисторы типа ТВО-60 с номиналом их сопротивления R_{03} в зарядно-разрядных цепях таких ЕНЭ различного исполнения.

Мощный высоковольтный ЕНЭ одномодульного исполнения с резистивной защитой конденсаторов. На рис. 1 приведена в упрощенном виде электрическая схема такого мощного ЕНЭ, содержащего в своей зарядно-разрядной цепи защитные сопротивления R_3 ,

установленные прямо на высоковольтных выводах параллельно соединенных конденсаторов общим числом n и собранные из k числа параллельно включенных постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 с номиналом активного сопротивления R_{03} . Приведенные в [9] результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что при длительном протекании по этим резисторам импульсов тока микро- и миллисекундной длительности максимальное (критическое) значение рассеиваемой тепловой энергии W_k для высоковольтных постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60-24 Ом составляет примерно 2,5 кДж. Из имеющегося в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» опыта эксплуатации мощных ЕНЭ с резистивной защитой их конденсаторов, выполненной на основе резисторов типа ТВО-60, следует, что значение $W_k \approx 2,5$ кДж может быть использовано в первом приближении и для других их номиналов из диапазона $24 \text{ Ом} \leq R_{03} \leq 100 \text{ Ом}$ [6, 7].

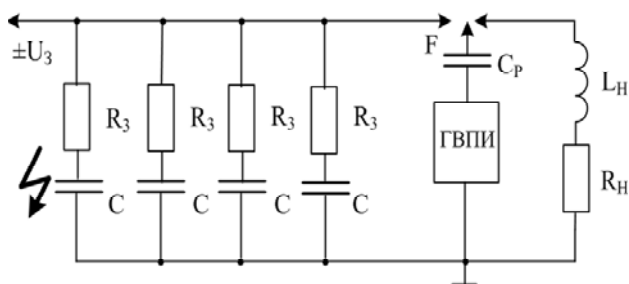


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема мощного высоковольтного ЕНЭ одномодульного исполнения с резистивной защитой его высоковольтных конденсаторов в аварийном режиме работы, вызванном пробоем изоляции его конденсатора на рабочее напряжение U_0 ($U_3 = U_0 \leq \pm 50 \text{ кВ}$ – зарядное напряжение параллельно включенных в количестве n конденсаторов емкостью C ; R_3 – защитное сопротивление, собранное из высоковольтных постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60; F – высоковольтный трехэлектродный управляемый воздушный коммутатор [10]; ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих импульсов на напряжение $\pm 100 \text{ кВ}$ [10]; C_p – высоковольтный разделительный конденсатор емкостью 180 пФ на напряжение $\pm 120 \text{ кВ}$ [10]; R_n, L_n – активное сопротивление и индуктивность электрической нагрузки [7, 10]

В рассматриваемом случае для аварийного режима работы ЕНЭ, вызванного, как правило, электрическим пробоем одного из его конденсаторов на стадии их заряда от повысительно-выпрямительного устройства (ПВУ), для сильноточной цепи разряда неповрежденных конденсаторов ЕНЭ на поврежденный (пробитый) конденсатор с апериодическим импульсом аварийного тока будет всегда выполняться следующее неравенство [11]: $R_3 > 2[L_C/(n-1)C]^{1/2}$. Поэтому величина защитного сопротивления R_3 может быть найдена из следующего приближенного соотношения:

$$R_3 \approx U_3 / I_{mp}, \quad (1)$$

где U_3 – зарядное напряжение конденсаторов ЕНЭ; I_{mp} – амплитуда максимально допустимого для импульсных конденсаторов ЕНЭ аварийного тока [2].

Согласно [2] для характерных типов высоковольтных импульсных конденсаторов (например, ИК-50-3 и ИМ-5-140), широко используемых в зарядно-

разрядных цепях мощных ЕНЭ при формировании больших импульсных токов различных амплитудно-временных параметров (АВП), величины их зарядного постоянного напряжения U_3 изменяются в диапазоне $\pm 5 \text{ кВ} \leq U_3 \leq \pm 50 \text{ кВ}$, а величины максимально допустимых для них амплитуд I_{mp} разрядного тока – в диапазоне $\pm 2,5 \text{ кА} \leq I_{mp} \leq \pm 50 \text{ кА}$. Из (1) для характерного в области высоковольтной импульсной техники электрофизического случая ($U_3 = \pm 50 \text{ кВ}$; $I_{mp} = \pm 10 \text{ кА}$ [1, 7]) следует, что значение защитного сопротивления R_3 , устанавливаемого на высоковольтный вывод каждого из конденсаторов мощного ЕНЭ одномодульного исполнения, должно численно составлять около $R_3 \approx 5 \text{ Ом}$. Тогда при априори известном числе n параллельно включенных в высоковольтных зарядно-разрядных цепях мощного ЕНЭ импульсных конденсаторов ($U_3 = \pm 50 \text{ кВ}$; $I_{mp} = \pm 10 \text{ кА}$) с номинальной емкостью C и соответственно с заданной номинальной энергоемкостью $W_n = nCU_3^2/2$ конденсаторной батареи ЕНЭ для числа k параллельно соединенных на высоковольтном выводе каждого из конденсаторов такого ЕНЭ графито-керамических резисторов типа ТВО-60 находим:

$$k \approx R_{03} / R_3. \quad (2)$$

В результате с учетом (1) и (2) для общего числа N_3 графито-керамических резисторов типа ТВО-60 в используемой резистивной схеме защиты высоковольтных конденсаторов мощного ЕНЭ одномодульного исполнения от аварийного тока получаем:

$$N_3 = nk. \quad (3)$$

Для мощного высоковольтного ЕНЭ одномодульного исполнения проверка правильности осуществленного выбора по приведенным приближенным формулам (1) – (3) числа N_3 графито-керамических резисторов типа ТВО-60, устанавливаемых в его резистивную схему защиты силовых импульсных конденсаторов от аварийного тока, может быть выполнена по следующим критериальным соотношениям:

$$W_0(n-1) / N_3 \leq W_k; \quad (4)$$

$$R_{03} / N_3 \leq R_C, \quad (5)$$

где $W_0 = CU_3^2/2$ – номинальное значение электрической энергии, запасаемой в одном конденсаторе ЕНЭ.

При указанном выше защитном сопротивлении $R_3 \approx 5 \text{ Ом}$ и применении в резистивной схеме защиты конденсаторов ЕНЭ графито-керамических резисторов типа ТВО-60 с номиналом активного сопротивления $R_{03} = 24 \text{ Ом}$ из (2) вытекает, что для числа k будет справедливо следующее неравенство: $4 \leq k \leq 5$. Из опыта разработки и создания в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» в последние годы уникальных мощных одномодульных ЕНЭ с R_C в десятки миллиом и L_C в единицы микрогенри на основе высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИК-50-3 ($U_3 = \pm 50 \text{ кВ}$; $I_{mp} = \pm 10 \text{ кА}$) следует, что наиболее технологичным вариантом при практической реализации резистивной схемы защиты их импульсных конденсаторов от аварийных сверхтоков с применением высоковольтных постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60-24 Ом является тот, при котором $k=4$ [7, 10].

На рис. 2 приведен внешний вид фрагмента зарядно-разрядных цепей мощного высоковольтного

ЕНЭ одномодульного исполнения ($W_n=420$ кДж; $W_0=3,75$ кДж) разработки НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» с жестко установленными на высоковольтных выводах их конденсаторов типа ИК-50-3 ($n=112$; $k=4$; $N_3=448$) защитными графито-керамическими резисторами типа ТВО-60 номиналом $R_{03}=24$ Ом ($W_k \approx 2,5$ кДж) [7, 10]. Данный ЕНЭ согласно расшифровке соответствующих осциллограмм затухающего синусоидального тока в его разрядной цепи имеет собственное активное сопротивление $R_c \approx 0,057$ Ом [10]. Подставив в (4) и (5) соответствующие численные данные для указанного мощного одномодульного ЕНЭ ($W_0=3,75$ кДж; $n=112$; $k=4$; $N_3=448$), убеждаемся, что выбранные параметры резистивной защиты высоковольтных конденсаторов этого ЕНЭ от аварийных токов удовлетворяют указанным выше критериям.



Рис. 2. Внешний вид фрагмента зарядно-разрядных цепей мощного ЕНЭ одномодульного исполнения на номинальное напряжение ± 50 кВ и номинальную запасаемую электрическую энергию $W_n=420$ кДж с высоковольтными импульсными конденсаторами типа ИК-50-3 и установленными на их высоковольтных выводах защитными постоянными графито-керамическими резисторами типа ТВО-60-24 Ом [10]

Расчетную оценку амплитуды I_m аperiodического импульса аварийного тока, протекающего в рассматриваемом мощном ЕНЭ через его поврежденный (пробитый) конденсатор типа ИК-50-3, выполним по следующему приближенному соотношению [7]:

$$I_m \approx U_3 k / R_{03}. \quad (6)$$

Из (6) при $U_3=\pm 50$ кВ, $R_{03}=24$ Ом и $k=4$ следует, что $I_m \approx 8,33$ кА. Видно, что в данном случае $I_m < I_{mp}$. Этот результат может говорить о том, что в случае электрического пробоя на стадии заряда одного из конденсаторов типа ИК-50-3 указанного мощного ЕНЭ аварийный ток не вызовет опасное для него и персонала разрушение поврежденного конденсатора.

Расчетную оценку АВП слабозатухающего синусоидального аварийного тока, протекающего через пробитый электрическим разрядом конденсатор типа ИК-50-3 рассматриваемого мощного ЕНЭ ($U_0=U_3=\pm 50$ кВ; $L_c \approx 2,5$ мГн; $C=3$ мкФ; $n=112$) в режиме короткого замыкания, при отсутствии в нем резистивной защиты выполним по следующему соотношению [7, 11]:

$$I_m \approx U_3 \beta_A^{-1} [L_c / (n-1)C]^{-1/2}, \quad (7)$$

где β_A – нормирующий коэффициент (в нашем случае $\beta_A \approx 1,59$), рассчитываемый согласно [12].

Из (7) при указанных выше исходных электрических параметрах для исследуемого мощного высоковольтного ЕНЭ ($W_n=420$ кДж; $U_3=\pm 50$ кВ) получаем,

что $I_m \approx \pm 363$ кА. Отсюда можно аргументировано заключить, что применяемая в составе этого мощного одномодульного ЕНЭ резистивная защита обеспечивает 43-х кратное ограничение амплитуды I_m аварийного тока, протекающего через его поврежденный (пробитый электрическим разрядом) конденсатор.

Мощный высоковольтный ЕНЭ многомодульного исполнения с резистивной защитой конденсаторов. Одним из недостатков конструктивного варианта одномодульного исполнения мощного ЕНЭ, содержащего в своем составе сотни параллельно соединенных, заряжающихся и разряжающихся на общую электрическую нагрузку высоковольтных импульсных конденсаторов, является вероятная опасность взрывообразного разрушения в аварийном режиме его работы (случай электрического пробоя одного из его конденсаторов на стадии их заряда) защитных постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 [13]. Наличие в таких ЕНЭ большого количества параллельно включенных конденсаторов приводит к их большой электрической емкости $C_n=nC$ и соответственно к появлению большой длительности τ_p аварийного тока, лежащей в миллисекундном временном диапазоне. В подобных случаях выделяемая в указанных защитных резисторах, ограничивающих амплитуду I_m аварийного тока, тепловая энергия W_p может значительно превышать значение максимальной (критической) тепловой энергии W_k , многократно рассеиваемой графито-керамическими резисторами типа ТВО-60 от действия на них аperiodического импульса аварийного тока. Несмотря на высокоскоростную «отсечку» при этом аварийного тока, вызванную взрывообразным разрушением защитных графито-керамических резисторов на высоковольтном выводе электрически пробитого конденсатора, подобное разрушение защитного сопротивления R_3 влечет за собой опасность поражения осколками от его взрыва как элементов ЕНЭ, так и окружающего оборудования. Для исключения на практике таких случаев, снижающих безопасность функционирования мощных ЕНЭ и несущих угрозу травматизма для их обслуживающего персонала, конденсаторную батарею ЕНЭ целесообразно разбивать на отдельные модули [13].

На рис. 3 приведена в упрощенном виде электрическая схема мощного ЕНЭ многомодульного исполнения, содержащая в составе резистивную защиту его высоковольтных импульсных конденсаторов, выполненную на основе высоковольтных постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60. В соответствии с рис. 3 в режиме заряда от ПВУ до постоянного напряжения $U_0=\pm U_3 \leq \pm 50$ кВ высоковольтных конденсаторов емкостью C , разбитых на m модулей по n параллельно соединенных конденсаторов в каждом из модулей ЕНЭ, его 1,..., m модули между собой соединены высоковольтными междумодульными сопротивлениями R_p , выполненными также как и защитные сопротивления R_3 ЕНЭ из постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60. В режиме разряда конденсаторов ЕНЭ на общую электрическую RL -нагрузку его отдельные модули при помощи короткозамыкателей $P_1, \dots, P_m$ с электромагнитным приводом будут через общий высоковольтный

коммутатор F [14], сравнительно малоиндуктивную и низкоомную электрическую цепь параллельно разряжаться на указанную нагрузку. В аварийном режиме, обусловленном электрическим пробоем одного из конденсаторов m -го модуля ЕНЭ на стадии их заряда (наихудший случай аварийного режима), на поврежденный конденсатор будут разряжаться практически лишь высоковольтные конденсаторы общим числом $(n-1)$ аварийного модуля данного мощного ЕНЭ [13].

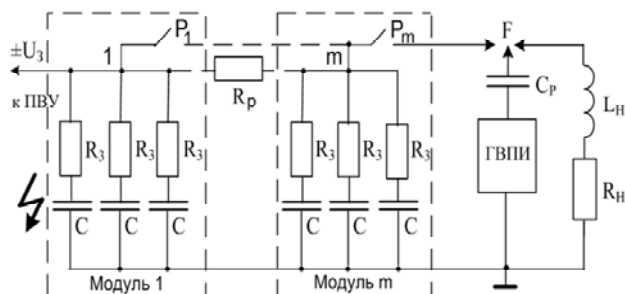


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема мощного высоковольтного ЕНЭ многомодульного исполнения с резистивной защитой высоковольтных конденсаторов в аварийном режиме работы, вызванном пробоем изоляции одного из его конденсаторов на рабочее напряжение $U_0 = \pm U_3 \leq 50$ кВ (R_p – междумодульное сопротивление, выполненное на основе высоковольтных постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60; $1, \dots, m$ – число модулей в ЕНЭ; $P_1, \dots, P_m$ – короткозамыкатели разрядных цепей отдельных модулей ЕНЭ; F – общий высоковольтный трехэлектродный управляемый воздушный коммутатор ЕНЭ [10, 14])

Выбор для схемы на рис. 3 величины защитного сопротивления R_3 и числа k параллельно соединенных в нем графито-керамических резисторов типа ТВО-60 осуществляется, как и для схемы на рис. 1, по приближенным формулам (1) и (2). Что касается общего числа N_3 используемых в предлагаемой согласно рис. 3 резистивной защите высоковольтных импульсных конденсаторов мощного ЕНЭ многомодульного исполнения от аварийного тока постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60, то оно может быть определено по следующему соотношению:

$$N_3 = nkm. \quad (8)$$

Число модулей m в зарядно-разрядных цепях мощного ЕНЭ многомодульного исполнения при известном типе его высоковольтных конденсаторов находим по следующему приближенному выражению:

$$m \approx W_{mn} / (nW_0), \quad (9)$$

где W_{mn} – энергоемкость многомодульного ЕНЭ.

Число n параллельно соединенных в каждом модуле мощного ЕНЭ высоковольтных конденсаторов емкостью C на зарядное постоянное напряжение $U_3 \leq 50$ кВ с учетом требований по предотвращению взрывообразного разрушения защитных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 в аварийном режиме работы ЕНЭ находим из соотношения [13]:

$$n \approx 6k^3 W_k / (R_{03}^2 I_{mp}^2 C) + 1. \quad (10)$$

Критериальные соотношения (4) и (5), по которым можно оценить достоверность проведенного выбора n , k , m и числа N_3 графито-керамических резисторов типа ТВО-60, устанавливаемых в резистивную

схему защиты от аварийного тока высоковольтных импульсных конденсаторов мощного ЕНЭ многомодульного исполнения, в этом случае приобретают вид:

$$W_0(n-1)/(nk) \leq W_k; \quad (11)$$

$$R_{03}/(nkm) \leq R_C. \quad (12)$$

Величина междумодульного сопротивления R_p в схеме мощного ЕНЭ на рис. 3 может быть выбрана из следующего приближенного соотношения [13]:

$$R_p \approx 10R_3. \quad (13)$$

Рассмотрим работоспособность расчетных соотношений (1), (2) и (8) – (13) применительно к мощному высоковольтному ЕНЭ многомодульного исполнения с конденсаторами типа ИК-50-3 и резистивной схемой их защиты от аварийного тока на основе постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60, характеризующемуся следующими электрическими параметрами: $W_{mn} = 420$ кДж; $U_3 = \pm 50$ кВ; $I_{mp} = \pm 10$ кА; $C = 3$ мкФ; $W_0 = 3,75$ кДж; $R_C \approx 0,057$ Ом; $L_C \approx 2,5$ мкГн; $R_{03} = 24$ Ом; $W_k \approx 2,5$ кДж. Из (1) при указанных исходных данных для исследуемого мощного ЕНЭ получаем, что $R_3 \approx 5$ Ом, а из (2) и приведенных рекомендаций следует, что $k \approx 4$. Тогда из (10) находим, что в каждом модуле такого ЕНЭ должно размещаться не более семи параллельно соединенных конденсаторов указанного типа ($n \approx 7$). Из (9) для числа модулей m в ЕНЭ получаем, что $m \approx 16$. В результате из (8) для общего числа N_3 постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60-24 Ом, установленных на высоковольтных выводах конденсаторов типа ИК-50-3 рассматриваемого мощного многомодульного ЕНЭ, следует, что $N_3 \approx 448$. Подставив полученные расчетные данные в (11) и (12), убеждаемся, что рекомендуемые критериальные соотношения выполняются.

