

ISSN 2074-272X

науково-практичний
журнал

2018/3



EIE Електротехніка і Електромеханіка

Electrical Engineering

& Electromechanics

**Електротехніка. Визначні події. Славетні імена
Електротехнічні комплекси та системи.**

Силова електроніка

Техніка сильних електричних та магнітних полів.

Кабельна техніка

Електричні станції, мережі і системи

Ювілеї

Інформація

**З 2016р. журнал індексується у міжнародній
наукометричній базі Web of Science
Core Collection: Emerging Sources
Citation Index**



«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

Видання засновано Національним технічним університетом «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») та Державною установою «Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України» (ДУ «ІТПМ НАНУ»)

Журнал засновано у 2002 р.

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



«ELECTRICAL ENGINEERING & ELECTROMECHANICS»

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

| | |
|-----------------------|--|
| Klymenko B.V. | Editor-in-Chief , Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (NTU "KhPI"), Ukraine |
| Sokol Ye.I. | Deputy Editor , Professor, Corresponding member of NAS of Ukraine, Rector of NTU "KhPI", Ukraine |
| Rozov V.Yu. | Deputy Editor , Professor, Corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine"(SI "ITPM NASU"), Kharkiv, Ukraine |
| Batygin Yu.V. | Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine |
| Bíró O. | Professor, Institute for Fundamentals and Theory in Electrical Engineering, Graz, Austria |
| Bolyukh V.F. | Professor, NTU "KhPI", Ukraine |
| Doležel I. | Professor, University of West Bohemia, Pilsen, Czech Republic |
| Féliachi M. | Professor, University of Nantes, France |
| Gurevich V.I. | Ph.D., Honorable Professor, Central Electrical Laboratory of Israel Electric Corporation, Haifa, Israel |
| Kildishev A.V. | Associate Research Professor, Purdue University, USA |
| Kuznetsov B.I. | Professor, SI "ITPM NASU", Ukraine |
| Kurylenko 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, NTU "KhPI", Ukraine |
| Rožanov 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 |
| Yufarov 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, 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" |
| Буряковський С.Г. | професор, директор НДПКи "Молнія" НТУ "ХПІ" |
| Буткевич О.Ф. | професор, Інститут електродинаміки НАНУ |

| | |
|--------------------------|---|
| Василів К.М. | професор, НУ "Львівська Політехніка" |
| Васьковський Ю.М. | професор, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» |

| | |
|-------------------------|-------------------------------------|
| Гриб О.Г. | професор, НТУ "ХПІ" |
| Гурин А.Г. | професор, НТУ "ХПІ" |
| Жемеров Г.Г. | професор, НТУ "ХПІ" |
| Клепиков В.Б. | професор, НТУ "ХПІ" |
| Міліх В.І. | професор, НТУ "ХПІ" |
| Михайлов В.М. | професор, НТУ "ХПІ" |
| Омельяненко В.І. | професор, НТУ "ХПІ" |
| Петрушин В.С. | професор, ОНПУ, Одеса |
| Пуйло Г.В. | професор, ОНПУ, Одеса |
| Резинкін О.Л. | професор, НТУ "ХПІ" |
| Сосков А.Г. | професор, ХНУМГ імені О.М. Бекетова |

Щербак Я.В. професор, ХНУМГ імені О.М. Бекетова

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

Адреса редакції / Editorial office address:

Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПІ", вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна
Dept. of Electrical Apparatus, NTU "KhPI", Kurpychova Str., 2, Kharkiv, 61002, Ukraine

тел. / phone: +380 57 7076281, +380 67 3594696, e-mail: a.m.grechko@gmail.com

ISSN (print) 2074-272X

ISSN (online) 2309-3404

© Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", 2018

© ДУ "Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України", 2018

Підписано до друку 08.06.2018 р. Формат 60 x 90 1/8. Папір – офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,25.

Наклад 200 прим. Зам. № 66/172-03-2018. Ціна договірна.

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

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.), Institute "Molniya" of NTU "KhPI" |
| Buriakovskiy S.G. | Professor, Director of Institute "Molniya" of NTU "KhPI" |
| Butkevych O.F. | Professor, Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine |

| | |
|-------------------------|--|
| Vasylyv K.M. | Professor, Lviv Polytechnic National University |
| Vaskovskiy Yu.M. | Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" |

| | |
|--------------------------|--|
| Gryb O.G. | Professor, NTU "KhPI" |
| Guryn A.G. | Professor, NTU "KhPI" |
| Zhemerov G.G. | Professor, NTU "KhPI" |
| Klepikov V.B. | Professor, NTU "KhPI" |
| Milykh V.I. | Professor, NTU "KhPI" |
| Mikhaylov V.M. | Professor, NTU "KhPI" |
| Omel'yanenko V.I. | Professor, NTU "KhPI" |
| Petrushin V.S. | Professor, Odessa National Polytechnic University |
| Puilo G.V. | Professor, Odessa National Polytechnic University |
| Rezynkin O.L. | Professor, NTU "KhPI" |
| Soskov A.G. | Professor, O.M. Beketov National University of Urban Economy (NUUE) in Kharkiv |
| Shcherbak Ya.V. | Professor, O.M. Beketov NUUE in Kharkiv |

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



ЗМІСТ

Електротехніка. Визначні події. Славенні імена

Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 44: Традиционная энергетика. Атомные электрические станции: ретроспектива, состояние и перспективы их развития 3

Електротехнічні комплекси та системи. Силова електроніка

Василів К.М. Закономірності електромагнітних процесів безконтактної системи збудження асинхронізованого генератора на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора напруги за схемою в одну зірку 17

Задорожня І.Н., Задорожний Н.А. Синтез двухмассового электропривода с астатической системой подчиненного регулирования при действии переменных сил трения 23

Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Паранчук Р.Я., Матіко Ф.Д. Розвиток методів та засобів комп'ютерного моделювання для дослідження електричних режимів дугової сталеплавильної печі 28

Техніка сильних електричних та магнітних полів. Кабельна техніка

Баранов М.И. Энергетические характеристики грозового облака тропосферы Земли: особенности их расчета и прикладного применения 37

Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A., Strelnikova V.A. The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review 43

Бойко Н.И., Макогон А.В., Маринин А.И. Энергоэффективность обеззараживающей обработки текучих пищевых продуктов при помощи высоковольтных импульсных воздействий 53

Електричні станції, мережі і системи

Glaoui H., Harrouz A. Sliding mode control of the DFIG used in wind energy system 61

Нижевский И.В., Нижевский В.И. Методика натурных измерений сопротивления заземляющего устройства 68

Ювілеї

Юхимчук Владимир Данилович (к 80-летию со дня рождения) 72

Інформація

Міжнародний Симпозіум «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки (SIEMA'2018)» 73

TABLE OF CONTENTS

Electrical Engineering. Great Events. Famous Names

Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 44: Traditional power engineering. Nuclear power stations: retrospective view, state and prospects of their development 3

Electrotechnical Complexes and Systems. Power Electronics

Vasyliv K.M. Regularities of electromagnetic processes of a contactless excitation system of an asynchronized generator based on a cascade three-phase-three-phase voltage modulator in a single-star circuit 17

Zadorozhniaia I.N., Zadorozhniy N.A. Synthesis of a two-mass electric drive with an astatic system of subordinate regulation at the action of variable friction forces 23

Lozynskiy O.Y., Paranchuk Y.S., Paranchuk R.Y., Matico F.D. Development of methods and means of computer simulation for studying arc furnace electric modes 28

High Electric and Magnetic Field Engineering. Cable Engineering

Baranov M.I. Power descriptions of a storm cloud of troposphere of Earth: features of their calculation and applied utilization 37

Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A., Strelnikova V.A. The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review 43

Boyko M.I., Makogon A.V., Marynin A.I. Energy efficiency of the disinfection treatment of liquid food-stuffs by high-voltage pulse effects 53

Power Stations, Grids and Systems

| | |
|---|----|
| Glaoui H., Harrouz A. Sliding mode control of the DFIG used in wind energy system | 61 |
| Nizhevskiy I.V., Nizhevskiy V.I. A technique of full-scale measurements of the resistance of the grounding device | 68 |

Anniversaries

| | |
|---|----|
| Yukhymchuk V.D. (on the 80th anniversary of his birth)..... | 72 |
|---|----|

Information

| | |
|---|----|
| International Symposium «Problems of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics (SIEMA'2018)»..... | 73 |
|---|----|

ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!

Науково-практичний журнал «Електротехніка і Електромеханіка» – передплатне видання. Вартість передплати на 2018 рік – 330,18 грн., на два місяці – 55,03 грн., на чотири місяці – 110,06 грн., на шість місяців – 165,09 грн., на вісім місяців – 220,12 грн., на десять місяців – 275,15 грн. Передплатний індекс у каталозі ПАТ «УкрПошта»: 01216.

ШАНОВНІ АВТОРИ ЖУРНАЛУ!

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

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

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

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

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

Журнал «Електротехніка і Електромеханіка» включений у довідник періодичних видань Ulrich's Periodical Directory, представлений у загальнодержавній реферативній базі даних «Україніка Наукова», реферативному журналі «Джерело», індексується у наукометричній базі даних Web of Science Core Collection: Emerging Sources Citation Index (ESCI), що рекомендована МОН України, а також у таких міжнародних базах даних: Index Copernicus (ICV2016:92.55), Російський Індекс Научного Цитування – РИНЦ (ELIBRARY), і входить до баз даних EBSCO, ProQuest, GALE, DOAJ тощо.



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 44: ТРАДИЦИОННАЯ ЭНЕРГЕТИКА. АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ: РЕТРОСПЕКТИВА, СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ

Наведено короткий науково-технічний огляд про ретроспективу, сучасний стан і тенденціях у розвитку світової ядерної енергетики. Приведені ядерно-фізичні основи функціонування і описані основні пристрої ядерного реактора на урані та теплових нейтронах, що широко використовується на атомних електричних станціях (АЕС). Представлена класифікація ядерних реакторів. Надані дані про ядерне паливо, що вживається на АЕС, і радіоактивних відходах ядерних реакторів АЕС. Вказані заходи для підвищення безпеки ядерних реакторів і АЕС. Відмічена важлива роль АЕС у річному обсязі вироблення електроенергії в світі і низці країн. Вказані переваги і недоліки АЕС. Розглянута ядерна енергетика України. Позначені основні проблеми і перспективи розвитку в світі і Україні ядерної енергетики. Бібл. 20, табл. 1, рис. 13.

Ключові слова: ядерна фізика і енергетика, ядерний реактор, атомна електрична станція, безпека ядерного реактора і атомної електричної станції, проблеми і перспективи розвитку ядерної енергетики.

Приведен краткий научно-технический обзор о ретроспективе, современном состоянии и тенденциях в развитии мировой ядерной энергетики. Приведены ядерно-физические основы функционирования и описаны основные устройства ядерного реактора на уране и тепловых нейтронах, широко используемого на атомных электрических станциях (АЭС). Представлена классификация ядерных реакторов. Приведены данные о применяемом на АЭС ядерном топливе и радиоактивных отходах ядерных реакторов АЭС. Указаны меры для повышения безопасности ядерных реакторов и АЭС. Отмечена важная роль АЭС в годовом объеме выработки электроэнергии в мире и ряде стран. Указаны преимущества и недостатки АЭС. Рассмотрена ядерная энергетика Украины. Обозначены основные проблемы и перспективы развития в мире и Украине ядерной энергетики. Библ. 20, табл. 1, рис. 13.

Ключевые слова: ядерная физика и энергетика, ядерный реактор, атомная электрическая станция, безопасность ядерного реактора и атомной электрической станции, проблемы и перспективы развития ядерной энергетики.

Введение. Как известно, впервые в мире управляемая цепная ядерная реакция в природном уране ${}_{92}^{238}\text{U}$, содержащем не более 0,71 % на единицу веса редкий делящийся медленными (тепловыми) нейтронами изотоп урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ [1], была осуществлена 2 декабря 1942 г. группой ученых-физиков и инженеров Чикагского университета (США), возглавляемой лауреатом Нобелевской премии по физике за 1938 г., профессором Энрико Ферми [2, 3]. Первый в мире уран-графитовый ядерный реактор в форме эллипсоида вращения (при полярном по вертикали радиусе около 3,09 м и экваториальном радиусе по горизонтали около 3,88 м), получивший название «Chicago Pile-1» или CP-1 («Чикагская поленница») и содержащий по радиусу 57 слоев уран-графитовых блоков (при 46 тоннах природного урана, из которых 6 тонн составлял металлический уран, а 40 тонн – диоксид урана, и 385 тоннах блочного графита особо высокой чистоты [3]), обеспечил получение самоподдерживающейся управляемой (за счет радиально вводимых по пяти трехуровневым горизонтальным каналам в активную зону реактора поглощающих замедленные графитом тепловые нейтроны кадмиевых стержней) цепной ядерной реакции [2]. При минимальных уровнях мощности энерговыделения (около 0,5 Вт) и радиоактивности для персонала в этом неохлаждаемом ядерном реакторе был достигнут коэффициент размножения k_p нейтронов, практически равный единице [3]. Под k_p , определяющим реактивность $\rho_p = (k_p - 1)$ ядерного реактора, понимается отношение числа нейтронов в одном из последующих поколений от деления ядер изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ к их числу в предыдущем поколении от деления указанных ядер [1]. Именно создание уран-графитового ядерного реактора открыло магистральный путь к военному и мирному

использованию внутриядерной энергии ряда радиоактивных химических элементов (например, изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ и изотопа плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ [1, 3]). Отметим, что в рамках работ по Урановому проекту нацистской Германии (научный руководитель проекта – лауреат Нобелевской премии по физике за 1932 г., профессор Вернер Гейзенберг) полноценная управляемая цепная ядерная реакция в уране ${}_{92}^{235}\text{U}$ была получена лишь в феврале 1945 г. в эксперименте, проведенном в горной выработке вблизи Хайгерлоха [2]. Спустя практически около двух месяцев ядерная программа Германии из-за поражения последней во Второй мировой войне прекратила свое существование. Укажем и то, что в бывшем СССР первый советский опытный уран-графитовый ядерный реактор, созданный под научным руководством академика АН СССР Игоря Васильевича Курчатова в Лаборатории №2 (ныне РИЦ «Курчатовский институт», Российская Федерация (РФ), г. Москва) и получивший название Ф-1 (на мой взгляд, буква «Ф» в названии реактора происходит от фамилии выдающегося итальянско-американского физика-ядерщика Ферми, первым избранным этот тип гетерогенного ядерного реактора – это своеобразная дань уважения советских физиков-ядерщиков этому всемирно известному ученому), 25 декабря 1946 г. был выведен в свое критическое состояние ($k_p \approx 1$) [2]. Реактор Ф-1 имел практически форму шара диаметром до 7,5 м, в центральной части которого диаметром около 6 м по отверстиям в графитовых блоках были размещены рабочие урановые и управляемые кадмиевые стержни. Он не имел системы охлаждения и поэтому работал на минимальных уровнях мощности. На основе опытных данных, полученных на реакторе Ф-1, в июле 1948 г. на Южном

© М.И. Баранов

Урале (г. Озерск) был создан первый советский промышленный уран-графитовый реактор, имевший название А-1 и предназначенный для наработки оружейного плутония ^{239}Pu для первых советских атомных бомб [2, 4]. Важно подчеркнуть, что еще в 1948 г. (до окончания работ по созданию первой советской плутониевой атомной бомбы, успешно взорванной на Южном ядерном полигоне СССР 29 августа 1949 г. [4, 5]) академик АН СССР Курчатов И.В. добился по соответствующему решению Правительства СССР начала проведения опытно-конструкторских работ по практическому мирному применению энергии атома для получения электроэнергии. В мае 1950 г. в г. Обнинске (Калужская обл., РФ), где тогда был расположен один из советских лидеров в области реакторостроения «Физико-энергетический институт» (сейчас это всемирно известный ГНЦ РФ «Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского» [6]), началось строительство Обнинской атомной электрической станции (АЭС) с установленной мощностью 5 МВт [2]. 27 июня 1954 г. Обнинская АЭС (рис. 1) была введена в опытную эксплуатацию. Она оказалась первой в мире АЭС, подключенной к общей электрической сети [2].



Рис. 1. Общий вид главного корпуса первой в мире опытно-промышленной Обнинской АЭС с установленной мощностью 5 МВт (г. Обнинск, Калужская обл., РФ, 1954 г.) [7]

В 1958 г. в бывшем СССР была введена в строй 1-я очередь Сибирской АЭС (г. Томск) с мощностью 100 МВт (вскоре АЭС была доведена до проектной мощности в 600 МВт) [2]. 26 апреля 1964 г. 1-я очередь Белоярской АЭС (Средний Урал, РФ) дала электрический ток своим потребителям. В сентябре 1964 г. был сдан 1-й энергоблок Нововоронежской АЭС с установленной мощностью 210 МВт [2, 7]. 2-й энергоблок этой АЭС с установленной мощностью 365 МВт был запущен в декабре 1969 г. В 1973 г. произошла сдача в эксплуатацию 1-го энергоблока Ленинградской АЭС с установленной мощностью в 1000 МВт.

Укажем, что за пределами бывшего СССР первая АЭС промышленного назначения с установленной мощностью 46 МВт была введена в эксплуатацию в 1956 г. в г. Колдер-Холле (Великобритания) [2]. В 1957 г. США запустили свою первую АЭС в г. Шиппингпорте с установленной мощностью 60 МВт. В 1959 г. свою первую АЭС построила Франция, в 1961 г. – Германия, в 1962 г. – Канада, в 1964 г. – Швеция и в 1966 г. – Япония [2, 7]. В 1976 г. по всему миру были начаты работы по сооружению рекордного ко-

личества АЭС за всю историю мировой ядерной энергетики, насчитывающего 44 новых атомных станции. В 1979 г. в США произошла серьезная авария на АЭС «Три-Майл-Айленд», приведшая к длительному «замораживанию» американской ядерной энергетической программы [2]. Заметим, что в США к идее введения в строй новых мирных ядерных мощностей вернулись только в начале 21-го столетия. Только в течение 1984-1985 гг. в мире было построено 33 новых АЭС [2]. Масштабная катастрофа 26 апреля 1986 г. на Чернобыльской АЭС (взрыв ядерного реактора 4-го энергоблока мощностью 1000 МВт) отрицательным образом отразилась не только на ядерной энергетике бывшего СССР и затем независимой Украины, но и на всей ядерной энергетике промышленно развитых стран мира. Безусловно, что негативное влияние на мировую атомную энергетику оказала и недавняя катастрофа на АЭС «Фукусима-1», произошедшая в марте 2011 г. в Японии из-за сильного землетрясения в близлежащей зоне разлома коры Земли и последовавшими за ним огромными океаническими волнами (цунами) [8]. Несомненный научно-технический и просветительский интерес представляет обзор современного состояния и возможных перспектив развития мировой ядерной энергетики, имеющей для человечества огромное социально-экономическое значение.

Целью статьи является составление на основе опубликованных материалов научно-технического обзора о ретроспективе, современном состоянии, основных достижениях, проблемах и перспективах развития в мире ядерной энергетики с ее мощными АЭС.

1. Общая характеристика АЭС, ее основных схем построения и энергоагрегатов. Как известно, АЭС является важным стратегическим объектом любого государства мира, содержащим ядерную установку с необходимыми техническими сооружениями и технологическими системами, предназначенную для промышленного производства электроэнергии (тепла) [7, 8]. Стоимость сооружения АЭС по современным экспертным оценкам составляет около 2300 \$ USA за 1 кВт электрической мощности указанной ядерной установки, обычно называемой «*ядерным реактором*» [8]. Исходя из этого, примерная стоимость строительства на АЭС ее одного энергоблока мощностью 1000 МВт будет составлять не менее 2,3 миллиардов \$ USA. Как видим, ядерная энергетика является той отраслью экономики страны, которая требует вложения огромных финансовых инвестиций. На рис. 2 и 3 в укрупненном виде приведены схемы построения современных АЭС с мощными ядерными реакторами и энергоблоками повышенной безопасности [2, 7, 8].

Согласно данным рис. 2 и 3 «сердцем» АЭС и ее каждого энергоблока является ядерный реактор (принятая нами аббревиатура ВВЭР-1000 означает «водяной энергетический реактор мощностью 1000 МВт»), превращающий в активной зоне с урановыми сборками тепловыделяющих систем (ТВС) подаваемую в него очищенную воду с добавлением раствора борной кислоты в некипящую бороводную смесь с температурой до 320 °С, направляемую главным циркуляционным насосом по первому радиоактивному контуру в парогенератор.

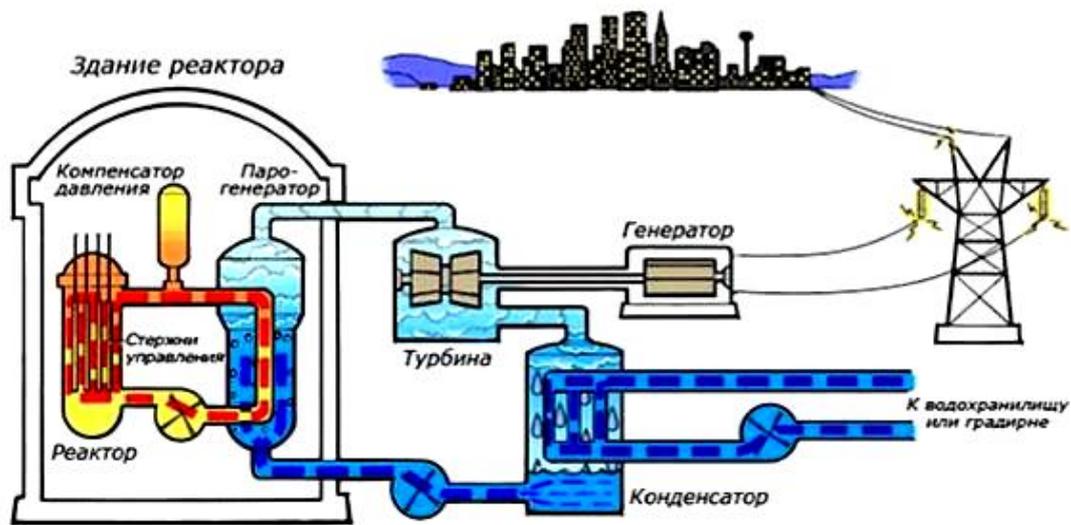


Рис. 2. Схема современной АЭС на двухконтурном водо-водяном энергетическом ядерном реакторе типа ВВЭР-1000 [8]

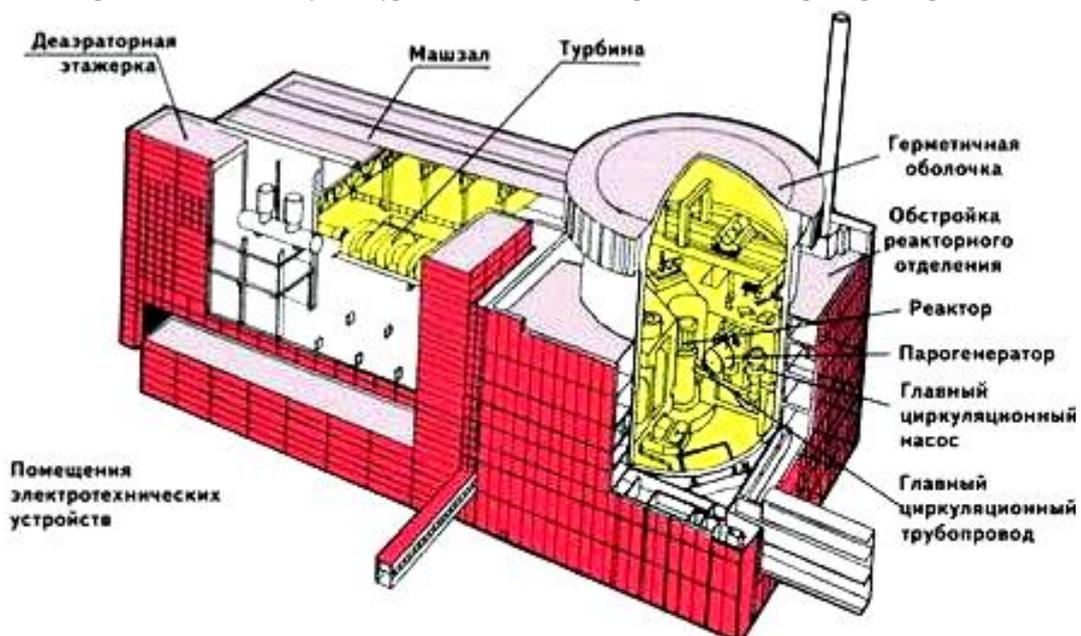


Рис. 3. Схема устройства мощного энергоблока современной АЭС с ядерным реактором типа ВВЭР-1000 [8]

Рабочее давление боровой смеси в первом контуре ядерного реактора типа ВВЭР-1000 составляет до 160 атм (16,2 МПа) [8]. Компенсатор давления в данном контуре служит для выравнивания колебаний давления, обусловленных тепловым расширением его теплоносителя. В теплообменнике парогенератора эта смесь нагревает до кипения воду второго нерадиоактивного замкнутого контура, перегретый пар которого под давлением около 63 атм (6,4 МПа) направляется на паровую турбину (см. рис. 2 и 4), вращающую ротор синхронного генератора, вырабатывающего электричество. С выходного патрубка паровой турбины отработанный пар направляется в конденсатор, где охлаждается потоками воды с пруда-охладителя (градирни) и с помощью циркуляционного насоса этого замкнутого контура подается снова в теплообменник парогенератора. Отметим, что применение в первом контуре ядерного реактора вместо воды жидкометаллического теплоносителя (например, натрия) позволяет существенно упростить конструкцию его металлического корпуса в активной зоне (давление его жидкометаллического теплоносителя не превышает атмосферное) и избавиться в нем от компенсатора дав-

ления [7, 8]. Остановимся далее на ядерно-физических особенностях функционирования мощных ядерных реакторов АЭС.



Рис. 4. Монтаж в машинном зале АЭС мощной отечественной паровой турбины ПТ-1000 (справа по оси турбины виден корпус соответствующего турбогенератора) [9]

1.1. Ядерная физика и ядерный реактор. Из атомной физики известно, что самопроизвольному переходу микрочастицы вещества в иное состояние препят-

ствуется энергетический барьер. Преодолеть этот барьер она может лишь двумя путями [1]: либо за счет кинетической энергии сталкивающихся частиц, либо за счет энергии связи присоединяющейся частицы. Возбуждение вещества присоединяющимися частицами не требует больших значений их кинетической энергии. Главное тут иметь эти частицы, приводящие к протеканию в возбуждаемом веществе «экзоэнергетических реакций», при которых в следующем за возбуждением превращении вещества выделяется энергии больше, чем требуется для его самого возбуждения. При получении таким путем энергии в макроскопических масштабах такие реакции в веществе должны быть цепными – следующими одна за другой. *Цепные реакции* в веществе могут возникать только тогда, когда возбуждающие в нем экзоэнергетическую реакцию частицы появляются снова как продукт протекания этих экзоэнергетических реакций. Физики-ядерщики долго искали подобное вещество (химический элемент) и подобные микрочастицы, приводящие к возникновению в нем «цепных ядерных реакций» и соответственно к выделению больших значений внутриядерной энергии. В январе 1939 г. австрийско-немецкий «танDEM» физиков Отто Фриш и Лиза Мейтнер, интерпретируя результаты проведенного накануне в декабре 1938 г. ядерного эксперимента немецкими учеными Отто Ханом и Фрицем Штрассманом, пришли к выводу о протекании в облученном потоком нейтронов природном уране ${}_{92}^{238}\text{U}$ ядерной реакции деления «материнских» ядер его изотопа ${}_{92}^{235}\text{U}$ на два осколка с их «дочерними» ядрами и испусканием нескольких быстрых нейтронов [3, 10]. Научное открытие цепной ядерной реакции деления в изотопе урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ указывало на практическую реальность освоения ядерной энергией как для военных, так и мирных целей. Теперь мы знаем, что при каждом акте деления одного ядра изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ высвобождается энергия примерно в 197 МэВ ($3,15 \cdot 10^{-11}$ Дж) и «рождается» в среднем 2,47 быстрых нейтронов [1, 3]. Большая часть быстрых нейтронов (с энергией до 0,7 МэВ [1]) при этой ядерной реакции деления испускается практически мгновенно (за время порядка времени релаксации свободных электронов в медном проводнике – 10^{-14} с [1]), а примерно 0,75 % от всех вторичных нейтронов испускается осколками ядерного деления с запаздыванием во времени, равным (0,05 – 60) с [1, 3]. Такие нейтроны в ядерной физике получили название «запаздывающих», играющих важную роль в управлении цепными ядерными реакциями в реакторах АЭС, работающих на тепловых нейтронах. Для устойчивого протекания цепной ядерной реакции в изотопе урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ в нем должны отсутствовать примеси, поглощающие нейтроны, а также необходимо наличие минимального количества ядерного вещества, называемого *критической массой* [1, 3]. Кроме того, энергия нейтронов в активной зоне с ядерным топливом должна быть достаточной для того, чтобы вызвать деление ядер изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$. При использовании в реакторе для этих целей медленных нейтронов их энергия составляет ~0,025 эВ [1, 3]. Управляемая цепная ядерная реакция в изотопе урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ лежит в основе построения ядерных реакторов, работающих на медленных нейтронах и используемых на АЭС. На рис. 5 приведено уникальное фотоизображение активной зоны работающего водо-водяного ядерного реактора [2].

Ядерный реактор (рис. 6) состоит из следующих основных частей [2]: активной зоны с ядерным топли-

вом и замедлителем нейтронов; отражателя нейтронов, окружающего активную зону реактора; жидкого (обычно очищенной воды) теплоносителя, отбирающего тепло у ядерных сборок ТВС и передающего его в парогенератор энергоблока АЭС; системы управления цепной ядерной реакцией в активной зоне реактора; аварийной защиты реактора; радиационной защиты реактора; системы дистанционного управления работой реактора.