Расчетная оценка для мощного многомодульного ЕНЭ амплитуды I_m аварийного апериодического импульса тока длительностью $\tau_p \approx 0,7 \cdot k^{-1} \cdot R_{03} \cdot (n-1) \cdot C \approx 75,6$ мкс, выполненная по (6), показывает, что и в этом электрофизическом случае $I_m \approx \pm 8,33$ кА (амплитуде I_m при этом соответствует время $t_m \approx 1,33$ мкс), а $I_m < I_{mp}$. Величина междумодульного сопротивления R_p согласно (13) принимает численное значение около 50 Ом, которому соответствует промышленно выпускаемый в РФ высоковольтный объемный постоянный графито-керамический резистор типа ТВО-60-51 Ом [8]. При отсутствии же рассматриваемой резистивной защиты на высоковольтных выводах конденсаторов в указанном многомодульном ЕНЭ, модули которого на стадии заряда их конденсаторов разделены между собой лишь междумодульными сопротивлениями $R_p \approx 50$ Ом, первая амплитуда I_m аварийного слабозатухающего синусоидального тока в таком режиме короткого замыкания в его m -ом модуле согласно (7) окажется примерно равной ± 120 кА ($\beta_A \approx 1,12$). Это дает основание говорить о том, что применение предлагаемой резистивной защиты в мощном высоковольтном ЕНЭ многомодульного исполнения (см. рис. 3) с указанными выше электрическими параметрами обеспечивает 14-ти кратное ограничение амплитуды I_m аварийного тока в пробитом конденсаторе ЕНЭ.

Выводы.

1. Мощные высоковольтные ЕНЭ, содержащие в зарядно-разрядных цепях десятки и сотни параллельно-последовательно включенных силовых импульсных конденсаторов, в целях повышения своей функциональной безопасности и обеспечения безопасных условий труда для обслуживающего их персонала должны содержать специальные устройства защиты высоковольтных конденсаторов от аварийных импульсных токов амплитудой до сотен килоампер, протекающих через поврежденные (пробитые) электрическим разрядом конденсаторы подобных ЕНЭ.

2. Предложены две новые схемы резистивной защиты высоковольтных импульсных конденсаторов мощных ЕНЭ одно- и многомодульного исполнения от аварийных импульсных токов, базирующиеся на использовании в их составе высоковольтных постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 номиналом от 24 до 100 Ом, устанавливаемых прямо на высоковольтных выводах конденсаторов ЕНЭ. Резистивная схема защиты от аварийных токов высоковольтных конденсаторов типа ИК-50-3 для мощного одномодульного ЕНЭ ($W_n=420$ кДж; $U_3=\pm 50$ кВ; $n=112$; $k=4$) прошла практическую апробацию.

3. Показано, что предложенные схемы резистивной защиты высоковольтных импульсных конденсаторов мощных ЕНЭ от аварийных импульсных токов способны в аварийных режимах работы подобных ЕНЭ (электрический пробой внутренней или наружной изоляции конденсаторов на стадии их заряда или разряда) обеспечить многократное ограничение по амплитуде аварийных токов и тем самым предотвратить опасное для дорогостоящего высоковольтного электрофизического оборудования и обслуживающего его персонала взрывообразное разрушение силовых конденсаторов (как правило, с жидким минеральным диэлектриком), сопровождающееся обычно их воспламенением и поражающим действием разлетающихся от них осколков разрушаемых металлических и изоляционных элементов их конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
2. 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.
3. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. – Киев: Наукова думка, 1990. – 208 с.
4. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
5. Колиушко Г.М. Исследование и разработка систем защиты для емкостных накопителей энергии: дисс. ... канд. техн. наук. – Х., 1981. – 218 с.
6. Баранов М.И. Выбор и установка защитных высоковольтных керамических резисторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – №50(1092). – С. 13-20.
7. Баранов М.И. Основные показатели термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии

- от аварийных сверхтоков // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – №50(1092). – С. 20-27.
8. ГОСТ 11324-76. Резисторы постоянные объемные типа ТВО. – М.: Госстандарт СССР, 1976. – 20 с.
9. Баранов М.И., Бочаров В.А., Носенко М.А. Предельные характеристики по рассеиваемой импульсной мощности и энергии высоковольтных керамических объемных резисторов типа ТВО-60 // Вісник НТУ «ХПІ». – 2007. – №20. – С. 45-56.
10. 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.
11. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. Учебник для вузов. Том 1. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с.
12. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: НТУ «ХПІ», 2010. – 407 с.
13. Баранов М.И. Новая резистивная схема защиты высоковольтных конденсаторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии // Вісник НТУ «ХПІ». – 2015. – №20(1129). – С. 3-10.
14. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Рудаков С.В. Мощный высоковольтный генератор аperiodических импульсов тока искусственной молнии с нормированными по международному стандарту IEC 62305-1-2010 амплитудно-временными параметрами // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №1. – С. 51-56.

REFERENCES

1. Komel'kov V.S. *bol'shih impul'snykh tokov i magnitnykh polej*. [Technique large pulsed currents and magnetic fields]. Moscow, Atomizdat Publ., 1970. 472 p. (Rus).
2. 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).
3. Gulyi G.A. *Nauchnye osnovy razriadno-impul'snykh tekhnologii* [Scientific basis of the discharge-pulse technology]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1990. 208 p. (Rus).
4. Mesiats G.A. *Impul'snaya energetika i elektronika* [Pulsed power and electronics]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 704 p. (Rus).
5. Koliushko G.M. *Issledovanie i razrabotka sistem zashchity dlia emkostnykh nakopitelei energii. Diss. cand. techn. nauk* [Research and development of security systems for capacitive energy storage. Cand. tech. sci. diss.]. Kharkov, 1981. 218 p. (Rus).
6. Baranov M.I. Selection and installation of high-voltage ceramic protective resistors in the charge-discharge circuit powerful capacitive energy storage. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.50(1092), pp.13-20. (Rus).
7. Baranov M.I. Key indicators thermo protection in high-voltage capacitors charge-discharge circuit powerful capacitive energy storage of emergency overcurrent. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.50(1092), pp.20-27. (Rus).
8. GOST 11324-76. *Rezistory postoiannye ob'emnye tipa TVO* [State Standard 11324-76. Resistors constant volume type TVO]. Moscow, USSR State Standard Publ., 1976. 20 p. (Rus).
9. Baranov M.I., Bocharov V.A., Nosenko M.A. Limit characteristics of the scattered pulse power and high-power ceramic resistors bulk type TVO-60. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2007, no.20, pp. 45-56. (Rus).
10. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzelskyi O.S., Dnyschenko V.N. A current generator of the artificial lightning for full-scale tests of technical objects. *Pribory i tekhnika eksperimenta – Instruments and experimental techniques*, 2008, no.3, pp. 81-85. (Rus).

11. 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).

12. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki. Tom 2, Kn. 2: Teoriia elektrofizicheskikh efektov 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).

13. Baranov M.I. New resistive circuit protection in high-voltage capacitors charge-discharge circuit powerful capacitive energy storage. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2015, no.20(1129), pp. 3-10. (Rus).

14. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A powerful high-voltage generator of aperiodic impulses of current of artificial lightning with the peak-temporal parameters rated on an International Standard IEC 62305-1-2010. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.1, pp. 51-56. (Rus).

Поступила (received) 29.07.2015

Баранов Михаил Иванович¹, д.т.н., гл.н.с.,

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

⁴ Национальный университет гражданской защиты Украины,

61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94,

тел/phone +38 057 7073438, e-mail: serg_73@i.ua

M.I. Baranov¹, 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, Chernyshevskaya Str., Kharkiv, 61023, Ukraine.

Development of new charts of capacitance-resistance defense of high-voltage capacitors of powerful capacity stores of energy from emergency currents.

Purpose. Development of new charts of capacitance-resistance defense of high-voltage capacitors of powerful capacity stores of energy (CSE) from emergency large impulsive currents (LIC) at the electric hasp of one of condensers of such CSE on the stage of their charge or discharge. **Methodology.** Electrophysics bases of the technique of high-voltage and large pulsed currents, and also scientific and technical bases of planning of devices of high-voltage impulse technique. **Results.** Two new charts of capacitance-resistance defense of high-voltage impulsive capacitors are offered for powerful CSE of one- and multi-module execution from emergency LIC, being based on the use of high-voltage permanent graphite-ceramic resistors of type of TVO-60 a face value from 24 to 100 Ohm, set on the high-voltage conclusions of all of condensers of CSE. One of the developed capacitance-resistance charts of defense of condensers for powerful one-module CSE passed practical approbation.

Originality. It is shown that application of the developed charts of capacitance-resistance defense of high-voltage condensers of powerful CSE is provided by frequent limitation of amplitude of emergency LIC, flowing through broken through an electric discharge condenser of CSE on the stage of his charge or discharge. Such limitation emergency LIC is prevented by explosion destruction of the damaged condenser of high-voltage CSE.

Practical value. The use of the developed charts of capacitance-resistance defense of high-voltage capacitors from emergency LIC allows substantially to promote functional safety of powerful CSE of one- and multi-module execution and provide the safe terms of labour for a scientific and technical personnel, attendant similar CSE. References 14, figures 3.

Key words: powerful capacity store of energy, emergency current, capacitance-resistance chart of defense of high-voltage capacitors, high-voltage permanent graphite-ceramic resistors.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ В ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ С ПРИТЯГИВАЮЩИМ ЭКРАНОМ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ ВНЕШНИМ КРУГОВЫМ СОЛЕНОИДОМ

У статті представлений теоретичний аналіз просторово-часових розподілів індуктованих струмів і сил притягання в «індукторній системі з притягуючим екраном», що збуджується плоским круговим соленоїдом, розташованим із зовнішнього боку допоміжного екрана. Показана, досить висока ефективність системи, що дозволяє рекомендувати її як інструмент зовнішнього рихтування вм'ятин в кузовних покриттях автотранспорту. Бібл. 9, табл. 1, рис. 1.

Ключові слова: магнітно-імпульсна обробка, притягання металів, індукторна система, круговий соленоїд, притягуючий екран.

В статье представлен теоретический анализ пространственно-временных распределений индуцированных токов и сил притяжения в «индукторной системе с притягивающим экраном», возбуждаемой плоским круговым соленоидом, расположенным с внешней стороны вспомогательного экрана. Показана, достаточно высокая эффективность системы, что позволяет рекомендовать её как инструмент внешней рихтовки вмятин в кузовных покрытиях автотранспорта. Библ. 9, табл. 1, рис. 1.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка, притяжение металлов, индукторная система, круговой соленоид, притягивающий экран.

Введение. Разработки в сфере магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) находят все большее применение в современных технологиях производства и ремонта авиационной, автомобильной и другой техники, так как являются экологически чистыми и энергосберегающими, в сравнении с классическими подходами [1, 2]. Одной из основных составляющих устройств МИОМ является инструмент-индуктор или индукторные системы с притягивающим экраном (ИСПЭ). Для оценки эффективности работы ИСПЭ была взята система, описанная авторами работы [3].

Анализ литературы. Необходимые для анализа расчётные зависимости для возбуждаемых токов и электродинамических сил притяжения в исследуемой ИСПЭ выпишем из работы [4].

Отметим, что указанные соотношения получены для низкочастотного режима возбуждаемых полей, когда имеет место их существенное проникновение сквозь тонкостенный металл экрана и деформируемой заготовки. Как было ранее показано, данный режим является наиболее эффективным с точки зрения силового воздействия на объект обработки [5-9].

Цель работы – теоретический анализ пространственно-временных распределений индуцированных токов и сил притяжения в индукторной системе с притягивающим экраном, возбуждаемой плоским круговым соленоидом, расположенным с внешней стороны вспомогательного экрана.

Расчётные зависимости. Предполагается «электродинамическая тонкостенность» проводящих элементов исследуемой ИСПЭ, что соответствует ситуации, формально описываемой неравенством [9]:

$$\omega \cdot \tau \ll 1, \quad (1)$$

где ω – циклическая частота электромагнитных процессов, $\tau = \mu_0 \gamma d^2$ – характерное время проникновения возбуждаемых полей сквозь немагнитный металлический слой с электропроводностью γ и толщиной d .

Экран и заготовка – листовые металлы одинаковой толщины d с одинаковой удельной электропроводностью γ .

Итак, исследуемая индукторная система представляет собой послойно расположенные параллельные плоские компоненты: возбуждающий круговой

экран, немагнитные металлические вспомогательный листовой экран и листовая заготовка.

В системе возбуждаются индуцированные токи с линейной плотностью:

а) в металле вспомогательного плоского экрана, расположенного на расстоянии $-h$ от возбуждающего кругового соленоида (формула (34) из [4])

$$J_{\phi}^{(3)}(t, r) = -\frac{\tau}{(2d^2)} \cdot \frac{dj(t)}{dt} \cdot \int_0^{\infty} f(\lambda) \cdot \frac{e^{-\lambda h} (1 - e^{-\lambda d})}{\lambda} \cdot J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (2)$$

где $j(t) = j_m \cdot j(t)$ – плотность возбуждающего тока в индукторе, j_m – амплитудное значение $j(t)$ – временная

зависимость, $f(\lambda) = \int_{R_3}^{R_4} r \cdot J_1(\lambda r) dr$ – Фурье-Бесселев

образ функции равномерного радиального распределения возбуждающего тока, h – расстояние от возбуждающего соленоида до экрана, d – толщина экрана.

б) в металле листовой заготовки, расположенной на расстоянии $-(3h + d)$ от возбуждающего кругового соленоида (формула (35) из [4])

$$J_{\phi}^{(3)}(t, r) = -\frac{\tau}{(2d^2)} \cdot \frac{dj(t)}{dt} \cdot \int_0^{\infty} f(\lambda) \cdot e^{-\lambda(3h+d)} \cdot \frac{(1 - e^{-\lambda d})}{\lambda} \cdot J_1(\lambda r) d\lambda. \quad (3)$$

Формула для вычисления распределённой силы притяжения, которая при жёстко фиксированном экране будет притягивать листовую заготовку к его рабочей поверхности.

$$F_{attr}(t, r) = \mu_0 \cdot J_{\phi}^{(3)}(t, r) \cdot J_{\phi}^{(3)}(t, r) \cdot \frac{r}{(2h)}, \quad (4)$$

где $J_{\phi}^{(3)}(t, r)$, $J_{\phi}^{(3)}(t, r)$ – определены зависимостями (2) и (3), соответственно.

Отметим, что в принятой постановке решаемой задачи (низкие частоты действующих полей) на обрабатываемый объект будет действовать только сила электродинамического притяжения (закон Ампера). Интегральная во времени действенность сил отталкивания и радиального растяжения-сжатия, обусловленных взаимодействием возбуждающих и индуцированных токов (силы Лоренца), будет крайне малой и ими можно пренебречь [5-9].

Выражения (2 – 4) приведём к виду, удобному в вычислениях.

В несобственных интегралах зависимостей (2) и (3) введём новую переменную интегрирования $x = \lambda \cdot d$, $x \in [0; \infty)$. Кроме того, положим, что ток в витке индуктора изменяется во времени по закону экспоненциально затухающей синусоиды, характерному для реальной магнитно-импульсной обработки металлов [5-9]:

$$j(t) = j_m \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t) = j_m \cdot e^{-\delta_0 \psi} \cdot \sin(\psi),$$

где j_m – амплитуда, $\psi = \omega t$ – фаза, δ и δ_0 – абсолютный и относительный декременты затухания.

В терминах новой переменной формулы с учётом формы плотности возбуждающего тока в витке индуктора выражения (2) и (3) принимают следующий вид:

а) экран

$$J_{\phi}^{(a)}(\psi, r) = -J_m \int_0^{\infty} f_1(x) \cdot \frac{e^{-x} \frac{h}{d} (1 - e^{-x})}{x} J_1\left(x \frac{r}{d}\right) dx, \quad (5)$$

где $J_m = j_m \cdot \frac{\omega \tau}{2} \cdot \frac{dg(\psi)}{d\psi}$ – «условная» амплитуда сигнала,

$$g(\psi) = e^{-\delta_0 \psi} \cdot \sin(\psi),$$

$$f(x) = \frac{1}{x^2} \int_{x \frac{R_3}{d}}^{x \frac{R_4}{d}} y \cdot J_1(y) dy;$$

б) заготовка

$$J_{\phi}^{(b)}(\psi, r) = -J_m \cdot \int_0^{\infty} f(x) \cdot e^{-x \left(\frac{3h}{d} + 1 \right)} \cdot \frac{(1 - e^{-x})}{x} J_1\left(x \frac{r}{d}\right) dx. \quad (6)$$

Численные оценки, результаты анализа. Численные оценки и анализ выполним для экспериментальной модели ИСПЭ, возбуждаемой внешним витком с $R_3 = 0,025$ м, $R_4 = 0,03$ м.

На вход индуктора подаётся токовый импульс с рабочей частотой – $\omega = 2\pi \cdot 1500$ Гц; относительным декрементом затухания – $\delta_0 = 0,2$; амплитудой – $I_m = 50$ кА.

Вспомогательный экран и листовая заготовка – нержавеющая сталь с толщиной $d = 0,001$ м и удельной электропроводностью $\gamma = 0,4 \cdot 10^7$ 1/Ом·м.

При ширине витков – $\Delta R = R_2 - R_1 = R_4 - R_3 = 0,005$ м принятая амплитуда тока может соответствовать максимальной величине линейной плотности $j_{\max} = 10^7$ А/м.

Временные характеристики токового импульса и параметры листовой заготовки соответствуют требуемому уровню её «прозрачности» для действующих полей, а именно,

$$\omega \cdot \tau = (2\pi \cdot 1500) \cdot \tau = \left\| \tau = \mu_0 \gamma d^2 = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ с} \right\| = 0,015 \ll 1.$$

Результаты вычислений с помощью формул (4) – (6) приведены ниже.

Графическую зависимость для распределённой силы притяжения (рис. 1, б) (аналог давления при отталкивании) можно дополнить расчётными данными для интегральной силы притяжения, найденной интегрированием распределённых сил притяжения по площадям участков: $\{r \leq 1,2, R_2 = 0,036 \text{ м}, \phi \in [0; 2\pi]\}$.

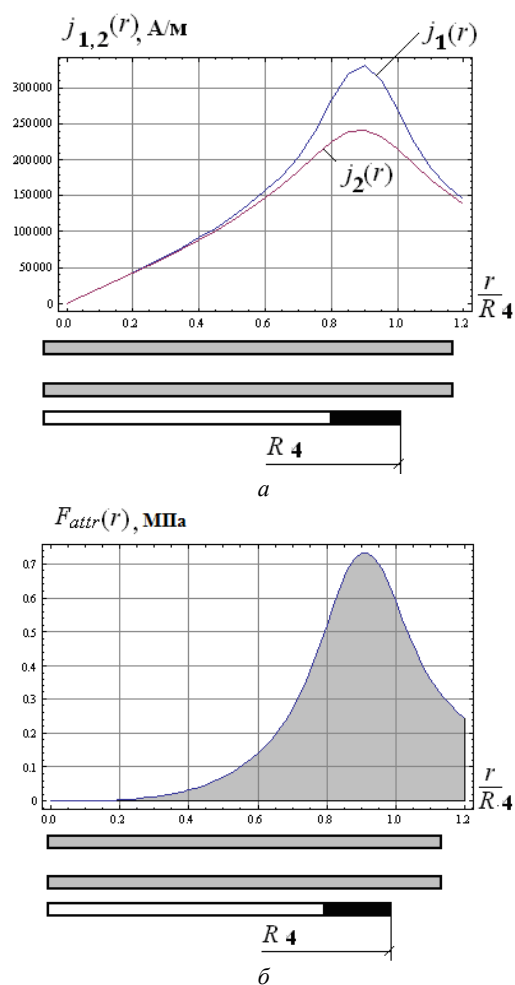


Рис. 1. Радиальные распределения возбуждаемых токов и сил: а – плотности токов, индуцированных в экране – $j_1(r)$ и заготовке – $j_2(r)$, б – распределённая сила притяжения заготовки

Для наглядности в восприятии результаты вычислений оформим в виде табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	Площадь участка, м ²	Сила притяжения, Н	Среднее значение распределённой силы притяжения, МПа
1	0,004072	1400,25	0,344

Проведенные вычисления показали, что индуцированные токи, как в экране, так и заготовке, односторонне направлены и их взаимодействие в соответствии с законом Ампера определяет амплитуды возбуждаемых сил притяжения (рис. 1). Особо следует отметить эффективную действенность рассмотренной индукторной системы, возбуждаемой внешним круговым соленоидом. Здесь при достаточной простоте конструктивного исполнения имеют место довольно высокие значения развиваемых сил притяжения и их средних величин (табл. 1). Физически, более высокая силовая эффективность системы с «внешним» витком в сравнении с системой, где виток расположен во внутренней полости, объясняется отсутствием «провала» в радиальном распределении возбуждаемых сил. Данный «провал» в конструкции с витком между листовыми металлами обусловлен его экранирующим действием в отношении сил притяжения между индуцированными токами [7, 8].

Выводы.

1. Проведен теоретический анализ пространственно-временных распределений индуцированных токов и сил притяжения в «индукторной системе с притягивающим экраном», возбуждаемой плоским круговым соленоидом, расположенным с внешней стороны вспомогательного экрана.

2. Показано, что «индукторная система с притягивающим экраном» при возбуждении внешним круговым соленоидом с током ~50 кА обеспечивает силовые показатели притяжения до ~1400 Н на площади листового металла ~ 0,004 м².

3. Достаточно высокая эффективность предложенного варианта индукторной системы позволяет рекомендовать её как инструмент внешней рихтовки вмятин в кузовных покрытиях автотранспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Welcome to BETAG Innovation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.betaginnovation.com.
2. Лаборатория электромагнитных технологий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electromagnetic.comoj.com>.
3. Пат. 77579 Україна, В21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих заготовок одновитковим круговим індуктором, розташованим над допоміжним екраном / Батигін Ю.В., Гнатов А.В., Чаплигін Є.О., Трунова І.С., Гопко А.В., Сабокар О.С.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u2012 07542 заявл. 22.06.2012; опубл. 25.02.2013, Бюл. № 4.
4. Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Шиндерук С.А. Расчет полей и токов в индукторной системе с притягивающим экраном и дополнительным витком как инструмента рихтовки // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – № 1. – С. 57-62.
5. Yuriy V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – fundamentals and perspective applications // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – vol.213. – no.3. – pp. 444-452.
6. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Магнитно-импульсное притяжение и отталкивание тонкостенных листовых ферромагнетиков // *Електричество*. – 2012. – №8. – С. 58-65.
7. Batygin Yuri V., Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals // *Journal of Materials Processing Technology*. – vol.214. – iss.2. – 2014. – pp. 390-401.
8. Батыгин Ю.В., Головащенко С.Ф., Чаплыгин Е.А. Магнитно-импульсное притяжение немагнитных металлов // *Електричество*. – 2014. – №2. – С. 40-52.
9. Batygin Yu.V. Experimental test of the tool for the external EMF removing dents on a car body // *International Journal of Energy and Power Engineering*. – 2014. – vol.3. – no.4. – pp. 204-208.

REFERENCES

1. Welcome to BETAG Innovation. Available at: www.betaginnovation.com (accessed 16 June 2014).
2. Laboratoriia elektromagnitnykh tekhnologii (Laboratory of Electromagnetic Technology) Available at: <http://electromagnetic.comoj.com> (accessed 10 July 2014). (Rus).
3. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin E.O., Trunova I.S., Gopko A.V., Sabokar O.S. Sposib magnitno-impul'snogo prityagannya metalivih zagotivok odnovitkovim krugovim induktorom, roztashovanim nad dopomizhnim ekranom [Method of the magnetic-pulse attraction metal workpieces single-turn circular inductor located on the auxiliary screen]. Patent UA, no.77579, 2013. (Ukr).
4. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A. Calculation of fields and currents in the induction system with the attractive screen and the additional coil as a tool for the straightening. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.1, pp. 57-62. (Rus).

5. Yuriy V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – fundamentals and perspective applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol.213, no.3, pp. 444-452. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.10.003.

6. Batygin Yu.V., Gnatov A.V. Magnetic-pulse attraction and repulsion of thin-walled sheet ferromagnetics. *Electrichestvo – Electricity*, 2012, no.8, pp. 58-65. (Rus).

7. Batygin Yuri V., Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol.214, iss.2, pp. 390-401. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.09.018.

8. Batygin Yu.V., Golovashchenko S.F., Chaplygin E.A. Magnetic-pulse attraction of nonmagnetic metals. *Electrichestvo – Electricity*, 2014, no.2, pp. 40-52. (Rus).

9. Batygin Yu.V. Experimental test of the tool for the external EMF removing dents on a car body. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 2014, vol.3, no.4, pp. 204-208. doi: 10.11648/j.ijepe.20140304.14.

Поступила (received) 28.05.2015

Чаплыгин Евгений Александрович, к.т.н., доц.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,
61002, Харьков, ул. Петровского, 25,
тел/phone +38 057 7073727, e-mail: chaplygin_e_a@mail.ru

E.A. Chaplygin

Kharkov National Automobile and Highway University,
25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

Analysis of the processes in an inductor system with an attracting screen excited by the external circular solenoid.

Introduction. Developments in the field of magnetic-pulse treatment of metals (MPTM) are increasingly used in the modern technologies of production and repair of the aviation, automotive and other machinery, as they are environmentally friendly and energy-efficient in comparison with classical approaches. One of the main components of the device MPTM is a tool – inductor or the inductor system with an attractive screen (ISAS). The calculated dependences to calculate the inductor system with an attractive screen were taken from previous works. The ratios were obtained for the low-frequency mode of the excited fields, when is place their significant penetration through a thin-walled metal screen and a deformed workpiece. As it was shown earlier this mode is the most efficient from point of view of a force action on the object of a processing. **Purpose.** The theoretical analysis of the spatial-temporal distributions of the induced currents and forces of an attraction in the inductor system with an attractive screen excited by a flat circular solenoid located on the outside of the auxiliary screen. **Methodology.** The calculations are shown that the induced currents both in the screen and the workpiece are unidirectional and their interaction, in accordance with the law of Ampere determines the amplitudes of excited forces of attraction. Let's note the effective validity of the considered inductor system excited by an external circular solenoid. With sufficient simplicity of the design take place rather high values of the developed forces of attraction and their averages. **Results.** Physically, a higher power efficiency of the system with an «external» coil in comparison with a system where coil is located in the internal cavity, can be accounted for lack of «failure» in the radial distribution of the excited forces. This «failure» in the design with a coil between the sheet metal is caused by its screening action against the forces of attraction between the induced currents. **Practical value.** It is shown that the inductor system with an attractive screen when it is excited by outer circular solenoid with a current of 50 kA ~ provides attractive power rates to about 1400 N on an area of sheet metal ~ 0.004 m². The sufficiently high efficiency of the proposed options of an inductor system allows us to recommend it as a tool of the external straightening dents in the bodycar surfaces of vehicles. References 9, table 1, figure 1. **Key words:** magnetic pulse treatment, attractive of metals, inductor system, the circular solenoid, attractive screen.

УНИФИЦИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ В ФАЗНЫХ КООРДИНАТАХ

У статті розглядаються методи математичного моделювання елементів електричних систем, що засновані на складанні систем диференціальних рівнянь та їх розв'язанні методами чисельного інтегрування. Представлені дискретні рівняння електричних машин в системі координат $d-q-0$ і в системі фазних координат. Запропоновано алгоритм моделювання окремих елементів електричних систем для розробки математичної моделі систем електропостачання в перехідних режимах. Бібл. 7.

Ключові слова: енергосистема, перехідні процеси, математична модель, електричні машини, синхронний генератор, асинхронний двигун, фазні координати.

В статье рассматриваются методы математического моделирования элементов электрических систем, которые основаны на составлении систем дифференциальных уравнений и их решении методами численного интегрирования. Представлены дискретные уравнения электрических машин в системе координат $d-q-0$ и в системе фазных координат. Предложен алгоритм моделирования отдельных элементов электрических систем для разработки математической модели систем электроснабжения в переходных режимах. Библ. 7.

Ключевые слова: энергосистема, переходные процессы, математическая модель, электрические машины, синхронный генератор, асинхронный двигатель, фазные координаты.

Введение. Постановка проблемы. Современный этап развития методов и средств исследования режимов электрических систем характеризуется тем, что задачи исследования их режимов работы при проектировании и в эксплуатации решаются с использованием ЭВМ. ЭВМ обеспечивают возможность ставить и решать значительно более широкий круг задач и с более высокой точностью на основе применения более полных математических моделей электрических систем.

Поэтому в последние годы получают все более широкое распространение исследования электрических систем с использованием современной вычислительной техники, хотя и переход к решению задач на ЭВМ не снимает полностью всех технических трудностей [1, 2].

Анализ последних исследований и публикаций указывает на то, что возможности имеющихся программных средств, позволяющих воспроизводить либо только электромагнитную составляющую переходных процессов (периодические составляющие токов короткого замыкания (КЗ)), либо только электро-механическую (в расчетах электро-механических переходных процессов при самозапуске электродвигателей [3, 4]) недостаточны для решения этих задач.

Кроме того, уравнения вращающихся электрических машин в фазных координатах в научной и учебной литературе приводятся, но применяются они, как правило, лишь для того, чтобы использовать их в качестве исходных для преобразований с целью перехода к другим системам координат [5]. Возможности современных ЭВМ позволяют переходить к более полным и точным моделям, учитывающим емкостные и индуктивные параметры элементов, периодически изменяющиеся параметры вращающихся электрических машин, нелинейные характеристики защитных аппаратов и другие факторы.

Цель статьи. Предлагаются модели электрических машин в системе фазных координат, универсальный алгоритм моделирования отдельных элемен-

тов как в системе координат $d-q-0$, так и в системе фазных координат.

Математическое моделирование. Компьютерные методы исследования переходных процессов в электрических системах основаны на составлении систем дифференциальных уравнений и их решении методами численного интегрирования.

Одним из факторов в пользу выбора неявных методов численного интегрирования для решения поставленных задач является то, что при этом обеспечивается возможность полного структурного моделирования – т.е. разработки сначала моделей отдельных элементов сложной системы, а затем формирования модели системы в целом.

Для математического моделирования электромагнитных переходных процессов в элементах электрических систем принят неявный метод Эйлера-Коши, так как при этом обеспечиваются более высокие точность и устойчивость вычислительных процессов.

При разработке моделей элементов целесообразно выделить две группы элементов:

- статические элементы [6, 7] и электрические машины в координатах $d-q$;
- вращающиеся электрические машины в фазных координатах.

Уравнения элементов во вращающейся системе координат.

Синхронные генераторы в координатах $d-q-0$.

Полная система уравнений Парка-Горева в матричной форме включает:

- уравнения напряжений:

$$\begin{bmatrix} r_d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega \Psi_q \\ \omega \Psi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

- уравнения потокосцеплений:

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & L_{ad} & L_{ad} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & L_{aq} \\ L_{ad} & 0 & L_f & L_{ad} & 0 \\ L_{ad} & 0 & L_{ad} & L_D & 0 \\ 0 & L_{aq} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Если при анализе электромагнитной составляющей переходного процесса считать, что скорость вращения ротора генератора постоянна ($\omega = \text{const} = 1$), ток возбуждения за время КЗ не изменяется и $u_f = \text{const}$, то уравнения Парка-Горева преобразуются в линейную систему уравнений, что значительно упрощает решение.

Исключив потокосцепления подстановкой уравнений напряжений в (1), получим в матричной форме:

$$[U] = [R] \cdot [I] + \omega [L_1] \cdot [I] + [L] \cdot \frac{d}{dt} [I],$$

где

$$[L] = \begin{bmatrix} L_d & 0 & L_{ad} & L_{ad} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & L_{aq} \\ L_{ad} & 0 & L_f & L_{ad} & 0 \\ L_{ad} & 0 & L_{ad} & L_D & 0 \\ 0 & L_{aq} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix};$$

$$[L_1] = \begin{bmatrix} 0 & -x_q & 0 & 0 & -x_{aq} \\ x_d & 0 & x_{ad} & x_{ad} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

или, после приведения подобных, в окончательном виде:

$$\begin{bmatrix} r_d & -x_q & 0 & 0 & -x_{aq} \\ x_d & r_q & x_{ad} & x_{ad} & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} L_d & 0 & L_{ad} & L_{ad} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & L_{aq} \\ L_{ad} & 0 & L_f & L_{ad} & 0 \\ L_{ad} & 0 & L_{ad} & L_D & 0 \\ 0 & L_{aq} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Введя для первой матрицы в (2) обозначение $[R] + \omega [L_1] = [R]_1$,

получим

$$[L] \cdot \frac{d}{dt} [I] + [R]_1 \cdot [I] = [U],$$

т.о. при принятых условиях система уравнений Парка-Горева линейна, не содержит переменных коэффициентов и имеет вид такой же, как для статических элементов [7].