Рис. 5. Редчайший вид активной зоны действующего исследовательского водо-водяного ядерного реактора (в активной зоне этого типа реактора отчетливо наблюдается голубое свечение, вызванное излучением Вавилова-Черенкова) [2]

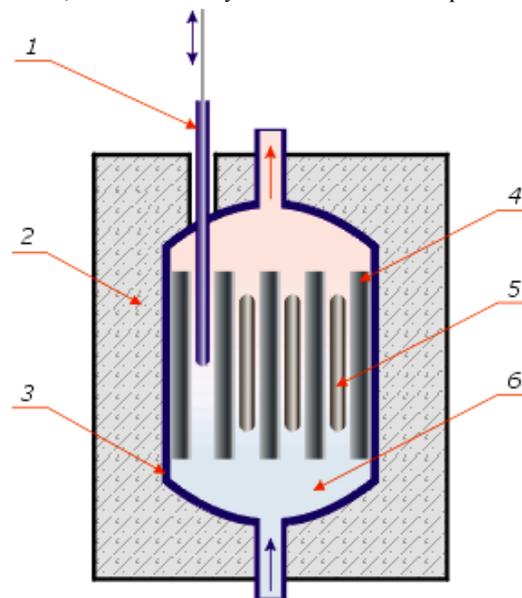


Рис. 6. Упрощенная схема устройства гетерогенного ядерного реактора на тепловых нейтронах (1 – управляющий стержень; 2 – массивная радиационная защита; 3 – теплоизолирующий корпус; 4 – замедлитель нейтронов; 5 – ядерное топливо; 6 – жидкий теплоноситель) [2]

Данные рис. 5 наглядно демонстрируют для читателя сложные ядерно-физические процессы, проте-

кающие в активной зоне водо-водяного ядерного реактора, работающего на тепловых нейтронах. При этих процессах в активной зоне реактора идет образование мощных нейтронных потоков и быстрых заряженных микрочастиц, вызывающих интенсивное излучение Вавилова-Черенкова в водяном теплоносителе реактора. Напомним, что эффект Вавилова-Черенкова обусловлен излучением электромагнитной энергии (света) быстро движущейся со скоростью v_e заряженной микрочастицей в оптически прозрачной среде, когда $v_e > c/n$ [1, 3], где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме; n – показатель преломления теплоносителя (для воды $n \approx 1,33$ [1]).

Текущее состояние любого ядерного реактора характеризуется двумя показателями [2]: коэффициентом размножения k_p нейтронов в его активной зоне и реактивностью ρ_p . При $k_p \approx 1$ и $\rho_p \approx 0$ число делений ядер изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ в активной зоне реактора постоянно и ядерный реактор находится в *стабильном критическом состоянии*. Обращение коэффициентом размножения k_p нейтронов в единицу достигается сбалансированием процесса размножения нейтронов в активной зоне реактора и их потерями. В ядерном реакторе существуют две основные причины потерь нейтронов [2, 8]: первая – захват нейтронов ядрами урана без их деления; вторая – уход нейтронов за пределы зоны размножения. Управление цепной ядерной реакцией деления ядер изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ в сборках ТВС обеспечивается «запаздывающими» нейтронами. Именно за счет значительного времени «жизни» в активной зоне реактора «запаздывающих» нейтронов его система управления успевает переместить управляющие стрежни-поглотители (изготавливаются обычно из бора или кадмия) и тем самым выбрать для ядерного реактора необходимый коэффициент размножения k_p нейтронов и соответственно его реактивность ρ_p . Отметим то одно важное обстоятельство, что в описываемом ядерном реакторе на тепловых нейтронах ядра природного урана ${}_{92}^{238}\text{U}$, захватив быстрые нейтроны от деления ядер изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ или нейтроны в процессе их замедления, не испытывают своего деления. Такие возбужденные ядра урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ в процессе длинной цепочки ядерных превращений (в течение времени, равного до 2,3 суток) переходят в стабильные ядра оружейного изотопа плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$, которые, как и ядра изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$, могут делиться в урановых сборках ТВС реактора под действием тепловых нейтронов [1, 3].

1.1.1. Классификация ядерных реакторов. По конструкции современные ядерные реакторы АЭС подразделяются на две большие группы [11]:

- каналные реакторы (ядерные сборки ТВС в них размещаются в отдельных каналах, пронизывающих его активную зону и выполненных в графитовых блоках замедлителей нейтронов; сборки друг с другом персоналом могут меняться местами и обтекаются потоком жидкого теплоносителя);
- корпусные реакторы (ядерные сборки ТВС в них стационарно размещаются внутри массивного металлического корпуса, а активная зона омывается интенсивным потоком жидкого теплоносителя).

На рис. 7 и 8 приведены общие виды соответственно каналного и корпусного типов ядерных реакторов, применяемых на АЭС Украины [2, 9, 12].



Рис. 7. Общий вид мощного ядерного реактора типа РБМК-1000, установленного в реакторном цеху одного из 4-х эксплуатировавшихся энергоблоков Чернобыльской АЭС (до катастрофы в 1986 г.), со стороны его сборной из отдельных свинцовых блоков верхней защитной крышки [2, 9]

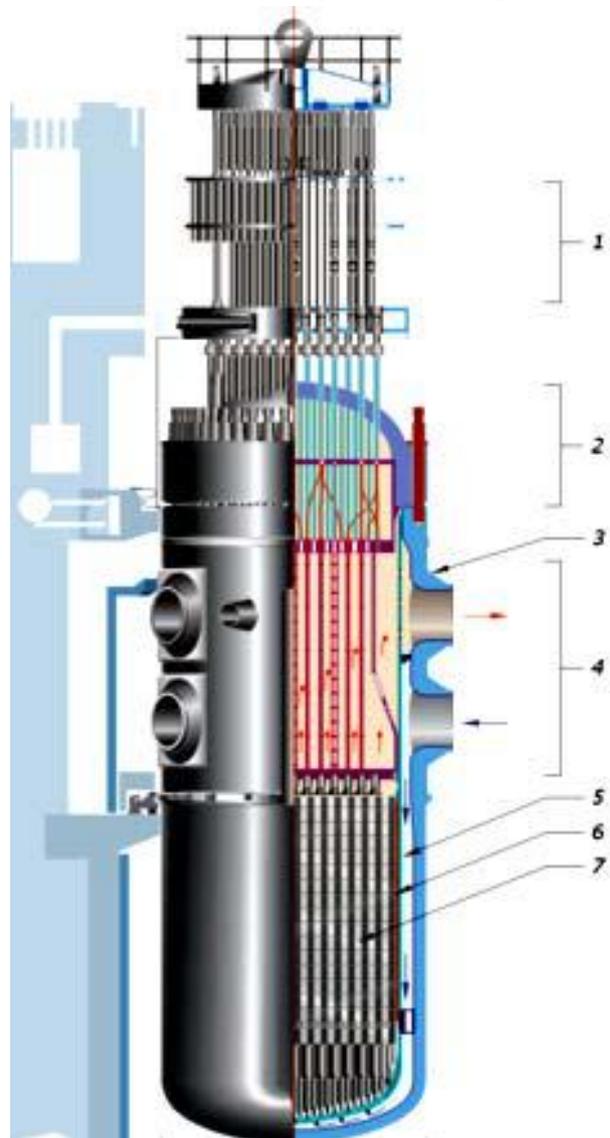


Рис. 8. Схема устройства мощного ядерного реактора типа ВВЭР-1000 (1 – привод СУЗ; 2 – защитная крышка реактора; 3 – корпус реактора; 4 – блок БЗТ; 5 – водная шахта; 6 – выгородка активной зоны; 7 – сборки ТВС) [9]

Как известно, в апреле 1986 г. на 4-ом энергоблоке ЧАЭС именно на ядерном реакторе РБМК-1000

большой мощности канального типа с тепловой мощностью 1000 МВт произошла самая тяжелая в мировой истории атомной энергетики авария, подорвавшая веру людей в безопасность ядерных реакторов. Некоторые страны (например, Италия) после катастрофы на Чернобыльской АЭС приняли законы, запрещающие размещение АЭС на ее территории (уже действовавшие атомные станции были остановлены, а их ядерные реакторы законсервированы) [8]. В Германии приняты правительственные решения по сокращению количества работающих на ее территории АЭС [2, 8].

В настоящее время наиболее безопасной конструкцией мощного ядерного реактора на тепловых нейтронах, используемого на современных АЭС, является приведенная на рис. 8 конструкция реактора типа ВВЭР-1000 [9, 12]. Габаритные размеры такого ядерного реактора составляют [9]: высота – до 20 м, а диаметр корпуса – до 4,5 м. Управление и регулирование процесса протекания цепных ядерных реакций в сборках ТВС, заполненных урановыми теплоделяющими элементами (ТВЭЛ) пластинчатой или цилиндрической формы, и процесса нагрева водного теплоносителя ядерного реактора типа ВВЭР-1000 выполняется с помощью стержней системы управления и защиты (СУЗ) и блока защитных труб (БЗТ). Корпус такого реактора рассчитывается на максимальное давление перегретой смеси его водного теплоносителя, составляющее около 160 атм [8].

Интересно, что геометрическая форма ядерного реактора выбирается из условия минимума отношения площади его массивного радиационно-стойкого корпуса к занимаемому им объему. Этому условию соответствуют формы сферы, короткого цилиндра и куба [1]. Делается это для минимизации утечки нейтронов из активной зоны ядерного реактора, имеющей в критическом состоянии реактора ($k_p \approx 1$; $\rho_p \approx 0$) критический объем (для современных ядерных реакторов этот объем может составлять сотни м³ [2]). Критическому объему реактора соответствует критическая масса делящегося в нем ядерного топлива. Заметим, что наименьшей критической массой обладают ядерные реакторы, в которых топливом служат водные растворы солей чистых делящихся радиоактивных изотопов с водяным отражателем нейтронов. Например, для изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ наименьшая критическая масса составляет 0,8 кг, а для изотопа плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ – 0,5 кг [2]. По мере «выгорания» ядерного топлива реактивность ρ_p рассматриваемого реактора уменьшается. В этой связи его сборки ТВС с ТВЭЛ требуются менять. В реакторах типа ВВЭР-1000 замена «выгоревшего» ядерного топлива производится сразу из всей их активной зоны, а в реакторах типа РБМК-1000 такая замена осуществляется постепенно с оставлением в работе ТВЭЛ разных «возрастов». Напомним, что под активной зоной реактора понимается зона, где находится ядерное топливо, протекает управляемая цепная ядерная реакция деления его ядер и где выделяется внутриядерная энергия. На рис. 9 показан момент замены ядерного топлива в реакторе типа ВВЭР-1000.

Ядерные реакторы по виду используемого в их активной зоне ядерного топлива делятся на [2, 11]:

- реакторы со сборками ТВС и ТВЭЛ на основе таких изотопов урана как ${}_{92}^{238}\text{U}$, ${}_{92}^{235}\text{U}$ и ${}_{92}^{233}\text{U}$;
- реакторы с ТВС и ТВЭЛ на основе изотопа плу-

тония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$, целого семейства изотопов плутония ${}_{94}^{239-242}\text{Pu}$ в смеси с природным ураном ${}_{92}^{238}\text{U}$;

- реакторы с ТВС и ТВЭЛ на основе изотопа тория ${}_{90}^{232}\text{Th}$ (с дальнейшим превращением его при пребывании в активной зоне в изотоп урана ${}_{92}^{233}\text{U}$).



Рис. 9. Загрузка свежего топлива (сборки ТВС) в мощный водо-водяной ядерный реактор типа ВВЭР-1000 (верхняя герметичная защитная крышка реактора снята) [2, 9]

Ядерные реакторы по характеру размещения топлива в активной зоне классифицируются на [2]:

- гетерогенные реакторы (топливо в их зоне размещается дискретно в виде блоков (сборки ТВС с ТВЭЛ, обтекаемых теплоносителем), между которыми находится замедлитель нейтронов);

- гомогенные реакторы (топливо и замедлитель нейтронов представляют однородную смесь).

Ядерные реакторы по степени обогащения их ядерного топлива в ТВЭЛ различаются на [2, 11]:

- реакторы с ТВЭЛ на основе изотопа необогащенного природного урана ${}_{92}^{238}\text{U}$;
- реакторы с ТВЭЛ на основе изотопа слабообогащенного природного урана ${}_{92}^{238}\text{U}$;
- реакторы с ТВЭЛ на основе изотопа высокообогащенного природного урана ${}_{92}^{238}\text{U}$.

Ядерные реакторы по химическому составу топлива в активной зоне подразделяются на [2, 11]:

- реакторы с металлическими изотопами урана, плутония и тория;
- реакторы с диоксидом урана UO_2 ;
- реакторы с карбидом урана UC .

Ядерные реакторы по энергетическому спектру нейтронов в активной зоне делятся на [2, 11]:

- реакторы на тепловых (медленных) нейтронах, называемые «тепловыми реакторами»;
- реакторы на быстрых нейтронах, называемые «быстрыми реакторами»;
- реакторы на промежуточных нейтронах;
- реакторы на нейтронах со смешанным энергетическим спектром.

Ядерные реакторы по виду теплоносителя в их активной зоне подразделяются на [2, 11]:

- реакторы с легкой водой H_2O , называемые «водо-водяными ядерными реакторами»;
- реакторы с тяжелой водой D_2O , называемые «тяжеловодными ядерными реакторами»;
- реакторы с газом в активной зоне, называемые «графито-газовыми ядерными реакторами»;
- реакторы с жидкометаллическим теплоносителем (например, с натрием, жидкой смесью свинца с висмутом);

- реакторы с органическим теплоносителем;
- реакторы с твердым теплоносителем;
- реакторы на расплавах ряда солей (например, фторидов урана).

Ядерные реакторы по роду применяемого в их зоне замедлителя нейтронов делятся на [2, 11]:

- реакторы с графитом С, выполняемые как «графито-водные и графито-газовые реакторы»;
- реакторы с легкой водой H_2O , выполняемые как «легководные и водо-водяные реакторы»;
- реакторы с тяжелой водой D_2O , выполняемые как «тяжеловодные реакторы»;
- реакторы с металлическим бериллием Ве (могут изготавливаться и с оксидом бериллия BeO);
- реакторы с гидридами ряда металлов;
- реакторы без замедлителя, называемые «реакторами на быстрых нейтронах».

Ядерные реакторы по способу генерации в них пара теплоносителя различаются на [2, 11]:

- реакторы с внешним парогенератором, выполняемые как «водо-водяные реакторы» (например, двухконтурные реакторы типа ВВЭР-1000);
- реакторы с внутренней генерацией пара, выполняемые как «кипящие реакторы» (например, одноконтурные реакторы типа РБМК-1000).

Ядерные реакторы по характеру своего назначения и использования подразделяются на [2, 11]:

- энергетические реакторы, применяемые для получения электроэнергии и тепловой энергии (именно эти реакторы и устанавливаются на АЭС);
- транспортные реакторы, размещаемые на транспортных средствах передвижения (например, на подводных лодках военного назначения);
- промышленные реакторы, применяемые для работы оружейного изотопа плутония ${}_{94}^{239}Pu$ и производства радиоактивных изотопов, используемых в различных областях (например, в медицине);
- исследовательские реакторы, в которых генерируемые в их активных зонах потоки нейтронов и гамма-квантов используются для изучения поведения различных веществ применительно к задачам ядерной физики, физики твердого тела, радиационной химии, радиобиологии и радиологии;
- экспериментальные реакторы, предназначенные для определения в условиях интенсивных нейтронных и тепловых полей различных физико-технических свойств конструкционных материалов, необходимых для проектирования и эксплуатации на АЭС и ядерных производствах специального назначения новых конструкций ядерных реакторов.

Как видим, ядерные реакторы характеризуются широкой гаммой своей классификации. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) использует следующую классификацию основных типов энергетических ядерных реакторов на АЭС [2, 12]:

- PWR (pressurized water reactor) – реактор с водой под давлением, в котором легкая вода H_2O является и теплоносителем и замедлителем (например, «водо-водяной реактор» типа ВВЭР-1000);
- LWGR (light water graphite reactor) – реактор с легкой водой H_2O в качестве теплоносителя и с графитом в качестве замедлителя (например, «графито-водный реактор» типа РБМК-1000);
- BWR (boiling water reactor) – «кипящий реактор», в котором образование водяного пара, подаваемого по

одноконтурной цепи на паровую турбину, происходит непосредственно в реакторе;

- GCR (gas-cooled reactor) – «газоохлаждаемый реактор», в котором в качестве теплоносителя используется газ, а замедлителя – блочный графит;
- FBR (fast breeder reactor) – «реактор на быстрых нейтронах», не требующий наличия замедлителя в активной зоне и использующий жидкометаллический теплоноситель (обычно натрий) в первом контуре, а во втором контуре – легкую воду H_2O ;
- HTGR (high-temperature gas-cooled) – «высокотемпературный газоохлаждаемый реактор»;
- PHWR (pressurised heavy water reactor) – реактор с тяжелой водой D_2O в качестве замедлителя и теплоносителя («тяжеловодный реактор»);
- HWGCR (heavy-water-moderated, gas-cooled reactor) – реактор, в котором в качестве теплоносителя применяется газ, а в качестве замедлителя – тяжелая вода D_2O («газоохлаждаемый реактор с тяжеловодным замедлителем»);
- HWLWR (heavy-water-moderated, boiling light-water-cooled reactor) – реактор, в котором в качестве замедлителя и кипящего теплоносителя используется тяжелая вода D_2O («кипящий реактор с замедлителем из тяжелой воды»);
- PBMR (pebble bed modular reactor) – модульный реактор с шаровыми конструкциями его ТВЭЛ.

В ядерной энергетике и на мощных АЭС различных стран мира наибольшее распространение получили «водо-водяные ядерные реакторы» (до 62 %) и «кипящие ядерные реакторы» (до 20 %) [2, 8].

1.1.2. Топливо для ядерных реакторов АЭС Украины.

До 2011 г. ядерное топливо (урановые сборки ТВС с ТВЭЛ) для всех АЭС Украины поставлялось российской компанией «ТВЭЛ» [13]. В 2008 г. наша страна взяла курс на диверсификацию поставок ядерного топлива для своих АЭС. С этой целью в том же году был заключен договор с компанией «Westinghouse Electric Company» (США) на поставку ею в Украину в течение 2011-2015 гг. 630 штук урановыхборок ТВС для 3-х мощных энергоблоков отечественных АЭС с ядерными реакторами типа ВВЭР-1000 [13]. В апреле 2012 г. опытная эксплуатация урановых ТВС производства американской компании «Westinghouse Electric Company» на 3-м энергоблоке Южно-Украинской АЭС выявила ряд серьезных конструкционных ошибок в данных сборках ТВС, нанесших украинской стороне убытки на сумму около 175 миллионов \$ USA [13]. Эксплуатация указанного энергоблока Южно-Украинской АЭС была продолжена лишь после установки на нем вместо поврежденных американскихборок ядерного топлива новыхборок ТВС с ТВЭЛ производства РФ. По данным Госстата Украины за период января-октября 2015 г. объем импорта ядерного топлива в нашу страну составил 504 миллиона \$ USA, включая поставки из РФ на сумму 471 миллион \$ USA (94 %) и Швеции (от завода-поставщика компании США «Westinghouse Electric Company») – на сумму 33 миллиона \$ USA (6 %) [13]. В настоящее время всемирно известная российская компания «ТВЭЛ» остается основным поставщиком ядерного топлива для наших АЭС, обеспечивая не менее 90 % от необходимых потребностей Украины в этом топливе. По состоянию на декабрь 2016 г. ядерное топливо компания «Westinghouse Electric Company» (США) поставляла в ограниченном

объеме лишь для 3-го энергоблока Южно-Украинской АЭС и 5-го энергоблока Запорожской АЭС [13].

1.1.3. Утилизация и хранение отработанного ядерного топлива на АЭС Украины. В процессе работы ядерного реактора из-за накопления в его урановом топливе осколков деления изменяется его изотопный и химический состав и происходит образование трансурановых элементов (в основном изотопов плутония ^{244}Pu) [2, 11]. Отработанное ядерное топливо (ОЯТ) в активной зоне реактора на АЭС подлежит из-за своего остаточного тепловыделения сравнительно длительному хранению. Данное остаточное тепловыделение в ОЯТ является следствием гамма- и бета-распадов в радиоактивных продуктах деления ядерного топлива, накопившихся в сборках ТВС с ТВЭЛ за время работы ядерного реактора. В ОЯТ возбужденные ядра указанных продуктов деления вследствие своего радиоактивного распада переходят в более стабильное или полностью стабильное состояние с выделением значительной тепловой энергии. В этой связи остаточное тепловыделение в ОЯТ является для работающих АЭС важной проблемой, напрямую связанной с их ядерной безопасностью. Для решения этой неизбежной проблемы на АЭС должны размещаться специальные сухие или мокрые хранилища ОЯТ, в которых последнее при определенном температурном режиме должно пребывать достаточно длительное время (например, до 3-4 лет в их водяных бассейнах выдержки) [2]. С 2001 г. в Украине действует только одно сухое хранилище ОЯТ на Запорожской АЭС. У нас имеется также и одно мокрое хранилище ОЯТ в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС, которое не способно принимать ОЯТ даже от своих АЭС на долговременное хранение [2]. В настоящее время только две страны мира – Россия и Франция обладают технологиями переработки ОЯТ. Поэтому сейчас ОЯТ с Хмельницкой, Ровенской и Южно-Украинской АЭС вывозится на хранение и переработку в РФ. Такие технологические процедуры обходятся в Украине ежегодно в (150-200) миллионов \$ USA [13].

В связи с высокой стоимостью хранения ОЯТ на территории РФ и принятыми обязательствами Украины перед МАГАТЭ в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС намечается строительство Центрального хранилища ОЯТ [13]. С сентября 2016 г. техническая документация на сооружение в Украине такого сухого большого хранилища ОЯТ проходит международную экспертизу. Создание подобного хранилища ОЯТ позволит отечественным АЭС диверсифицировать утилизацию радиоактивных отходов от своих реакторов.

1.1.4. Безопасность АЭС и их ядерных реакторов. В настоящее время высокая степень безопасности АЭС во многих странах мира обеспечивается следующими основными защитными факторами [13, 14]:

- принципом самозащитенности ядерного реактора АЭС (композиция активной зоны реактора и физика протекающих в ней ядерных процессов на основе естественных обратных связей за счет возникновения эффекта «отрицательной реактивности» должны обеспечивать его саморегулирование);
- наличием на реакторах АЭС аварийной защиты и ряда барьеров радиационной безопасности;
- многократным дублированием на АЭС каналов безопасности и применением систем безопасности как активного (требующих вмешательства обслуживающего персонала и наличия источника энергоснабжения), так и пассивного (не требующих вмешательства

обслуживающего персонала и наличия источника энергоснабжения) защитного характера;

- использованием высокостойких к воздействию интенсивных радиационных и тепловых полей материалов, электротехнических устройств, технологических систем и систем управления (включая их аппараты и кабельно-проводниковую продукцию);
- внедрением культуры безопасности (от момента выбора площадки под строительство АЭС до периода ее пуска и во время ее эксплуатации).

Ядерные реакторы, оставшиеся на работающих энергоблоках АЭС Украины, относятся к реакторам типа ВВЭР, из которых два – типа ВВЭР-440 (с установленной мощностью 440 МВт) и 13 типа ВВЭР-1000 (с установленной мощностью 1000 МВт) [13]. Эти реакторы имеют двухконтурные схемы (см. рис. 2), которые являются принципиально более безопасными по сравнению с одноконтурной схемой реактора японской АЭС «Фукусима-1» [8]. В первом контуре реактора типа ВВЭР из-за высокого в нем давления нет насыщенного пара. Поэтому риск «оголения» (оставления без теплоносителя) и перегрева его ядерного топлива принципиально ниже, чем в одноконтурном реакторе. Система радиационной безопасности современных АЭС Украины и РФ (необходимо не упускать из виду того, что отечественные АЭС и их ядерные реакторы являются российскими разработками) включает четыре основных барьера на пути распространения ионизирующих излучений и радиоактивных веществ в окружающую среду [13, 14]:

- топливную матрицу, предотвращающую выход продуктов деления под оболочку ТВЭЛ;
- циркониево-стальную оболочку ТВЭЛ, не дающую продуктам деления топлива попасть в теплоноситель главного циркуляционного контура;
- главный циркуляционный контур (1-й контур), препятствующий выходу продуктов деления под защитную герметичную оболочку реактора;
- систему защитных герметичных оболочек («контейнмент») реактора, исключающую выход продуктов ядерного деления в окружающую среду.

На рис. 10 приведена упрощенная схема контейнмента ядерного реактора типа ВВЭР-1000 [14].

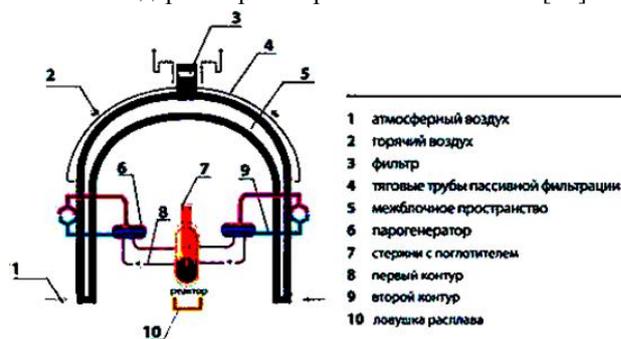


Рис. 10. Схема защитных герметичных оболочек ядерного реактора типа ВВЭР-1000 на отечественных АЭС [14]

Укажем, что контейнмент ядерного реактора типа ВВЭР-1000 объемом до 75 тысяч м^3 , выполненный из предварительно напряженного бетона с металлическими тросами, механически рассчитан как на внешнее силовое воздействие (например, на падение на него летательного аппарата со скоростью до 200 м/с и массой до 5 тонн), так и на внутреннее действие ско-

пившихся в аварийном режиме в зоне реактора газов избыточным давлением до 5 атм [14]. Кроме того, этот контейнмент ядерного реактора типа ВВЭР способен выдержать воздействие ударной воздушной волны с давлением на ее фронте до 30 кПа, сейсмическое воздействие от расчетного землетрясения с интенсивностью до 8 баллов по шкале MSK-64 и воздействие урагана со скоростью ветра до 56 м/с [14].

Для случая возникновения на ядерном реакторе типа ВВЭР-1000 тяжелой аварии (например, разрыв трубопровода первого контура охлаждения его активной зоны), ее локализации и ликвидации на нем имеется система аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ), содержащая над реактором специальные емкости с борной кислотой [14]. Каждая емкость объемом 60 м³ указанной системы САОЗ реактора представляет собой толстостенный (толщиной 90 мм) цилиндрический сосуд из двухслойной плакированной стали диаметром до 3175 мм, работающий под давлением в 60 атм [14]. Быстрая доставка содержимого указанных емкостей САОЗ внутрь активной зоны ядерного реактора приводит к гашению в ней большим количеством борсодержащего вещества, хорошо поглощающего быстрые и медленные нейтроны, цепных ядерных реакций в ТВС и к выведению реактора на минимальную тепловую мощность. В дальнейшем согласно действующим на АЭС правилам к охлаждению активной зоны аварийного реактора должна подключаться система его аварийного расхолаживания [14]. Используемый на АЭС принцип глубоководной защиты ее ядерных реакторов предполагает также наличие такой концепции ядерной безопасности, которая предусматривает не только средства предотвращения аварий, но и средства управления последствиями запроектных аварий, обеспечивающих локализацию радиоактивных веществ в пределах контейнмента. К таким средствам относится [14]:

- система удаления водорода (с пассивными рекомбинаторами), скопившегося в объеме, занимаемом защитными герметичными оболочками;
- система защиты первого контура реактора от превышения в его трубопроводах давления;
- система отвода тепла от парогенераторов;
- система отвода тепла от конструкций защитных герметичных оболочек ядерного реактора;
- устройство локализации расплава активной зоны («ловушка»), размещаемое под реактором.

Аварийная защита ядерного реактора АЭС состоит из совокупности устройств, предназначенных для быстрого прекращения цепной ядерной реакции в активной зоне реактора. Данная защита автоматически срабатывает при достижении одним из параметров ядерного реактора значения, которое может привести к его аварии. В качестве таких параметров могут выступать [2]: температура, давление и расход теплоносителя (в первом радиоактивном контуре реактора типа ВВЭР), уровень и скорость увеличения мощности реактора. В большинстве случаев исполнительными элементами активной аварийной защиты ядерного реактора на АЭС являются стержни с веществом, хорошо поглощающим нейтроны (например, бором или кадмием). Иногда для остановки ядерного реактора используется жидкий поглотитель, впрыскиваемый под давлением в его радиоактивный контур теплоносителя. Дополнительно к активной аварийной

защите на современных ядерных реакторах предусматриваются и системы их пассивной аварийной защиты (например, указанная система САОЗ) [14].

В соответствии с действующими в Украине и РФ «Правилами ядерной безопасности реакторных установок атомных станций», по крайней мере, одна из предусмотренных систем остановки реактора должна выполнять функцию аварийной защиты ядерного реактора АЭС [12-16]. Аппаратура аварийной защиты ядерного реактора АЭС при этом должна состоять, как минимум, из двух независимых штатных комплектов. Каждый комплект аппаратуры аварийной защиты реактора должен быть спроектирован таким образом, чтобы во всем диапазоне изменения технологических параметров, установленном в проекте реакторной установки АЭС, обеспечивалась аварийная защита не менее чем тремя независимыми каналами по каждому технологическому параметру, по которому необходимо осуществлять защиту [15, 16].

Важно отметить, что на всех АЭС Украины и РФ установлены автоматические системы контроля радиационной обстановки (АСКРО), фиксирующие с помощью сети датчиков уровень радиации вокруг радиационно опасных объектов АЭС в реальном масштабе времени. Показания приборов АСКРО передаются на специальный сайт всемирной сети Интернет.

1.2. Крупнейшие АЭС мира. Отметим, что если в 1978 г. в мире на АЭС работало около сотни ядерных реакторов различных типов и мощностей, то в апреле 2017 г. количество действовавших (с учетом временно остановленных) в промышленно развитых странах мира ядерных энергоблоков АЭС составляло уже 451 [2]. Крупнейшей действующей АЭС в Европе является Запорожская АЭС (г. Энергодар, Запорожская обл., Украина) с установленной мощностью 6000 МВт, строительство которой началось в 1980 г. [8]. В составе этой АЭС с 1996 г. работает шесть мощных двухконтурных энергоблоков с «водо-водяными ядерными реакторами» типа ВВЭР-1000 (см. рис. 8). Крупнейшая в мире АЭС по установленной мощности величиной 8212 МВт находится в г. Касивадзаки (префектура Ниигата, Япония) [8]. Она имеет пять «кипящих ядерных реакторов» (типа BWR по классификации МАГАТЭ) и два улучшенных «кипящих ядерных реактора» типа ABWR [2, 8]. Однако, с 2011 г. данная АЭС не генерирует электричество в сеть. Поэтому на сегодня крупнейшей в мире действующей АЭС является южнокорейская АЭС «Кори», имеющая семь мощных энергоблоков с «водо-водяными реакторами» (типа PWR по шкале МАГАТЭ) с установленной мощностью 6862 МВт [8].

1.3. Выработка электроэнергии на АЭС в мире. По состоянию на 31 декабря 2015 г. АЭС мира в суммарном объеме выработали около 2477 ТВт·ч электроэнергии за год, что составило около 10,7 % от всемирной генерации электричества [8]. Годовой «пик» производства электроэнергии на АЭС всего мира был зафиксирован в 2006 г., составивший 2660 ТВт·ч. Доля ядерной энергетики в глобальном годовом производстве на нашей планете электричества в 2015 г. по сравнению с 1996 г. снизилась с 17,6 % до 10,7 %. Мировыми лидерами по объему производства на АЭС электроэнергии на 2016 г. являлись [8]:

- США (805,3 млрд. кВт·ч/год; на АЭС работало 99 ядерных реакторов, генерирующих до 19,7 % от вырабатываемой в стране электроэнергии);

- Франция (384,0 млрд. кВт·ч/год; на АЭС работало 58 реакторов, генерирующих до 72,3 % от вырабатываемой в стране электроэнергии);
- Китай (210,5 млрд. кВт·ч/год; на АЭС работало 36 ядерных реакторов, генерирующих до 3,6 % от вырабатываемой в стране электроэнергии), осуществляющий в настоящее время самую масштабную в мире программу строительства новых АЭС;
- Россия (179,7 млрд. кВт·ч/год; на АЭС работало 37 ядерных реакторов, генерирующих до 17,1 % от производимой в стране электроэнергии);
- Южная Корея (154,3 млрд. кВт·ч/год; на АЭС работало 25 ядерных реакторов, генерирующих до 30,3 % от вырабатываемого в стране суммарного объема электроэнергии);
- Канада (97,4 млрд. кВт·ч/год; на АЭС работало 19 ядерных реакторов, генерирующих до 15,6 % от вырабатываемой в стране электроэнергии);
- Украина (81,0 млрд. кВт·ч/год; на АЭС работало 15 мощных ядерных реакторов типа ВВЭР (PWR), генерирующих до 52,3 % от вырабатываемого в стране общего объема электроэнергии);
- Германия (80,1 млрд. кВт·ч/год; на АЭС работало 8 ядерных реакторов, генерирующих до 13,1 % от вырабатываемой в стране электроэнергии);
- Великобритания (65,1 млрд. кВт·ч/год; на АЭС работало 15 мощных ядерных реакторов, генерирующих до 20,4 % от вырабатываемого в стране общего объема электроэнергии);
- Швеция (60,6 млрд. кВт·ч/год; на АЭС работало 10 ядерных реакторов, генерирующих до 40 % от вырабатываемой в стране электроэнергии; государственная программа по отказу от ядерной энергетики в стране была приостановлена).

Из приведенных выше количественных данных для АЭС ряда стран видно, что практически половина всемирной годовой выработки электроэнергии на АЭС приходится всего на две страны мира – США и Францию. Сейчас АЭС использует 31 страна мира [8]. Подавляющее число действующих АЭС находится в странах Европы, Северной Америки, Дальневосточной Азии и на территории независимых стран, образовавшихся от распада в 1991 г. бывшего СССР [2, 8].

1.4. Ядерная энергетика Украины. В настоящее время в Украине электроэнергию вырабатывают 15 энергоблоков четырех мощных АЭС с ядерными реакторами типа ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 [13]: Запорожской, Ровенской, Хмельницкой и Южно-Украинской (четыре мощных энергоблока с реакторами типа РБМК-1000 Чернобыльской АЭС завершили свою работу: в 1986 г. – 4-й энергоблок; в 1991 г. – 2-й энергоблок; в 1996 г. – 1-й энергоблок; в 2000 г. – 3-й энергоблок). По количеству энергетических ядерных реакторов (все типа ВВЭР – «водо-водяные реакторы» или типа PWR по классификации МАГАТЭ) Украина занимает 5-е место в Европе и 10-е место в мире [13]. Укажем, что Украина 12 энергоблоков на своих АЭС унаследовала от бывшего СССР. За время независимости нашей страны были достроены и введены в эксплуатацию три энергоблока АЭС (в 1995 г. и 2000 г.), готовых более чем на 80 % еще при бывшем СССР. Общая электрическая мощность всех АЭС Украины в 2016 г. равнялась около 130 ТВт. Как было указано выше вклад ядерной энергетики Украины в 2016 г. в годовой энергетический баланс составил

около 52,3 % от суммарного объема производства электроэнергии в стране. Начиная с осени 2014 г., выработка электроэнергии на АЭС в Украине превысила 50 % от ее общей выработки, что было связано со снижением мощностей отечественной теплоэнергетики из-за боевых действий в зоне АТО на Донбассе и нехваткой каменного угля необходимых марок для тепловых электрических станций (ТЭС) страны [13].

В табл. 1 приведены основные данные об отечественных АЭС, вырабатывающих электричество.

Таблица 1
Данные про мощные ядерные реакторы и энергоблоки АЭС Украины [13]

| Название АЭС | Энерго-блок | Тип реактора | Мощность, МВт | Топливо |
|-----------------|-------------|--------------|---------------|-----------|
| Запорожская | 1 | ВВЭР-1000 | 1000 | ТВЭЛ |
| | 2 | ВВЭР-1000 | 1000 | ТВЭЛ |
| | 3 | ВВЭР-1000 | 1000 | ТВЭЛ |
| | 4 | ВВЭР-1000 | 1000 | ТВЭЛ |
| | 5 | ВВЭР-1000 | 1000 | ТВЭЛ+ WH* |
| | 6 | ВВЭР-1000 | 1000 | ТВЭЛ |
| Ровенская | 1 | ВВЭР-440 | 440 | ТВЭЛ |
| | 2 | ВВЭР-440 | 440 | ТВЭЛ |
| | 3 | ВВЭР-1000 | 1000 | ТВЭЛ |
| | 4 | ВВЭР-1000 | 1000 | ТВЭЛ |
| Хмельницкая | 1 | ВВЭР-1000 | 1000 | ТВЭЛ |
| | 2 | ВВЭР-1000 | 1000 | ТВЭЛ |
| | 3 | ВВЭР-1000 | Законсервир. | ТВЭЛ |
| | 4 | ВВЭР-1000 | Законсервир. | ТВЭЛ |
| Южно-Украинская | 1 | ВВЭР-1000 | 1000 | ТВЭЛ |
| | 2 | ВВЭР-1000 | 1000 | ТВЭЛ |
| | 3 | ВВЭР-1000 | 1000 | ТВЭЛ+ WH* |
| | 4 | ВВЭР-1000 | Законсервир. | ТВЭЛ |

Прим*. В табл. 1 в колонке «Топливо» символы WH обозначают частичное применение урановых сборок ТВС компании США «Westinghouse Electric Company» одновременно со сборками ТВС на ТВЭЛ России [13].

Из данных табл. 1 видно, что в настоящее время два мощных энергоблока Хмельницкой (№3 и №4) и один мощный энергоблок (№4) Южно-Украинской АЭС законсервированы и все строительные работы на них «заморожены». Хочется надеяться, что с созданием через ряд лет в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС Центрального сухого хранилища ОЯТ определенная часть Украина не превратится в большую радиоактивную «свалку» как собственных ядерных отходов, так и ядерных отходов от АЭС, поставляемых в Украину из Европы и Северной Америки.

На рис. 11-13 приведены соответственно общие виды Южно-Украинской АЭС, машинного зала одного из ее мощных энергоблоков и одного из ее блочных щитов управления (БЩУ) [17]. Данной отечественной АЭС, расположенной на живописном берегу реки Южный Буг на высоте 130 м над уровнем Балтийского моря, не грозят ни сильные землетрясения, ни цунами. Проект технических сооружений этой отечественной АЭС и ее ядерных установок предусматривает защиту от всевозможных природных катаклизмов и ударных воздействий различных внешних факторов (например, падающего самолета) [17].

Протекание цепных ядерных реакций в урановых сборках ТВС с ТВЭЛ и частично с выделяющими ядерную и тепловую энергию урановыми элементами компании США «Westinghouse Electric Company» (на 3-ем энергоблоке станции) каждого из трех работающих энергоблоков с мощными реакторами типа ВВЭР-1000 на данной АЭС Украины четко контролируется с БЩУ (см. рис. 13) при помощи системы СУЗ.



Рис. 11. Общий вид фрагмента Южно-Украинской АЭС суммарной установленной мощностью 3000 МВт (г. Южноукраинск, Николаевская обл., Украина) [17]



Рис. 12. Общий вид машинного зала энергоблока тепловой мощностью 1000 МВт Южно-Украинской АЭС [17]



Рис. 13. Общий вид БЩУ (отдельного специфического «командного пункта») одного из энергоблоков с тепловой мощностью 1000 МВт на Южно-Украинской АЭС [17]

Опуская и поднимая при помощи системы СУЗ специальные стержни из бора, активно поглощающие нейтроны в активной зоне ядерного реактора типа ВВЭР-1000, оперативный персонал энергоблоков этой АЭС может замедлять или ускорять цепные ядерные реакции в его урановых сборках ТВС с ТВЭЛ. Высоко-

надежная система СУЗ на каждом мощном энергоблоке рассматриваемой отечественной АЭС позволяет по команде с БЩУ вообще остановить работу соответствующего ядерного реактора («заглушить» реактор) [2, 17]. Читателю необходимо помнить, что вывод ядерного реактора на минимальную тепловую мощность (его остановка) приводит к его «отравлению».

В ядерной физике состояние атомного реактора после его остановки и «отравления» получило название «иодной ямы» [2]. Данное ненормальное состояние реактора характеризуется накоплением в его активной зоне короткоживущего радиоактивного изотопа ксенона ^{135}Xe (с периодом полураспада 9,2 ч), который, в свою очередь, является продуктом радиоактивного распада промежуточного изотопа йода ^{135}I (с периодом полураспада 6,8 ч) [2, 11]. Из-за того, что изотоп ксенона ^{135}Xe обладает наибольшим сечением поглощения нейтронов (до $2,6 \cdot 10^6$ барн [1, 2]) ядерный реактор в состоянии «иодной ямы» теряет свою реактивность ρ_p (она становится отрицательной) и соответственно тепловую мощность. Это делает затруднительным вывод реактора на проектную мощность в течение времени, измеряемом (1-2) сутками [2, 8]. В этой связи такие состояния для ядерного реактора АЭС являются нежелательными. Поэтому производить кратковременные остановки реактора на АЭС и колебания его выходной тепловой мощности нельзя. Допускается осуществлять остановку ядерного реактора только в случае аварийного режима, предусмотренного соответствующими Правилами (см. п. 1.1.4).

1.5. Вредное воздействие АЭС на окружающую среду. Для лучшего понимания рассматриваемой актуальной для Украины экологической проблемы, связанной с ядерной энергетикой, читателю необходимо напомнить, что, например, каждый мощный реактор типа ВВЭР-1000 на отечественных АЭС при своей полной загрузке ядерным топливом содержит 54 урановые сборки ТВС общей массой в 41 тонну при суммарном числе в них ТВЭЛ, составляющим 48 тысяч штук [8]. В подобном ядерном реакторе современной АЭС из уранового топлива ТВС с ТВЭЛ посредством ядерных превращений образуется примерно 300 видов радионуклидов, из которых более 30 в качестве газоаerosольных выбросов с объема его контайнмента, несмотря на имеющиеся в нем соответствующие защитные фильтры, могут попасть в воздушную атмосферу [8]. Среди них такие радиоактивные вещества как [11]: изотоп цезия ^{137}Cs (с периодом полураспада 30 лет), изотоп йода ^{131}I (с периодом полураспада 8 суток), изотоп йода ^{133}I (с периодом полураспада 20,8 ч) и изотоп ксенона ^{138}Xe (с периодом полураспада 17 мин). Заметим, что эксплуатационным регламентом, действующим на АЭС Украины и РФ, допускается наличие в активной зоне ядерного реактора до 1 % ТВЭЛ с поврежденной защитной циркониево-стальной обложкой (для двухконтурного «водо-водяного» энергетического реактора типа ВВЭР-1000 это составляет около 480 ТВЭЛ) [2, 8]. Через микротрещины в ТВЭЛ и в процессе извлечения ТВЭЛ из реактора при их периодической замене радионуклиды могут попадать в водяной теплоноситель первого контура и в воздух под куполом контайнмента. Поэтому указанный выше наиболее безопасный мощный ядерный реактор типа ВВЭР-1000 в год образует около 40 тысяч кюри (активность в 1 кюри (Ки) равна $3,7 \cdot 10^{10}$ беккерелей (Бк), являющихся ее единицей

исчисления в системе СИ [1]) газообразных радиоактивных выбросов [8]. Большинство из них быстро распадается и удерживается защитными фильтрами контайнмента. Отметим, что под активностью радиоактивного вещества в атомной физике понимается число распадов его ядер в одну секунду. Для сравнения следует заметить, что одноконтурные мощные реакторы типа РБМК-1000 производят на АЭС радиоактивных газообразных выбросов на практически порядок больше, чем двухконтурные мощные реакторы типа ВВЭР-1000 [8]. Среднесуточный выброс радиоактивных газов и аэрозолей на Курской АЭС, до сих пор использующей реакторы типа РБМК-1000, составлял в период 1981-1990 гг. до 750 кюри на одну реакторную установку (при этом годовой радиоактивный показатель подобных выбросов достигал уровня до 274 тысяч кюри) [8]. Укажем, что большая часть радиоактивности газоаэрозольных выбросов на АЭС генерируется короткоживущими радионуклидами и без особого ущерба для окружающей среды распадается за несколько часов или дней. Необходимо указать и то, что АЭС кроме обычных газообразных выбросов время от времени наполняют окружающую их воздушную атмосферу и далее загрязняют близлежащие территории небольшим количеством опасных для здоровья человека радионуклидов – продуктами коррозии корпуса реактора и его первого контура, а также осколками деления ядер изотопа урана ^{235}U . Эти радионуклиды прослеживаются на несколько десятков километров вокруг любой АЭС.

1.6. Преимущества и недостатки ядерной энергетики. Основными достоинствами АЭС перед другими конкурирующими с ними мощными промышленными источниками электрической и тепловой энергии для человечества на сегодня являются [8]:

- практическая независимость от источников размещения топлива из-за сравнительно небольшого объема потребляемого любой АЭС ядерного топлива (например, для реактора типа ВВЭР-1000 на 1,5 года его эксплуатации в составе мощного энергоблока требуется всего около 41 тонны диоксида урана UO_2 , входящего в состав ТВС с ТВЭЛ; в тоже время, например, для Змиевской ТЭС установленной мощностью 2200 МВт только в течение 1 суток требуется два железнодорожных состава каменного угля [7]);

- относительная экологическая чистота по сравнению с ТЭС (суммарные годовые выбросы в окружающую среду таких вредных веществ как сернистого газа, оксидов азота, оксидов углерода, углеводородов, альдегидов и золы пыли на 1000 МВт установленной мощности на пылеугольных ТЭС составляют около 165 тысяч тонн; ТЭС на 1000 МВт ее мощности потребляет из атмосферы около 8 миллионов тонн кислорода O_2 в год, а АЭС при своей работе атмосферного кислорода O_2 не потребляет вообще);

- более высокая способность противостояния энергетическим кризисным ситуациям в обществе и соответственно удержания объема и стоимости производимой электроэнергии на приемлемом для ее потребителей уровне (повышение в мире цен на уголь, газ и нефть повышает конкурентоспособность АЭС).

Основными недостатками АЭС являются [8]:

- тяжелые последствия для окружающей среды и населения от крупных аварий и катастроф на мощных ядерных реакторах АЭС (для исключения подобных ситуаций современные АЭС оборудуются сложными

системами ядерной и радиационной безопасности их ядерных установок с резервированием и многократными запасами стойкости их конструкций к высокой радиации и температуре, исключая активную зону реактора даже в случае максимальной проектной аварии);

- большие затраты финансовых средств на ликвидацию технических сооружений АЭС и ее энергоблоков после выработки их ядерными реакторами своего рабочего ресурса (по экспертным оценкам эти затраты составляют до 20 % от стоимости строительства АЭС; проблема продления ресурса энергоблоков АЭС является острой не только для ядерной энергетики Украины, но и всех других стран мира, использующих АЭС для получения электричества [18]);

- невозможность маневренных режимов работы ядерных энергетических реакторов АЭС, покрывающих возникающие «пики» и сглаживающих «провалы» на графиках их электрической нагрузки;

- более высокие финансовые затраты на строительство АЭС по сравнению с ТЭС аналогичной установленной мощности (например, для АЭС данные затраты составляют около 2300 \$ USA за 1 кВт электрической мощности их энергоблоков, а для пылеугольных ТЭС – примерно 1200 \$ USA за 1 кВт электрической мощности энергоблоков таких станций).

2. Основные проблемы, тенденции и перспективы развития АЭС в мире и Украине. Имеющиеся на сегодня проблемы в области мировой ядерной энергетики, активно занимающейся промышленным производством электроэнергии и тепловой энергии путем сложного и опасного для жизнедеятельности человека технологического использования атомной энергии ряда делящихся радиоактивных материалов (например, изотопа урана ^{235}U и изотопа плутония ^{239}Pu [1]), можно свести к следующим [2, 8]:

- проблеме разработки и создания для АЭС более совершенных по своей энергетической эффективности, ядерной и радиационной безопасности мощных ядерных установок с КПД более 35 %;

- проблеме минимизации возникновения на мощных ядерных установках АЭС аварий, приводящих к тяжелым последствиям для целых регионов страны и народов соседних с ней государств;

- проблеме утилизации и переработки ОЯТ от мощных ядерных реакторов АЭС на территории тех стран, где данные ядерные отходы были получены;

- проблеме наличия замкнутого ядерного цикла на территории тех стран, которые активно применяют мощные ядерные установки для промышленного производства электричества и тепла в больших объемах, соизмеримых с объемами выработки указанных видов энергии их теплоэнергетикой, использующей органические виды топлива (эта проблема особенно актуальна для Украины, которая в меру своих ограниченных финансовых ресурсов пытается из года в год постепенно подходить к ее решению, используя даже такой трудный путь как уход от прямой кабанной зависимости от РФ в вопросах сохранения и дальнейшего развития собственной ядерной энергетики и диверсификации поставок на отечественные АЭС урановых сборок ТВС с ТВЭЛ других стран мира);

- проблеме продления ресурса энергоблоков АЭС и соответственно ресурса ядерных реакторов.

В мировой ядерной энергетике наблюдается тенденция старения ядерных реакторов. По данным

МАГАТЭ средний «возраст» действующих ядерных реакторов на АЭС мира составляет 29 лет [8]. Самый «старый» в мире действующий реактор находится сейчас в Швейцарии, который надежно работает вот уже в течение 47 лет. Отметим, что нормативный срок эксплуатации ядерных энергоблоков АЭС устанавливается правительством конкретной страны на основании проектного ресурса работы их реакторов того или иного типа. Обычно этот срок равен от 30 до 40 лет [8]. В Украине и РФ нормативный срок эксплуатации большинства их типов энергоблоков АЭС составляет 30 лет [8, 18]. Известно, что продление срока эксплуатации энергоблока АЭС является весьма экономически эффективной мерой. Так, при финансовых затратах на продление срока службы мощного ядерного «водо-водяного реактора» типа ВВЭР-1000 (по шкале МАГАТЭ типа PWR) на 20 лет примерно в 90 миллионов \$ USA возможная прибыль от его эксплуатации на АЭС в течение такого дополнительного срока может составить около 1,3 миллиардов \$ USA [8, 19]. В Украине и РФ эксплуатация двухконтурных водородных ядерных реакторов типа ВВЭР первого поколения и одноконтурных ядерных реакторов типа РБМК уже продлена до 45 лет, а ядерных реакторов типа ВВЭР второго поколения – до 55 лет [2, 8, 19].

В условиях сравнительно быстро надвигающегося в мире энергетического «голода» и истощения в земной коре нашей планеты запасов углеводородного топлива (по экспертным оценкам углеводородов для ТЭС всего мира хватит лишь на ближайшие 50-100 лет [6]) и практической неисчерпаемости в ней запасов радиоактивного урана у ядерной энергетики имеются реальные перспективы для ее дальнейшего развития. Альтернативная энергетика (ветроэнергетика, гелиоэнергетика, водородная энергетика, геотермальная энергетика, биогазовая энергетика и малая гидроэнергетика) пока серьезной конкуренции традиционной энергетике (теплоэнергетике, ядерной энергетике и гидроэнергетике) оказать не в состоянии. Учитывая ряд указанных выше явных преимуществ ядерной энергетики перед другими хорошо известными видами современных технологий выработки электричества и тепловой энергии, в настоящее время, несмотря на имеющееся ограничение мирного использования атомной энергии в ряде стран мира (например, в Италии, Германии, Швеции и США [20]), вполне обоснованно можно говорить о том, что в ближайшем будущем человечество продолжит для целей получения электроэнергии и тепла в промышленных масштабах активно использовать возможности атомной энергии.

Выводы. Выполненный краткий аналитический научно-технический обзор ретроспективы, современного состояния, основных достижений, тенденций и перспектив развития мировой ядерной энергетики указывает на колоссальный прорыв знаний человечества об устройстве микромира материи и ограниченные на сегодня его возможности в мирном использовании неисчерпаемых запасов ее внутриядерной энергии. Мировая ядерная энергетика находится сейчас на трудном и сложном научно-техническом пути своего «взросления» (прошло лишь немногим более 60 лет с момента ввода в эксплуатацию первой в мире АЭС) и демонстрации энергетических возможностей этой новой для людей прогрессивной промышленной технологии получения электрической и тепловой энергий в огромных объемах.

Ядерная энергетика, как и любая другая прогрессивная промышленная технология, имеет свои «плюсы» и «минусы» для человеческого общества и земной природы в целом. Несмотря на свою скрытую радиационную опасность со смертельной угрозой всему живому на Земле, уже не один раз в современной истории развития человеческой цивилизации «прорывавшуюся» наружу с нанесением ее обществу больших людских жертв и финансовых убытков, ядерная энергетика с несколькими сотнями действующих мощных энергоблоков АЭС по всему миру занимает серьезные передовые позиции в объемах годовой выработки электрической и тепловой энергий. В Украине данные объемы электроэнергии с 2014 г. по ряду объективных причин составляют не менее 50 % в годовом энергетическом балансе страны.

Учитывая ограниченность запасов на Земле органического углеводородного топлива для ТЭС и практическую неисчерпаемость на нашей планете природных запасов радиоактивного уранового (ядерного) топлива для АЭС, у мировой ядерной энергетики имеются все возможности для своего дальнейшего поступательного развития, направленного на удовлетворение все возрастающих потребностей человеческого общества в электричестве и тепловой энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.
2. https://ru.wikipedia.org/wiki/Ядерный_реактор.
3. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 3-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – 252 с.
4. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 3-х томах. Том 1. – Х.: НТМТ, 2011. – 311 с.
5. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 40: Научное открытие метода взрывной имплозии для получения сверхкритической массы ядерного заряда и украинский «след» в американском атомном проекте «Манхэттен» // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2017. – №5. – С. 3-13. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.01.
6. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 3-х томах. Том 3. – Х.: ФЛП Панов А.Н., 2016. – 415 с.
7. http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/156142/Атомная_электростанция.
8. https://ru.wikipedia.org/wiki/Атомная_электростанция.
9. <https://www.google.ru/search?q=аэс+принцип+работы&newwindow>.
10. Frish O. Niels Bohr. – New York: Publ. S. Rozental, 1967. – 137 p.
11. Левин В.Е. Ядерная физика и ядерные реакторы. – М.: Атомиздат, 1979. – 420 с.
12. Андрущечко С.А., Афоров А.М., Васильев Б.Ю., Генералов В.Н., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Украинцев В.Ф. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. – М.: Логос, 2010. – 604 с.
13. https://ru.wikipedia.org/wiki/Атомная_энергетика_Украины.
14. http://energ2010.ru/Stati/Elektrostanciya/AES/Bezopasnost_aes.html.
15. <https://ria.ru/eco/20090426/169135271.html>.
16. https://ru.wikipedia.org/wiki/Аварийная_защита_ядерного_реактора.
17. <https://www.segodnya.ua/ukraine/rabotniki-juzhno-ukrainkoj-aec-nash-reaktor-vyderzhit-dazhe-padenie-camoleta.html>.
18. Домашев Е.Д., Зенюк А.Ю., Рейсиг В.А., Колесниченко Ю.М. Некоторые подходы к решению проблемы продления

ресурса энергоблоков АЭС Украины // Промышленная теплотехника. – 2001. – Т.23. – №6. – С. 108-112.

19. Фаворский О.Н. Об энергетике России в ближайшие 20-30 лет // Вестник Российской академии наук. – 2007. – Т.77. – №2. – С. 121-127.

20. <http://economics.studio/kniga-ekonomika-prirodopolzovaniya/plyusyi-minusyi-atomnoy-energetiki-76786.html>.

REFERENCES

1. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).

2. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_reactor (accessed 09 August 2017).

3. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 3-h tomah. Tom 1: Elektrofizika i vydajushhiesja fiziki mira* [Selected topics electrophysics: Monographs in 3 vols. Vol.1: Electrophysics and outstanding physics of the world]. Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2008. 252 p. (Rus).

4. Baranov M.I. *Antologija vydajushchikhsia dostizhenii v nauke i tekhnike: Monografija v 3-h tomakh. Tom 1.* [An anthology of outstanding achievements in science and technology: Monographs in 3 vols. Vol.1]. Kharkov, NTMT Publ., 2011. 311 p. (Rus).

5. Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 40: The scientific opening of the method of explosive implosion for the obtaining above critical mass of nuclear charge and Ukrainian «track» in the «Manhattan» American atomic project. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.5, pp. 3-13. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.01.

6. Baranov M.I. *Antologija vydajushhiesja dostizhenij v nauke i tekhnike: Monografija v 3-h tomah. Tom 3* [An anthology of the distinguished achievements in science and technique: Monograph in 3 volumes. Volume 3]. Kharkiv, PhPB Panov A.N. Publ., 2016. 415 p. (Rus).

7. Available at: http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/156142/Атомная_электростанция (accessed 25 May 2017). (Rus).

8. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_power_plant (accessed 19 September 2017).

9. Available at: <https://www.google.ru/search?q=аэс+принцип+работы&newwindow> (accessed 12 October 2016). (Rus).

10. Frish O. *Niels Bohr*. New York, Publ. S. Rozental, 1967. 137 p.

11. Levin V.E. *Jadernaja fizika i jadernye reaktory* [Nuclear physics and nuclear reactors]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 420 p. (Rus).

12. Andrushechko S.A., Aforov A.M., Vasilyev B.Yu., Generalov V.N., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M., Ukrainsev V.F. *AES s reaktorom tipa WWER-1000. Ot fizicheskikh osnov ekspluatatsii do evoljucii proekta* [AES with a reactor of the WWER-1000 type. From the physical foundations of exploitation to the evolution of the project]. Moscow, Logos Publ., 2010. 604 p. (Rus).

13. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_power_in_Ukraine (accessed 20 August 2016).

14. Available at: http://energ2010.ru/Stati/Elektrostanciya/AES/Bezopasnost_aes.html (accessed 10 June 2016). (Rus).

15. Available at: <https://ria.ru/eco/20090426/169135271.html> (accessed 18 November 2016). (Rus).

16. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Аварийная_защита_ядерного_реактора (accessed 12 March 2016). (Rus).

17. Available at: <https://www.segodnya.ua/ukraine/rabotniki-juzhno-ukrainckoj-aec-nash-reaktor-vyderzhit-dazhe-padenie-camoleta.html> (accessed 15 May 2017). (Rus).

18. Domashev E.D., Zenyuk A.Yu., Reisig V.A., Kolesnichenko Yu.M. Some approaches to the solution of the problem of prolonging the resource of power units of Ukrainian AES. *Industrial heat engineering*, 2001, vol.23, no.6, pp. 108-112. (Rus).

19. Favorskiy O.N. On the energy industry of Russia in the next 20-30 years. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2007, vol.77, no.2, pp.121-127. (Rus).

20. Available at: <http://economics.studio/kniga-ekonomika-prirodopolzovaniya/plyusyi-minusyi-atomnoy-energetiki-76786.html> (accessed 14 April 2017). (Rus).

Поступила (received) 19.12.2017

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: baranovmi@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov

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

An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 44: Traditional power engineering. Nuclear power stations: retrospective view, state and prospects of their development.

Purpose. Preparation of brief scientific and technical review about a retrospective view, modern state, achievements, problems, tendencies and prospects of development of world nuclear energy. **Methodology.** Known scientific methods of collection, analysis and analytical treatment of the opened scientific and technical information, present in scientific monographs, journals and internet-reports, world level in area of nuclear energy. **Results.** A brief analytical scientific and technical review is resulted about a retrospective view, modern state, basic achievements, existent problems, tendencies and prospects of development of nuclear energy in the industrially developed countries of the world. Considerable progress is marked in development and creation of technical base of modern nuclear energy, including the nuclear power stations (NPP) such their basic devices as nuclear reactors, steam generators, steam turbines and turbogenerators. The basic charts of construction of NPP producing in the world now about 11 % are described annual production electric power. It is indicated that in Ukraine a production of electricity volume at NPP makes more than 50 %, and in France – more than 70 % in annual power balance of country. Nuclear-physical bases of work of nuclear reactor are resulted on thermal-neutron, widely in-use at NPP. The design of most safe water-waters of nuclear power-reactor of type of WWER-1000 is described by thermal power 1000 MW, applied presently at NPP of Ukraine. Basic classification of nuclear reactors is presented. Technical information is resulted about largest NPP of the world. Master data are indicated about a nuclear fuel and radio-active offcuts of nuclear reactors of NPP. Basic measures and facilities are described for the increase of safety of nuclear reactors and NPP. Advantages and lacks of NPP are marked by comparison to the thermal power plants. Nuclear energy of Ukraine is considered and basic technical descriptions of operating domestic NPP are indicated. Basic problems, tendencies and possible prospects of development, are marked in the world and to Ukraine of nuclear energy. **Originality.** Systematization of the scientific and technical materials touching functioning of such important sector of world economy as nuclear energy known from the sources opened in outer informative space is executed. It is shown on the basis of approach of the systems that in spite of row of existent problems in area of world nuclear energy has the real prospects in the further development and to service society at satisfaction of his increasing requirements in electric and thermal energies. **Practical value.** Popularization and deepening for students, engineer-technical and scientific workers of scientific and technical knowledge in area of modern nuclear physics and energy, extending their scientific range of interests and further development of scientific and technical progress in society. References 20, figures 13, tables 1.