Асинхронные двигатели в координатах d - q -0. Уравнения переходных процессов в АД в матричной форме и при отсутствии токов нулевой последовательности имеют вид:

- уравнения напряжений:

$$\begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_c & & & \\ & r_c & & \\ & & r_p & \\ & & & r_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} -\omega_k \Psi_{cq} \\ \omega_k \Psi_{rd} \\ -(\omega_k - \omega) \Psi_{rq} \\ (\omega_k - \omega) \Psi_{rd} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{cd} \\ \Psi_{cq} \\ \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix}; \quad (3)$$

- уравнения потокосцеплений:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{cd} \\ \Psi_{cq} \\ \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{c1} & & L_{ad} & \\ & L_{c1} & & L_{ad} \\ L_{ad} & & L_{p1} & \\ & L_{ad} & & L_{p1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Исключив потокосцепления подстановкой (4) в (3), обозначив $\omega_s = \omega_k - \omega$ и приведя подобные, получим уравнения АД в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} r_c & -\omega_k L_{c1} & & -\omega_k L_{ad} \\ \omega_k L_{c1} & r_c & \omega_k L_{ad} & \\ & -\omega_s L_{ad} & r_p & -\omega_s L_{p1} \\ \omega_s L_{ad} & & \omega_s L_{p1} & r_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \\ i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} L_{c1} & & L_{ad} & \\ & L_{c1} & & L_{ad} \\ L_{ad} & & L_{p1} & \\ & L_{ad} & & L_{p1} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \\ i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \\ u_{pd} \\ u_{pq} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Решение уравнений позволяет исследовать электромагнитные переходные процессы в асинхронном двигателе, при этом напряжения на зажимах статора U_{dc} , U_{qc} и ротора U_{dp} , U_{qp} должны быть либо заданы, либо связаны с токами соответственно статорных и роторных обмоток. Угловая скорость вращения координатных осей ω_k также должна быть задана.

Для угловой скорости вращения координатных осей ω_k разные авторы берут разные значения:

- $\omega_k = \omega_0$, где ω_0 – синхронная скорость;
- $\omega_k = \omega$, при этом координатные оси неподвижны относительно ротора;
- $\omega_k = 0$, при этом координатные оси неподвижны относительно статора.

Если считать, что $\omega_k = \omega_0$ уравнения (5) будут иметь вид:

$$\begin{bmatrix} r_c & -\omega_0 L_{c1} & & -\omega_0 L_{ad} \\ \omega_0 L_{c1} & r_c & \omega_0 L_{ad} & \\ & -\omega_s L_{ad} & r_p & -\omega_s L_{p1} \\ \omega_s L_{ad} & & \omega_s L_{p1} & r_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \\ i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} L_{c1} & & L_{ad} & \\ & L_{c1} & & L_{ad} \\ L_{ad} & & L_{p1} & \\ & L_{ad} & & L_{p1} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \\ i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \\ u_{pd} \\ u_{pq} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Введя для первой матрицы в (6) обозначение

$$[R] + \omega[L] = [R]_1,$$

получим:

$$[L] \cdot \frac{d}{dt} [I] + [R]_1 \cdot [I] = [U],$$

т.о. при принятых условиях система уравнений Парка-Горева линейна, не содержит переменных коэффициентов и имеет вид такой же, как для уже рассмотренных статических элементов.

Модели электрических машин в фазных координатах.

Синхронные машины. Полная система дифференциальных уравнений СМ содержит

- уравнения потокосцеплений обмоток:

$$[\Psi]_S^F = [L]_{SS}^F [i]_S^F + [L]_{SR} [i]_R; \quad (7)$$

$$[\Psi]_R = [L]_{RS} [i]_S^F + [L]_{RR} [i]_R;$$

- уравнения равновесия напряжений всех электрических контуров на статоре и роторе:

$$[U]_S^F = -\frac{d}{dt} [\Psi]_S^F - [R]_S [i]_S^F; \quad (8)$$

$$[U]_R = \frac{d}{dt} [\Psi]_R - [R]_R [i]_R;$$

- уравнение равновесия моментов (уравнение движения ротора):

$$T_j \frac{d\omega}{dt} = M_{ЭМ} - M_T, \quad (9)$$

где T_j – постоянная инерции вращающихся масс; M_T , $M_{ЭМ}$ – вращающий момент турбины и электромагнитный тормозящий момент СГ.

Индуктивности обмоток статора и ротора в уравнениях (7)

$$\begin{bmatrix} \Psi_S \\ \Psi_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_S & L_{SR} \\ L_{RS} & L_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}$$

являются функциями угла γ . Поэтому производные от потокосцеплений по времени с учетом этой зависимости имеют вид:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_S \\ \Psi_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dL(\gamma)}{d\gamma} \frac{d\gamma}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} + [L(\gamma)] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}.$$

Подставив производные от потокосцеплений в уравнения (8), получим

$$\begin{bmatrix} L_S & L_{SR} \\ L_{RS} & L_R \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} + \left(\omega \begin{bmatrix} \frac{dL(\gamma)}{d\gamma} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_S & \\ & r_R \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_S \\ U_R \end{bmatrix}.$$

Уравнения электрических машин, если в них для выражения в скобках принять обозначение

$$\left(\omega \begin{bmatrix} \frac{dL}{d\gamma} \end{bmatrix} + [R] \right) = [R]_1,$$

и записать их в виде

$$[L] \frac{d}{dt} [i] + [R]_1 [i] = \begin{bmatrix} u_S \\ u_R \end{bmatrix},$$

то можно сказать, что они аналогичны уравнениям в системе координат $d-q-0$ и отличаются тем, что в уравнениях в фазных координатах элементы матриц индуктивностей фаз являются периодическими функциями времени.

Кроме того, переходные процессы в электрических машинах имеют наряду с электромагнитной еще и электромеханическую составляющую, обусловленную изменениями скоростей вращения роторов и взаимного положения контуров, расположенных на статоре и роторе.

Далее, решаем полученные уравнения относительно производных, переходим к разностной аппроксимации в соответствии с формулой Эйлера, переносим элементы, содержащие токи обмоток статора i_S и ротора i_R на $(k+1)$ -м шаге, в левую сторону и вводим обозначение

$$[A(\gamma)^{(k+1)}] = [E] + h[L(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \left(\omega \begin{bmatrix} \frac{dL(\gamma)}{d\gamma} \end{bmatrix}^{(k+1)} + \begin{bmatrix} r_S & \\ & r_R \end{bmatrix} \right).$$

Тогда уравнения примут вид:

$$[A(\gamma)^{(k+1)}] \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k+1)} = h[L(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \begin{bmatrix} u_S \\ u_R \end{bmatrix}^{(k+1)} + \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k)}.$$

Умножив обе части уравнения на обратную матрицу $[A(\gamma)^{(k+1)}]$, получим окончательно:

$$\begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k+1)} = [Y(\gamma)^{(k+1)}] \begin{bmatrix} u_S \\ u_R \end{bmatrix}^{(k+1)} + \begin{bmatrix} j_S \\ j_R \end{bmatrix}^{(k)},$$

где

$$[Y(\gamma)^{(k+1)}] = h[A(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} [L(\gamma)^{(k+1)}]^{-1},$$

$$\begin{bmatrix} j_S \\ j_R \end{bmatrix}^{(k)} = [A(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k)}.$$

Дискретные параметры СМ являются переменными и должны вычисляться на каждом шаге вычислительного процесса в функции углового положения роторов СМ. В такой унифицированной форме уравнения СМ могут быть включены в систему уравнений, решаемых на шаге численного интегрирования.

Асинхронные двигатели. Подставив уравнения для потокосцеплений в уравнения для напряжений обмоток, получим уравнения электромагнитных переходных процессов АД в виде

$$\begin{bmatrix} L_S & L_{SR} \\ L_{RS} & L_R \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{dL_{SR}(\gamma)}{d\gamma} \\ \frac{dL_{RS}(\gamma)}{d\gamma} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_S & \\ & r_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_S \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где

$$L_S = \begin{bmatrix} L_{11} & \\ & L_{11} \\ & & L_{11} \end{bmatrix}; \quad L_R = \begin{bmatrix} L_{22} & \\ & L_{22} \\ & & L_{22} \end{bmatrix},$$

$[L_{SR}] = L_{12}[\cos\gamma]$, $[L_{RS}] = L_{21}[\cos\gamma]^t$ – индуктивности собственные и взаимные обмоток статора и ротора, а

$$[C_\gamma] = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \gamma & \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \gamma \end{bmatrix}.$$

Или в более компактном виде:

$$[L_{AD}] \frac{d}{dt} [i] + \left(\omega \left[\frac{dL}{d\gamma} \right] + [R] \right) [i] = \begin{bmatrix} u_S \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Решив (11) относительно производных токов в обмотках статора и ротора и выполнив разностную аппроксимацию уравнений, получим:

$$\begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} A_S & A_{SR} \\ A_{RS} & A_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k)} + \begin{bmatrix} Y_S & Y_{SR} \\ Y_{RS} & Y_R \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} u_S \\ 0 \end{bmatrix}^{(k)} + \begin{bmatrix} Y_S & Y_{SR} \\ Y_{RS} & Y_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_S \\ 0 \end{bmatrix}^{(k+1)}$$

или в окончательном виде:

$$\begin{aligned} [i_S]^{(k+1)} &= [Y_S][u_S]^{(k+1)} + [Y_S][u_S]^{(k)} + [A_S][i_S]^{(k)} + \\ &+ [A_{SR}][i_R]^{(k)}; \\ [i_R]^{(k+1)} &= [Y_{RS}][u_S]^{(k+1)} + [Y_{RS}][u_S]^{(k)} + \\ &+ [A_{RS}][i_S]^{(k)} + [A_R][i_R]^{(k)}; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} A_S & A_{SR} \\ A_{RS} & A_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k)} + \begin{bmatrix} Y_S & Y_{SR} \\ Y_{RS} & Y_R \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} u_S \\ 0 \end{bmatrix}^{(k)} + \begin{bmatrix} Y_S & Y_{SR} \\ Y_{RS} & Y_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_S \\ 0 \end{bmatrix}^{(k+1)}.$$

Полученные уравнения также представлены в форме, унифицированной для включения в систему уравнений переходных процессов электрической сети. В них также токи в обмотках статора и ротора на текущем шаге интегрирования выражены через напряжения на текущем шаге, а также через известные из предыдущего шага напряжения и токи в обмотках.

Унифицированный алгоритм моделирования переходных процессов в электрических машинах неявными методами численного интегрирования.

Приведенные примеры и формулы (1) – (12) иллюстрируют общий подход к моделированию переходных процессов и могут служить основанием для того, чтобы сформулировать общий алгоритм решения задачи. Алгоритм применительно к задаче моделирования отдельно взятого элемента электрической системы должен содержать следующие этапы:

1. Составить систему дифференциальных уравнений, отражающих переходные процессы в рассматриваемом элементе электрической системы.
2. Определить параметры R , L элемента, влияющие на протекание переходных процессов.
3. Выполнить обращение матрицы индуктивностей $[L]$ и получить уравнения в форме Коши.
4. Выбрать шаг интегрирования h и перейти от уравнений в дифференциальной форме к конечно-

разностным – выполнить формирование матриц дискретных параметров (дискретных проводимостей $[Y]$ и дискретных токовых коэффициентов $[A]$) на шаге.

5. Задать начальные условия параметров режима (начальные значения токов и напряжений) и выполнить формирование вектора-столбца $[J]$ правой части дискретных уравнений на шаге.

6. Выполнить расчет переходного процесса, повторяя в цикле вычисления токов и напряжений на текущем $(k+1)$ -м шаге по известным напряжениям и токам на предыдущем (k) -м шаге. Перейти к следующему шагу.

7. Представить результаты расчета переходного процесса в форме, удобной для изучения и анализа.

Особенностями алгоритма моделирования переходных процессов в электрических машинах в фазных координатах, по сравнению с моделированием в системе координат $d-q-0$, являются следующие:

- уравнения, отражающие электромагнитные переходные процессы в ЭМ, имеют ту же структуру, что и для моделей в системе координат $d-q-0$, поэтому пункты алгоритма, обеспечивающие моделирование этих составляющих (п.п. 3-6) остаются неизменными;
- электромеханические составляющие переходных процессов определяются уравнением движения роторов ЭМ, поэтому алгоритм моделирования в системе фазных координат необходимо дополнить:

8. Численное уравнение движения для определения изменений скоростей $\omega(t)$ и углов $\gamma(t)$.

Алгоритмы моделирования переходных процессов в электрических машинах, можно рассматривать как модификации единого обобщенного алгоритма, основными элементами которого являются пункты 3 – 6, а в случае моделирования в фазной системе координат – пункт 8 – численное интегрирование уравнений движения. При моделировании в системе координат $d-q-0$ элементы исходных матриц и матриц дискретных параметров элементов неизменны в течение переходного процесса, поэтому на шаге численного интегрирования в цикле выполняются пункты 5, 6. В случае же моделирования в фазных координатах элементы матриц электрических машин являются периодическими функциями времени, зависят от их взаимного положения и скорости вращения ротора, вычисления этих параметров выполняются на каждом шаге вычислительного процесса, поэтому в цикле выполняются пункты 3 – 8.

Выводы. Полученный обобщенный алгоритм и принятая унифицированная форма записи уравнений элементов обеспечивают возможность применения структурных методов при разработке математической модели систем электроснабжения в переходных режимах.

На базе данного алгоритма получена возможность создания программы, осуществляющей расчеты переходных режимов. Результаты расчета отражают как общую, качественную картину переходного процесса, так и его количественные характеристики (ударный и установившийся токи, кратности перенапряжений, время затухания электромагнитных и электромеханических составляющих переходного

процесса и др.). Кроме того, при наличии компьютерной модели открывается возможность проведения многовариантных расчетов для исследования и изучения факторов, влияющих на количественные характеристики переходных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.
2. Ерохин А.М., Коротков Б.А., Попков Е.Н. Уравнения и схемы замещения многообмоточной машины в фазных координатах // Труды ЛПИ. – 1986. – №421. – С. 68-76.
3. Черновец А.К., Семёнов К.Н., Федотов А.М. Математическое моделирование системы собственных нужд электростанций при расчётах самозапуска // Исследования электромагнитных процессов в энергетических установках. – 1988. – №1. – С. 52-57.
4. Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей. 2-е изд., перераб и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Страхов С.П. Переходные процессы в электрических цепях, содержащих машины переменного тока. – М.: Госэнергоиздат, 1960.
6. Веприк Ю.Н. Базовая математическая модель электромагнитных переходных процессов в электрических системах с несимметрией // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – Том 2. – №7(44). – С. 37-42.
7. Веприк Ю.Н., Лебедка С.Н., Веприк В.Ю. Математическое моделирование переходных процессов в электрических сетях с изолированной нейтралью в фазных координатах // Електротехніка і електромеханіка. – 2005. – №3. – С. 74-77.

REFERENCES

1. Vazhnov A.I. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transients in an AC machines]. Leningrad, Energiia Publ., 1980. 256 p. (Rus).
2. Erokhin A.M., Korotkov B.A., Popkov E.N. The equations and equivalent circuit of the multiwinding machines in phase coordinates. *Trudy LPI – Works of the Leningrad Polytechnic Institute*, 1986, no.421, pp. 68-76. (Rus).
3. Chernovets A.K., Semyonov K.N., Fedotov A.M. Mathematical modeling of own needs of power plants in calculations of automatic starting of motors. *Issledovaniya elektromagnitnykh protsessov v energeticheskikh ustanovkakh – Research of electromagnetic processes in power plants*, 1988, no.1, pp. 52-57. (Rus).
4. Golodnov Yu.M. *Samozapusk elektrodvigatelay* [Automatic starting of motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. (Rus).
5. Strakhov S.P. *Perekhodnye protsessy v elektricheskikh tsepiakh, soderzhashchikh mashiny peremennogo toka* [Transients in electrical circuits containing AC machines]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1960. (Rus).
6. Vepryk Yu.N. Base mathematical model of electromagnetic transient processes in electric systems with unsymmetry. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2010, vol.2, no.7(44), pp. 37-42. (Rus).

7. Vepryk Yu.N., Lebedka S.N., Vepryk V.Yu. Mathematical modelling of transient processes in electric networks with an insulated neutral in phase coordinates. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2005, no.3, pp. 74-77. (Rus).

Поступила (received) 07.10.2015

Веприк Юрий Николаевич¹, д.т.н., проф.,
Небера Ольга Алексеевна¹, аспирант,
¹ Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
e-mail: neberaolga@gmail.com

Yu.N. Vepryk¹, O.A. Nebera¹

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

Unified models of elements of power supply systems based on equations in phase coordinates.

Purpose. The models of electrical machines in the phase coordinates, the universal algorithm for the simulation of separate elements in a d-q coordinates system and in a phase-coordinates system are proposed. **Methodology.** Computer methods of investigation of transients in electrical systems are based on a compilation of systems of differential equations and their numerical integration solution methods. To solve differential equations an implicit method of numerical integration was chosen. Because it provides to complete structural simulation possibility: firstly developing models of separate elements and then forming a model of the complex system. For the mathematical simulation of electromagnetic transients in the elements of the electrical systems has been accepted the implicit Euler-Cauchy method, because it provides a higher precision and stability of the computing processes. **Results.** In developing the model elements identified two groups of elements: - Static elements and electrical machines in the d-q coordinates; - Rotating electrical machines in phase coordinates. As an example, the paper provides a model of synchronous and asynchronous electric machines in the d-q coordinates system and the phase coordinate system. The generalization algorithm and the unified notation form of equations of elements of an electrical system are obtained. It provides the possibility of using structural methods to develop a mathematical model of power systems under transient conditions. **Practical value.** In addition, the using of a computer model allows to implement multivariant calculations for research and study of factors affecting the quantitative characteristics of the transients. References 7.

Key words: power system, transients, mathematical model, electrical machines, synchronous generator, induction motor, phase coordinates.

MONITORING OF ELECTRICAL ENERGY QUALITY ON THE TRACTION SUBSTATION INPUT

For the implementation of measures to maintain the quality of the energy industrial enterprises have to spend a significant material and monetary assets. In this regard, significant is the feasibility study of the allocation of such funds and, primarily, the determination of the economic damage arising from low quality of electricity. The reliability of the electricity metering system, relay protection and automation of modern digital substations depends on the quality of electrical energy. At the present time to improve the reliability of the substation operation it is necessary to monitor indicators of quality of electric energy, allowing you to take organizational and technical solutions for their improvement. Monitoring the power quality at the input traction substation has shown that indicators such as the coefficient of the n-th harmonic component of the voltage does not meet the standards GOST 13109-97. The source of higher harmonics is a voltage Converter used on the locomotive. To eliminate higher harmonics in the supply network for traction substations will need to install power filters. Today, the USB-analyzer of power quality «Digital system for the measurement of electrical energy quality» type of DSMEEQ of accuracy class 0.2. Work energy requires reliable and quality electricity supply to consumers. The new model of balancing energy market are bilateral contracts. The main task of this market, it ensure the stable and reliable operation of the unified energy system of Ukraine, that is, transmission and supply of electricity of appropriate quality. References 4, tables 1, figures 10.

Key words: quality, higher harmonics, electrical energy, substation, monitoring, losses.

Надежность работы системы учета электроэнергии, релейной защиты и автоматики на современных цифровых подстанциях зависит от качества электрической энергии. В настоящее время для повышения надежности работы подстанции необходимо контролировать показатели качества электрической энергии, что позволяет принимать организационные и технические решения по его повышению. Библи. 4, табл. 1, рис. 10.

Ключевые слова: качество, высшие гармоники, электрическая энергия, подстанция, мониторинг, потери.

Introduction. In the process of the scientific and technological progress, novel technologies creation, increase of the energetic security of Ukraine the reliable and qualitative delivery of electrical energy to customers plays an important role. A new model of the electrical energy market which represents a market of bilateral contracts and a balancing market is introduced in Ukraine. One of tasks of the new market model is to create a market operating to guarantee stable and reliable operation of the consolidated power system of Ukraine, transmission and delivery of electrical energy of appropriate quality [1].

Problem definition. To carry out measures to hold the electrical energy quality, industrial enterprises are forced to spend huge material and financial means. Therefore, technical and economical assessment of such expenses is important, first of all to determine economical losses arising as a result of low electrical energy quality.

In conditions of the market economy, a network enterprise and a customer are equal partners, subjects of the indivisible process of the distribution and demand of electrical energy [2]. Change of the attitude of power supply companies as well as of customers to problems of electrical energy quality is determined, first of all, by losses sustained by the enterprise and the power network proper as a result of utilization of electrical energy of low quality. Losses which can arise as a result of low electrical energy quality should be divided into material, labor, financial, temporal, and special ones.

Material losses become apparent in unforeseen additional losses or direct ones of equipment, property, production, low materials, or energy. In industry material losses are directly connected with loss of fixed and circulating capital.

Labor losses represent working time losses caused by unforeseen circumstances. At the direct measurement labor losses are expressed in man-hours, man-days or just in hours of the working time. Translation of labor losses to cost or money equivalent is carried out by multiplication of man-hours by cost (price) of one hour.

Financial losses are direct money loss connected with unforeseen payments, penalties, additional taxes, losses of money and securities. Besides, financial losses can be resulted when they receive less or do not receive money from foreseen sources, by failure to return the debt, when purchaser does not pay for production supplied, by the decrease of receipts as a result of the decrease of prices for production and services.

Time losses exist when the process of the economical activity proceeds slowly than it was planned. Direct assessment of such losses is carried out in hours, days, weeks, months of delay in obtaining the result scheduled. To translate the time losses estimation to the cost quality it is necessary to determine in which losses of income and profit the time losses can result [2].

Losses because of 1 hour of downtime resulted by voltage deviations are the following:

- airlines booking centers – USD 67,000 – 112,000;
- commodity exchange – USD Mio 5.6 – 7.3;
- a network of automates and services – USD 12,000-17,000;
- credit card sale – USD Mio 2.2 – 3.1;
- voltage undershoot at the paper mill stops the production for 1 day, losses are USD 250,000;
- cycling production interruption in the glass industry costs USD 200,000.

When de-energization takes place enterprises loss:

- USD 1477 during 1 s of de-energization;
- USD 2107 during 3 min of de-energization;
- USD 7795 during 1h of de-energization.

By the data of more than 200 large commercial and industrial customers at the de-energization during 4 h without preliminary notification, average loss in the USA is about USD 75,000. During 1 h without notification – USD 40,000. During 1 h with notification – USD 23,000. Loss by the voltage drop of 10-20% is estimated as USD 7,500, loss of sudden outage during 2 s – USD 11,000..

Materials of investigations. Main integral indicator of the electrical energy quality is suitability calculated on the base of the measured values of the electrical energy quality indicators determined by the Standard GOST 13109-97: suitability of each electrical energy quality indicator is calculated as a ratio of numbers of measurements situating in normally permitted by GOST 13109-97 bounds, and total numbers of measurements for the period under review. If the value of the electrical energy quality indicator corresponds to GOST 13109-97, the value of the suitability is equal or more than 0.95; if not – less than 0.95. The suitability by the indicator which has passed out the maximum allowable values is supposed to equal zero and does not correspond the requirements of GOST 13109-97. The electrical energy quality is characterized by the following properties:

- voltage deviation;
- voltage oscillations;
- voltage undershoot;
- temporal overvoltage;
- voltage non-sinusoidality;
- non-symmetry of three-phase voltage system;
- frequency error;
- pulsed voltage.

In the correspondence with [1] the electrical energy quality indicator correspond these properties:

- steady-state voltage deviation δU_y ;
- voltage swing δU_i ;
- flicker doze P_i ;
- distortion coefficient of the voltage curve sinusoidality K_U ;
- coefficient of the n -th voltage harmonic component $K_{U(n)}$;
- coefficient of the voltage non-symmetry by the reverse sequence K_{2U} ;
- coefficient of the voltage non-symmetry by the zero sequence K_{0U} ;
- frequency error Δf ;
- duration of the voltage undershoot $\Delta t_{\text{нп}}$;
- pulsed voltage $U_{\text{нпп}}$;
- coefficient of the temporal overvoltage $K_{\text{пер}U}$.

Currently, an analyzer of the electrical energy quality «Digital system for the measurement of electrical energy quality» (DSMEEQ) of the accuracy class 0.2 is developed (see Fig. 1) [3, 4].

Experimental investigations of the electrical energy quality are carried out at the substation 330/110 kV from which a traction substation of mainline electrical transport by the line 110 kV is supplied (Fig. 2-4).



Fig. 1. Digital system for the measurement of electrical energy quality (DSMEEQ)

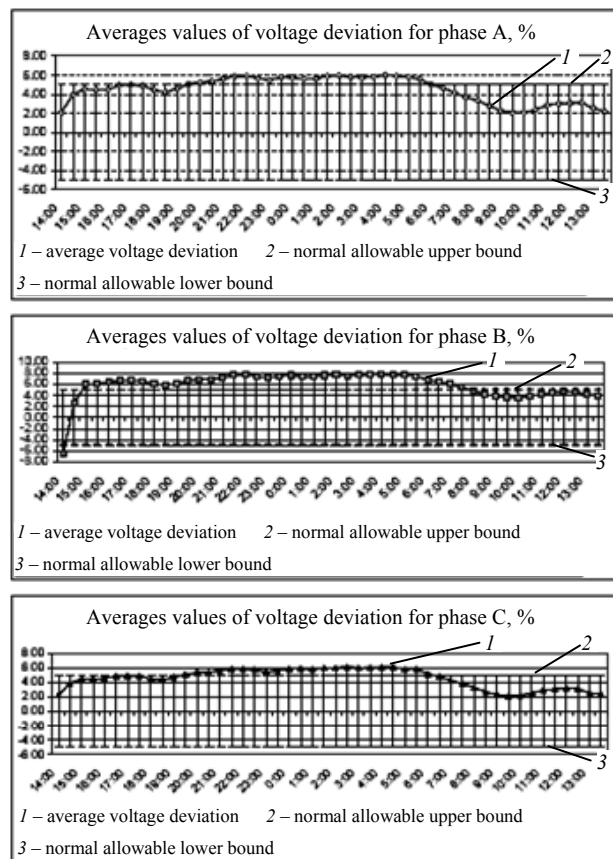


Fig. 2. Steady-state voltage deviation for phases A, B, C

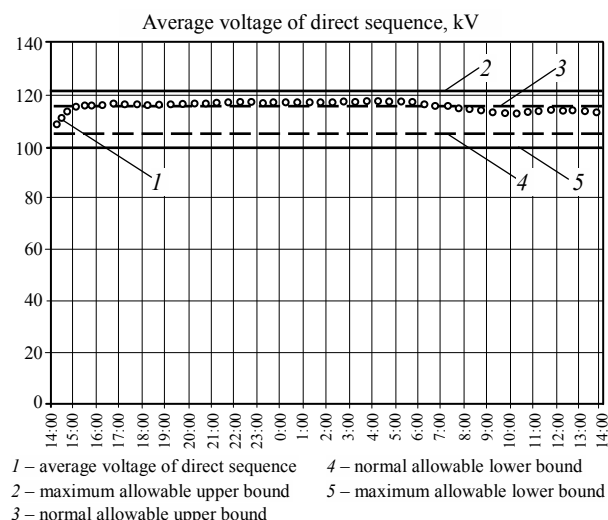


Fig. 3. Average voltage of direct sequence

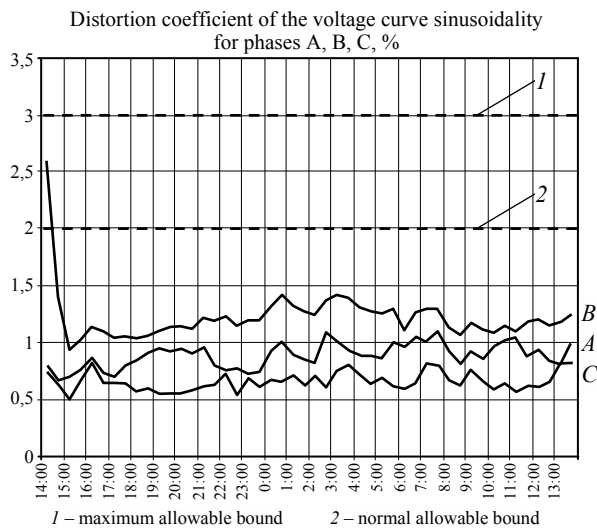


Fig. 4. Distortion coefficient of the voltage curve sinusoidality for phases A, B, C

In Fig. 5-10 graphic charts and test record sheets for coefficients of the n -th harmonic voltage component in phases A, B, C at the traction substation 330/110 kV of the line 110 kV are presented. Measurements are carried out at the bound of the balance belonging of the supplier and customer of electrical energy.

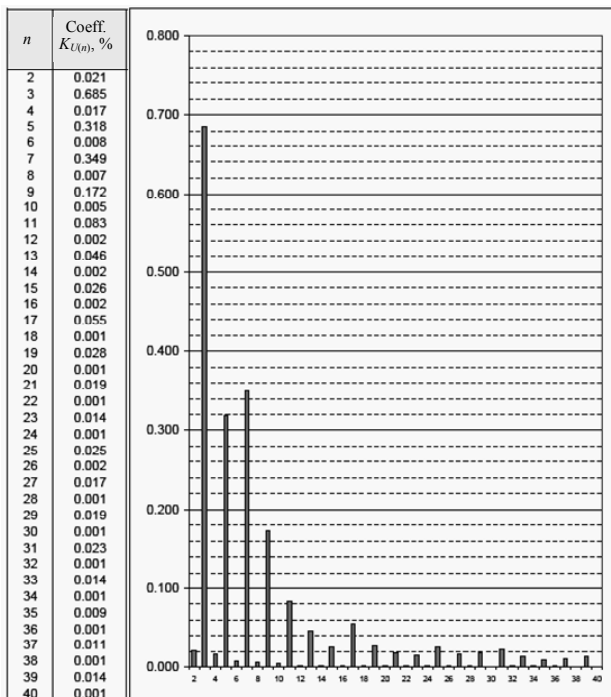


Fig. 5. Graphic chart for the n -th harmonic voltage component in the phase A

From the total record sheet for coefficients of the n -th harmonic voltage component in the phase A at the traction substation 330/110 kV of the line 110 kV in the phase A during 24 hours it is shown that the coefficient of the n -th harmonic voltage component corresponds the normative by GOST 13109-97(see Fig. 5, 6).

From the total record sheet for coefficients of the n -th harmonic voltage component in the phase B at the traction substation 330/110 kV of the line 110 kV in the phase B during 24 hours it is shown that the coefficient of

No. of harmonic	Allowable values		No. of measurements	No. of passes out		Availability
	normal %	maximum %		normal allowable values	maximum allowable values	
2	0.50	0.75	28 799	0	0	1.000
3	1.50	2.25	28 799	0	0	1.000
4	0.30	0.45	28 799	0	0	1.000
5	1.50	2.25	28 799	0	0	1.000
6	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
7	1.00	1.50	28 799	0	0	1.000
8	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
9	0.40	0.60	28 799	107	0	0.996
10	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
11	1.00	1.50	28 799	0	0	1.000
12	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
13	0.70	1.05	28 799	0	0	1.000
14	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
15	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
16	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
17	0.50	0.75	28 799	0	0	1.000
18	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
19	0.40	0.60	28 799	0	0	1.000
20	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
21	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
22	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
23	0.40	0.60	28 799	0	0	1.000
24	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
25	0.40	0.60	28 799	0	0	1.000
26	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
27	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
28	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
29	0.37	0.56	28 799	0	0	1.000
30	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
31	0.36	0.54	28 799	0	0	1.000
32	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
33	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
34	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
35	0.34	0.51	28 799	0	0	1.000
36	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
37	0.33	0.50	28 799	0	0	1.000
38	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
39	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
40	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000

Fig. 6. Test record sheet for coefficients of the n -th harmonic voltage component in the phase A

the n -th harmonic voltage component does not correspond the normative by GOST 13109-97(see Fig. 7, 8). Let us analyze harmonics presented in the phase B.

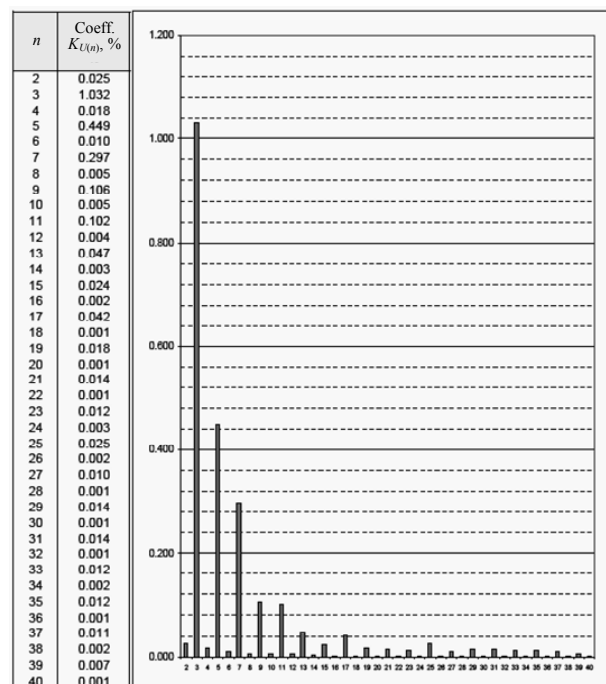


Fig. 7. Graphic chart for the n -th harmonic voltage component in the phase B

In this phase even and odd harmonics which passed out the maximum allowable values (mav) are presented:
 Harmonics 2 – mav (0.75) – 3.11; 3.12; 3.21; 3.34.
 Harmonics 6 – mav (0.30) – 0.36; 0.35.
 Harmonics 10 – mav (0.30) – 0.34; 0.33; 0.32.
 Harmonics 3 – mav (2.25) – 8.59; 8.61; 8.63; 10.03.