Key words: nuclear physics and energy, nuclear reactor, nuclear power station, safety of nuclear reactor and nuclear power station, problems and prospects of development of nuclear energy.

К.М. Василів

ЗАКОНОМІРНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ БЕЗКОНТАКТНОЇ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ АСИНХРОНІЗОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА НА БАЗІ КАСКАДНОГО ТРИФАЗНО-ТРИФАЗНОГО МОДУЛЯТОРА НАПРУГИ ЗА СХЕМОЮ В ОДНУ ЗІРКУ

Встановлено закономірності перебігу електромагнітних процесів, які відбуваються в безконтактній системі збудження асинхронізованого генератора на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора напруги за схемою в одну зірку на предмет можливості розширення діапазону двозонного ковзання генератора. Запропоновано спосіб корегування параметрів роторів машин модулятора і генератора, який дає змогу стабілізувати роботу комутатора для діапазону ковзання від мінус одиниці до плюс n яти десятих із збереженням працездатності асинхронізованого генератора. Бібл. 3, рис. 8.

Ключові слова: асинхронізований генератор, модулятор напруги, комутатор, безконтактна система збудження, ковзання.

Установлено закономерности электромагнитных процессов, протекающих в бесконтактной системе возбуждения асинхронизированного генератора на базе каскадного трехфазно-трифазного модулятора напряжения по схеме в одну звезду на предмет возможности расширения диапазона двухзонного скольжения генератора. Предложено способ корректировки параметров роторов машин модулятора и генератора, позволяющий стабилизировать работу коммутатора для диапазона скольжения от минус единицы до плюс пяти десятых с сохранением работоспособности асинхронизированного генератора. Библ. 3, рис. 8.

Ключевые слова: асинхронизированный генератор, модулятор напряжения, коммутатор, бесконтактная система возбуждения, скольжение.

Вступ. Базовими структурними елементами сучасних стаціонарних електроенергетичних систем є теплові та атомні електричні станції. Водночас практикується використання доволі великої кількості різноманітних автономних електроенергетичних установок (АЕЕУ) як у промисловості, так і в інших галузях, зокрема, на транспорті та в агро-промисловому комплексі. Є потреба в АЕЕУ також на магістралях транспортування органічних енергоносіїв (нафтопроводах та газогонах). Перспективним вбачається використання вітроенергетичних установок, які можуть працювати як паралельно зі стаціонарною енергосистемою, так і в автономному режимі. АЕЕУ на сьогодні становлять вагомий частку генерування та споживання електроенергії загалом. Тому увага до них, з погляду наукових досліджень як в теоретичному, так і в практичному аспектах з метою їх вдосконалення, є достатньо аргументованою і закономірною.

Для споживачів електроенергії необхідно мати не лише надійне електроживлення, але й отримувати якісну електроенергію, одним з найважливіших показників якої є частота напруги. Стабільність частоти напруги принципово необхідна як для стаціонарних енергосистем, так і для автономних джерел електроживлення (АДЕЖ). Адже зниження частоти напруги в стаціонарних енергосистемах призводить до втрати стійкості їх роботи і, як наслідок, до розвалу.

Для АДЕЖ характерні певні особливості до найвагоміших з яких логічно віднести такі. Перше – висока ймовірність необхідності роботи в режимі граничних навантажень, що робить актуальною проблему надійності їх функціонування загалом. Друга особливість таких установок полягає в істотній нестабільності та широкому діапазоні зміни частоти обертання ротора автономного генератора, наприклад, вітроенергетичних установок (ВЕУ), що спричиняє іншу складну проблему – нестабільність частоти напруги.

Аналіз наукової літератури та практичних рішень показують, що обидві ці складні і актуальні проблеми можуть бути ефективно вирішені використанням у АДЕЖ асинхронізованих генераторів (АСГ) з безконтактною вентиляльною системою збудження (БВСЗ) на базі каскадного модулятора напруги (КМН) [3]. З погляду схемного рішення асинхронізовані генератори з БВСЗ на базі КМН можуть бути реалізовані в багатьох варіантах (порядку 16-ти схем). Всі такі генератори працюють за однаковим принципом, але кожне схемне рішення силового електричного кола модулятора, комутатора і самого генератора вносить свої специфічні особливості з погляду фізики процесів. Тому в наукових дослідженнях необхідно проаналізувати кожну з таких схем окремо. Виходячи з цього, об'єктом дослідження в статті є безконтактна вентиляльна система збудження асинхронізованого генератора на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора напруги (К Т-Т МН) за схемою в одну зірку. Схему силового електричного кола такої системи збудження зображено на рис. 1. З цього рисунку видно, що К Т-Т МН складається з двох асинхронних машин АМ1 та АМ2, фазні обмотки роторів яких розщеплені на три гілки та з'єднані між собою послідовно перехресними зв'язками, а на вході розщеплені фазні гілки можуть мати потенціальне комбіноване з'єднання або можуть бути сполучені в один спільний вузол. Варіанти цих з'єднань визначають положенням ключа К. Коли ключ К розімкнений (ідентифікуємо такий його стан як $K=1$) – перший варіант, а коли ключ К замкнений ($K=2$) – другий. Статорні обмотки машин модулятора АМ1 та АМ2 живляться від двох трифазних джерел живлення Е1 та Е2, які мають взаємно протилежну послідовність фаз. Тут априорі приймається, що такими джерелами є акумуляторні батареї з керованими інверторами напруги.

© К.М. Василів

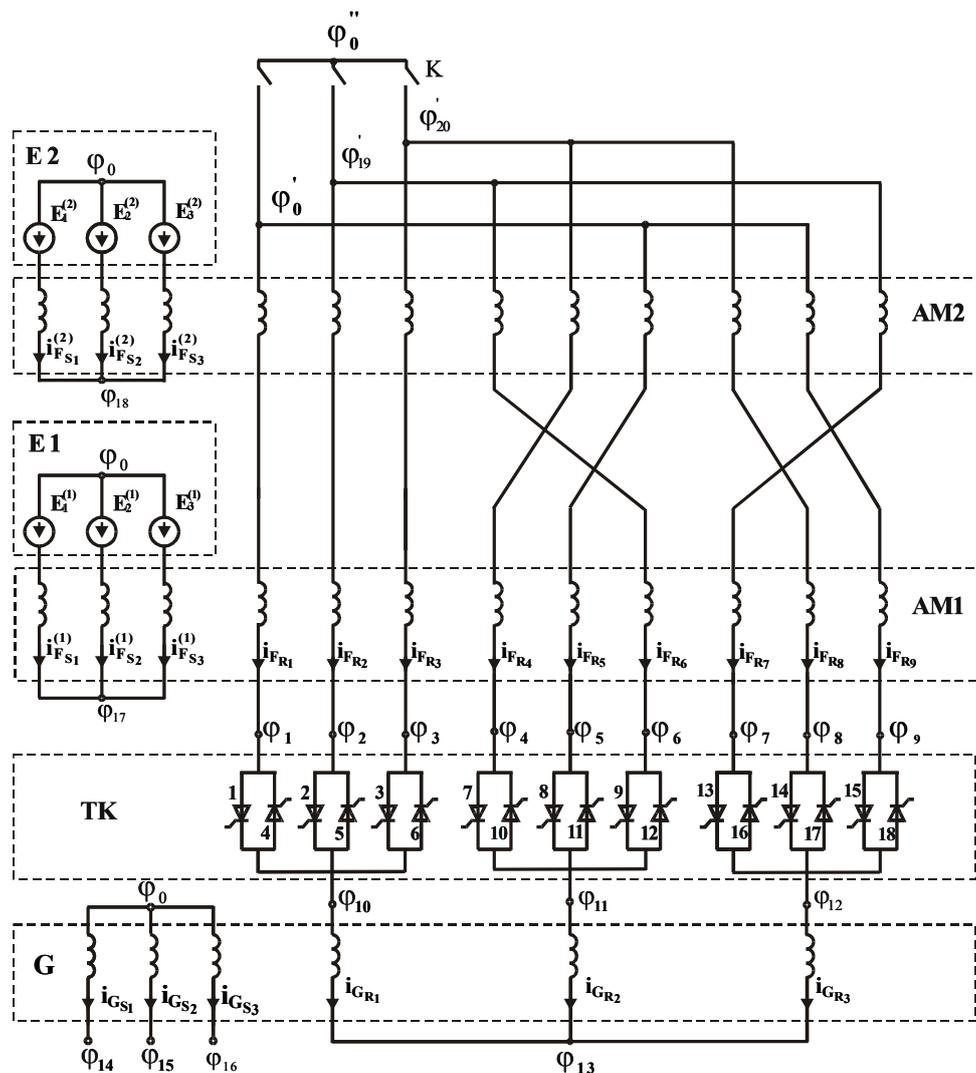


Рис. 1. Схема силового електричного кола асинхронізованого генератора

До решти структурних елементів схеми (рис. 1) належать: ТК – тиристорний комутатор циклоконверторного типу з природною комутацією, яким слугує безпосередній тиристорний перетворювач частоти (БТПЧ), G – асинхронізований генератор, яким слугує трифазна асинхронна машина з фазним ротором, обмотки фаз ротора якої з'єднані в зірку. Усі решта позначення на цій схемі є загальноприйнятими – літерами E, ϕ та i позначені електрорушійні сили, електричні потенціали в вузлах та струми електричних гілок схеми. Літерами F, G у нижніх індексах позначено належність координат (струмів, напруг і т. ін.) до машин модулятора та АСГ, а літерами S, R у нижніх індексах позначено належність координат до статора і ротора електричних машин, відповідно. Тиристри БТПЧ пронумеровані числами. Числами 1 та 2 в дужках у верхніх індексах позначено належність до першого E1 та другого E2 джерел живлення, відповідно.

На думку автора, з метою полегшення сприйняття основних положень матеріалу статті, логічним є лаконічно описати принцип роботи АСГ такого типу. Він ґрунтується на тому, що модулятор напруги шляхом додавання напруг і частот фазних гілок роторів машин модулятора формує сумарну напругу модульованої форми, частота заповнення якої пропорційна

частоті обертання роторів машин модулятора і кількості їх пар полюсів (ротори AM1 та AM2 розміщені на одному валі з АСГ), а частота модуляції визначається частотою двозонного ковзання. Послідовно з'єднаний з обмотками роторів машин модулятора комутатор циклоконверторного типу декодує модульовану напругу, внаслідок чого на його виході (на обмотці ротора генератора) утворюється система трифазних напруг частоти ковзання. Це забезпечує стабільну частоту обертання магнітного поля генератора стосовно його обмотки статора, що, своєю чергою, формує частоту напруги генератора, яка дорівнює частоті мереж живлення E1 та E2. Отже, теоретично частота напруги АСГ має дорівнювати частоті мереж живлення E1 та E2 асинхронних машин модулятора AM1 та AM2 і не залежати від частоти обертання ротора АСГ.

Аналіз публікацій та мета дослідження. Ідеологію генераторів стабільної частоти (ГСЧ) з безконтактною вентиляльною системою збудження на базі КМН започатковано в [3]. За збігом обставин питаннями наукового дослідження та розвитку автономних системи електроживлення (АСЕЖ) на базі АСГ з БВСЗ займається доволі вузьке коло науковців та інженерів, а тому вагома частка публікацій, спрямованих на дослідження зазначених систем електро-

живлення шляхом математичного моделювання належить автору цієї статті. Поява низки публікацій, спрямованих на розробку методів і математичних моделей, а також на вивчення закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в зазначених вище АСЕЖ, пояснюється наявністю в них різнотипних елементів – асинхронних машин та БТПЧ за низкою схем їх силових електричних кіл, а також наявністю системи керування комутатором та системи автоматичного керування окремими координатами (зокрема напругою), що спричинює складність електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в цих АСЕЖ.

Однією з основних наукових праць, які стосуються дослідження АСЕЖ на базі АСГ з БВСЗ, є публікація [1]. Вона спрямована на розробку математичних моделей і відповідних програмних комплексів як засобу для вивчення закономірностей перебігу електромагнітних і електромеханічних процесів, які відбуваються в АСЕЖ на базі АСГ з БВСЗ за трифазно-трифазною схемою модулятора напруги. Математичні моделі і відповідні програмні комплекси дають змогу вивчати електромагнітні і електромеханічні процеси, які відбуваються в автономній системі електроживлення під час роботи АСГ на типове навантаження, яким слугують: асинхронні двигуни, активно-індуктивне та активно-індуктивно-емісійне навантаження.

У публікації, які стосуються дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів АСЕЖ на базі АСГ з БВСЗ вважається, що асинхронні машини модулятора напруги та генератора мають типову конструкцію. Виходячи саме з цього, діапазон двозонного ковзання, який забезпечує нормальну роботу АСЕЖ становить $S = -0,06 \div +0,06$. Це вказує на те, що загалом АСЕЖ на базі АСГ з БВСЗ є працездатною. Але такий діапазон ковзання розцінюється за надто вузьким, щоби стверджувати про достатні можливості для практичного застосування таких асинхронізованих генераторів в АСЕЖ. Тому дослідження продовжуються з метою досягнення розширення діапазону ковзання до меж, які б дали змогу практичного використання АСГ цього класу навіть в таких електроенергетичних установках як ВЕУ.

Враховуючи ту обставину, що працездатність АСГ з БВСЗ значною мірою визначається належною роботою комутатора, всю увагу слід сконцентрувати на процеси, які відбуваються саме в БВСЗ і її окремих структурних елементах, до яких належать машини модулятора, сам тиристорний комутатор та обмотка збудження АСГ (його роторна обмотка).

Першою працею, яка спрямована на вирішення такої проблеми, була публікація [2], яка стосується безконтактної системи збудження АСГ на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора напруги за схемою у дві зірки (коли кожна з фаз обмотки ротора генератора розщеплена на дві гілки, а утворені таким чином 6 гілок з'єднані у дві окремі трифазні зірки). У [2] розглянуто одну схему модулятора, в якій розщеплені фазні гілки роторів машин модулятора на вході з'єднані в один спільний вузол (для схеми рис. 1 це – $K=2$). За результатами дослідження [2] встановлено, що діапазон ковзання можливо розширити від

$S = -0,06$ до $S = +0,2$ шляхом збільшення співвідношення кількості витків обмотки статора до кількості витків обмотки ротора машин модулятора.

Враховуючи специфіку кожної із схем тиристорного комутатора і модулятора, однозначно очевидно є практична потреба в виконанні аналогічного дослідження безконтактної вентиляльної системи збудження АСГ на базі трифазно-трифазного каскадного модулятора напруги за схемою в одну зірку, характерним для якої є удвічі менша кількість тиристорів, аніж для схеми у дві зірки, що кваліфікується як перевага з погляду практичного застосування.

Таким чином, метою дослідження є встановлення закономірностей перебігу електромагнітних процесів, які відбуваються в безконтактній вентиляльній системі збудження АСГ на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора напруги за схемою в одну зірку на предмет можливості розширення робочого діапазону двозонного ковзання.

Виклад основного матеріалу. Результати попередніх досліджень [1, 2] вказують на те, що робота комутатора істотно визначається співвідношенням параметрів обмоток статорів і роторів машин модулятора. Великі значення параметрів роторів спричиняють інерційність електромагнітних процесів в колі модулятора і збуджувача генератора, внаслідок чого порушується нормальна робота комутатора, що унеможливило формування трифазної напруги частоти ковзання в обмотці ротора генератора, а отже, формування напруги стабільної частоти в обмотці статора АСГ.

З метою створення сприятливих умов роботи комутатора на підставі позитивного результату дослідження, отриманого в [2], запропоновано зменшити індуктивні опори роторних обмоток не лише машин модулятора, але й генератора шляхом збільшення співвідношення кількості витків обмоток статора і ротора (тобто, збільшенням їх коефіцієнтів трансформації). Перевірку впливу зміни коефіцієнтів трансформації на працездатність БВСЗ асинхронізованого генератора виконаємо аналізом функцій струмів і напруг фазних гілок роторів машин модулятора і генератора. Залежності струмів і напруг отримаємо шляхом розрахунку електромагнітних процесів БВСЗ рис. 1 за допомогою розроблених в [1] математичної моделі і програмного комплексу. Моделювання виконаємо для АСГ потужністю 100 кВт, вхідні дані якого мають такі значення: $L_{Gm} = 0,1$ Гн – робоча індуктивність (з боку статора); $L_{GS} = 0,005$ Гн – індуктивність розсіювання статора; $L_{GR} = 0,005$ Гн – приведена до обмотки статора індуктивність розсіювання обмотки ротора; $K_{Gi} = 10$ – коефіцієнт трансформації генератора; $P_{G0} = 2$ – кількість пар полюсів генератора; $R_{GS} = 0,01$ Ом – активний опір фаз обмотки статора; $R_{GR} = 0,05$ Ом – активний опір фаз обмотки ротора.

З метою уникнення переобтяження обсягом вхідних даних, для машин модулятора наведемо лише найважливіші дані, до яких належать: $K_i^{(1)}=20$ – коефіцієнт трансформації АМ1; $P_0^{(1)}=2$ – кількість пар полюсів АМ1; $K_i^{(2)}=20$ – коефіцієнт трансформації АМ2; $P_0^{(2)}=6$ – кількість пар полюсів АМ2.

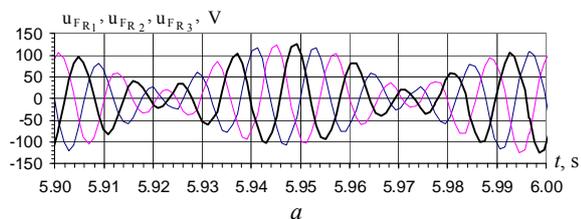
Принципово важливо зазначити, що відповідно до теорії АСГ з БВСЗ на базі каскадного модулятора напруги [3] для формування модульованої напруги частоти ковзання на виході модулятора співвідношення кількості пар полюсів генератора і машин модулятора має задовольняти таку умову:

$$(P_0^{(1)} + P_0^{(2)})/2 = 2 \cdot P_{G0}. \quad (1)$$

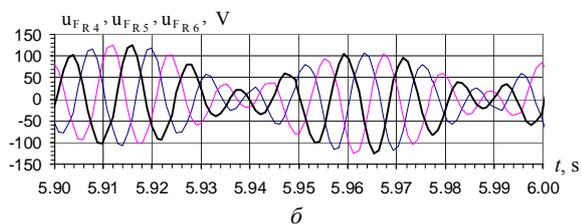
Наведені вище числові значення кількості пар полюсів генератора і асинхронних машин модулятора АМ1 та АМ2 задовольняють умову (1).

Згідно з [2] максимальне значення ковзання, при якому вдалося досягнути працездатності АСГ з БВСЗ на базі КМН дорівнює 0,2 ($S = +0,2$). Тому за орієнтир для дослідження роботи АСГ з безконтактною вентиляційною системою збудження за схемою в одну зірку візьмемо саме таке значення ковзання. Виходячи з цього, на початку дослідження розглянемо розрахункові залежності напруг та струмів фазних гілок обмоток роторів машин модулятора та фазних струмів обмотки ротора генератора для двох значень двозонного ковзання $S = -0,2$ та $S = +0,2$.

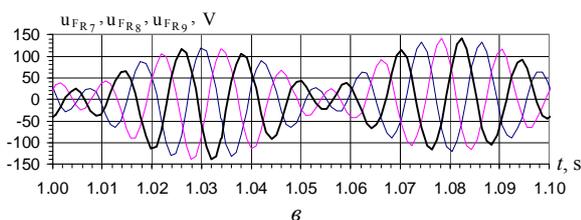
На рис. 2 зображено розрахункові залежності від часу напруг фазних гілок роторів машин модулятора.



($u_{FR1}, u_{FR2}, u_{FR3}$ – напруги I, II, III фазних гілок)



($u_{FR4}, u_{FR5}, u_{FR6}$ – напруги IV, V, VI фазних гілок)



($u_{FR7}, u_{FR8}, u_{FR9}$ – напруги VII, VIII, IX фазних гілок)

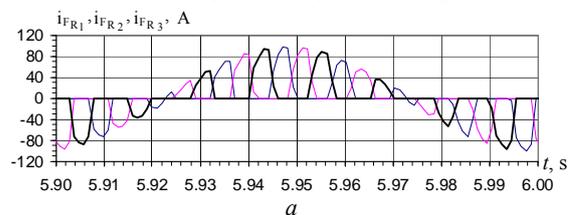
Рис. 2. Розрахункові залежності від часу миттєвих напруг фазних гілок роторів машин модулятора

Зокрема, рис. 2,а ілюструє напруги перших трьох розщеплених фазних гілок роторів машин модулятора $u_{FR1}, u_{FR2}, u_{FR3}$ (див. рис. 1). Кожна з цих кривих формується сумою електрорушійних сил послідовно з'єднаних розщеплених фазних гілок роторів машин модулятора АМ1 та АМ2, які, своєю чергою, індукуються окремо для кожної з машин АМ1 та АМ2 струмами обмоток їх статорів. Аналогічно рис. 2, б ілюструє

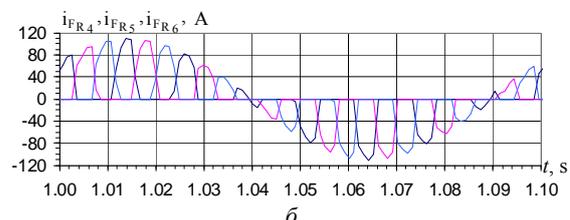
напруги $u_{FR4}, u_{FR5}, u_{FR6}$ других трьох, а рис. 2,в – напруги $u_{FR7}, u_{FR8}, u_{FR9}$ третіх трьох розщеплених фазних гілок роторів машин модулятора (рис. 1).

З рис. 2 видно, що напруги послідовно з'єднаних фазних гілок роторів машин каскадного модулятора мають модульовану форму з частотою ковзання (тут ковзання $S = +0,2$), яке відповідає періоду $T = 0,1$ с. При цьому кожна з трьох систем напруг, зображених на рис. 2,а-в зсунута за фазою на кут $2\pi/3$ за частотою ковзання, що досягається перехресним з'єднанням розщеплених фазних гілок роторів машин модулятора (див. рис. 1). Модульовані напруги з частотою ковзання дають підстави очікувати формування системи трифазних напруг частоти ковзання в роторній обмотці генератора. Факт взаємного зсуву напруг всіх трьох груп фазних гілок за частотою ковзання на $2\pi/3$ забезпечує відповідний зсув фазних напруг і струмів обмотки ротора генератора.

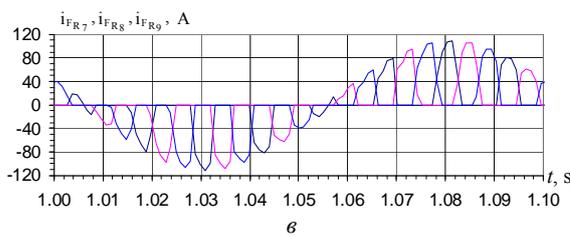
Для повнішого розуміння електромагнітних процесів, які відбуваються в системі збудження АСГ розглянемо криві миттєвих значень фазних струмів роторів машин модулятора. Їх зображено на рис. 3.



($i_{FR1}, i_{FR2}, i_{FR3}$ – струми I, II, III фазних гілок)



($i_{FR4}, i_{FR5}, i_{FR6}$ – струми IV, V, VI фазних гілок)



($i_{FR7}, i_{FR8}, i_{FR9}$ – струми VII, VIII, IX фазних гілок)

Рис. 3. Розрахункові залежності від часу миттєвих струмів фазних гілок роторів машин модулятора

Додатна півхвиля струмів на рис. 3,а формується тиристорами 1, 2, 3, а від'ємна – тиристорами 4, 5, 6 (див. схему на рис. 1). Аналогічним чином формуються струми двох інших груп фазних гілок рис. 3,б та рис. 3,в відповідно.

У контексті аналізу процесів, які відбуваються в БВСЗ АСГ принципово важливою інформацією слугує характер фазних напруг і струмів обмотки ротора генератора. Адже для отримання стабільної частоти напруги

обмотки статора генератора в обмотці ротора генератора має бути трифазна система струмів частоти ковзання. Тому розглянемо фазні струми обмотки ротора АСГ.

На рис. 4 зображено розрахункові залежності миттєвих значень фазних струмів обмотки ротора асинхронізованого генератора для ковзання $S = +0,2$. З цього рисунку видно, що в обмотці ротора АСГ сформовані трифазні струми, форма яких є близькою до синусоїдної за частотою ковзання. Період цих струмів відповідає частоті ковзання ($S = +0,2$) і становить $T = 0,1$ с. Така форма струмів в обмотці ротора АСГ дає підставу очікувати, що частота фазних напруг обмотки статора буде дорівнювати частоті напруги в обмотках статора машин модулятора.

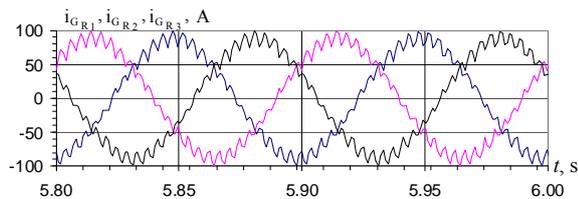


Рис. 4. Розрахункові залежності фазних струмів ротора АСГ $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$

Наведені вище результати моделювання, а також отримані результати досліджень, які не представлені тут, дають підставу стверджувати, що для ковзання АСГ, яке дорівнює плюс дві десяті ($S = +0,2$), його БВСЗ працездатна і забезпечує необхідну частоту напруги обмотки статора генератора, що і є предметом дослідження в цій публікації. А аналіз кривих напруг обмоток статора генератора становить предмет окремих досліджень з огляду на те, що на форму цих кривих впливають ще й інші чинники, які на тепер достатньо повно ще не вивчені, але з вже наявних результатів дослідження відомо, що вони змінюють гармонічний спектр фазних напруг генератора.

Для визначення крайньої межі робочого діапазону додатної зони ковзання асинхронізованого генератора з безконтактною вентиляльною системою збудження необхідно мати інформацію про характер струмів обмотки ротора генератора для інших, більших значень ковзання. Тому нижче наведемо розрахункові залежності цих струмів для низки значень додатного ковзання. Форма цих кривих дасть інформацію для розуміння закономірностей перебігу електромагнітних процесів, які відбуваються в безконтактній вентиляльній системі збудження асинхронізованого генератора і, як наслідок, дасть підставу для визначення крайнього допустимого робочого ковзання в його додатній області.

На рис. 5 зображено розрахункові залежності фазних струмів обмотки ротора генератора для ковзання $S = +0,5$.

З рис. 5 видно, що криві фазних струмів ротора генератора мають квазисинусоїдну форму з періодом основної гармоніки, який дорівнює $0,04$ ($T = 0,04$) секунди, що відповідає частоті ковзання $F_k = 25$ Гц ($F_k = 50 \cdot S = 50 \cdot 0,5 = 25$). Така форма кривих фазних струмів з чітко визначеною частотою також забезпечує стабільність частоти напруги генератора, а отже для ковзання $S = +0,5$ БВСЗ АСГ є працездатною.

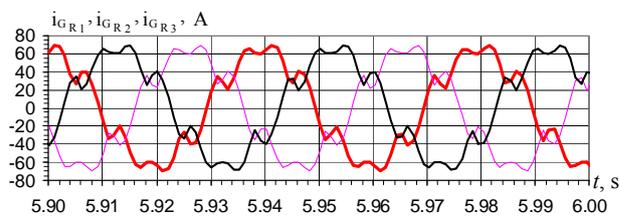


Рис. 5. Фазні струми ротора АСГ $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$

для ковзання $S = +0,5$

Подальше збільшення ковзання в додатній області призводить до зміни форми кривих фазних струмів, що видно з рис. 6 та рис. 7. На першому з них зображено розрахункові залежності фазних струмів обмотки ротора генератора для ковзання $S = +0,9$, а на другому – для ковзання $S = +0,95$. З цих рисунків видно, що фазні струми за формою не є синусоїдними. Натомість спостерігається тенденція до утворення системи напруг модульованої форми. Тому висновок є однозначним, його сутність полягає в тому, що для додатного ковзання, значення якого перевищує $S = +0,5$, БВСЗ АСГ втрачає працездатність. Таким чином, крайньою межею додатного діапазону робочого ковзання АСГ є ковзання зі значенням $S = +0,5$.

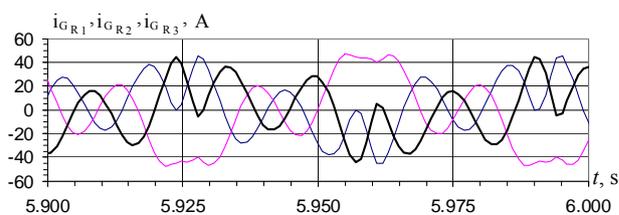


Рис. 6. Фазні струми ротора АСГ $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$

для ковзання $S = +0,9$

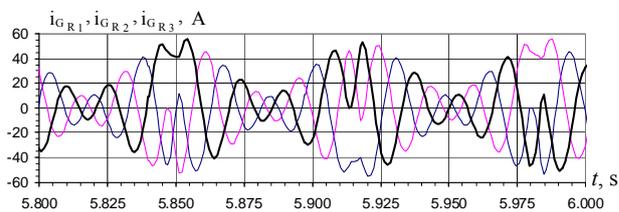


Рис. 7. Фазні струми ротора АСГ $i_{GR1}, i_{GR2}, i_{GR3}$

для ковзання $S = +0,95$

Як уже було зазначено, АСГ з БВСЗ на базі каскадного модулятора напруги може працювати в режимі двозонного ковзання. Адже збудження тут виконується з боку ротора, як у синхронній машині. Тому принципово важливо з'ясувати його функційні можливості для від'ємного діапазону ковзання. З цією метою також проведено дослідження для низки значень від'ємного ковзання.