No. of harmonic	Allowable values		No. of measurements	No. of passes out		Availability
	normal %	maximum %		normal allowable values	maximum allowable values	
2	0.50	0.75	28 799	0	100	0.000
3	1.50	2.25	28 799	8	99	0.000
4	0.30	0.45	28 799	0	0	1.000
5	1.50	2.25	28 799	0	99	0.000
6	0.20	0.30	28 799	0	99	0.000
7	1.00	1.50	28 799	0	99	0.000
8	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
9	0.40	0.60	28 799	0	99	0.000
10	0.20	0.30	28 799	15	84	0.000
11	1.00	1.50	28 799	0	99	0.000
12	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
13	0.70	1.05	28 799	0	99	0.000
14	0.20	0.30	28 799	99	0	0.997
15	0.20	0.30	28 799	0	99	0.000
16	0.20	0.30	28 799	99	0	0.997
17	0.50	0.75	28 799	0	99	0.000
18	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
19	0.40	0.60	28 799	0	99	0.000
20	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
21	0.20	0.30	28 799	0	99	0.000
22	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
23	0.40	0.60	28 799	13	0	1.000
24	0.20	0.30	28 799	90	0	0.997
25	0.40	0.60	28 799	0	0	1.000
26	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
27	0.20	0.30	28 799	93	0	0.997
28	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
29	0.37	0.56	28 799	0	0	1.000
30	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
31	0.36	0.54	28 799	0	0	1.000
32	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
33	0.20	0.30	28 799	44	0	0.998
34	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
35	0.34	0.51	28 799	0	0	1.000
36	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
37	0.33	0.50	28 799	0	0	1.000
38	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
39	0.20	0.30	28 799	3	0	1.000
40	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000

Fig. 8. Test record sheet for coefficients of the n -th harmonic voltage component in the phase B

Harmonics 5 – mav (2.25) – 2.65; 2.59; 2.56; 2.54.
 Harmonics 7 – mav (1.50) – 3.10; 3.08; 3.15.
 Harmonics 9 – mav (0.60) – 2.34; 2.36; 2.35; 2.48.
 Harmonics 11 – mav (1.50) – 1.93; 1.91; 1.88; 1.89.
 Harmonics 13 – mav (1.05) – 1.47; 1.46; 1.44; 1.43.
 Harmonics 15 – mav (0.30) – 1.29; 1.28; 1.30; 1.35.
 Harmonics 17 – mav (0.75) – 0.93; 0.92; 0.97.
 Harmonics 19 – mav (0.60) – 0.73; 0.72; 0.70.
 Harmonics 21 – mav (0.30) – 0.53; 0.52; 0.51.
 Harmonics 23 – mav (0.40) – 0.40; 0.41; 0.42.

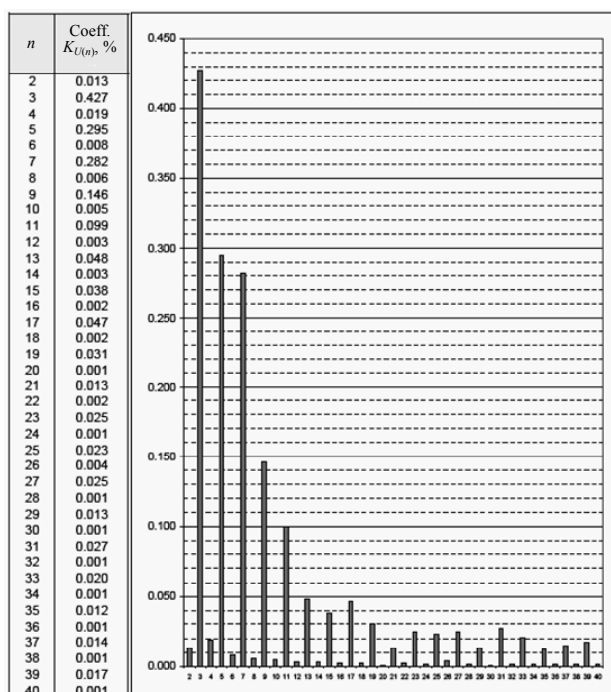


Fig. 9. Graphic chart for the n -th harmonic voltage component in the phase C

Besides, even and odd harmonics which passed out the normal allowable values (nav):

Harmonics 14 – nav (0.20) – 0.26; 0.25; 0.23.

Harmonics 16 – nav (0.20) – 0.24; 0.23; 0.25.

Harmonics 24 – nav (0.20) – 0.20; 0.21.

Harmonics 27 – nav (0.20) – 0.21; 0.22; 0.23.

Harmonics 33 – nav (0.20) – 0.22; 0.21

Harmonics 39 – nav (0.20) – 0.21; 0.20.

No. of harmonic	Allowable values		No. of measurements	No. of passes out		Availability
	normal %	maximum %		normal allowable values	maximum allowable values	
2	0.50	0.75	28 799	0	0	1.000
3	1.50	2.25	28 799	0	0	1.000
4	0.30	0.45	28 799	0	0	1.000
5	1.50	2.25	28 799	0	0	1.000
6	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
7	1.00	1.50	28 799	0	0	1.000
8	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
9	0.40	0.60	28 799	38	9	0.000
10	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
11	1.00	1.50	28 799	0	0	1.000
12	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
13	0.70	1.05	28 799	0	0	1.000
14	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
15	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
16	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
17	0.50	0.75	28 799	0	0	1.000
18	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
19	0.40	0.60	28 799	0	0	1.000
20	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
21	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
22	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
23	0.40	0.60	28 799	0	0	1.000
24	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
25	0.40	0.60	28 799	0	0	1.000
26	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
27	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
28	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
29	0.37	0.56	28 799	0	0	1.000
30	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
31	0.36	0.54	28 799	0	0	1.000
32	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
33	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
34	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
35	0.34	0.51	28 799	0	0	1.000
36	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
37	0.33	0.50	28 799	0	0	1.000
38	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
39	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000
40	0.20	0.30	28 799	0	0	1.000

Fig. 10. Test record sheet for coefficients of the n -th harmonic voltage component in the phase C

From the total record sheet for coefficients of the n -th harmonic voltage component in the phase C at the traction substation 330/110 kV of the line 110 kV in the phase C during 24 hours it is shown that the coefficient of the n -th harmonic voltage component does not correspond the normative by GOST 13109-97(see Fig. 9, 10). Let us analyze harmonics presented in the phase C.

In this phase there is odd harmonic which passes out the normal allowable value: the 9-th harmonic – (0.40) – in the range 0.42; 0.45; 0.46; 0.43; 0.49.

In Table 1 the generalized results of measurements of the n -th harmonic voltage component C at the traction substation 330/110 kV on the feeder of the line 110 kV are presented.

Conclusions.

1. Operation of power engineering at modern conditions requires reliable and qualitative electrical energy supply to customers. The main new model of the balancing power energy market is bilateral contracts. The main task of this market is to guarantee stable and reliable operation of the consolidated power system of Ukraine, i.e. transmission and supply of electrical energy of appropriate quality.

2. The carried out monitoring of the electrical energy quality on the traction substation input is shown that such an indicator as the coefficient of the n -th voltage

harmonic component does not correspond the normative by GOST 13109-97. The source of higher harmonics is a voltage changer used in the electric locomotive. To remove higher harmonics in the supply main it is necessary to install power filters at the traction substation.

Table 1

Traction substation 330/110 kV on the feeder of the line 110 kV			
№	No. of harmonic	No. of passes out the normal allowable values	No. of passes out the maximum allowable values
1	2	0	100
2	3	8	99
3	5	0	99
4	6	0	99
5	7	0	99
6	9	145	108
7	10	15	84
8	11	0	99
9	13	0	99
10	14	99	0
11	15	0	99
12	16	99	0
13	17	0	99
14	19	0	99
15	21	0	99
16	23	13	0
17	24	90	0
18	27	93	0
19	33	44	0
20	39	3	0

REFERENCES

1. GOST 13109-97. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy 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. *Kachestvo elektricheskoy energii. Tom 1. Ekonomiko-pravovaya baza kachestva elektricheskoy energii v Ukraine i Evrosoyuze. Pod redaktsiei Griba O.G.* [The quality of electric power. Vol.1. Economic and legal framework of quality of electric energy in Ukraine and the EU. Edited by Gryb O.G.]. Kharkiv, Monograph PP Graf-X, Publ., 2014. 300 p. (Rus).
3. *Kachestvo elektricheskoy energii. Tom 2. Kontrol kachestva elektricheskoy energii. Pod redaktsiei Griba O.G.* [The quality of electric power. Vol.2. Monitoring of power quality. Edited by Gryb O.G.]. Kharkiv, Monograph PP Graf-X, Publ., 2014. 244 p. (Rus).
4. Gryb O.G., Prahovnik A.V., Tesik Y.F., Zharkin A.F., Novskiy V.O., Kalinchik V.P., Karasinskiy O.L., Dovgalyuk O.M., Lazurenko O.P., Hodakivskiy A.M., Vasilchenko V.I., Svetelik O.D. *Avtomatyzovani systemy obliku ta yakosti elektrichnoyi enerhiyi* [The automated systems of the account and quality of electric energy. Edited by Gryb O.G.]. Kharkiv, Ranok-NT Publ., 2012. 516 p. (Ukr).

Received 16.10.2015

Gryb O.G.¹, Gapon D.A.¹, Ierusalimova T.S.¹, Borodin D.V.², Diachenko A.V.¹

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

phone +38 057 7076551, e-mail: Ierusalimovat@mail.ru

²O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 12, Revolution Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

PROBLEMS IN TESTING DIGITAL PROTECTIVE RELAY FOR IMMUNITY TO INTENTIONAL DESTRUCTIVE ELECTROMAGNETIC IMPACTS. CONTINUATION OF THE THEME

The article is the continuation of the theme highlighted in the previous article with same title. The new article evaluates the results of digital protective relays (DPR) testing for immunity to the E1 component of High-altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and to Intentional Electromagnetic Interferences (IEMI) impacts, conducted by some independent American organizations; discusses the features of relay protection devices as well as clarifies and supplements the procedure for testing these devices. Due to methodology errors during the DPR tests conducted by mentioned organizations earlier, they cannot be considered as satisfactory and their results as meaningful. At the moment there are no reliable data on the level of DPR immunity to IDEI, which suggests that the test should be conducted further. References 7, figures 6.

Key words: high power electromagnetic threats, high-altitude electromagnetic pulse, intentional destructive electromagnetic impacts, digital protective relays.

Статья является продолжением темы, рассмотренной в предыдущей статье с таким же названием. В новой статье оцениваются результаты испытаний микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ) на устойчивость к компоненту E1 электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ) и к преднамеренным дистанционным электромагнитным воздействиям (ПДВ), приводимые некоторыми независимыми американскими организациями; обсуждаются особенности методики их испытаний. Показано, что из-за ошибок в методологии испытаний, результаты, полученные упомянутыми выше организациями нельзя считать достоверными. В настоящее время нет никаких надежных данных об уровне устойчивости МУРЗ к ПДВ, что указывает на необходимость проведения дополнительных испытаний. Библ. 7, рис. 6.

Ключевые слова: электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва, преднамеренные деструктивные электромагнитные воздействия, микропроцессорные устройства релейной защиты.

Introduction. In my previous article on this theme [1] I presented a substantial analysis of the regulatory documents related to the problem of Intentional Destructive Electromagnetic Impacts (IDEI) on Digital Protective Relays (DPR). I justified the choice of test methods, articulated the requirements to parameters of test impacts and included a review of technical aids that facilitate these tests. However, my communication with technical staff responsible for these tests, which is provided in [1], was not enough for the correct planning and conduction of experiments. Analysis of findings of earlier tests revealed that the methods used for trials, criteria of operation quality and parameters of testing impact are rarely selected correctly resulting in the fact that the findings of the tests do not allow making an unambiguous judgment about DPR's resistance to IDEI. This requires conducting further investigations of the issue and developing additional recommendations.

Use of performance criterion during the electromagnetic compatibility (EMC) test of electronic equipment. The response of an object under test (OUT) to electromagnetic impacts (EI) can be variable. For example, the OUT can be fully inoperative due to a breakdown of internal electronic components, while on the other hand it can be temporarily non-operative only during the impact of either the impulse or electromagnetic field. Another possibility is a short-term fault in the software operation as affected by the impulse voltage supplied to the OUT, which may require (or not) from the operator to reset the internal program of the OUT. There are many types of responses of the OUT to EI. The acceptable response of this type of OUT to electromagnetic impact under some type of trial is called «performance criterion» (PC). The performance criterion is an extremely important indicator in the tests for EMC. When properly

selected it allows reaching a conclusion whether a specific device has passed the specific test or not. However, the EMC standards do not contain (and they are unlikely to contain) the methods of the correct selection of these criteria. As a rule everything is limited by a sentence like: «Selection of the strictness degree for performance criterion is performed by people who develop and approve performance specifications and technical conditions» and a chart from which a specific PC can be selected out of 3-4 criteria offered by the specific standard. This is obvious, since the correct choice depends on the specific type of OUT and specific modes and conditions of its operation. Moreover, a different PC can be selected for the same type of OUT depending on its operation mode, connection diagram, purpose for use, working environment, etc. Thus, the understanding of specific features of each single OUT is very important, since the choice of one or another performance criterion allows making a decision of whether this specific OUT fits (or doesn't fit) specific working environment based on the trial results.

Features of performance criterion during the IDEI immunity test of DPR. The North American Electric Reliability Council (NERC) has established a list of equipment, which needs to be tested for immunity to High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) upon the request of special commission: Congressional «Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse (EMP) Attack». The list includes, in particular, digital protective relays (DPR) and SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition – a general name for software and hardware measures of different types, which ensure real-time data collection from numerous detectors, processing, archiving, displaying and transferring information about objects under monitoring as well as the

transfer of operator commands to remote sites – foundation of Substation Control System – SCS) system. Metatech Company conducted tests of SEL-311L DPR (Differential Line Protection) and SEL-2032 controller of SCADA system (fig. 1) under a shortening test program. The test was performed only for immunity to the E1 component of HEMP. The results of these tests are presented in the Meta-R-320 [2] report. As indicated in the report evaluation of the correctness of operation and lack of damages **after each test** was selected as PC in the DPR and SCADA controller tests. During the tests short-time (5/50 nsec) high-voltage impulses with an amplitude of up to 8 kV were applied to different terminals of devices.



Fig. 1. SEL-311L DPR and SEL-2032 controller for SCADA system produced by Schweitzer Engineering Laboratories (USA) subject to testing for HEMP immunity

The report also mentioned that application of impulses with an amplitude of up to 3.2 kV to the serial port resulted in spontaneous DPR switch-off, but then it returned to normal operation mode. Some other ports (e.g., IRIG – Inter-Range Instrumentation Group time code – time synchronization port) were damaged at as low as 600V. The Ethernet communication module of the SCADA controller was damaged at 1.2 kV. The report also suggests that the record of oscillographic tests of current and voltage rates supplied to the relay's terminals were selected as one of the additional parameters of PC. It is mentioned in the report that abnormalities in the record were not revealed during testing.

Criticism of the DPR testing method used in [2]

1. I think it is incorrect to use the PC based on the DPR damages check **after it is subjected to interference**. This does not allow making a definite conclusion about the immunity of DPR to this interference. This is due to the fact that DPR possesses several specific features reviewed in [3, 4] as compared to the SCADA system. With all the importance and responsibility of the SCADA system it is designed in first and foremost for automatic collection, processing and displaying information. Despite the fact that the system includes the so-called Remote Terminal Units (RTU) – remotely controlled actuating units, they cannot work under the automatic mode and are only intended for performance of operator commands from a remote control center. The majority of modern substations work in the automatic mode without any operator. Manual control of breaker status on these substations (i.e., literally control of power system configuration) is performed by an operator sitting in a remote control center through the SCADA system, which is susceptible to IDEI impacts. This is why, in case of IDEI impact, the remote control of

a substation from the control center will likely be lost and the configuration of the power system will only be determined by the relay protection system – the only system that can automatically control the breaker status. At the same time, the DPRs, which comprise the foundation of the modern relay protection, are constantly sharing information and commands **in the automatic mode via communication channels susceptible to IDEI** (unlike the SCADA system, where critical control commands are delivered to breakers spearheaded by a dispatcher). In the event of incorrect actions of automatic operating relay protection, where the dispatcher cannot intrude, such as unnecessary operation subject to IDEI impact, the electric power system and then the whole energy system can fully collapse. This is one of the reasons why the digital protection relay should be tested for IDEI impacts **during operation** and not be checked for damages after the impact of interference.