На рис. 8 зображено розрахункові залежності фазних струмів ротора генератора для трьох значень ковзання: $S = -0,2$; $S = -0,8$ та $S = -1,0$. З рис. 8 виразно видно, що фазні струми ротора АСГ мають близьку до синусоїди форму з частотою основної гармоніки, яка дорівнює частоті ковзання. Це дає підставу стверджувати, що на відміну від додатної області ковзання, у від'ємній – БВСЗ працездатна в цілому її діапазоні від $S = 0$ до $S = -1,0$.

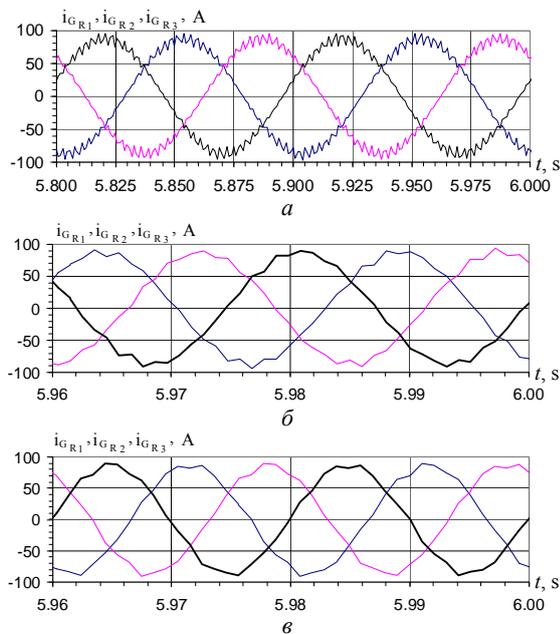


Рис. 8. Фазні струми ротора АСГ i_{GR1} , i_{GR2} , i_{GR3} (а – для $S = -0,2$; б – для $S = -0,8$; в – для $S = -1,0$)

На цьому етапі за допомогою розробленої в [1] математичної моделі і відповідного програмного коду виконано аналіз електромагнітних процесів, які відбуваються в безконтактній вентильній системі збудження АСГ на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора напруги за схемою в одну зірку та встановлено закономірності їх перебігу на предмет впливу двозонного ковзання на працездатність асинхронізованого генератора.

У контексті перспективи досліджень з метою подальшого розвитку теорії асинхронізованих генераторів цього типу вбачається необхідним виконати аналіз електромагнітних процесів, які відбуваються в таких генераторах на предмет впливу двозонного ковзання на якість напруги АСГ і за критерієм частоти, і за критерієм гармонічного спектру. Окрім цього, ставиться за мету виконати аналогічні дослідження для схеми модулятора зі спільним з'єднанням розщеплених фазних гілок обмоток роторів машин модулятора, коли ключ К замкнений (рис. 1) бо тут розглянуто схему з потенціальним комбінованим з'єднанням, коли ключ К розімкнений.

Висновки.

1. Вузкий діапазон робочого двозонного ковзання асинхронізованого генератора з безконтактною вентильною системою збудження на базі каскадного модулятора напруги за схемою в одну зірку, який на час останніх досліджень становив $\pm 0,06$, не дає змоги практичного застосування таких генераторів як автономних джерел електроживлення.

2. З метою вивчення можливостей розширення діапазону двозонного ковзання АСГ з БВСЗ виконано дослідження електромагнітних процесів, які відбуваються в цій системі збудження. На підставі проведених досліджень шляхом математичного моделювання за допомогою розроблених автором математичних моделей і програмного комплексу встановлені закономірності перебігу цих процесів залежно від значення двозонного ковзання.

3. Шляхом зміни параметрів роторів машин модулятора і АСГ через збільшення співвідношення кількості витків обмотки статора до обмотки ротора асинхронних машин модулятора і генератора досягнуто істотного розширення діапазону робочого ковзання асинхронізованого генератора.

4. Область від'ємного ковзання збільшено до значення $S = -1$, а область додатного – до $S = +0,5$.

5. Розширення діапазону робочого ковзання до вказаних меж створює реальні можливості для практичного впровадження генераторів цього класу в автономних системах електроживлення з широким діапазоном зміни частоти обертання ротора.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Васи́лів К.М. Математична модель динамічних процесів автономної електроенергетичної системи на базі безконтактного асинхронізованого генератора з трифазно-трифазним каскадним модульованим збуджувачем // Технічна електродинаміка. – 2004. – №5. – С. 50-55.
2. Васи́лів К.М. Закономірності електромагнітних процесів безконтактної системи збудження асинхронізованого генератора за схемою у дві зірки на базі трифазно-трифазного модулятора напруги // Вісник НТУ «ХПІ». – 2016. – №32(1204). – С. 48-52.
3. Галиновский А.М. Бесконтактный асинхронизированный генератор с модулированным преобразователем частоты // Труды I Международной (III Всероссийской) конференции по Электромеханотронике. – Санкт-Петербург. – 1997. – С. 182-192.

REFERENCES

1. Vasylyv K.M. Mathematical model of dynamic processes of an autonomous electric power system on the basis of contactless asynchronous generator with a three-phase-three-phase cascade modulated exciter. *Technical electrodyamics*, 2004, no.5, pp. 50-55. (Ukr).
2. Vasylyv K.M. Regularities of electromagnetic processes in the contactless excitation system of an asynchronous generator following a two-star scheme based on a threephase-threephase voltage modulator. *Bulletin of NTU «KhpI»*, 2016, no.32(1204), pp. 48-52. (Ukr).
3. Galinovskiy A.M. Non-contact asynchronous generator with a modulated frequency converter. *Trudy I Mezhdunarodnoi (III Vserossiiskoi) konferentsii po Elektromekhanotronike* [Proceedings of the 1st International (III All-Russian) Conference on Electromechanotronics]. St. Petersburg, 1997, pp. 182-192. (Rus).

Надійшла (received) 25.02.2018

Васи́лів Карл Миколайович, д.т.н., проф.,
Національний університет «Львівська політехніка»,
79013, Львів, вул. С. Бандери, 28а,
тел/phone +38 032 2226403, e-mail: karl.vasylyv@gmail.com

K.M. Vasylyv

Lviv Polytechnic National University,
28a, S. Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine.

Regularities of electromagnetic processes of a contactless excitation system of an asynchronous generator based on a cascade three-phase-three-phase voltage modulator in a single-star circuit.

The regularities of electromagnetic processes occurring in a non-contact excitation system of an asynchronous generator based on a cascade three-phase – three-phase voltage modulator in a single-star circuit for the possibility of expanding the range of a two-zone slip of a generator are established. A method for correcting the parameters of the machines' rotors of modulator and generator is proposed which makes it possible to stabilize the operation of the switch for the slip range from minus one to plus five tenths with maintaining the performance of the asynchronous generator. References 3, figures 8.

Key words: asynchronous generator, voltage modulator, switch, contactless excitation system, slip.

И.Н. Задорожня, Н.А. Задорожний

СИНТЕЗ ДВУХМАССОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСТАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПЕРЕМЕННЫХ СИЛ ТРЕНИЯ

Отримав подальший розвиток метод синтезу електроприводу з астатичною системою підпорядкованого регулювання при дії змінних сил тертя з активним демпфуванням пружних механічних коливань, що досягається вибором відповідного співвідношення динамічних параметрів. Показано, що параметри в електромеханічних системах знаходяться у взаємозв'язку, а реалізація розрахункових співвідношень для регулятора швидкості при оптимізації основана на компенсації впливу пружних сил інерційними та може бути використана для настройки систем керування технологічних машин. Бібл. 13, рис 2.

Ключові слова: електромеханічна система, демпфування, електропривод, взаємодія, регулювання, регулятор швидкості, синтез параметрів, змінні сили тертя.

Получил дальнейшее развитие метод синтеза электропривода с астатической системой подчиненного регулирования при действии переменных сил трения с активным демпфированием упругих механических колебаний, что достигается выбором определенного соотношения динамических параметров. Показано, что параметры в электромеханических системах находятся во взаимосвязи, а реализация расчетных соотношений для регулятора скорости при оптимизации основана на компенсации влияния упругих сил инерционными и может быть использована для настройки систем управления технологических машин. Библ. 13, рис 2.

Ключевые слова: электромеханическая система, демпфирование, электропривод, взаимодействие, регулирование, регулятор скорости, синтез, переменные силы трения.

Введение. Регулируемый автоматизированный электропривод (ЭП) современных технологических машин выполняет функции ограничения динамических нагрузок электрического и механического оборудования, теоретически обеспечивает высокую статическую и динамическую точность воспроизведения законов управления и инвариантность к возмущающим воздействиям при нормированном быстродействии [1, 2]. Однако практическая реализация динамических возможностей ЭП затруднена из-за влияния на процессы регулирования и управления упругих механических звеньев передач, действия переменных сил трения на валу рабочих механизмов [3, 4]. В режиме низких скоростей в ЭП с широким диапазоном регулирования переменные силы трения в сочетании с упругими механическими колебаниями являются причиной возникновения автоколебаний и потери устойчивости [5, 6].

Постановка задачи исследования. В опубликованных научно-исследовательских работах приводятся результаты анализа и предложены методы синтеза двухмассовых электромеханических систем (ЭМС) по различным критериям оптимизации, как правило, без рассмотрения эффектов взаимодействия подсистем [7-9], поэтому представляет интерес исследование электроприводов с астатической системой автоматического регулирования и минимизацией колебательных составляющих процессов при действии переменных сил трения и оптимальном (предельном) электромеханическом взаимодействии.

Двухмассовая ЭМС с астатической системой подчиненного регулирования представлена структурной схемой на рис. 1. При описании структурной схемы используется относительная форма записи параметров, и объект регулирования характеризуется следующими параметрами: $T_{M1} = J_1\omega_H/M_H$ – механическая постоянная времени электродвигателя; $T_{M2} = J_2\omega_H/M_H$ – механическая постоянная времени механизма (вторая масса, приведенная к валу двигателя);

$\Omega_{12} = \sqrt{c_{12}(T_{M1} + T_{M2})/T_{M1}T_{M2}}$ – частота свободных колебаний двухмассовой ЭМС; $c_{12} = C_{12}\omega_H/M_H$ – коэффициент упругости механической передачи; $\beta_C = \pm B_C\omega_H/M_H$ – коэффициент трения механической нагрузки для различных участков характеристики; $\gamma = (T_{M1} + T_{M2})/T_{M1}$ – коэффициент распределения инерционных масс двигателя и механизма.

При настройке контура тока (момента) на предельное быстродействие влияние на него упругих механических колебаний для постоянной интегрирования контура тока $T_T \ll T_y$ ($T_y = 1/\Omega_{12}$) и $\gamma = 1,01 - 1,5$ считается незначительным [7], что позволяет после преобразования передаточную функцию принять в виде $W_{KT}(p) \approx 1,0$. Регулятор скорости – пропорционально-интегральный с коэффициентом передачи K_R и постоянной интегрирования τ – обеспечивает нулевую статическую ошибку при изменении нагрузки m_C на валу механизма.

Исследования влияния переменных сил трения производим для отдельных (линеаризованных) участков характеристики нагрузки. При влиянии упругих звеньев в сочетании с проявлением «отрицательного» вязкого трения ($\beta_C < 0$) в ЭМС возбуждаются колебания с дестабилизацией процессов регулирования и потерей устойчивости [10]. Возникают также проблемы устойчивости ЭМС с двукратноинтегрирующей САУ в режиме малых скоростей и при действии сил трения на возрастающем участке характеристики нагрузки ($\beta_C > 0$).

Целью исследования является решение актуальной задачи активного подавления упругих электромеханических колебаний в ЭМС с астатической системой автоматического регулирования. Если демпфирование упругих механических колебаний осуществляется за счет оптимизации динамической жесткости механической характеристики ЭП [11], то удастся обеспечить требуемую степень устойчивости при минимальной колебательности ЭМС и высокой точности отработки возмущений по нагрузке.

© И.Н. Задорожня, Н.А. Задорожний

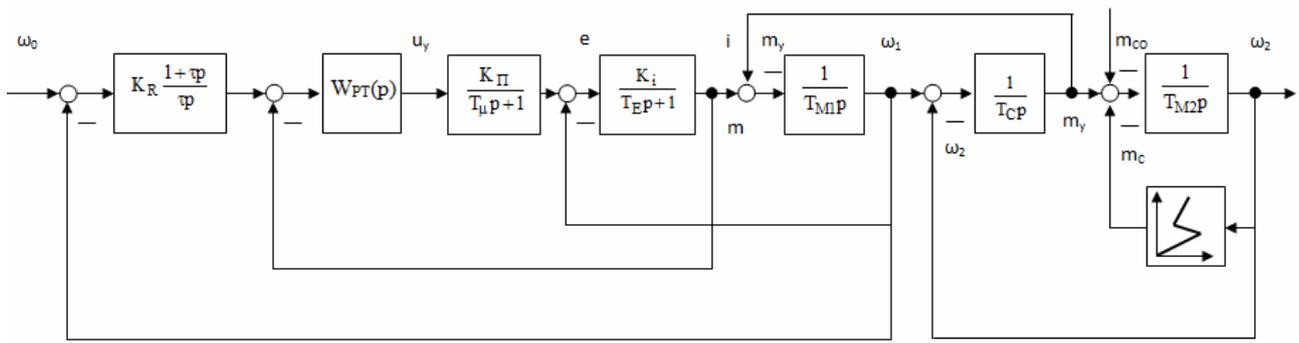


Рис. 1. Структурная схема двухмассовой электромеханической системы с нелинейной механической нагрузкой при астатическом регулировании

Для исследования демпфирующих свойств ЭМС на основании структурной схемы получены передаточные функции по управляющему и возмущающему воздействиям, из которых, как и в источнике [10], используется характеристический полином (ХП):

$$Q(p) = \gamma T_{M1} \tau T_y^2 p^4 + (\gamma K_R \tau T_y^2 + T_{M1} \tau T_d) p^3 + (\gamma T_{M1} \tau + K_R \tau T_d + \gamma K_R T_y^2) p^2 + (K_R T_d + (K_R \pm \beta_C) \tau) p + K_R. \quad (1)$$

Материалы исследований. В ХП (1) для удобства записи и анализа приняты следующие обозначения: $T_d = \pm \beta_C / c_{12}$ – постоянная времени, обусловленная вязким трением; $T_y = 1 / \Omega_{12}$ – постоянная времени упругих колебаний.

Если после преобразования выражения

$$K_R \pm \beta_C = K_R \left[1 \pm \frac{\beta_C}{K_R} \right],$$

обозначить

$$1 \pm \frac{\beta_C}{K_R} = \varepsilon, \quad (2)$$

то становится понятным смысл коэффициента « ε » – он характеризует дополнительное отклонение в динамике скорости механизма ω_2 при действии переменных сил трения.

В области малых отклонений от точки установившегося режима колебаний

$$\varepsilon > 1, \text{ если } \beta_C > 0, \omega < \omega_0,$$

$$\varepsilon = 1, \text{ если } \beta_C = 0, \omega = \omega_0,$$

$$0 < \varepsilon < 1, \text{ если } \beta_C < 0 \text{ и } |\beta_C| < K_R, \omega > \omega_0.$$

Тогда для канонической формы записи полинома

$$Q(p) = \gamma \frac{T_{M1}}{K_R} \tau T_y^2 p^4 + (\gamma \tau T_y^2 + \frac{T_{M1}}{K_R} \tau T_d) p^3 + (\gamma \frac{T_{M1}}{K_R} \tau + \tau T_d + \gamma T_y^2) p^2 + (T_d + \varepsilon \tau) p + 1. \quad (3)$$

Активное подавление упругих колебаний с развитием процессов дестабилизации при астатическом регулировании анализировать по ХП (1) затруднительно из-за множества вариантов сочетания параметров и частных решений. Поэтому представим ХП (3) в нормированном виде с учетом обобщенных параметров (4)

$$\left. \begin{aligned} K_B &= \frac{\Omega_{12}^2}{\Omega_E^2} = \frac{\tau T_{M1}}{K_R T_y^2}; \\ \xi_D &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tau K_R}{T_{M1}}}; \\ \xi_C &= \frac{T_d}{2\sqrt{\gamma T_y}}; \\ \gamma &= \frac{T_{M1} + T_{M2}}{T_{M1}}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Предложенная форма нормирования полиномов процессов электромеханического взаимодействия [11] учитывает физические явления и устанавливает взаимосвязи параметров ЭМС.

Согласно (4) K_B – коэффициент взаимодействия электромагнитной и механической подсистем ЭМС; ξ_D – коэффициент демпфирования (отдельной) парциальной электромагнитной подсистемы; ξ_C – коэффициент демпфирования (отдельной) парциальной механической подсистемы, причем

$$\xi_C > 0, \beta_C > 0, \varepsilon > 1,$$

$$\xi_C = 0, \beta_C = 0, \varepsilon = 1,$$

$$\xi_C < 0, \beta_C < 0, \varepsilon < 1, |\beta_C| < K_R.$$

При совместном рассмотрении соотношений (4) для K_B и ξ_D получаем формулы связи параметров ЭМС исходной структурной схемы с обобщенными показателями

$$\left. \begin{aligned} \frac{T_{M1}}{K_R} &= \frac{\sqrt{K_B} T_y}{2\xi_D}; \\ \tau &= 2\sqrt{K_B} \xi_D T_y. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Приняв форму нормирования (5), ХП представим в виде

$$Q(p) = \gamma K_B T_y^4 p^4 + 2(\gamma \sqrt{K_B} \xi_D + \sqrt{\gamma} K_B \xi_C) T_y^3 p^3 + (\gamma(1 + K_B) + 4\sqrt{\gamma} \sqrt{K_B} \xi_D \xi_C) T_y^2 p^2 + 2(\varepsilon \sqrt{K_B} \xi_D + \sqrt{\gamma} \xi_C) T_y p + 1. \quad (6)$$

ЭП при отработке отклонения скорости с нулевой статической ошибкой при действии нагрузки, переменных сил трения и устойчивом движении с затуханием процессов в механической подсистеме будет являться динамическим гасителем колебаний.

В таком случае ХП (6) при последовательной динамической декомпозиции представляется отдель-

ными взаимодействующими электромагнитной и механической подсистемами с описанием процессов в следующем виде:

$$Q(p) = (T_0^2 p^2 + 2\xi_1 T_0 p + 1)(T_0^2 p^2 + 2\xi_2 T_0 p + 1) = 0. \quad (7)$$

Электромеханическое взаимодействие процессов при описании в форме (7) физически означает полное извлечение (отвод) энергии колебаний из механической подсистемы в электромагнитную с одновременным преобразованием при $\xi_2 \rightarrow \xi_1$ за минимальное время.

ХП (7) после преобразования к стандартному виду записывается как

$$Q(p) = T_0^4 p^4 + 2(\xi_1 + \xi_2) T_0^3 p^3 + (2 + 4\xi_1 \xi_2) T_0^2 p^2 + 2(\xi_1 + \xi_2) T_0 p + 1. \quad (8)$$

Процессы в ЭМС при действии переменных сил трения и возбуждения упругих механических колебаний, которые описаны в нормированной форме (6) будут соответствовать процессам (8) при условии равенства коэффициентов при соответствующих степенях оператора характеристических полиномов, что дает следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \gamma K_B T_y^4 = T_0^4; \\ 2(\gamma \sqrt{K_B} \xi_D + \sqrt{\gamma} K_B \xi_C) T_y^3 = 2(\xi_1 + \xi_2) T_0^3; \\ (\gamma(1 + K_B) + 4\sqrt{\gamma} \sqrt{K_B} \xi_D \xi_C) T_y^2 = (2 + 4\xi_1 \xi_2) T_0^2; \\ 2(\varepsilon \sqrt{K_B} \xi_D + \sqrt{\gamma} \xi_C) T_y = 2(\xi_1 + \xi_2) T_0. \end{cases} \quad (9)$$

Система уравнений (9) решается при учете физических соображений – в полной ЭМС при оптимальной электромеханической связи

$$\xi_1 \leq \xi_2, \quad (10)$$

где $\xi_1 = \xi_E$ – коэффициент демпфирования процессов электромагнитной подсистемы в составной ЭМС; $\xi_2 = \xi_M$ – коэффициент демпфирования процессов механической подсистемы в составной ЭМС.

Известно, что ЭП может обладать свойствами демпфирования колебаний в упругой механической подсистеме с вязким трением при колебательном движении электромагнитной подсистемы [12], то и в системе с дестабилизацией $\xi_1 < 1$. И, конечно, суммарный эффект гашения колебаний в механической подсистеме не может быть выше демпфирующего действия электродвигателя. Такое ограничение позволяет принять и выразить для упрощения преобразований при решении системы (9) следующее обозначение

$$\xi_C = m \xi_D, \quad (11)$$

где m – коэффициент веса (доля) демпфирования силами трения (по отношению к ξ_D); $0 < m < 1$ – трение вязкое при движении со скоростью, соответствующей положительному участку характеристики трения; $-1 < m < 0$ – при колебательном движении со скоростью, соответствующей отрицательному участку характеристики трения.

Процессы (7) в электромагнитной и механической подсистемах будут равнозначны, то есть будут протекать с предельной степенью устойчивости и минимальной колебательностью в случае $\xi_2 = \xi_1$ для демпфирования

$$\xi_D = \sqrt{\frac{\gamma(1+m)^2 - 2(1-m)(\varepsilon-m) + (\varepsilon-m)^2}{\varepsilon^2(1-m)^2 + 2m(1-m)(\varepsilon-2)(\varepsilon-m) + m^2(\varepsilon-m)^2}}$$

при выполнении следующих соотношений для обобщенных показателей электромеханического взаимодействия подсистем

$$K_B = \gamma \frac{(1-m)^2}{(\varepsilon-m)^2}; \quad \xi_C = m \xi_D. \quad (12)$$

Анализ полученных соотношений (12) показывает, что при предельной степени демпфирования – минимуме колебательности – коэффициент электромеханического взаимодействия K_B и коэффициент демпфирования ξ_D определяются как коэффициентом распределения инерционных масс γ , так и коэффициентом отклонения скорости ε и коэффициентом веса « m ». При допущении отсутствия действия переменных сил трения на валу механизма $\varepsilon = 1$ и $m = 0$ получаются следующие соотношения:

$$K_B = \gamma; \quad \xi_D = \sqrt{\gamma - 1}, \quad (13)$$

которые соответствуют приведенным в источнике [9] для реализации процессов в ЭМС с предельной степенью электромеханического демпфирования упругих колебаний астатической системой автоматического регулирования. Таким образом, если выполнить синтез параметров ЭМС при астатическом регулировании, соблюдая соотношения (12), процессы в динамике будут соответствовать эталонным (7) и при влиянии дестабилизирующих факторов с действием «отрицательного» вязкого трения ЭМС будет устойчива при $\gamma > 1$, $0 < \varepsilon < 1$ и положительном вязком трении при $1 < \gamma < 5$ и $\varepsilon > 1$. В предельном случае характер колебательных затухающих процессов в ЭМС будут соответствовать предельному демпфированию с показателями:

$$\xi_0 = \sqrt{\frac{\gamma(1-m)^2 - 2(\varepsilon-m)(1-m) + (\varepsilon-m)^2}{4(\varepsilon-m)(1-m)^2}} + m \xi_D^2; \quad \xi_E = \xi_M = \xi_0, \quad (14)$$

$$\Omega_E = \Omega_M = \Omega_{EM} = \Omega_0 \sqrt{1 - \xi_0^2}, \quad (15)$$

где ξ_0 – коэффициент демпфирования колебаний в ЭМС; $\Omega_0 = \frac{1}{T_0} = \Omega_{12} \sqrt{\frac{\varepsilon-m}{\gamma(1-m)}}$ – собственная частота недемпфированных колебаний двухмассовой ЭМС, в динамике эквивалентной одномассовой.

Показатели характера процессов в ЭП (14), (15) с предельной степенью демпфирования упругих колебаний при действии переменных сил трения достигаются настройкой регулятора тока по критерию «модульный оптимум», а регуляторов скорости системы подчиненного регулирования по соотношениям

$$K_R = \frac{2T_{M1}\xi_D}{\sqrt{K_B} T_y}; \quad \tau = 2\sqrt{K_B} \xi_D T_y, \quad (16)$$

которые получены из формул (5) с последующей подстановкой оптимальных значений параметров K_B , ξ_D , ξ_C из (12).

На рис. 2 приведена осциллограмма изменения момента двигателя $m(t)$ для малых отклонений скорости при единичном ступенчатом изменении нагрузки для участка характеристики с отрицательным трением, где график переходного процесса 1 представлен для случая настройки на симметричный оптимум с типовыми параметрами САУ при расчетах без учета свойств упругого звена и переменных сил трения, а график переходного процесса 2 – для случая настройки на минимум колебательности с оптимальными параметрами САУ для участка характеристики с «отрицательным» трением. ЭП эффективно демпфирует колебания. В частности, предлагаемый метод синтеза параметров САУ был апробирован в промышленных условиях, при этом получены положительные результаты при наладке и модернизации станочного электропривода [13].

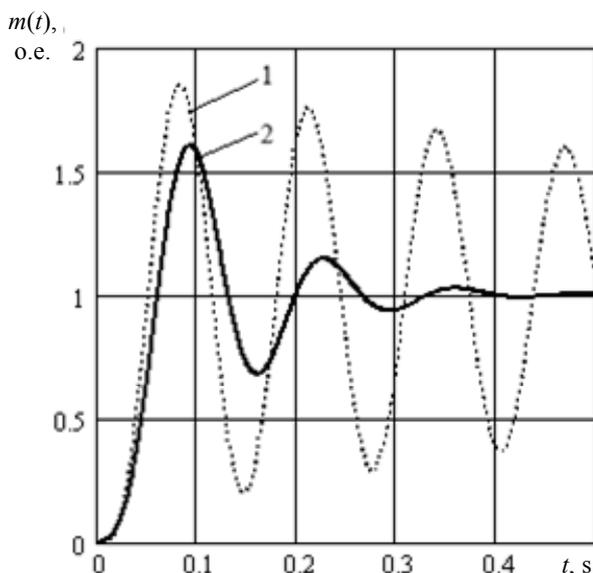


Рис. 2. Графики изменения момента двигателя для малых отклонений скорости при единичном ступенчатом изменении нагрузки:

$$1 - \gamma = 1,5, \Omega_{12} = 62,8 \text{ с}^{-1}, K_R = 141,75, \tau = 0,02 \text{ с};$$

$$2 - \gamma = 1,5, \Omega_{12} = 62,8 \text{ с}^{-1}, K_R = 65,227, \tau = 0,0273 \text{ с}, \zeta = 0,686,$$

$$m = -0,5, \varepsilon = 0,98$$

Выводы.

1. Двухмассовый ЭП с астатической системой регулирования при действии переменных сил трения эффективно демпфирует колебания при оптимизации параметров регуляторов.

2. Синтез параметров регуляторов скорости по соотношениям для коэффициента передачи K_R и постоянной интегрирования τ позволяет реализовать предельные показатели характера затухающих процессов при нулевой статической ошибке.

3. Метод синтеза по обобщенным показателям K_B , ζ_D , ζ_C и γ удовлетворяет требованиям системного анализа, так как учитывает меры механического, конструктивного, электромеханического способов подавления упругих механических колебаний.

4. Метод синтеза рекомендуется к практическому использованию для систем управления ЭП металлургических и подъемно-транспортных машин, металлообрабатывающих станков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат., 2001. – 704 с.
2. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посібник для студ. вищ. навч. закладів, які навчаються за напрямом «Електромеханіка». – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
3. Андриушенко В.А. Об устойчивости следящего электропривода низких скоростей при неограниченном возрастании некоторых его параметров // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1976. – №1. – С. 100-103.
4. Иванченко Ф.К. Механика приводов технологических машин. – К.: Вища шк., 1986. – 152 с.
5. Бесекерский В.А. Динамический синтез систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1970. – 576 с.
6. Клепиков В.Б., Осичев А.В. Определение границ устойчивости электропривода с отрицательным вязким трением с учетом упругости кинематической цепи // Электричество. – 1989. – №1. – С. 36-41.
7. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.
8. Бургин Б.Ш. Анализ и синтез двухмассовых электромеханических систем. – Новосибирск: Новосиб. электротехн. ин-т, 1992. – 199 с.
9. Samuelsson O. Load modulation at two locations for damping of electromechanical oscillations in a multimachine system // Power Engineering Society Summer Meeting 2000. IEEE, 2000, vol.3, pp. 1912-1917. doi: 10.1109/pess.2000.868826.
10. Задорожний Н.А., Марилев Н.Г., Кутовой Ю.Н., Мохаммед Арус. Анализ электромеханической системы приводов с упругими механическими связями в режиме низких скоростей и буксовании // Вестник НТУ «ХПИ». Темат. вып.: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – 1997. – С. 122-123.
11. Задорожний Н.А., Задорожня И.Н. Синтез параметров астатической системы автоматического управления двухмассовыми электроприводами с заданной степенью устойчивости и минимальной колебательностью // Вестник НТУ «ХПИ». Темат. вып.: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – 2015. – №12(1121). – С. 155-159.
12. Задорожня І.М. Оптимізація динамічних режимів приводів металургійних машин з мінімізацією впливу пружних коливань // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XI Міжнародної науково-технічної конференції. – Кременчук, КрНУ, 2013. – С. 51-52.
13. Задорожний Н.А., Ребедак О.А., Задорожня И.Н. Особенности работы механизма подачи глубокорасточного станка КЖ-1910 в режиме низких скоростей // Вісник НТУ «ХП». – 2013. – №36(1009). – С. 209-210.

REFERENCES

1. Kliuchev V.I. *Teoriia elektroprivoda* [Theory of the electric drive]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2001. 704 p. (Rus).
2. Popovich M.G., Lozinskii O.Yu., Klepikov V.B. *Elektromekhanichni sistemi avtomatichnogo keruvannia ta elektroprivodi : navch.posibnik dlia stud. vishch. navch. zakladiv, iaki navchait'sia za napriamom «Elektromekhanika»* [Electromechanical systems of automatic control and electric drives: a manual for students of higher educational institutions in the direction of «Electromechanics»]. Kyiv, Lybid Publ., 2005. 680 p. (Ukr).
3. Andriushchenko V.A. On the stability of the traction electric drive of low speeds with unlimited increase of some of its parameters. *Russian Electromechanics*, 1976, no.1, pp. 100-103. (Rus).

4. Ivanchenko F.K. *Mekhanika privodov tekhnologicheskikh mashin* [Mechanics of drives of technological machines]. Kyiv, Vishcha shk. Publ., 1986. 152 p. (Rus).
5. Besekerskii V.A. *Dinamicheskii sintez sistem avtomaticheskogo regulirovaniia* [Dynamic synthesis of automatic control systems]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 576 p. (Rus).
6. Klepikov V.B., Osichev V.B. Determination of the stability limits of an electric drive with negative viscous friction taking into account the elasticity of the kinematic chain. *Electricity*, 1989, no.1, pp. 36-41. (Rus).
7. Bortsov Iu.A., Sokolovskii G.G. *Avtomatizirovannyi elektropriwod s uprugimi svyaziami* [Automated electric drive with elastic connections]. St. Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1992. 288 p. (Rus).
8. Burgin B.Sh. *Analiz i sintez dvukhmassovykh elektromekhanicheskikh sistem* [Analysis and synthesis of two-mass electromechanical systems]. Novosibirsk, NETI Publ., 1992. 199 p. (Rus).
9. Samuelsson O. Load modulation at two locations for damping of electromechanical oscillations in a multimachine system. *Power Engineering Society Summer Meeting 2000*. IEEE, 2000, vol.3, pp. 1912-1917. doi: 10.1109/pess.2000.868826.
10. Zadorozhnyi N.A., Marilov N.G., Kutovoi Iu.N., Arus Mokhammed. Analysis of electromechanical drive systems with elastic mechanical connections in the regime of low speeds and slipping. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Problems of automated electric drive. Theory and practice*. Kharkov, 1997, pp. 122-123. (Rus).
11. Zadorozhnyi N.A., Zadorozhniaia I.N. Synthesis of parameters of an astatic automatic control system for two-mass electric drives with a specified degree of stability and minimum oscillation. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Problems of automated electric drive. Theory and practice*, 2015, no.12(1121), pp. 155-159. (Rus).
12. Zadorozhnia I.M. Optimization of dynamic modes of drives of metallurgical machines with minimization of influence of elastic oscillations. *Electromechanical and Energy Systems, Modeling and Optimization Methods. Conference proceedings of the 11th International conference of students and young researchers*. Kremenchuk, April 9-11, 2013, pp. 51-52. (Ukr).
13. Zadorozhnyi N. A., Rebedak O. A., Zadorozhniaia I.N. Features of the work of the feed mechanism deep machine KZH-1910 in low speed mode. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2013, no.36(1009), pp. 209-210. (Rus).

Поступила (received) 19.02.2018

Задорожня Інна Николаевна¹, к.т.н., доц.,
 Задорожний Николай Алексеевич¹, к.т.н., доц.,
¹Донбасская государственная машиностроительная академия,
 84313, Донецкая обл., Краматорск, ул. Академическая, 72,
 e-mail: zadorozhnyaya_in@ukr.net

I.N. Zadorozhniaia¹, N.A. Zadorozhnyi¹

¹Donbass State Engineering Academy,
 72, Akademicheskaiia Str., Kramatorsk, Donbass Region, 84313,
 Ukraine.

Synthesis of a two-mass electric drive with an astatic system of subordinate regulation at the action of variable friction forces.

Purpose. The solution of actual problem of active suppression of resilient electromechanical vibrations in an electric drive with the astatic system of automatic control is presented. **Methodology.** For research of damping properties of electrical drive according to a flow diagram from transmission functions on regulation and indignation a characteristic polynomial is got in the rationed form of parameters that takes into account the physical phenomena and sets intercommunications of parameters in the electromechanical system. As a result of it a characteristic polynomial at a successive dynamic decoupling appears separate interactive electromagnetic and mechanical subsystems. Thus, electromechanical interaction physically means complete extraction of energy of vibrations from a mechanical subsystem in electromagnetic with simultaneous transformation for minimum time. An electric drive for the case of realization of processes of electromechanical interaction is the dynamic extinguisher of vibrations. **Results.** The active resilient mechanical oscillation damping comes true due to optimization of dynamic inflexibility of mechanical description of electrical drive and as a result the required degree of stability is provided at minimum vibration and high exactness of working off indignations on loading. **Originality.** For the first time an electrical drive with the astatic system of automatic control at the action of variable forces of friction for the offered optimal parameters of dynamic inflexibility of mechanical description effectively damps vibrations. The synthesis of parameters of regulators according to correlations allowed to realize the maximum indexes of character of attenuation processes at a zero static error. **Practical value.** The synthesis method is approved in industrial conditions during the adjustment and modernization of the machine tool and is recommended for setting up automatic control systems for the operating and newly designed electric drives of technological machines. References 13, figures 2.

Key words: electromechanical system, damping, electric drive, interaction, regulation, speed controller, synthesis, variable friction forces.

О.Ю. Лозинський, Я.С. Паранчук, Р.Я. Паранчук, Ф.Д. Матіко

РОЗВИТОК МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЖИМІВ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ

Мета. Метою статті є створення трифазної у миттєвих координатах комп'ютерної Simulink-моделі системи живлення та системи автоматичного регулювання (САР) координат електричного режиму (ЕР) дугової сталеплавильної печі типу ДСП-200, яка має зручний інтерфейс для зміни структури та параметрів системи живлення трифазних дуг, структури системи та законів керування електричним режимом, а також стохастичних характеристик параметричних та координатних збурень. *Методика.* Для проведення досліджень використовувалися положення теорії електричних кіл, експериментальні дослідження і математичне та комп'ютерне моделювання в додатку Simulink пакету Matlab. *Результати.* Створено високоточну комп'ютерну у миттєвих координатах Simulink-модель системи живлення та САР координат ЕР ДСП-200 та з її використанням проведено дослідження ЕР та отримано оцінки показників функціонування дугової печі у різних технологічних періодах плавлення та за різних структур системи автоматичного керування (САК). *Наукова новизна.* Вперше на основі поєднання елементів бібліотеки додатку Simulink та типових бібліотечних блоків SimPowerSystems програми Matlab складено трифазну у миттєвих координатах повну модель системи живлення та САК ЕР дугової печі ДСП-200, яка має значні переваги по точності, швидкодії та функціональних можливостях у порівнянні з відомими моделями. *Практична цінність.* Можливість виконання на створеній Simulink-моделі математичних експериментів з дослідження показників динаміки регулювання координат ЕР та показників електромагнітної сумісності режимів ДСП та електромережі при дії детермінованих і випадкових збурень. Бібл. 11, табл. 3, рис. 16.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, комп'ютерна Simulink-модель, система живлення, система автоматичного регулювання, електричний режим, регулятор, динамічна вольт-амперна характеристика дуги, електромеханічний контур.

Цель. Целью статьи является создание трехфазной в мгновенных координатах компьютерной Simulink-модели системы питания и системы автоматического регулирования (САР) координат электрического режима (ЭР) дуговой сталеплавильной печи типа ДСП-200, которая имеет удобный интерфейс для изменения структуры и параметров системы питания трехфазных дуг, структуры системы и законов управления электрическим режимом, а также стохастических характеристик параметрических и координатных возмущений. *Методика.* Для проведения исследований использовались положения теории электрических цепей, экспериментальные исследования и математическое и компьютерное моделирование в приложении Simulink программы Matlab. *Результаты.* Создана высокоточная компьютерная в мгновенных координатах Simulink-модель системы питания и САР координат ЭР ДСП-200 и ее использованием проведены исследования ЭР и получены оценки показателей функционирования дуговой печи в различных технологических периодах плавления и при различных структурах системы автоматического управления (САУ). *Научная новизна.* Впервые на основе сочетания элементов библиотеки приложения Simulink и типовых библиотечных блоков SimPowerSystems программы Matlab составлена трехфазная в мгновенных координатах полная модель системы питания и САУ ЭР дуговой печи ДСП-200, которая имеет значительные преимущества по точности, быстродействию и функциональным возможностям по сравнению с известными моделями. *Практическая ценность.* Возможность выполнения выполения на созданной Simulink-модели математических экспериментов по исследованию показателей динамики регулирования координат ЭР и показателей электромагнитной совместимости режимов ДСП и электросети при действии детерминированных и случайных возмущений. Библ. 11 табл. 3, рис. 16.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, компьютерная Simulink-модель, система питания, система автоматического регулирования, электрический режим, регулятор, динамическая вольт-амперная характеристика дуги, электромеханический контур.

Вступ. Дугові сталеплавильні печі (ДСП) – це потужні електротехнологічні об'єкти для плавлення сталей і сплавів в основному з металобрухту. Зважаючи на значну встановлену потужність та вкрай динамічний несиметричний та нелінійний характер навантаження, проведення експериментальних досліджень їх режимів та показників процесу плавлення в ДСП з огляду низки організаційних, технічних та виробничих причин не завжди є можливим. Особливі труднощі виникають при необхідності виконання експериментальних досліджень для різних структур системи автоматичного керування (САК), для різних її параметрів, для різних схемних змін у силовому колі живлення трифазних дуг тощо.

Постановка проблеми. Одним з підходів для отримання вказаної інформації (показників динаміки, електротехнологічної ефективності та електромагнітної сумісності) є математичне та комп'ютерне моде-

лювання [1, 2]. Проте існуючі математичні та комп'ютерні моделі процесів в ДСП за швидкодією, точністю відтворення режимів, функціональними можливостями, зручністю зміни структури, параметрів та постановки модельних експериментів не відповідають сучасним вимогам для комплексного дослідження показників динаміки, електротехнологічної ефективності та електромагнітної сумісності.

Огляд останніх публікацій. Існуючі комп'ютерні моделі [3, 4] мають складний та незручний інтерфейс зі зміни параметрів та структури САК ЕР та силового кола живлення трифазних дуг, законів керування електричним режимом, оперативного формування характеристик збурень з різними стохастичними характеристиками, що відповідають досліджуваному технологічним стадіям плавлення, статистичного опрацювання результатів моделювання в on-line

© О.Ю. Лозинський, Я.С. Паранчук, Р.Я. Паранчук, Ф.Д. Матіко

режимі, що ускладнює комп'ютерні дослідження ЕР дугової печі при пошуку найкращих рішень для структури та параметрів САК і законів керування ЕР. Деякі з відомих моделей застосовуються лише для аналізу процесів зміни координат ЕР у силовому колі без замкненої системи регулювання довжин дуг в усереднених координатах [5], інші мають складний і незручний інтерфейс із зміни структури САК, законів керування, характеристик параметричних та координатних збурень, залежностей динамічних вольтамперних характеристик дуг тощо [6-8]. Їм властива або низька точність відтворення режимів [5], чи обмежені функціональні можливості з постановки та проведення різних математичних експериментів [6-8].

Обґрунтування актуальності. Тому задача створення нових високоточних та швидкодійних комп'ютерних моделей системи живлення та САК координат ЕР ДСП, у яких враховуються всі основні нелінійності, особливості зміни параметричних та координатних збурень у процесі плавлення, у яких реалізуються зручні інтерфейси зміни структури, законів керування та параметрів САК, постановки математичних експериментів та статистичного опрацювання результатів досліджень на сьогодні є актуальною та важливою науково-технічною задачею.

Метою роботи є створення трифазної у миттєвих координатах структурної Simulink-моделі системи живлення трифазних дуг та системи автоматичного керування електричним режимом дугової сталеплавильної печі та дослідження показників динаміки електричних режимів та показників електромагнітної сумісності з її використанням.

Науковою задачею є створення структурної Simulink-моделі системи живлення трифазних дуг та системи автоматичного керування електричним режимом дугової сталеплавильної печі на основі поєднання модельних елементів бібліотеки Simulink та структурних блоків SimPowerSystem програми Matlab.

Структурна Simulink-модель системи живлення та САК координат ЕР печі ДСП-200. На рис. 1 показано розроблену функціональну схему системи електроживлення трифазних дуг без нульового провідника та одноконтурної системи автоматичного регулювання координат ЕР з диференціальним законом формування сигналу керування на переміщення електродів (автоматичного регулювання довжин дуг).

На основі цієї функціональної схеми створено комп'ютерну Simulink-модель (рис. 2), яка налаштована на параметри системи живлення, силового електрообладнання та регулятора потужності дуг типу АРДМТ-12 (САК координат ЕР) дугової печі типу ДСП-200. Тестування моделі виконувалося шляхом порівняння показників динаміки відпрацювання детермінованих та стаціонарних випадкових збурень за довжиною (напругою) дуги, що отримувалися на діючій дугової печі ДСП-200 та на складеній її Simulink-моделі при керуванні за диференціальним законом.

Для адекватного відтворення в складеній комп'ютерній моделі реальних залежностей динамічних вольтамперних характеристик (ДВАХ) дуг, що мають місце на різних технологічних стадіях плавлення, у модулі трифазних дуг Simulink-моделі перед-

бачено можливість реалізації в поточному математичному експерименті однієї з чотирьох моделей, що відповідають основним технологічним стадіям плавлення – лінійної $u_a(t) = R_a(t) \cdot i_a(t)$ та нелінійних – на основі функції арктангенса $u_a(t) = 2 \cdot E_{am}(t) \cdot \arctan(k \cdot i_a(t)) / \pi$, на основі диференційного рівняння Кассі

$$\theta \frac{dg_a(t)}{dt} = \left(\frac{u_g(t)^2}{E_{am}^2} \right) g_a(t) \text{ та нелінійної зі складною}$$

нелінійною функціональною залежністю на основі використання кусково-лінійних та кусково-нелінійних сплайнів $u_a(t) = \Psi(i_a(t), l_a(t))$ з можливістю відтворення гістерезисних властивостей дуги, піків запалювання, погасання дуги тощо, де $g_a(t)$, $R_a(t)$ – миттєва провідність та опір дуги; E_{am} – максимальне значення проти-ЕРС дуги; $u_a(t)$, $i_a(t)$, $l_a(t)$ – миттєві напруга, струм та довжина дуги, θ_a – стала часу, що характеризує теплову інерційність дуги [9].

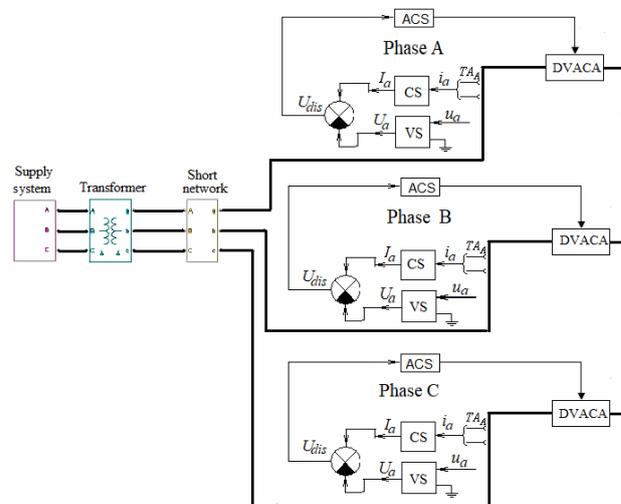


Рис. 1. Функціональна схема трифазної Simulink-моделі системи живлення та САК координат ЕР печі ДСП-200

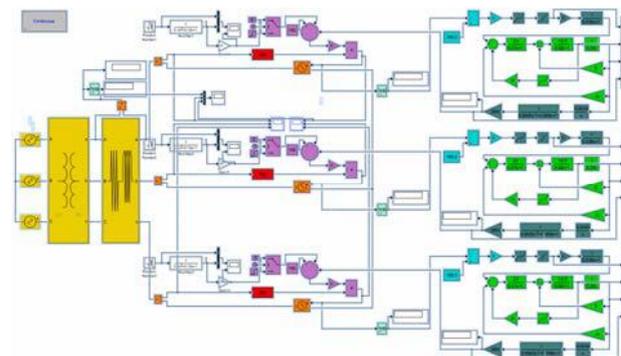


Рис. 2. Структурна схема трифазної Simulink-моделі системи живлення та САК координат ЕР дугової печі ДСП-200

Зміною значення сталої часу θ_a в моделі можна відтворювати умови горіння дуг на різних технологічних стадіях плавки, тобто реалізувати різні ДВАХ дуг (їх площа характеризує реактивну потужність дуги). На початку плавки $\theta_a = 0.2 \div 0.5$ мс; $\theta_a = 1 \div 1.5$ мс на інтервалі утворення рідкої фази розплаву, а на періодах окислення та рафінування – $\theta_a = 3 \div 5$ мс.

Модель блока трифазних дуг за внесення відповідних структурних і параметричних змін має мож-

ливість відтворювати вказані вище типи ДВАХ дуг, що властиві різним технологічним стадіям плавлення.

На рис. 2 жовтим кольором позначено елементи моделі трифазної симетричної електричної мережі (ЕМ), пічного трансформаторного агрегату (ПТА) та вторинного струмопровода – короткої мережі (КМ) печі, які подають модель силового електричного кола живлення трифазних дуг ДСП з відповідними ДВАХ дуг, що зібрані на елементах бібліотеки SimPowerSystems (червоний колір). На цих елементах реалізовано можливість відтворення описаних вище чотирьох типів динамічних ДВАХ дуг, які мають місце на різних технологічних стадіях плавлення.

Джерела напруги відтворюють трифазну синусоїдну напругу мережі живлення дугової печі з частотою 50 Гц, амплітудою $35\sqrt{2}$ кВ та кутом зсуву 120 ел.град. Блок «пічний трансформатор» представляє собою трифазний трансформатор з коефіцієнтом трансформації $k_{tr} = 35000/480 = 72.92$ та потужністю $S = 125$ МВА.

Блок «сумарний повний опір» імітує сумарний опір всіх активних опорів елементів системи живлення дуг (дроселя, трансформатора, короткої мережі та електрода у кожній фазі), що об'єднані в опір r_{ss} , а всі їх індуктивні опори об'єднані в опір x_{ss} .

Червоний блок $I_a(U_a)$ відтворює статичну зовнішню характеристику дугової печі ДСП-200 для відповідної ступені силового пічного трансформатора.

Помаранчевий блок є джерелом керованої напруги, характеристика «вхід-вихід» якого формується блоком $I_a(U_a)$ та блоком задання збурень.

Фіолетові блоки з групи елементів задання збурень моделюють детерміновані та випадкові збурення за довжиною дуги, що виникають при роботі ДСП у дугових проміжках на різних технологічних стадіях плавлення. Призначенням цієї групи блоків є формування різних часових реалізацій збурень за довжинами дуг у фазах короткої мережі печі, з однаковими статистичними характеристиками, які відповідають досліджуваному технологічному стадіям плавлення.

Блоки яскраво блакитного кольору відтворюють модель блока порівняння вхідних сигналів САР для реалізації відповідного закону формування сигналу розузгодження ЕР. Його вихідним сигналом є сигнал розузгодження U_{dis} , а його залежність «вхід-вихід» $U_{dis}=F(U_a, I_a)$ змінюється відповідно до досліджуваного закону керування електричним режимом.

Елементи Simulink-моделі темно-зеленого кольору моделюють статичну залежність «вхід-вихід» блока формування сигналу керування на переміщення електрода певної фази печі. У ньому реалізується «зона нечутливості» ($\delta = 2...10$ %), коефіцієнт підсилення на піднімання та опускання електродів, обмеження максимальної швидкості на піднімання U_t^{max} та опускання U_d^{max} електродів, відтворюється інерційність фільтра низьких частот, що включається у кожній фазі на виході випрямлячів давача струму ДС та давача напруги ДН. На рис. 3 показано статичну характеристику блока формування сигналу керування $U_c = f(U_{dis})$.

Блок «Редуктор» слугує для перетворення кутової швидкості двигуна, зведеної до кутової швидкості шес-

терні, у лінійні переміщення електрода і представляється в Simulink-моделі нелінійною ланкою типу «люфт» та інтегруючою ланкою, які моделюють механічну передачу типу «шестерня - рейка». Блок «Коливна ланка» відтворює обмежену жорсткість окремих елементів кінематичної схеми механізму переміщення електрода, зокрема вертикальної колони, горизонтального рукава електродотримача та самого електрода.

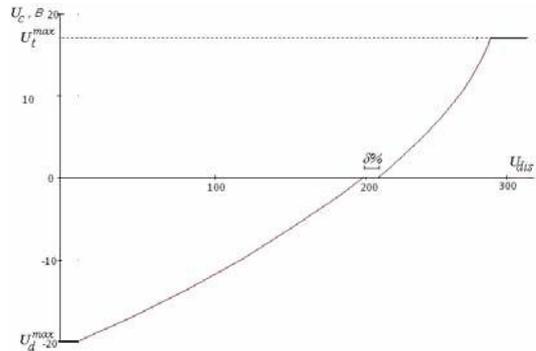


Рис. 3. Залежність «вхід-вихід» блока формування сигналу керування

Група елементів зеленого кольору моделює електропривод механізму переміщення електрода регулятора потужності дуг типу АРДМ-Т-12, який зібраний за схемою «реверсивний тиристорний перетворювач – двигун постійного струму» із нелінійним від'ємним зворотним зв'язком за струмом якоря та від'ємним за швидкістю двигуна і з підсумовуванням цих сигналів на вхідному підсилювачі.

В блоках RMS неперервно у процесі моделювання розраховуються діючі значення струму і напруги дуги

$$\text{за формулою } RMS(f(t)) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t)^2 dt}.$$

У табл. 1 наведено експериментально отримані на печі ДСП-200 дані, які описують статичну зовнішню характеристику $I_a(U_a)$ цієї печі та залежність потужності дуг $P_a(U_a)$, які відтворюються функціональними блоками в моделі силового кола печі ДСП-200.

Таблиця 1
Експериментальні дані для характеристик $I_a(U_a)$ та $P_a(U_a)$ дугової сталеплавильної печі ДСП-200

| I_a, A | U_a, B | $P_a, Bт$ |
|----------|----------|-----------|
| 70962 | 3.96E-06 | 0.28101 |
| 68808 | 39.39 | 2710347 |
| 65339 | 77.98 | 5095135 |
| 60614 | 115.13 | 6978490 |
| 54723 | 149.99 | 8207903 |
| 47894 | 183.34 | 8780886 |
| 43970 | 198.2 | 8714854 |
| 40800 | 208.5 | 8506800 |
| 33590 | 227.9 | 7655161 |
| 27593 | 241.85 | 6673367 |
| 19392 | 256.72 | 4978314 |
| 14749 | 263.25 | 3882674 |
| 7673 | 271.11 | 2080227 |
| 2877 | 275.2 | 791750.4 |
| 1428 | 276.25 | 394485 |
| 142.7 | 277.08 | 39539.32 |
| 14.27 | 277.14 | 3954.788 |
| 1.4273 | 277.16 | 395.5905 |

На рис. 4 та рис. 5 наведено побудовані на основі цих експериментальних даних модельні залежності цих двох основних характеристик дугової печі ДСП-200.

На рис. 5 пунктирними лініями показано координати точки режиму максимальної потужності дуг та точки потужності дуг, що відповідає усталеному режиму печі на першій ступені напруги пічного трансформатора. Координати точки усталеного режиму (напруга та струм дуги) відповідають уставкам регулятора потужності дуг типу АРДМ-Т-12 за напругою U_{set} та за струмом I_{set} дуги відповідно.

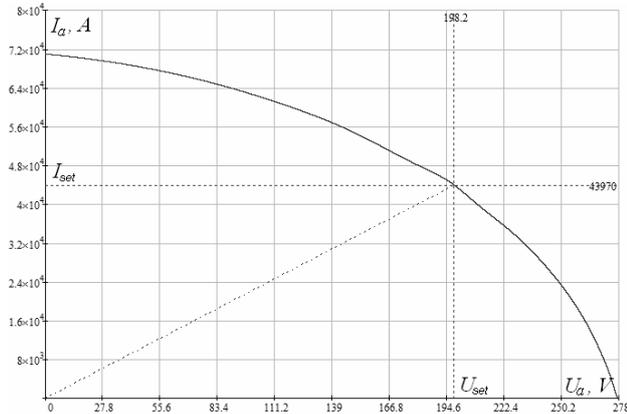


Рис. 4. Зовнішня характеристика $I_a(U_a)$ печі ДСП-200

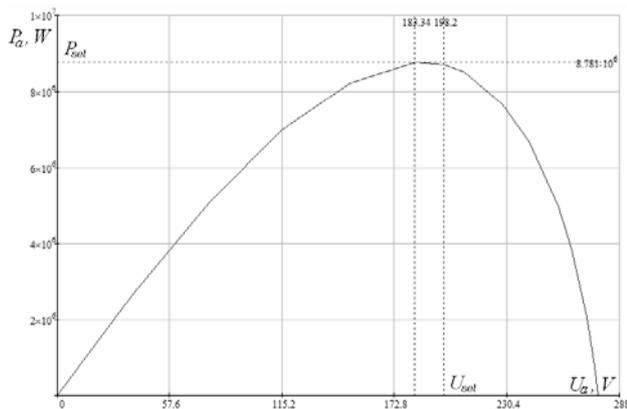


Рис. 5. Залежність потужності $P_a(U_a)$ дуг ДСП-200

В структурну схему Simulink-моделі включено модуль генератора детермінованих (зокрема екстремальних, що спричиняють симетричні чи несиметричні по фазах експлуатаційні короткі замикання (к.з.) чи обриви дуги (о.д.)) та стаціонарних випадкових збурень за довжиною дуги, які за стохастичними характеристиками відповідають збуренням, що діють в дугових проміжках в досліджуваних технологічних стадіях. У створеній Simulink-моделі включено також модуль розрахунку інтегральних характеристик часових процесів зміни координат ЕР та показників електромагнітної сумісності, які комплексно характеризують ефективність керування режимами та динаміку регулювання координат ЕР печі ДСП-200 з налаштованою структурою САР для певної технологічної стадії, характеристик збурень та вибраних законів керування ЕР.

Дослідження точності створеної Simulink-моделі виконувалося на основі порівняння математичних сподівань та дисперсій процесів зміни середньоквад-

ратичних значень струмів дуг $I_a(t)$, отриманих на діючій дуговій печі ДСПА-200 та її Simulink-моделі на різних технологічних стадіях плавлення. Порівняння їх значень виконувалося на основі М-критерію Барлетта [10]. Критеріальні оцінки для математичного сподівання t_M та для дисперсій t_D струмів дуг отримувалися за формулами (1) та (2) відповідно:

$$t_M = \frac{N-k}{k-1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^k n_i \cdot (\bar{x}_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}; \quad (1)$$

$$t_D = \frac{\ln 10}{c} \left[(N-k) \cdot \lg s^2 - \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \cdot \lg s_i^2 \right];$$

$$c = 1 + \frac{1}{3 \cdot (k-1)} \cdot \left(\sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i - 1} - \frac{1}{N-k} \right); \quad (2)$$

$$s^2 = \frac{1}{N-k} \cdot \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \cdot s_i^2,$$

де $N = \sum_{i=1}^k n_i$ – загальна кількість даних; k – число вибірок; n_i , $i = 1, 2, \dots, k$ – чисельність i -ої вибірки;

$\bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \cdot \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}$, $i = 1, 2, \dots, k$ – середнє значення i -ої вибірки; $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}$ – загальне середнє значення

генеральної сукупності даних;

$s_i^2 = \frac{1}{n_i - 1} \cdot \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$ дисперсія i -ої вибірки.

Отримані значення цих критеріїв не перевищували допустиме (табличне) значення критерію – 3,84, що бралось для 5 %-го рівня значимості α . На основі порівняння цих оцінок отримано підтвердження про досягнення достатньої точності відтворення реальних процесів зміни струмів дуг $I_a(t)$ у створеній Simulink-моделі дугової печі ДСП-200.

Дослідження динаміки та ефективності різних структур САК ЕР печі ДСП-200. На першому етапі досліджень виконувалося моделювання процесів в електроприводі механізму переміщення електродів (електромеханічній системі «тиристорний перетворювач – двигун») (ТП-Д) регулятора потужності дуг типу АРДМ-Т-12 та механізмі переміщення електродів (МПЕ). Їх динамічні та статичні властивості відчутно впливають на показники якості регулювання довжин дуг (відпрацювання збурень за довжинами дуг). На рис. 6 представлено фрагмент загальної Simulink-моделі ДСП-200, що відтворює процеси зміни координат електропривода та МПЕ в одній фазі, а на рис. 7 показано отримані на цій моделі динамічні процеси зміни струму якоря $I_m(t)$ та кутової швидкості $\omega_m(t)$ двигуна МПЕ при детермінованих змінах сигналу керування $U_c(t)$ на вході тиристорного перетворювача.

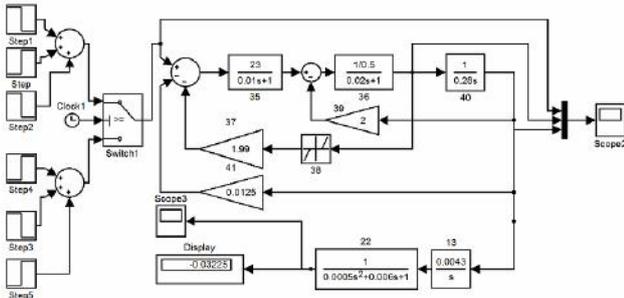


Рис. 6. Simulink-модель ЕП за схемою ТП-Д механізму переміщення електрода регулятора потужності дуг АРДМ-Т-12

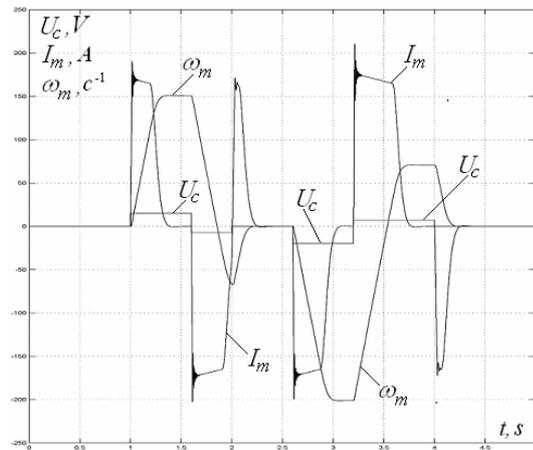


Рис. 7. Динаміка струму $I_m(t)$ і швидкості $\omega_m(t)$ двигуна МПЕ при детермінованій зміні сигналу керування $U_c(t)$ ЕП МПЕ

На рис. 8 показано отримані на створеній Simulink-моделі часові залежності зміни миттєвих значень напруги вторинної обмотки ПТ $u_{2p}(t)$ та струму $i_a(t)$ і напруги $u_a(t)$ дуги у фазі А в квазіусталеному режимі відпрацювання випадкових збурень при нелінійній ДВАХ дуги, що описується функцією арктангенса. Наведені часові залежності ілюструють вплив трапецеподібної форми напруги на дугах, яка спостерігається в кінці розплавлення твердої шихти, на спотворення синусоїдності форми струму дуги та фазної напруги вторинної обмотки пічного трансформаторного агрегату.