2. There are different paths of the entering of electromagnetic interference (represented by impulses supplied to protected terminals) and high-voltage electromagnetic waves (which enter directly into internal high-sensitive electronic components or through unprotected terminals/ports of electronic units as well as through multiple cables connected to DPR and functioning as antennas absorbing electromagnetic energy) to DPR. Moreover, the IDEI is not limited to HEMP only. It includes directed ultra-broadband high-frequency emissions of special sources with power ratings of several Gigawatts and is intended for remote destruction of electronic equipment [4]. Unfortunately, the danger is caused not only by special purpose devices intended for affecting electronic equipment, but also by emissions of ordinary powerful radars. For instance, in 1999 there was an officially registered event of devastating failure of the SCADA system at the San Diego County Water Authority Company, which supplies water to San Diego, CA. The reason for the failure was an emission of marine radar located 25 miles away from the city. In 1980 a similar case was registered on a gas supply line located 1.5 km away from Den Helder port in the Netherlands. The latter case of SCADA system damage by a marine radar resulted in a powerful gas explosion. This is why testing of DPR immunity to IDEI should not be limited by applying high-voltage impulses to certain terminals only. It should be accompanied by exposure of the OUT to electromagnetic emission from a directional antenna as stipulated by corresponding standards [1].

3. It should be taken into consideration that a case of HEMP it will affect not only high-sensitive electronic equipment (DPR, hardware of SCADA system), but also power facilities of energy systems, such as linear insulators, transformers and power generators. It should be noted that this equipment will be affected by not only the E1 component of HEMP (modeled during trials [2]) under these circumstances, but also by the other two components, i.e., E2 and E3 [1]. Previous research [2] conducted in the Soviet Union and the USA shows that the affect of all components of HEMP can result in the damage of power high-voltage equipment, such as break down of linear insulators, saturation and burning of power transformers, punctures of power generator insulation, etc. In

other words, the moment of impact of a powerful electromagnetic interference on DPR matches in time with the moment of changing of internal state of DPR elements, which is due to emerging of emergency rates of controlled current and voltage at its terminals. How will DPR behave under this mode? Will the IDEI affected relay protection be able to disconnect the saturating transformer or damaged part of aerial line of punctured cable? Won't the common directional operation of different DPR be a cause of full disintegration and collapse of the energy system?

The research conducted in [2] does not provide answers to these questions. «We have produced designs so complicated that we cannot possibly anticipate all the possible interactions of the inevitable failures; we add safety devices that are deceived or avoided or defeated by hidden paths in the systems» – wrote the famous specialist on reliability and susceptibility of complex systems Charles Perrow [5]. Perrow calls this problem «incomprehensibility» since even the ordinary incident can trigger interactions, which are «not only unexpected, but also unpredictable for a certain critical period of time». In most accidents nobody could expect that certain «interaction algorithms» will trigger others. Thus, nobody could predict what happened. This has a relation to modern rather complicated and branched relay protection system the behavior of which is difficult to predict under the IDEI impact.

Analysis of the result of the second independent trial of the same type of DPR. Another test of the same type of DPR (by an odd coincidence) is reported in a promotional presentation of the producer of these devices – Schweitzer Engineering Laboratories Company – SEL [6]. The presentation covers the results of testing of SEL-311 DPR samples on the test-benches of US Army's Picatinny Arsenal in New Jersey for HEMP and electromagnetic impact (fig. 2).



Fig. 2. SEL-311 DPR test for IDEI impact on Picatinny Arsenal test-benches in New Jersey [6]

The promotional presentation suggests that all tests were successful. At the same time the deeper analysis of

the material reveals several odd things. For instance, the advertisement depicted in fig. 3 suggests that SEL-311 was tested at field strength varied from 25 to 1000 V/m whereas the military standard MIL-STD-461 requires only 50 V/m.

The specialists of the renowned SEL Company demonstrate a rather odd ignorance in their report. The fact is that according to the MIL-STD-461 the units of measure of the field strength under IDEI impact are kilovolts, while they report volts and the figure «50» is presented as 50 kV/m instead of 50 V/m.

SEL-311C Tested at US Army's Picatinny Arsenal in New Jersey
RF from 100 MHz to 4 GHz at power levels from 25 to 1000 volts per meter (Mil-Std 461 ask for 50V/m only)

Fig. 3. The text from the promotional brochure of SEL Company [6]

The bar diagram illustrated in fig. 4 is even odder. It shows that in reality the field strength of 1000 V/m was implemented for testing at 1000-1500 MHz frequencies, while at another of frequencies it was almost two times lower. Another thing is that the dependence of amplitude on the frequency does not correspond to MIL-STD-461.

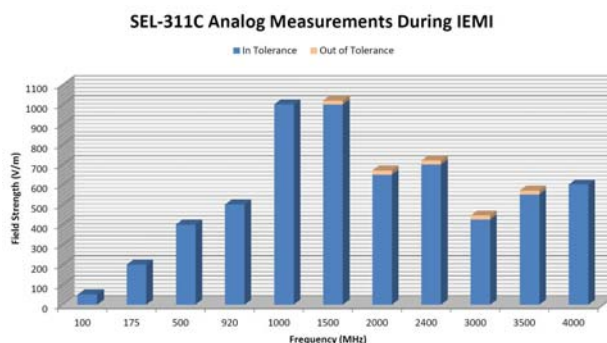


Fig. 4. Parameters of electromagnetic emission during SEL-311 DPR testing [6]

It is obvious from the diagram that the levels of field strength are limited by the beginning of the instability of relay functioning (yellow areas on the tops of the bars). In other words the diagram shows the area of steady operation of a separately installed (outside the relay protection system) SEL terminal. This implies that the relay doesn't allow for steady operation outside the area of values represented in this diagram with its extremely low levels of electromagnetic field strength.

When comparing it with the above mentioned MIL-STD-416 (fig. 5), you can see that the applied parameters of testing impacts are far away from the requirements of this standard. Considering the oddness of parameters selection to test SEL-311 immunity to IDEI who can take seriously about the manufacturer's statement that these relays are resistant to IDEI?

Another problem is the selection of a single DPR terminal as an OUT. As a rule, these terminals are manufactured in metal housings, which effectively weaken the electromagnetic emission. This is why the test results for electromagnetic impact on this single terminal are expected to be positive. In the field conditions DPR is

entangled by multiple cables acting as antennas and absorbing electromagnetic energy delivering it to the internal elements of DPR; multiple terminals of DPR are interconnected through corresponding communication instruments susceptible to IDEI impact. Thus, the test should be performed on the whole relay protection system while in operation rather than its single terminal.

An example of the correct approach to testing of complex systems to which relay protection undoubtedly belongs is represented by SCADA system testing described in [7] (fig. 6).

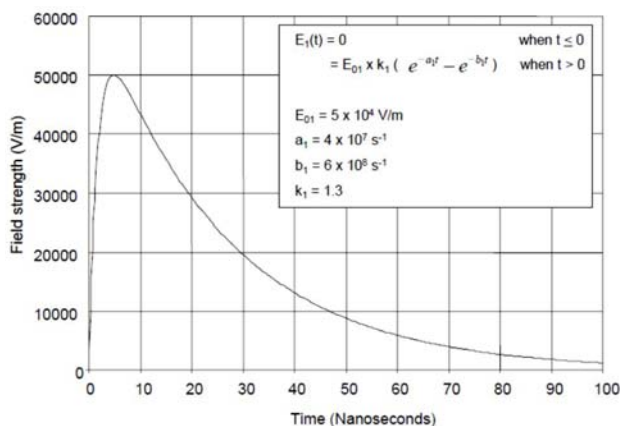


Fig. 5. A diagram from page 138 of MIL-STD-416F to compare with the diagram illustrated in fig. 1 (1 ns corresponds to a frequency of 1 GHz)



Fig. 6. Testing of SCADA system for immunity to HEMP [7].

An antenna system of EMI simulator is seen above. The elements of SCADA system are located in separate boxes and connected with each other via a standard communication system

Thus, the results of two independent tests of the DPR conducted by different manufacturers do not allow coming to any conclusion on its real immunity to IDEI. So, who would need these results?

Conclusions and recommendations:

1. Due to methodology errors during the DPR tests conducted by independent organizations earlier, they cannot be considered as satisfactory and their results as meaningful. At the moment there are no reliable data on the level of DPR immunity to IDEI, which suggests that the test should be conducted further.

2. The kinds and modes of DPR tests should be fully performed and correspond to the standards as described in [1].

3. The PC should be represented by a criterion, which allows for controlling DPR operation under normal and emergency modes of the object under protection when it is affected by an electromagnetic interference instead of a criterion that is based exclusively on checking the DPR condition when the impact of interference is over.

4. Testing should be performed on both the separate unit of DPR and the full relay protection system consisting of several DPR units connected with each other by several meters of cables via a corresponding communication device. At the same time electromagnetic energy should affect the relay protection system, while impulse tests for applied voltage should be performed on both separate DPR units/communication devices and several DPR units connected together with communication devices simultaneously.

5. During the test several steps of test impulse amplitude and electric field strength should be selected: from minimum to maximum value within the ranges described in the standards. The obtained data can be used during the evaluation of immunity of the DPR installed in specific cabinets and buildings, which possess a certain index of electric field weakening. They can also be used in the process of elaboration of requirements to further weakening of this field, if it is revealed that the current conditions do not ensure the required immunity of DPR to IDEI.

REFERENCES

1. Gurevich V. Problems in testing digital protective relays for immunity to intentional destructive electromagnetic impacts. *Global Journal of Advanced Research*, 2014, vol.1, iss.2, pp. 159-173.
2. Savage E., Gilbert J., Radasky W. The early-time (E1) high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) and its impact on the U.S. power grid. *Report Meta-R-320 for Oak Ridge National Laboratory*, 2010.
3. Gurevich V. *Problems of standardization in relay protection*. St. Petersburg: DEAN Publ., 2015. 168 p.
4. Gurevich V. *Vulnerabilities of digital protective relays. Problems and solutions*. Moscow, Infra-Engineering Publ., 2014. 256 p.
5. Perrow C. *Normal accidents. Living with high risk technologies. First ed.* Princeton, Princeton University Press, 1984.
6. *EMP Effects on Protection and Control Systems*. Schweitzer Engineering Laboratories, 2014. 31 p.
7. *Report of the commission to assess the threat to the United States from electromagnetic pulse (EMP) attack*. April 2008.

Received 03.07.2015

Vladimir I. Gurevich, Ph.D, Senior specialist,
Central Electric Laboratory of Israel Electric Corp.
31000, Israel, Haifa, POB 10,
e-mail: vladimir.gurevich@gmx.net

РАЙНИН ВАЛЕРИЙ ЕФИМОВИЧ

(к 75-летию со дня рождения)

Валерий Ефимович Райнин родился 20 сентября 1940 года в г. Москве. Большая часть его профессиональной биографии связана с Украиной, Харьковом, где он жил, учился и работал с 1956 по 1996 г. По окончании средней школы с серебряной медалью он поступил в Харьковский политехнический институт, электромашиностроительный факультет которого с отличием окончил в 1962 г. По распределению был направлен на работу во Всесоюзный научно-исследовательский институт низковольтного электроаппаратостроения Министерства электротехнической промышленности СССР (ВНИИэлектроаппарат, г. Харьков), где проработал почти тридцать лет, пройдя путь от инженера до заведующего лабораторией, кандидата технических наук. В этот очень важный период своей деятельности Валерий Ефимович внес заметный вклад в создание нового направления развития аппаратов защиты, основанного на применении электронной техники. При его активном участии разработано и внедрено в массовое производство на Харьковском электромеханическом заводе и других крупных предприятиях электропромышленности СССР большинство отечественных серий автоматических выключателей низкого напряжения с электронными расцепителями. Среди этих аппаратов – наиболее известная серия АЗ700, обеспечившая впервые в СССР качественно новый уровень защиты электроустановок общепромышленного и специального назначения. Эти разработки были выполнены на уровне изобретений и отмечены медалями всесоюзных и международных выставок.

Еще в студенческие годы Валерий Ефимович проявил склонность к научным исследованиям и в 1974 г. по окончании заочной аспирантуры при Новочеркасском политехническом институте защитил на базе своих разработок кандидатскую диссертацию. С этого момента Валерий Ефимович начинает совмещать работу по созданию новой техники с педагогической деятельностью. А в 1991 г. он избирается на должность доцента кафедры «Электротехника» Харьковской государственной академии городского хозяйства. В эти годы его научные интересы распространились на проблемы повышения точности и автоматизации учета электрической энергии. В результате под его руководством и при его непосредственном участии впервые в Украине были разработаны и внедрены в серийное производство электронные счетчики на заводах «Коммунар» (г. Харьков) и «Проминь» (г. Желтые воды). В 1996 г. Валерия Ефимовича пригласили возглавить наукоемкие работы по освоению электронных счетчиков на конверсионном предприятии – Мытищинском ордена Отечественной войны первой степени электротехническом заводе и переезжает в Москву. Став впоследствии главным инженером этого завода, он организовал разработку и про-



изводство более 20 наименований электронных счетчиков различного назначения. Одновременно преподает уже в российских вузах (РГУС и МЭИ).

Работая в промышленности, Валерий Ефимович продолжает исследования в области теории и практики трансформаторов тока для измерительных и силовых преобразователей и занимается вопросами применения других датчиков параметров электрической энергии и поиском новых критериев аварийных режимов для повышения качества защиты электроустановок. В результате в 1999 г. защищает в Московском энергетическом институте (Технический университет – ТУ) докторскую диссертацию на тему «Статические устройства защиты для низковольтных автоматических выключателей».

Начиная с 2002 г. по настоящее время Валерий Ефимович работает в МЭИ профессором кафедры «Электрические и электронные аппараты». Читает общие и специальные курсы, руководит дипломными работами бакалавров и магистров. Им подготовлено несколько кандидатов наук.

Проф. Райнин В.Е. является автором (соавтором) около 170 публикаций, в том числе двух монографий, двух учебников для вузов и 92 авторских свидетельств и патентов на изобретения. За участие в написании учебника «Электрические и электронные аппараты» Валерий Ефимович стал Лауреатом премии правительства Российской Федерации в области науки и техники». Он является действительным членом Академии электротехнических наук Российской Федерации и членом Российского отделения Международного института инженеров электротехники и электроники (IEEE). Проф. Райнин В.Е. входит в состав двух специализированных советов по присуждению ученой степени доктора наук в МЭИ (ТУ) и РГСУ. С 2012 г. является членом редколлегии нашего журнала.

Круг интересов юбиляра не ограничивается его профессиональной деятельностью. Валерий Ефимович и сейчас активно занимается спортом – горными лыжами (и это в его-то годы!). Он очень много путешествует – за последние 20 лет побывал практически во всех европейских странах, не забывая и Украину, восточную часть которой (Полтавская, Сумская, Харьковская, Донецкая области) он объездил на автомобиле.

Нельзя не сказать и о личных качествах Валерия Ефимовича – это интеллигентный, дружелюбный, много знающий, располагающий к общению человек.

Многочисленные друзья по обе стороны российско-украинской границы, коллеги и ученики желают Валерию Ефимовичу крепкого здоровья, семейного счастья, дальнейших успехов в научной и педагогической деятельности.

Редакционная коллегия журнала «Електротехніка і електромеханіка» присоединяется к этим пожеланиям.

РОЗОВ ВОЛОДИМИР ЮРІЙОВИЧ

(до 70-річчя з дня народження)

26 листопада 2015 року виповнилося 70 років з дня народження та 45 років наукової діяльності відомому вченому у галузі електротехніки, директору Державної установи «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України», завідувачу відділу фізики і техніки магнітних явищ, доктору технічних наук, члену-кореспонденту НАН України Розову Володимирі Юрійовичу.

Розов В.Ю. започаткував науковий напрямок «магнетизм технічних об'єктів» та заснував Інститут технічних проблем магнетизму НАН України. Автор і співавтор більш 150 наукових праць. Створив наукову школу з магнетизму технічних об'єктів, де підготовлено 2 доктори та 6 кандидатів технічних наук.

Закінчив електроенергетичний факультет Харківського політехнічного інституту у 1968 році. Після служби у радянській армії працював в НДІ заводу ХЕМЗ (1971-1976). Подальша трудова діяльність та життєва доля нерозривно пов'язані з Харківським відділенням ВНДІ Електромеханіки, яке в 1992 р. було перетворено у Відділення магнетизму ІЕД НАН України, у 2005 р. - в Науково-технічний центр магнетизму технічних об'єктів НАН України, а в 2013 р. - в Інститут технічних проблем магнетизму НАН України, де пройшов шлях від старшого наукового співробітника (1976), директора Відділення (з 1988 р) та директора Інституту (з 2013 р. по теперішній час).

Свою наукову діяльність Розов В.Ю. розпочав в 1971 році з досліджень методів управління тиристорними перетворювачами. Результати цих досліджень склали основу для створення систем управління джерелами живлення термоядерної системи «ТОКАМАК-10» та електроприводів прокатних станів металургійних підприємств, для створення спеціальних джерел живлення розмагнічувальних пристроїв кораблів ВМФ і лягли в основу кандидатської дисертації.

З 1988 року наукова діяльність В.Ю. Розова пов'язана з вирішенням проблем управління магнітним полем. Під його науковим керівництвом та безпосередньою участю розроблено наукові основи управління магнітним полем кораблів, транспортних засобів, космічних апаратів. Результати цих робіт дозволили вперше створити вітчизняний комплекс магнітного захисту кораблів протимінної оборони (ПАТ «ЦКБ «Шхуна», м. Київ), розробити серію унікальних перетворювачів для живлення систем розмагнічування кораблів (ВАТ «Завод «Перетворювач», м. Запоріжжя), створити елементи магнітних систем управління вітчизняних космічних апаратів з поліпшеними масоенергетичними характеристиками (ДП «КБ «Південне» м. Дніпропетровськ). Зазначені роботи склали основу докторської дисертації.

З 2002 р. наукова діяльність Розова В.Ю. спрямована на безпосереднє вирішення технічних проблем магнетизму. Ним узагальнено теорію магнетизму

різних класів технічних об'єктів (кораблів, бронетехніки, трубопроводів, космічних апаратів, електроенергетичного обладнання) і сформований новий науковий напрямок в електротехніці – «магнетизм технічних об'єктів».

Отримані принципово нові результати світового рівня, що впроваджені в оборонну і космічну галузі, паливно-енергетичний комплекс та медичну екологію. Вони склали наукову основу технологій виробництва корабельного електрообладнання в «маломігнітному» виконанні та промислових технологій з забезпечення магнітних характеристик вітчизняних космічних апаратів Мікрон, СІЧ-2, EgyptSat-1, розробок методів та засобів захисту населення від негативної дії статичного та низькочастотного магнітного поля.

Під керівництвом Розова В.Ю. забезпечено суттєвий розвиток кадрового потенціалу та дослідної бази установи, який склав основу для її перетворення в 2013 році в академічний інститут. Створена аспірантура та спеціалізована вчена рада, розпочато випуск наукового журналу. Експериментальна база інституту – його унікальний Магнітодинамічний комплекс став науковим об'єктом національного надбання і зараз забезпечує світовий рівень фундаментальних досліджень та є складовою частиною промислової технології забезпечення магнітних характеристик вітчизняних космічних апаратів.

В даний час під науковим керівництвом і безпосередній участі В.Ю. Розова тривають дослідження, спрямовані на подальший розвиток основ магнетизму технічних об'єктів, на вирішення проблем магнітного керування космічними апаратами, зменшення електромагнітного впливу об'єктів енергетики на довкілля.

Поряд з керівництвом інститутом та науковим відділом і аспірантами, веде значну науково-організаційну роботу. Є членом бюро Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України, членом секції енергетики Комітету з Державних премій України в галузі науки і техніки, членом спеціалізованих вчених рад Д 64.050.17 та Д 64.050.04 з захисту дисертацій, заступником головного редактора журналу «Електротехніка і електромеханіка», членом редколегії журналу «Технічна електродинаміка», керівником секції «Електромагнітне поле об'єктів електроенергетики. Проблеми моделювання, вимірювання та нормалізації» Наукової ради НАН України «Наукові основи електроенергетики».

Колективи ДУ «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України» та Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», редакція журналу «Електротехніка і електромеханіка» від щирого серця поздоровляють Володимира Юрійовича з ювілеєм та бажають йому міцного здоров'я, добробуту, довгих років плідної наукової праці, нових творчих успіхів.



НАЦІОНАЛЬНОМУ ТЕХНІЧНОМУ УНІВЕРСИТЕТУ «ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ» – 130 РОКІВ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», заснований у 1885 році, належить до числа перших десяти вищих навчальних закладів України, заснованих ще до початку XX століття. Протягом усієї 130-річної історії університет відчутно впливав на розвиток світової освіти, науки і техніки, готував фахівців високого рівня, а в історії незалежної України НТУ «ХПІ» робить визначальний внесок у розбудову вітчизняної сучасної вищої технічної освіти. Шлях НТУ «ХПІ» в незалежній Україні це шлях до вступу в Болонський процес, до інтеграції в європейський та світовий освітній і науковий простір. Харківський політехнічний, відповідно до визначення Великої Хартії Університетів, дійсно є «центром культури, знань і досліджень», якими є університети провідних країн світу. Сьогодні, коли наша держава впевнено тримається європейського вектора свого розвитку, слід згадати головні віхи інтеграційного просування вітчизняної системи освіти до європейського й світового освітнього простору.

Ще на початку нового століття (2002–2004 рр.) в нашій країні активізувалася підготовка до приєднання вітчизняної освітньої системи до Болонського процесу. НТУ «ХПІ» був активним учасником численних нарад і семінарів, що їх у 2003–2004 рр. проводили представники Європейського Союзу. У березні 2004 року саме в нашому університеті була проведена Всеукраїнська нарада ректорів вищих технічних навчальних закладів «Вища технічна освіта України і Болонський процес».



Перший ректор НТУ «ХПІ»
професор В.Л. Кірипичов

Рівно 10 років тому ректор НТУ «ХПІ» Л. Л. Товажнянський підписав у старішому університеті Європи – Болонському – Magna Charta Universitatum, а у 2007 р. НТУ «ХПІ» став членом Асоціації

університетів Європи з правом вирішального голосу.

Історія нашого університету – невід’ємна частина науково-технічної, інтелектуальної, культурної історії України. З Харківським політехнічним пов’язані імена лауреата Нобелівської премії Л. Д. Ландау, всесвітньо відомих вчених – академіків М. М. Бекетова, П. П. Буднікова, А. К. Вальтера, А. М. Ляпунова, С. П. Тимошенка, М. Д. Пільчикова, К. Д. Синельникова, В. А. Стеклова, Є. І. Орлова, Г. Ф. Проскури, І. І. Стрелкова, В. М. Хрушова, С. С. Уразовського, А. П. Філіпова, В. І. Атрощенко, А. С. Бережного, А. М. Підгорного, а також відомого фахівця в галузі механіки і організації технічної освіти, першого ректора НТУ «ХПІ» й Київської політехніки професора В. Л. Кірипичова та інших.

З університетом пов’язане зародження української технічної науки у галузях механіки, теорії міцності, теоретичної і прикладної фізики, прикладної хімії, авіації, ядерної фізики та кріотехніки, електро- та теплоенергетики, тракторобудування, танкобудування та двигунобудування, тепловозобудування тощо. Саме здобутки харківських політехніків покладено в основу найкращого в Другій світовій війні танка Т-34, магістральних тепловозів із показниками світового рівня, найпотужніших турбоагрегатів Дніпрогесу й атомних електростанцій України та країн зарубіжжя, тракторного парку нашої держави, систем управління ракетно-космічної техніки, вирішення важливих проблем обороноздатності держави та інше.

Засновником всесвітньо відомого КБ «Прогрес» був вихованець ХПІ, видатний генеральний конструктор авіадвигунів академік А. Г. Івченко. Видатними конструкторами були випускники університету Ж. Я. Котін, І. Я. Трашутін (танкобудування), М. Й. Гуревич (літаки МІГ), Ю. Ф. Косяк (турбіни), І. К. Кваша (підводні човни) тощо.

Університет став фундатором семи самостійних вищих навчальних закладів і є сьогодні одним із провідних науково-навчальних комплексів системи вищої освіти України. За рейтингом ЮНЕСКО «Топ 200», що складається для ВНЗ України, НТУ «ХПІ» входить до п’ятірки кращих вузів нашої держави, а за якістю освіти – в першу трійку.

У складі Університету 22 факультети, 96 кафедр, факультет військової підготовки імені Верховної Ради України, комп’ютерно-технологічний коледж, військовий коледж, Полтавський політехнічний коледж, науково-технічна бібліотека на 2 млн. томів, Міжгалузовий інститут післядипломної освіти, науково-методичне управління, центр дистанційної освіти, науково-дослідна частина, два науково-дослідних інститути «Іоносфера» та «Молнія», центр нових інформаційних технологій.

У нашому університеті працюють понад 5000 співробітників, навчаються більше 18 тис. студентів за 96 спеціальностями, 250 аспірантів, близько 2000 іноземців з 37 країн світу, працюють 1700 науково-педагогічних працівників, серед яких 212 докторів наук і професорів та понад 900 кандидатів наук і доцентів, 37 Заслужених діячів науки й техніки та Заслужених працівників освіти України, 35 лауреатів Державних премій України, 3 академіка і 3 член-кореспонденти НАН та НАПН України, 26 академіків галузових АН України.

Сьогодні технічною елітою держави є вихованці Харківського політехнічного інституту Герої України В. М. Лук’яненко, О. А. Жданов, А. О. Коваленко, Заслужені машинобудівники України, Заслужені працівники промисловості України, Заслужені діячі науки і техніки, лауреати Державної премії України: Ю. М. Бусяк, Л. К. А. Магеромов, В. М. Золотарьов, В. В. Казаков, Є. Т. Ковальов, Ю. М. Мацевитий, В. В. Розов, В. В. Кузьмін, В. І. Молчанов, О. Ю. Путнокі, Є. Я. Хрусьов, В. Ф. Клімов та багато інших.



Головний корпус університету

В університеті склалися і плідно працюють відомі в Україні і далеко за її межами 40 наукових шкіл з фізики металів та напівпровідників, електричного приводу, азотного синтезу, тепломасообміну та енергозбереження, керамічних та композиційних матеріалів, промислової та медичної електроніки, інформаційних технологій, систем управління, технології жирів, з проблем органічних палив, турбобудування, танкобудування, високоефективних технологій металообробки, технічної електрохімії, двигунів внутрішнього згоряння, механіки, фізики високих напруг, досліджень іоносфери Землі тощо.

Науковий потенціал вузу сьогодні визначають також науково-дослідні інститути «Молнія» та «Іоносфера». Унікальні експериментальні бази цих інститутів та науково-дослідний комплекс кафедри турбобудування становлять Національне надбання України. Університет є багатопрофільним науковим закладом. Загальний обсяг фінансування наукових досліджень перевищує щороку 20 млн. грн. Одним із стратегічних напря-

мів діяльності НТУ «ХПІ» є науково-технічна співпраця з більш ніж 20 установами Національної академії наук України.

Наукові дослідження виконуються на замовлення таких визначальних для економіки Держави підприємств, як ДП «Завод ім. Малишева», КБ ім. Антонова, ЗМКБ «Прогрес» ім. Івченка, ДП «ФЕД», ВАТ «Турбоатом», ВАТ «Харківський тракторний завод», ДП ХКБД та ДП ХКБМ імені О. Морозова, Сумське ВО ім. Фрунзе та ще понад 100 вітчизняних фірм і підприємств. За часи незалежності вчені університету виконували гранти на замовлення закордонних фірм з різних країн світу, а саме з Німеччини, США, Англії, Франції, Бельгії, Іспанії, Австрії, Південної Кореї, Угорщини, Румунії, Польщі, Італії, Китаю, В'єтнаму, Індії, Нідерландів, Данії, Швеції, Греції тощо. Серед цих замовників: «General electric» та «Boeing» (США), Boilentechnik (Швейцарія), Nuovo Pignone (Італія), Samsung Aerospace (Корея), Siemens (Німеччина), Bhopal (Індія) тощо.

За останні десять років видатні наукові розробки університету удостоєні 11 Державних премій України в галузі науки й техніки, 19 грантів та премій Президента України для молодих вчених. Щорічно більше 50–60 студентів стають переможцями Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з природничих, технічних та гуманітарних наук.

Науковці університету вносять вагомий вклад у зміцнення обороноздатності України. НТУ «ХПІ» є єдиним із вузів країни членом консорціуму «Бронетехніка» і готує фахівців з танкобудування, експлуатації бронемашин та військових спеціалістів у цій галузі. Значна частина вчених бере участь у дослідженнях і розробці аерокосмічної та авіаційної техніки.

Вчені-хіміки сьогодні розробили технологію та спроектували обладнання для знешкодження шкідливих речовин, таких як окислювач ракетного палива меланж. Всі ці роботи виконуються згідно з відповідними Державними програмами та постановами Кабінету Міністрів України.

Університет проводить активну міжнародну діяльність в академічній, науковій, економічній та культурній сферах, продовжує зміцнювати та поширювати зв'язки з зарубіжними партнерами. Сьогодні НТУ «ХПІ» співпрацює з 93 вищими навчальними закладами та фірмами із 31 країни світу, у тому числі з багатьма провідними вузами Німеччини, США, Англії, Франції, Китаю, Індії тощо. Тут виконуються проекти в рамках європейських програм INTAS, TEMPUS/TACIS, INCO-COPERNICUS та ЮНЕСКО. Отримано колективні та індивідуальні гранти Фонду Сороса, гранти Інформаційного Агентства США, Німецького академічного товариства DAAD, земельні гранти Німеччини та інших організацій. Свої наукові досягнення НТУ «ХПІ» демонструє постійно на виставках в Україні, Німеччині, Італії, Китаї тощо. Неодноразово отримували золоті медалі, дипломи та інші відзнаки цих виставок.

Спільною Постановою Міносвіти і НАН України на базі НТУ «ХПІ» створено Північно-Східний регіональний центр науково-комп'ютерної мережі України (URAN). Це забезпечує плідну діяльність потужної інформаційної системи університету, до складу якої входить найкрупніший серед вузів країни потужний вузол системи «Інтернет», на базі якого створено міську науково-освітню об'єднуючу мережу 20 установ освіти та науки Харкова.



Спортивний комплекс та Палац студентів НТУ «ХПІ»

Ми докладаємо багато зусиль для соціального захисту студентів і викладачів – це й 100-відсоткове забезпечення студентів гуртожитками, й безкоштовне їх медичне обслуговування, й обов'язковий щорічний профілактичний медичний огляд.

Наявність сучасного спортивного комплексу з легкоатлетичним манежем, 14 спортивними залами, 2 плавальними басейнами, стадіоном, 4 баскетбольними майданчиками та іншими спортивними спорудами надає широких можливостей для занять студентів спортом.

Університет постійно розбудовує та удосконалює матеріальну базу. За останні роки створено центр первинної медичної допомоги, відремонтовано й укомплектовано сучасним обладнанням фізіотерапевтичне відділення санаторію-профілакторію, створені поліграфічний центр, лабораторія дистанційної освіти, реконструйовано під потреби навчального процесу корпуси по вулицях Весніна та Гамарника, повернуто історичний вигляд багатьом аудиторіям. У 2012 році завершено будівництво фундаментальної науково-технічної бібліотеки обсягом 2 млн. томів, оснащеної сучасними інформаційними технологіями.

Нинішній ювілей НТУ «ХПІ» – не лише знаменне свято, це певний рубіж, з висоти якого ми не тільки оглядаємо зроблене, а й визначаємо перспективи та шляхи подальшого розвитку нашого університету.



Нова наукова бібліотека університету

У 2015–2016 навчальному році перед університетом стоїть важлива проблема, вирішення якої вплине на його розвиток на найближчі десять років. Запровадження нового переліку спеціальностей, зміна структури підготовки на двоступеневу бакалавр-магістр і, як наслідок, створення нового покоління навчальних програм передбачають реструктуризацію організації навчального процесу в університеті. Основою для такої реструктуризації є кластерний підхід, який вже давно став у світі базовим для розвитку економіки. Мова йде про соціальне партнерство, за умов якого всі рівні освіти дотримуються спільних наскрізних освітніх програм; освітні програми створюються з урахуванням вимог професійних стандартів, розроблених представниками галузі; колективи навчальних закладів та підприємств взаємодіють на основі принципів корпоративності. Реструктуризація організації навчального процесу в нашому університеті на основі кластерного підходу надасть нового імпульсу НТУ «ХПІ» для підготовки висококваліфікованих кадрів та прискорення розвитку економіки України.

Спадкоємність усіх поколінь студентів і викладачів, розвиток кращих традицій, любов до нашого ХПІ залишаються незмінними в нашому університеті, ювілей якого ми сьогодні святкуємо. Разом із сьогоднішніми політехніками цю подію відзначають випускники, які дарують НТУ «ХПІ» пам'ятник Першому інженеру на знак своєї любові до Alma mater, глибокої вдячності тисячам своїх попередників, які уклали Харківський політехнічний.

Все, чого ми досягли і що маємо ще звершити, робиться для майбутнього – нинішнього і прийдешніх поколінь студентів, яким належить покращувати життя в країні і всьому світі, гідно нести звання випускників Харківського політехнічного.



Фрагмент пам'ятника Першому інженеру

Є.І. Сокол,
ректор НТУ «ХПІ»