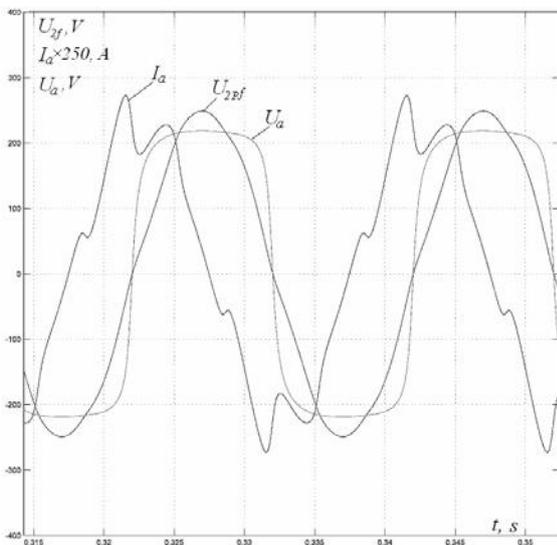


Рис. 8. Часові залежності квазіусталеного процесу зміни напруги $u_a(t)$, струму $i_a(t)$ дуги та напруги $u_{2p}(t)$ ПТА

На комп'ютерні моделі досліджувалися також і режими відпрацювання несиметричних по фазах детермінованих збурень за довжинами дуг – режими одно- та двофазних к.з. та о.д. і визначалися відповідні їм показники якості динаміки.

Так на рис. 9 показано отримані процеси зміни діючих значень напруги $U_a(t)$, струму $I_a(t)$, дуги та струму $I_m(t)$ і швидкості $\omega_m(t)$ двигуна електропривода механізму переміщення електрода у всіх трьох фазах при відпрацюванні к.з. у фазі А за диференційного закону регулювання довжин дуг.

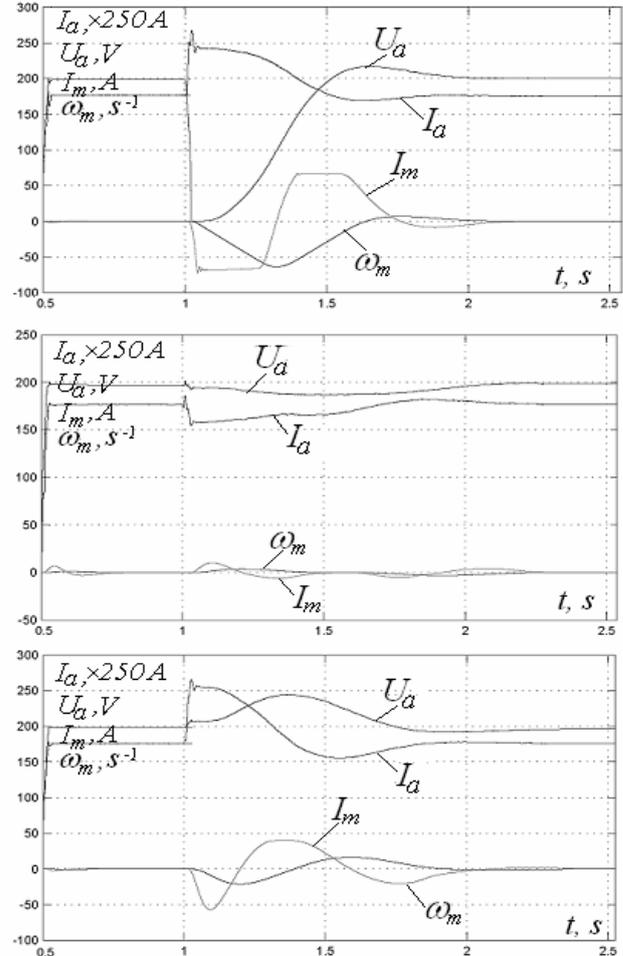


Рис. 9. Часові залежності координат ЕР печі ДСП-200 та двигуна МПЕ у кожній з фаз при відпрацюванні к.з. у фазі А

На рис. 10 наведено отримані на складеній Simulink-моделі часові залежності цих же координат ЕР у кожній з фаз силового кола печі ДСП-200 та двигуна електропривода МПЕ регулятора потужності дуг АРДМ-Т-12 у режимі відпрацювання екстремального (симетричного по фазах) збурення, що призводить до трифазного обриву дуг. Аналіз наведених на рис. 9 та рис. 10 часових залежностей показує коливий характер процесів відпрацювання вказаних детермінованих екстремальних збурень з часом регулювання 1.2 с та 1.4 с відповідно.

Окрім диференційного закону, досліджувалися також і інші закони формування сигналу керування на переміщення електродів. На рис. 11 показано отримані на моделі часові залежності зміни координат ЕР (напруги $U_a(t)$, струму $I_a(t)$, дуги) дугової печі

ДСП-200 та координат двигуна механізму переміщення електрода (струму $I_m(t)$, швидкості $\omega_m(t)$ кожній з фаз) при відпрацюванні обриву дуги у фазі А і регулюванні за законом відхилення напруги дуги від заданого $U_{dis}=k(U_{a.set} - U_a)$.

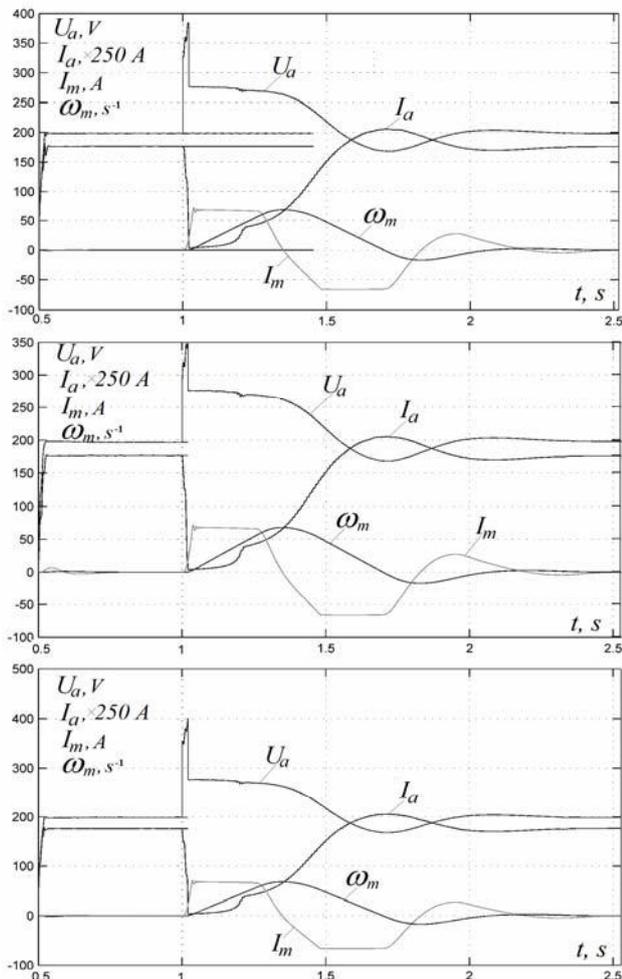


Рис. 10. Часові залежності напруги $U_a(t)$, струму $I_a(t)$ дуги печі ДСП-200 та струму $I_m(t)$ і швидкості $\omega_m(t)$ двигуна МПЕ кожної з фаз при відпрацюванні трифазного о.д.

Основними збуреннями у процесі плавлення шихти в дуговій печі є стаціонарні випадкові збурення за довжиною дуги, стохастичні характеристики яких змінюються упродовж плавки. З випадковим характером коливається теж і напруга на шинах живлення ДСП, випадково змінюються також і параметри елементів силового кола (елементів короткої мережі печі) тощо.

Для відтворення в складеній Simulink-моделі вказаних вище випадкових процесів координатних та параметричних збурень, створено і включено в модель модуль генерування трьох незалежних реалізацій випадкових процесів з однаковими стохастичними характеристиками і з можливістю зміни їх параметрів у відповідності з параметрами характеристик цих збурень, що діють у досліджуваних технологічних стадіях плавлення в діючій дуговій печі ДСП-200.

На початкових стадіях вказані збурення мають максимальні амплітуди в діапазоні низьких частот (0.2-1.5 Гц), далі амплітуди зменшуються, а їх частоти зростають, а на стадії окислення та рафінування

(зокрема стадії кипіння шлаку) амплітуди мінімальні, а їх частоти лежать в смузі 5-8 Гц. У створеному модулі генерування випадкових збурень реалізовано можливість такої зміни їх параметрів відповідно до значень параметрів стохастичних характеристик реальних збурень у досліджуваних технологічних стадіях плавки. Фрагмент таких випадкових збурень для технологічної стадії проплавлення колодязів в дуговій печі ДСП-200 показано на рис. 12.

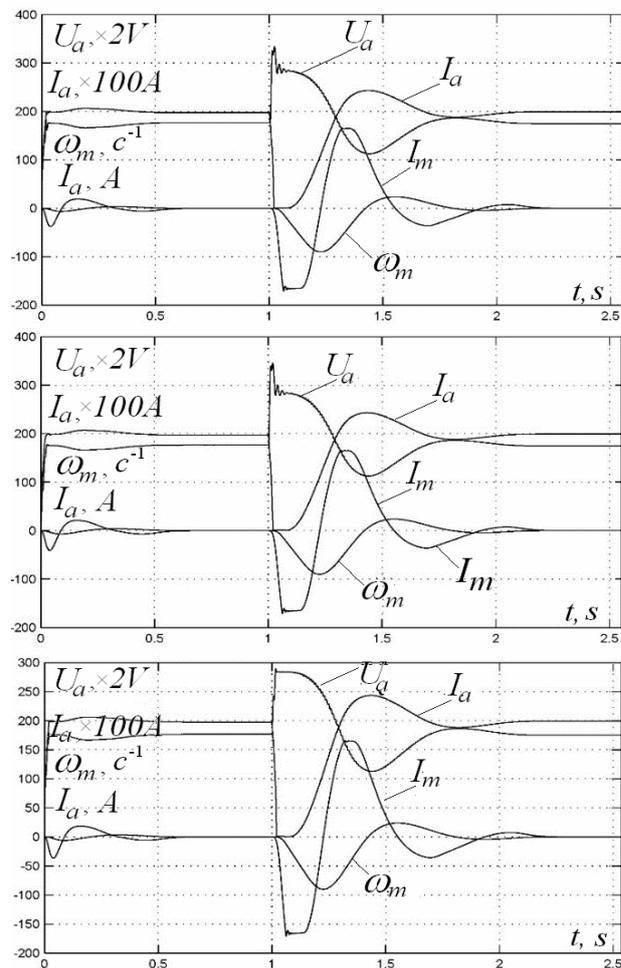


Рис. 11. Зміна координат ЕР $U_a(t)$, $I_a(t)$ печі ДСП-200 та двигуна МПЕ $I_m(t)$ $\omega_m(t)$ регулятора АРДМ-Т-12 при відпрацюванні о.д. у фазі А за законом відхилення напруги дуги

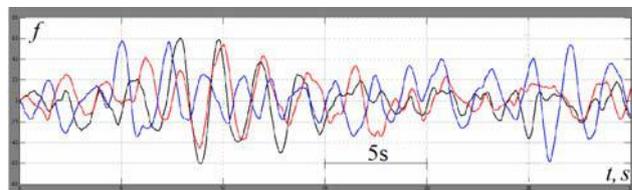


Рис. 12. Фрагмент випадкових збурень за довжинами дуг $f(t)$ у трьох фазах на стадії проплавлення колодязів

Як приклад, на рис. 13 показано отримані на створеній структурній Simulink-моделі за дії стаціонарних випадкових збурень за довжинами дуг процеси зміни струмів дуг при відпрацюванні регулятором потужності типу АРДМ-Т-12 стохастичних збурень в кожній фазі на технологічному періоді кипіння шлаку і при керуванні за диференціальним законом.

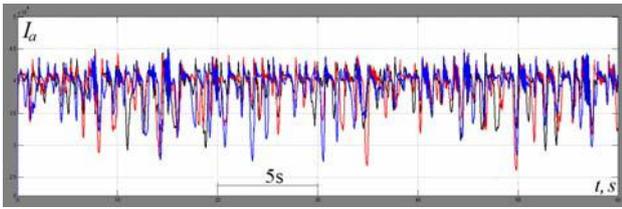


Рис. 13. Часові залежності зміни струмів дуг $I_a(t)$ дугової печі ДСП-200 на технологічному періоді кипіння шлаку при роботі регулятора АРДМ-Т-12 (диференційний закон)

На створеній Simulink-моделі виконувалися математичні експерименти з дослідження показників динаміки при використанні кожного із зазначених вище законів керування в одноконтурній САК (регулятор АРДМ-Т-12), а також при сумісній дії електро-механічного контуру (регулятор потужності дуг АРДМ-Т-12) та швидкодійного виключно електричного контуру регулювання струмів дуг (двоконтурна структура САК [11]) при дії як детермінованих так і стаціонарних випадкових координатних та параметричних збурень у кожній фазі.

Як приклад, на рис. 14 показано результати виконаних математичних експериментів з дослідження процесу відпрацювання детермінованих збурень, що призводили до симетричного трифазного к.з. в печі ДСП-200 при роботі лише електромеханічного контура з диференційним законом керування рис. 14,а; лише швидкодійного електричного контура рис. 14,б та у випадку сумісної роботи обох контурів (двоконтурна САК) рис. 14,с). Як видно з наведених на рис. 14 процесів, при використанні одноконтурної САК (електромеханічний контур – регулятор потужності дуг АРДМ-Т-12) час регулювання струмів дуг складає $t_{reg}=1,65s$, при роботі швидкодійного контуру $t_{reg} = 0,05 s$, а для двоконтурної САК – $t_{reg} = 0,125 s$. Деяке зростання часу регулювання у двоконтурній САК пояснюється несиметрією динаміки регулювання електромеханічного контуру через пофазну несиметрію параметрів силових елементів короткої мережі дугової печі ДСП-200.

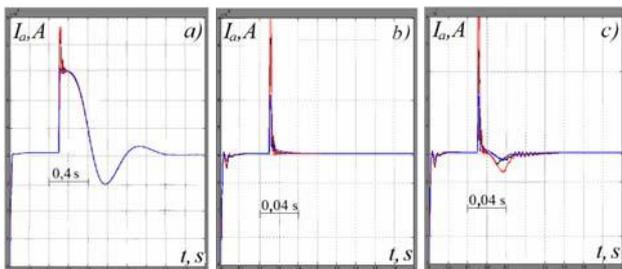


Рис. 14. Струми дуг $I_a(t)$ у трьох фазах при симетричному к.з. печі ДСП-200 та роботі АРДМ-Т-12 (а); лише швидкодійного контуру (б); та двоконтурної САК (с)

Практичний інтерес представляють показники динаміки двоконтурної САК електричного режиму ДСП-200 при відпрацюванні стаціонарних випадкових збурень за довжиною дуги на різних стадіях плавлення, так як такі збурення є основними на кожній плавці. Саме тому на створеній Simulink-моделі було проведено низку математичних експериментів з дослідження показників динаміки регулювання координат ЕР, показників енергоефектив-

ності та електромагнітної сумісності. Метою цих досліджень було отримати інтегральні оцінки якості динаміки, зокрема значення дисперсії струмів (напруг, потужностей) дуг та показників електромагнітної сумісності режимів дугової печі та електромережі при функціонуванні двоконтурної САК, як найдосконалішої з точки зору енергоефективності і, для порівняння, показників двох інших структур САК електричними режимами при дії стаціонарних випадкових збурень на різних технологічних стадіях плавлення.

Як приклад, на рис. 15 та рис. 16 показано часові залежності збурень (рис. 15,а та рис. 16,а) та відповідні їм часові залежності струмів дуг (рис. 15,б та рис. 16,б) у трьох фазах, які відповідають технологічним стадіям обвалів колодязів та доплавлення твердої шихти (рис. 15 та рис. 16 відповідно) при функціонуванні двоконтурної системи автоматичного регулювання струмів дуг дугової печі ДСП-200.

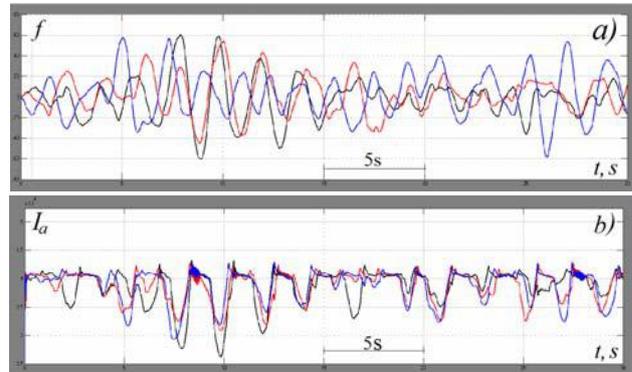


Рис. 15. Збурення за довжинами дуг $f(t)$ у фазах (а) та відповідні їм струми дуг $I_a(t)$ (б) двоконтурної САК на технологічній стадії обвалів колодязів

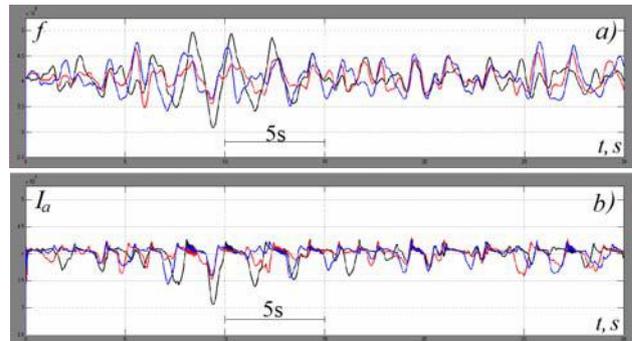


Рис. 16. Збурення за довжинами дуг $f(t)$ у фазах (а) та відповідні їм струми дуг $I_a(t)$ (б) двоконтурної САК на технологічній стадії доплавлення твердої шихти

У табл. 2 подано усереднені по фазах значення дисперсій струмів дуг, що отримані в комп'ютерних експериментах при дії в дугових проміжках однакових реалізацій трифазних збурень за довжинами дуг для однієї і тієї ж технологічної стадії але при функціонуванні різних структур САК ЕР ДСП-200.

Аналіз наведених у табл. 2 значень дисперсій струмів дуг показує, що використання в структурі системи регулювання швидкодійного електричного контуру регулювання струмів дуг дає змогу суттєво – у 2.5-5 разів зменшити дисперсію струмів.

Таблиця 2

Усереднені по фазах значення дисперсій струмів дуг печі ДСП-200 для різних САК та різних технологічних стадій

| Структура САК | Технологічна стадія | | | |
|--------------------------|------------------------------------|---|------------------------------|------------------------------|
| | Початок плавлення, кА ² | Проплавлення колодязів, кА ² | Окислювання, кА ² | Рафінування, кА ² |
| Одноконтурна (АРДМ-Т-12) | 26.0 | 40 | 29.0 | 6.8 |
| Швидкодійний контур | 13.0 | 16.5 | 6.9 | 2.2 |
| Двоконтурна | 9.5 | 8.2 | 6.7 | 2.0 |

Завдяки підвищенню швидкодії регулювання струмів дуг у двоконтурній структурі САК, відповідно покращується пофазна автономність (симетрія) регулювання струмів дуг, активної та реактивної потужностей, а також показники енергоефективності та електромагнітної сумісності режимів дугової печі та електромережі. У табл. 3 показано отримані за результатами модельних досліджень на створеній Simulink-моделі інтегральні оцінки деяких показників електромагнітної сумісності режимів дугової печі ДСП-200 та електромережі живлення.

Таблиця 3

Усереднені по фазах показники електромагнітної сумісності дугової печі ДСП-200 на періоді розплавлення шихти

| Показники функціонування | Структури САК | |
|--------------------------|------------------|-----------------|
| | Одноконтурна САК | Двоконтурна САК |
| C_{thd} | 0.096 | 0.081 |
| $\cos\varphi$ | 0.82 | 0.89 |
| δU_{ss} % | 1.42 | 0.92 |
| F | 0.168 | 0.058 |

Аналіз отриманих оцінок показників електромагнітної сумісності режимів печі ДСП-200 та мережі живлення у різних технологічних стадіях плавлення показав, що коефіцієнт спотворення синусоїдності струмів електромережі C_{thd} при роботі двоконтурної САК у порівнянні з функціонуванням одноконтурної (регулятор потужності АРДМТ-12) зменшується на 12-20 %, коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ при роботі двоконтурної САК зростає на 6-10 %, коливання напруги електромережі живлення δU_{ss} печі при цьому зменшується на 30-40 %, а доза флікера F – на 48-65 %.

Одночасно з цим, завдяки суттєвому покращанню динаміки регулювання струмів дуг (зменшенню дисперсії струмів дуг), при функціонуванні двоконтурної САК зменшується потужність електричних втрат в короткій мережі печі, у тому числі і за рахунок зменшеного споживання реактивної потужності, відповідно цьому покращується електричний коефіцієнт корисної дії, зменшується дисперсія потужності дуг і покращується рівномірність в часі та по фазах (по периметру розплаву) введення активної потужності в піч (завдяки цьому рівномірніше нагрівається розплав і відповідно усуваються локальні перегріви розплаву та бокових стінок кладки печі). Підвищення швидкодії регулювання струмів дуг позитивно позначається на вирівнюванні фазних навантажень печі і, як результат, практично усувається чи значно послаб-

люється негативна дія «дикої» та «мертвої» фази, а також зменшується коефіцієнт пофазної несиметрії напруг електромережі.

Висновки.

1. На основі застосування статистичного М-критерію Бартлетта показано, що створена трифазна у миттєвих координатах Simulink-модель має достатню точність (адекватність) відтворення процесів зміни струмів дуг.

2. Створена на основі поєднання типових елементів бібліотеки додатку Simulink та блоків SimPowerSystems програми Matlab структурна Simulink-модель дугової сталеплавильної печі має зручний інтерфейс налаштування на дослідження показників динаміки ЕР та показників електромагнітної сумісності для різних структур та параметрів САК і силового кола живлення трифазних дуг, законів керування, залежностей динамічних вольт-амперних характеристик дуг та параметрів стохастичних характеристик збурень.

3. Отримані значення показників якості динаміки досліджених структур САК ЕР дугової печі ДСП-200 показали, що найкращі показники динаміки властиві двоконтурній системі керування: у порівнянні з одноконтурною системою (регулятор потужності дуг АРДМ-Т) час регулювання струмів дуг при відпрацюванні екстремальних збурень електричного режиму (к.з. та о.д.) при використанні швидкодійного контуру в структурі двоконтурної САК зменшується у 20-40 разів, а дисперсія струмів дуг при відпрацюванні випадкових збурень за інших рівних умов зменшується у 3-5 разів, відчутно покращуються також і показники електромагнітної сумісності режимів дугової сталеплавильної печі та електромережі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Wang Y., Mao Z., Tian H., Li Y., Yuan P. Modeling of electrode system for three-phase electric arc furnace // Journal of Central South University of Technology. – 2010. – vol.17. – no.3. – pp. 560-565. doi: 10.1007/s11771-010-0523-3.
2. Паранчук Я.С. Моделювання та дослідження режимів електричної системи регулювання струмів дуг дугової сталеплавильної печі // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: «Електроенергетичні та електромеханічні системи». – 2000. – №403. – С. 126-133.
3. Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Лозинський А.О., Марущак Я.Ю. Математична модель системи живлення та регулювання режимів електротехнологічного комплексу ДСП-ЕПМ // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2004. – №3. – С. 8-15.
4. Varetsky Y., Lozynsky O., Paranchuk Y. A new design of SVC thyristor controlled reactor // Proceedings of the International Conference EPQU'03: «Electrical Power Quality and Utilization». – Krakow, Poland. – 2003. – pp. 353-360.
5. Balan R., Maties V., Hancu O., Stan S., Lapusan C. Simulation of an electric arc furnace electrode position system. Режим доступу: <http://www.freepatentsonline.com/article/Annals-DAAAM-Proceedings/177174488.html>.
6. Balan R., Maties V., Hancu O., Stan S., Ciprian L. Modeling and control of an electric arc furnace // 2007 Mediterranean Conference on Control & Automation, Jun. 2007. doi: 10.1109/med.2007.4433737.
7. Rahmatollah Hooshmand, Mahdi Banejad, Mahdi Torabian Eshfahanj. A new time domain model for electric arc furnace //

Journal of Electrical Engineering. – 2008. – vol.59. – no.4. – pp. 195-202.

8. Mahmood Moghadasian, Emad AlNasser. Modelling and control of electrode system for an electric arc furnace // 2nd International Conference on Research in Science, Engineering and Technology (ICRSET'2014), March 21-22, 2014 Dubai (UAE), pp. 129-133. doi: 10.15242/iee.e0314558.

9. Паранчук Я.С. Моделювання характеристик та процесів дуг дугової сталеплавильної печі // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: «Електроенергетичні та електромеханічні системи». – 2003. – №487. – С. 108-116.

10. Гайдышев И. Анализ и обработка данных: специальный справочник. – СПб: Питер, 2001. – 752 с.

11. Паранчук Я.С. Дослідження дворівневої системи компенсації реактивної потужності в мережах з дуговими сталеплавильними печами // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2004. – Ч.2. – С. 73-78.

REFERENCES

1. Wang Y., Mao Z., Tian H., Li Y., Yuan P. Modeling of electrode system for three-phase electric arc furnace. *Journal of Central South University of Technology*, 2010, vol.17, no.3, pp. 560-565. doi: 10.1007/s11771-010-0523-3.

2. Paranchuk Y.S. Modeling and research of electric arc furnace current regulation system modes. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series: «Electrical and electromechanical systems»*, 2000, no.403, pp. 126-133. (Ukr).

3. Lozynskyy O.Y., Paranchuk Y.S., Lozynskyy A.O., Maruschak Y.Y. Mathematical model of power supply system and modes control of the EAF-PSN electrotechnology complex. *Scientific Bulletin of the National Mining University*, 2004, no.3, pp. 8-15. (Ukr).

4. Varetsky Y., Lozynsky O., Paranchuk Y. A new design of SVC thyristor controlled reactor. *Proceedings of the International Conference EPQU'03: «Electrical Power Quality and Utilization»*. Krakow, Poland, 2003, pp. 353-360.

5. Balan R., Maties V., Hancu O., Stan S., Lapusan C. Simulation of an electric arc furnace electrode position system. Available at: <http://www.freepatentsonline.com/article/Annals-DAAAM-Proceedings/177174488.html> (accessed 02 May 2017).

6. Balan R., Maties V., Hancu O., Stan S., Ciprian L. Modeling and control of an electric arc furnace. *2007 Mediterranean Conference on Control & Automation*, Jun. 2007. doi: 10.1109/med.2007.4433737.

7. Rahmatollah Hooshmand, Mahdi Banejad, Mahdi Torabian Esfahanj. A new time domain model for electric arc furnace. *Journal of Electrical Engineering*, 2008, vol.59, no.4, pp. 195-202.

8. Mahmood Moghadasian, Emad AlNasser. Modelling and control of electrode system for an electric arc furnace. *2nd International Conference on Research in Science, Engineering and Technology (ICRSET'2014)*, March 21-22, 2014 Dubai (UAE), pp. 129-133. doi: 10.15242/iee.e0314558.

9. Paranchuk Y.S. Modeling of the arcs characteristics and processes in arc steelmaking furnace. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series: «Electrical and electromechanical systems»*, 2003, no.487, pp. 108-116. (Ukr).

10. Gaydyshev I. *Analiz i obrabotka dannykh: spetsial'nyi spravochnik* [Analysis and processing of data: special reference book]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2001. 752 p. (Rus).

11. Paranchuk Y.S. Investigation of the two-level reactive power compensation system in networks with arc steelmaking furnaces. *Technical electrodynamics. Thematic issue «Power electronics & energy efficiency»*, 2004, part 2, pp. 73-78. (Ukr).

Надійшла (received) 20.02.2018

Лозинський Орест Юліанович¹, д.т.н., проф.,

Паранчук Ярослав Степанович¹, д.т.н., проф.,

Паранчук Роман Ярославович¹, к.т.н.,

Матіко Федір Дмитрович¹, д.т.н., доц.,

¹ Національний університет «Львівська політехніка»,

79013, Львів, вул. С. Бандери, 12,

тел/phone +380 2582468,

e-mail: yparanchuk@yahoo.com

O.Y. Lozynskyy¹, Y.S. Paranchuk¹, R.Y. Paranchuk¹, F.D. Matico¹

¹ Lviv Polytechnic National University,

12, S. Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine.

Development of methods and means of computer simulation for studying arc furnace electric modes.

Goal. The purpose of the article is the creation of a three-phase instantaneous coordinates Simulink computer model of the power supply and automatic coordinates control system (ACS) of the DSP-200 type arc furnace electric mode (EM). The model has a convenient interface for changing the structure and parameters of the three-phase arcs power supply system, the structure and laws of the electric mode control system, as well as the stochastic characteristics of parametric and coordinate disturbances. **Method.** The provisions of the electric circuits theory, experimental study and mathematical and computer simulation in the Simulink system of the MatLAB computing environment were used for the research. **Results.** A high-precision instantaneous coordinates Simulink-model of the power supply system and electric mode coordinates ACS of the ER DSP-200 furnace was created. This model was used to study the EM and evaluate the performance of the arc furnace during various technological melting periods and with various structures of the automatic control system. **Scientific novelty.** For the first time, based on a combination of Simulink application library elements and SimPowerSystems standard library blocks of the MatLAB environment a complete high-precision three-phase instantaneous coordinate model of arc furnace DSP-200 power supply system and EM ACS was developed. The developed model has significant advantages in accuracy, performance and features compared to existing ones. **Practical value.** Possibility to run on the created Simulink-model mathematical experiments on the research of the electric mode coordinates control dynamic indices and electromagnetic compatibility indices of the electric arc furnace and the supply network under the influence of the deterministic and random perturbations. References 11, tables 3, figures 16.

Key words: arc furnace, Simulink computer model, power supply system, automatic control system, electric mode, regulator, dynamic current-voltage arc characteristic, electromechanical circuit.

М.И. Баранов

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРОЗОВОГО ОБЛАКА ТРОПОСФЕРЫ ЗЕМЛИ: ОСОБЕННОСТИ ИХ РАСЧЕТА И ПРИКЛАДНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Приведені результати розрахункової оцінки основних енергетичних характеристик надвисоковольтної системи «грозова хмара-земля», що містить суцільну заряджену сферу хмари. У якості цих характеристик грозової хмари розглянуті: електричний заряд q_{Σ} , зосереджений в сферичній грозовій хмарі заданого об'єму з дрібнодисперсними зарядженнями включеннями у вигляді твердих діелектричних частинок з усередненою об'ємною щільністю; електричний потенціал φ_r в сферичному об'ємі грозової хмари заданого радіусу; електрична енергія W_0 , яка накопичена в сферичному об'ємі прийнятої грозової хмари; амплітудно-часові параметри струму блискавки в плазмовому каналі довгого повітряного іскрового розряду грозової хмари на землю. Отримані результати сприятимуть можливості прогнозування грозової обстановки при мінімальній початковій метеорологічній інформації, подальшому розвитку природи атмосферної електрики, фізики лінійної блискавки і вирішенню глобальної проблеми блискавкозахисту об'єктів і обслуговування їх персоналу. Бібл. 12, рис. 2.

Ключові слова: атмосферна електрика, грозова хмара, накопичений заряд, електричний потенціал і енергія хмари, струм в каналі розряду хмари на землю, розрахунок, експериментальні дані.

Приведены результаты расчетной оценки основных энергетических характеристик сверхвысоковольтной системы «грозовое облако-земля», содержащей сплошную заряженную сферу облака. В качестве этих характеристик грозового облака рассмотрены: электрический заряд q_{Σ} , сосредоточенный в сферическом грозовом облаке заданного объема с мелкодисперсными заряженными включениями в виде твердых диэлектрических частиц с усредненной объемной плотностью; электрический потенциал φ_r в сферическом объеме грозового облака заданного радиуса; электрическая энергия W_0 , накопленная в сферическом объеме принятого грозового облака; амплитудно-временные параметры тока молнии в плазменном канале длинного воздушного искрового разряда грозового облака на землю. Полученные результаты будут способствовать возможности прогнозирования грозовой обстановки при минимальной исходной метеорологической информации, дальнейшему развитию природы атмосферного электричества, физики линейной молнии и решению глобальной проблемы молниезащиты объектов и обслуживающего их персонала. Библи. 12, рис. 2.

Ключевые слова: атмосферное электричество, грозовое облако, накопленный заряд, электрический потенциал и энергия облака, ток в канале разряда облака на землю, расчет, экспериментальные данные.

Введение. Одной из проблемных задач в области атмосферного электричества и молниезащиты наземных и находящихся в околоземном воздушном пространстве объектов до сих пор остается та, которая связана с определением при минимальной исходной информации о грозовой обстановке в исследуемом специалистами (инженерами и метеорологами) районе той или иной территории нашей планеты энергетических характеристик наблюдаемого ими грозового облака в тропосфере Земли. К подобным характеристикам грозового облака следует отнести: во-первых, накопленный в таком облаке суммарный электрический заряд q_{Σ} ; во-вторых, электрический потенциал φ_r в объеме грозового облака; в-третьих, электрическую энергию W_0 , запасаемую мелкодисперсными включениями (например, мелкими каплями и парами воды; мелкими гранулами и кристаллами льда и мелкими твердыми диэлектрическими частицами [1, 2]) рассматриваемого атмосферного облака в электростатической системе «грозовое облако-земля»; в-четвертых, вероятные амплитудно-временные параметры (АВП) импульсного тока $i_L(t)$ в канале сильноточного разряда грозового облака на землю или в защищаемый объект. От этих данных зависит их прогноз о возможной грозовой угрозе для наземных объектов и летательных аппаратов, оказавшихся в зоне расположения рассматриваемого атмосферного облака. Знание указанных энергетических характеристик грозового облака позволяет прогнозировать грозовую обстановку в исследуемом районе земной суши, а также определенным образом расширяет знания

людей в области атмосферного электричества и физики длинного воздушного искрового разряда (молнии) и последствий его (этого сильноточного разряда) действия на защищаемые объекты и окружающую их среду. Следует заметить, что обычно под грозовым облаком специалисты-метеорологи понимают кучево-дождевое облако, для которого выполняется ряд критических условий, указанных в [1]. Что касается понятия тропосферы Земли, то под ним понимают нижнюю часть земной атмосферы высотой до 11 км в умеренных широтах, в которой содержится 4/5 всей массы атмосферы, почти весь водяной пар и развиваются различные виды облаков [1, 3]. В этой связи приближенное определение расчетным путем величин q_{Σ} , φ_r , W_0 и АВП разрядного тока $i_L(t)$ в сверхвысоковольтной электростатической системе «грозовое облако-земля», в которой атмосферное облако имеет даже каноническую геометрическую форму и упрощенную внутреннюю «начинку» из ряда указанных выше мелкодисперсных включений, является актуальной в мире прикладной научно-технической задачей большой важности.

Целью статьи является выполнение расчетной оценки таких основных энергетических характеристик системы «грозовое облако-земля» как заряд q_{Σ} , потенциал φ_r , энергия W_0 и амплитудно-временные параметры импульсного тока $i_L(t)$ в канале длинного воздушного искрового разряда облака на землю.

1. Постановка задачи. Для удобства в выполнении анализа распределения в тропосфере Земли атмо-

© М.И. Баранов

сферного электричества рассмотрим один из частных случаев, когда грозное облако имеет форму сферы радиусом $R_0 \approx 985$ м (рис. 1), внутри которой с усредненной объемной плотностью $N_0 \approx 5 \cdot 10^7$ м⁻³ размещены главным образом твердые диэлектрические частицы радиусом $r_0 \approx 10 \cdot 10^{-6}$ м [1], каждая из которых на стадии формирования кучево-дождевого облака получила за счет электризации в теплых восходящих воздушных потоках земной атмосферы отрицательный электрический заряд величиной $q_0 \approx -2,78 \cdot 10^{-16}$ Кл и на стадии формирования грозного облака освободилась от покрывающих их электронейтральных молекулярных диполей воды [2]. Выбор указанного численного значения радиуса R_0 облака был обусловлен тем, что для упрощения расчетов, как и в [2], его исходный расчетный объем $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$ м³ представлял собой прямоугольную призму с размерами в горизонтальном основании 1000 м x 1000 м и высотой 4000 м, центр которой был расположен на высоте $H_0 \approx 3000$ м над плоской поверхностью земли (см. рис. 1). Согласно [1] именно с подобных высот и начинается в земной тропосфере образование облачных зарядов. Исходя из того, что в принятом приближении $V_0 = 4\pi R_0^3/3 = 4 \cdot 10^9$ м³, и вытекает указанное численное значение R_0 . Что касается численных значений величин N_0 и r_0 , то они были выбраны нами на основании экспериментальных данных, приведенных в [1]. Расчетное определение в облаке указанного численного значения заряда $q_0 \approx -2,78 \cdot 10^{-16}$ Кл твердых диэлектрических частиц радиусом $r_0 \approx 10 \cdot 10^{-6}$ м было выполнено в [2] с учетом теории двойного электрического слоя, основы которой приведены в [1, 4]. Отдельные заряды q_0 плотностью N_0 определяют в облаке их усредненную объемную плотность $\sigma_r \approx q_0 N_0 \approx -1,39 \cdot 10^{-8}$ Кл/м³, равномерно распределенную по его сферическому объему V_0 . Пусть в воздушном промежутке системы «грозное облако-земля» выполняются нормальные атмосферные условия (давление воздуха составляет около $1,013 \cdot 10^5$ Па, а его температура равна 0 °С [4]. Требуется с учетом принятых допущений в приближенном виде расчетным путем определить искомые значения накопленного принятым грозным облаком суммарного заряда q_Σ , электрического потенциала φ_r в сферическом объеме грозного облака, его электрической энергии W_0 и АВП импульсного тока $i_L(t)$ разряда в электростатической системе «грозное облако-земля».

2. Расчетная оценка электрического заряда q_Σ грозного облака. С учетом указанных выше допущений на стадии формирования грозного облака, сопровождающейся «освобождением» его отдельных многочисленных зарядов q_0 от электронейтральных молекулярных диполей воды [2], суммарный электрический заряд q_Σ рассматриваемого атмосферного облака может быть определен в следующем виде:

$$q_\Sigma = q_0 N_0 V_0. \quad (1)$$

Из (1) при принятых исходных данных, когда $q_0 \approx -2,78 \cdot 10^{-16}$ Кл, $N_0 \approx 5 \cdot 10^7$ м⁻³ и $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$ м³, следует, что в рассматриваемом случае величина $q_\Sigma \approx -55,6$ Кл.

Полученный по (1) модуль численного значения суммарного электрического заряда $q_\Sigma \approx 55,6$ Кл в исследуемом грозном облаке полностью соответствует

нормированному значению заряда $q_L = (50 \pm 10)$ Кл для короткого удара молнии с импульсным разрядным аperiodическим током временной формы 10 мкс/350 мкс в наземные технические объекты, удовлетворяющие III-IV уровням молниезащиты по требованиям международного стандарта IEC 62305-1: 2010 [5, 6].

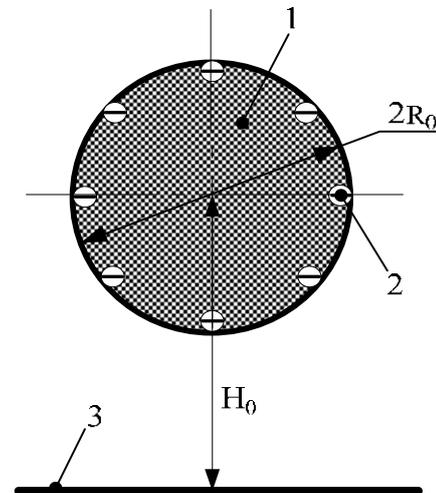


Рис. 1. Схематический вид упрощенной расчетной модели отрицательно заряженного грозного облака сферической формы, размещенного над земной плоской поверхностью (1 – облако; 2 – электрон; 3 – плоская поверхность Земли)

Кроме того, укажем, что используемое численное значение усредненной объемной плотности заряда исследуемого грозного облака, определяемое как $\sigma_r \approx q_0 N_0 \approx -1,39 \cdot 10^{-8}$ Кл/м³, соответствует известным экспериментальным данным для среднего значения плотности объемного заряда в грозном облаке [1, 2].

3. Расчетная оценка электрического потенциала φ_r грозного облака. Применяя для нахождения в облаке величины электрического потенциала φ_r подход, приведенный в [7], для радиального распределения искомого потенциала φ_r в исследуемой упрощенной модели грозного облака получаем:

$$\varphi_r = q_\Sigma (3R_0^2 - r^2) / (8\pi\epsilon_0 R_0^3), \quad (2)$$

где r – текущий радиус в сферическом объеме облака; $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная [4].

Из (2) при $r=0$ для электрического потенциала $\varphi_r = \varphi_0$ в центре принятого грозного облака находим:

$$\varphi_0 = 3q_\Sigma / (8\pi\epsilon_0 R_0). \quad (3)$$

При $r=R_0$ из (2) для электрического потенциала $\varphi_r = \varphi_R$ на наружной поверхности сферы грозного облака вытекает следующее расчетное соотношение:

$$\varphi_R = q_\Sigma / (4\pi\epsilon_0 R_0). \quad (4)$$

Анализ приведенных расчетных выражений (3) и (4) показывает, что в центре рассматриваемого грозного облака электрический потенциал φ_0 в 1,5 раза превышает электрический потенциал φ_R , приобретаемый наружной сферической поверхностью облака. Отсюда становится физически более понятным в теории атмосферного электричества глубинный механизм зарядной «подпитки» плазменного канала длинного искрового разряда грозного облака на землю или защищаемый технический объект. Ведь при таком радиальном распределении в грозном облаке

электрического потенциала φ_r при электрическом пробое в системе «грозовое облако-земля» (см. рис. 1) воздушного промежутка длиной $(H_0 - R_0)$ для компенсации убьли электрического потенциала φ_R на наружной поверхности облака к ней из внутренних зон облака с более высоким электрическим потенциалом φ_r будут «подтекать» электрические заряды (в нашем случае свободные электроны), пополняющие носители электрического тока $i_L(t)$ в канале самого разряда.

Численная оценка по (3) и (4) электрических потенциалов внутри и снаружи рассматриваемого грозового облака при $q_\Sigma \approx -55,6$ Кл и $R_0 \approx 985$ м свидетельствует о том, что в этом случае искомые величины по модулю становятся примерно равными $\varphi_0 \approx 759$ МВ, а $\varphi_R \approx 506$ МВ. Из известных автору на сегодня количественных данных для электрического потенциала φ_r грозового облака можно указать лишь его численное значение примерно в 100 МВ, приведенное в [8].

Для проверки достоверности полученного значения электрического потенциала $\varphi_R \approx 506$ МВ рассматриваемого грозового облака воспользуемся численной оценкой значения напряженности E_R электростатического поля вблизи его наружной сферической поверхности ($r \approx R_0$). С одной стороны, $E_R \approx \varphi_R / R_0 \approx 513$ кВ/м [4]. С другой стороны, для нахождения в исследуемом электростатическом случае E_R применим более точное аналитическое соотношение, имеющее вид [2, 7]:

$$E_R = q_\Sigma / (4\pi\epsilon_0 R_0^2). \quad (5)$$

Из (5) при $q_\Sigma \approx 55,6$ Кл и $R_0 \approx 985$ м получаем, что $E_R \approx 515$ кВ/м. Видно, что оба приведенные для E_R численные значения практически совпадают. В этой связи можно говорить о работоспособности расчетных соотношений (1) и (4), определяющих суммарный заряд q_Σ в принятой модели грозового облака и электрический потенциал φ_R наружной сферической поверхности исследуемого облака. Кстати, значение E_R по (5) оказывается наибольшим в радиальном распределении напряженности электростатического поля в сферическом объеме V_0 облака. Как известно, для этого сильного E -поля согласно соотношению вида [2, 7]:

$$E_r = q_\Sigma r / (4\pi\epsilon_0 R_0^3), \quad (6)$$

при $r = 0$ напряженность E_r будет равной нулю (при $r = R_0$ формула (6) переходит в (5) и определяет уровень E -поля на наружной поверхности этого облака).

Приведенные данные для радиального распределения напряженности E_r электростатического поля в системе «грозовое облако-земля» однозначно указывают на то, что в случае однородного (однородного по составу [3]) характера изменения носителей электричества в сферическом объеме V_0 принятого грозового облака развитие электронных лавин [1, 8], являющихся предвестником появления в рассматриваемой нами системе молнии (искрового пробоя в тропосфере Земли длинного воздушного промежутка), будет всегда начинаться с наружной поверхности облака. Отметим, что указанное численное значение $E_R \approx 515$ кВ/м при принятых атмосферных условиях приближается к критическому значению E -поля, соответствующему предпробивной стадии процессов в длинном воздушном промежутке длиной $(H_0 - R_0)$ нашей системы [1, 8].

4. Расчетная оценка электрической энергии W_0 грозового облака. Предварительные расчетные оценки численных значений величины электрической энергии W_0 , запасаемой в исследуемом грозовом облаке, выявили наличие ряд особенностей в ее определении. Так, оказалось, что прямое применение к расчетной системе «грозовое облако-земля» (см. рис. 1) положений и формул из [9] для ее электрической емкости приводит к ошибочным результатам в вычислении значений энергии W_0 грозового облака. Для демонстрации получаемых результатов применительно к энергии W_0 при таком расчетном подходе будем вначале исходить из того, что при найденном выше (в разделе 3) значении по (4) электрического потенциала φ_R облака и априори нулевом электрическом потенциале земли ($\varphi_E = 0$) нам при расчете электрической энергии W_0 для используемой расчетной системы «грозовое облако-земля» остается определить лишь значение ее электрической емкости. «Лобовое» определение в рассматриваемом случае ($H_0/R_0 \approx 3,04$) ее электрической емкости C_0 , по рекомендуемой [9] для неравенства $H_0/R_0 > 1,5$ приближенной формуле вида:

$$C_0 = 2\pi\epsilon_0 / \ln(2H_0 / R_0), \quad (7)$$

приводит к существенно заниженным значениям электрической емкости в расчетной системе «грозовое облако-земля». Например, при принятых исходных данных $H_0 \approx 3000$ м и $R_0 \approx 985$ м согласно (7) величина C_0 оказывается равной примерно $C_0 \approx 30,8 \cdot 10^{-12}$ Ф. Поэтому величина $W_0 \approx C_0 U_0^2 / 2$ [4], где $U_0 = (\varphi_R - \varphi_E)$ – разность электрических потенциалов грозового облака и плоской поверхности земли, принимает при $U_0 \approx 506$ МВ и используемом нами огромном объеме $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$ м³ грозового облака численное значение, составляющее всего 3,94 МДж. Причиной тому является то, что формула (7) учитывает только распределение электрического заряда по наружной поверхности расчетной сферы радиусом R_0 . Она не учитывает влияния электрического заряда, распределенного с объемной плотностью $\sigma_V \approx q_0 N_0$ по объему $V_0 = 4\pi R_0^3 / 3$ данной сферы. В этой связи величину электрической энергии W_0 грозового облака рекомендуется определять по следующему приближенному соотношению:

$$W_0 \approx 0,5 C_E U_0^2, \quad (8)$$

где $C_E \approx q_\Sigma / U_0$ – эквивалентная емкость сверхвысоковольтной системы «грозовое облако-земля».

Следует заметить, что при использовании формулы (8) в приближенный расчет величин C_E и W_0 также вносится определенная погрешность, обусловленная описанным нами ранее соответствующим радиальным распределением электрического потенциала φ_r по сферическому объему принятого грозового облака. Однако, эта погрешность несоизмерима мала по сравнению с погрешностью, вносимой формулой (7) в расчет электрической емкости и электрической энергии W_0 в нашей системе «грозовое облако-земля».

Из (8) при $q_\Sigma \approx -55,6$ Кл и $U_0 \approx -506$ МВ находим, что при рекомендуемом авторском подходе для рассматриваемой системы «грозовое облако-земля» величина ее эквивалентной электрической емкости C_E будет принимать численное значение около $1,1 \cdot 10^{-7}$ Ф, а величина запасаемой в ней электрической энергии

$W_0 \approx 14,1 \cdot 10^9$ Дж (как видим, почти в 3578 раз больше, чем с применением формулы (7) при расчете C_0 и W_0). Количественными данными для W_0 других исследователей атмосферного электричества в мире автор в настоящее время не располагает. Можно только предполагать, что если значения величин суммарного заряда q_Σ по (1) и электрического потенциала φ_R по (4) найдены правильно (этим расчетам нами были выше даны соответствующие достаточно убедительные электрофизические обоснования), то и приближенное определение по (8) значения электрической энергии W_0 грозового облака является также правильным.

5. Расчетная оценка АВП тока $i_L(t)$ в канале разряда грозового облака на землю. Для этой оценки применительно к цепи разряда емкости C_E грозового облака через плазменный канал в воздухе на землю используем классический электротехнический подход, характерный для электромагнитных процессов в RLC – цепи [10]. Вначале оценим численное значение индуктивности L_k цилиндрического плазменного канала радиусом r_k сильнооточного искрового разряда грозового облака в воздушном промежутке длиной $l_k \approx (H_0 - R_0)$ на землю по следующей формуле [11]:

$$L_k = (2\pi)^{-1} \mu_0 l_k [\ln(2l_k / r_k) - 1], \quad (9)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная [4].

Из (9) при $l_k \approx (H_0 - R_0) \approx 2015$ м и $r_k \approx 11 \cdot 10^{-3}$ м [12] следует, что в нашем случае сосредоточенная индуктивность L_k канала искрового разряда грозового облака на землю будет принимать значение, численно равное около 4,76 мГн. При оценке численного значения активного сопротивления R_k цилиндрического канала грозового воздушного разряда будем исходить из того, что погонное активное сопротивление R_{k0} исследуемого сильнооточного канала согласно расчетно-экспериментальным данным из [12] для повторной импульсной D -компоненты тока искусственной молнии амплитудой $I_{mD} \approx 92,3$ кА (рис. 2, где $t_{mD} \approx 15$ мкс – время, соответствующее первой амплитуде I_{mD} тока) численно составляет около 0,92 Ом/м. В результате для активного сопротивления R_k плазменного канала грозового разряда исследуемого облака на землю (см. рис. 1) находим, что $R_k \approx R_{k0} \cdot l_k \approx 0,92 \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1} \times 2015 \text{ м} \approx 1,85$ кОм. Видно, что в исследуемом случае для электрических параметров R_k , L_k и C_E рассматриваемой разрядной цепи выполняется неравенство вида $R_k > 2(L_k/C_E)^{1/2}$. Значит, в канале тока молнии будет протекать апериодический импульс тока $i_L(t)$ [10, 12].

Для АВП тока $i_L(t)$ разряда при апериодическом законе его изменения во времени t можно воспользоваться следующим расчетным соотношением [10, 12]:

$$i_L(t) = U_0 [(\alpha_2 - \alpha_1)L_k]^{-1} [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)], \quad (10)$$

где α_1 , α_2 – коэффициенты формы импульсного тока, равные $\alpha_1 = \delta - (\delta^2 - \omega_0^2)^{1/2}$ и $\alpha_2 = \delta + (\delta^2 - \omega_0^2)^{1/2}$; $\delta = R_k / (2L_k)$ – коэффициент затухания тока разряда; $\omega_0 = (L_k C_E)^{-1/2}$ – собственная круговая частота разрядного тока облака.

Время t_{mL} , соответствующее амплитуде I_{mL} грозового тока разряда по (10), будет равно известному в электротехнике аналитическому соотношению [10]:

$$t_{mL} = \ln(\alpha_2 / \alpha_1) / (\alpha_2 - \alpha_1). \quad (11)$$

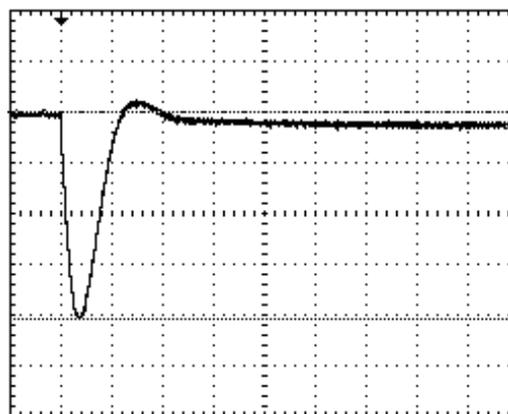


Рис. 2. Типичная осциллограмма D -компоненты тока искусственной молнии ($I_{mD} \approx 92,3$ кА; $t_{mD} \approx 15$ мкс; масштаб по вертикали – 22,52 кВ/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка), полученная в сильнооточной разрядной цепи высоковольтного генератора тока молнии УИТОМ-1 [12]

Для найденных исходных данных $R_k \approx 1,85$ кОм, $L_k \approx 4,76$ мГн и $C_E \approx 110$ нФ получаем, что в рассматриваемом случае: $\delta \approx 1,94 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$; $\omega_0 \approx 43,7 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$; $\alpha_1 \approx 5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$; $\alpha_2 \approx 3,83 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$; $t_{mL} \approx 11,47$ мкс (см. рис. 2, где опытное время для амплитуды импульса тока искусственной молнии составляло около 15 мкс). При $U_0 \approx 506$ МВ и $t_{mL} \approx 11,47$ мкс расчетное значение амплитуды тока молнии для исследуемого случая согласно (10) будет составлять примерно $I_{mL} \approx 262,1$ кА. Полученные количественные значения для t_{mL} и амплитуды I_{mL} тока в канале разряда принятого грозового облака на землю хорошо коррелируют с АВП импульсного тока, характерными для коротких ударов линейной молнии в наземные объекты, удовлетворяющие I уровню их молниезащиты по жестким требованиям международного стандарта IEC 62305-1: 2010 [5, 6]. Что касается длительности τ_p апериодического импульса тока молнии на уровне $0,5I_{mL}$, то она для нашего случая оказывается примерно равной $\tau_p \approx 0,7R_k C_E \approx 142,4$ мкс. Таким образом, при минимальной информации об электромагнитной обстановке в зоне формирования и развития грозового облака (только по его ориентировочным габаритным размерам и высоте размещения над поверхностью земли) специалистам можно вполне аргументировано прогнозировать грозовую «картину» для рассматриваемой сверхвысоковольтной электрофизической системы «грозовое облако-земля».

Выводы.

1. Показано, что в качестве упрощенной расчетной модели грозового облака инженерами и метеорологами может быть принята сферическая модель облака наружным радиусом R_0 и объемом $V_0 = 4\pi R_0^3 / 3$, содержащая распределенные по ее сферическому объему с усредненной плотностью $N_0 \approx 5 \cdot 10^7 \text{ м}^{-3}$ отрицательно наэлектризованные в теплых восходящих воздушных потоках тропосферы Земли мелкие твердые диэлектрические частицы радиусом $r_0 \approx 10 \cdot 10^{-6}$ м и зарядом $q_0 \approx -2,78 \cdot 10^{-16}$ Кл. Варьируя численными значениями радиуса R_0 и соответственно объема V_0 такого грозового облака, можно изменять и его основные энергетические характеристики в широких пределах, соответствующих действующим в мире нормативно-техническим документам.

2. На примере рассмотрения грозового облака земной тропосферы радиусом $R_0 \approx 985$ м и объемом $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$ м³ при $H_0 \approx 3000$ м продемонстрированы возможности предложенного подхода в области изучения атмосферного электричества для приближенного определения специалистами модулей его таких энергетических характеристик как суммарный электрический заряд $q_{\Sigma} \approx 55,6$ Кл, электрический потенциал в центре $\varphi_0 \approx 759$ МВ и на наружной поверхности $\varphi_R \approx 506$ МВ облака, запасаемая мелкодисперсными включениями облака электрическая энергия $W_0 \approx 14,1$ ГДж и АВП аperiodического импульса тока $i_L(t)$ в плазменном канале длинного воздушного искрового разряда облака на землю ($I_{mL} \approx 262,1$ кА; $t_{mL} \approx 11,5$ мкс; $\tau_p \approx 142,4$ мкс). Полученные количественные данные для q_{Σ} , φ_R , W_0 и АВП импульсного тока грозового разряда на поверхность земли удовлетворяют ряду требований международного стандарта IEC 62305-1: 2010 для коротких ударов линейной молнии в наземные объекты.

3. Полученные результаты будут способствовать возможному выполнению инженерами и метеорологами прогнозирования электромагнитной обстановки в районе формирования и развития в тропосфере Земли реального грозового облака, предварительно приведенного по величине занимаемого им объема V_0 к эквивалентному грозовому облаку сферической формы радиусом R_0 . Такой подход благодаря разработанному физико-математическому аппарату позволяет в приближенном виде найти указанные основные энергетические характеристики (q_{Σ} , φ_R , W_0 и АВП канального тока) эквивалентного грозового облака и открывает определенные новые возможности в мировой практике решения актуальных задач молниезащиты наземных объектов и находящихся в полете летательных аппаратов, оказавшихся в опасной зоне сильного электромагнитного воздействия на их электроаппаратуру (прежде всего, на их слаботочную электронику) грозового облака с его колоссальными по численным показателям энергетическими характеристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бортник И.М., Белогловский А.А., Верещагин И.П., Вершинин Ю.Н., Калинин А.В., Кучинский Г.С., Ларионов В.П., Монастырский А.Е., Орлов А.В., Темников А.Г., Пинталь Ю.С., Сергеев Ю.Г., Соколова М.В. Электрофизические основы техники высоких напряжений: Учебник для ВУЗов / Под общей ред. проф. И.П. Верещагина. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2010. – 704 с.
2. Баранов М.И. Новая гипотеза и электрофизическая природа дополнительных механизмов возникновения, накопления и разделения электрических зарядов в атмосферных облаках Земли // Электротехника і електромеханіка. – 2018. – №1. – С. 46-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.07.
3. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
4. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.
5. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
6. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A generator of aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of $10 \mu\text{s}/350 \mu\text{s}$ with an amplitude of $\pm(100-200)$ kA. *Instruments and Experimental Techniques*, 2015, vol.58, no.6, pp. 745-750. doi: 10.1134/s0020441215060032.

ning with a rationed temporal form of $10 \mu\text{s}/350 \mu\text{s}$ with an amplitude of $\pm(100-200)$ kA // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2015. – vol.58. – no.6. – pp. 745-750. doi: 10.1134/s0020441215060032.

7. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1990. – 624 с.
8. Бржезицкий В.О., Білий І.В., Бойко М.І., Гуль В.І., Гурин А.Г., Ільєнко О.С., Ісакова А.В., Кондра Б.М., Копшин В.О., Кравченко В.І., Набока Б.Г., Проценко О.Р., Рудаков В.В., Хименко Л.Т., Хомініч В.І., Шостак В.О., Янішевський В.І. Техніка і електрофізика високих напруг: Навчальний посібник / За ред. В.О. Бржезицького, В.М. Михайлова. – Харків: Торнадо, 2005. – 930 с.
9. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. – Л.: Энергоиздат. – 1981. – 288 с.
10. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. Учебник для вузов. Том 1. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с.
11. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
12. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Харьков: Точка, 2014. – 400 с.

REFERENCES

1. Bortnik I.M., Beloglovskiy A.A., Vereshchagin I.P., Ver-shinin Yu.N., Kalinin A.V., Kuchinskiy G.S., Larionov V.P., Monastyrskiy A.E., Orlov A.V., Temnikov A.G., Pinal' Yu.S., Sergeev Yu.G., Sokolova M.V. *Elektrofizicheskie osnovy tekhniki vysokih naprjazhenij* [Electrophysics bases of technique of high voltage]. Moscow, Publishing house of MEI, 2010. 704 p. (Rus).
2. Baranov M.I. New hypothesis and electrophysics nature of additional mechanisms of origin, accumulation and division of electric charges in the atmospheric clouds of Earth. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.1, pp. 46-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.07.
3. *Bol'shoy illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov* [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. (Rus).
4. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).
5. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
6. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A generator of aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of $10 \mu\text{s}/350 \mu\text{s}$ with an amplitude of $\pm(100-200)$ kA. *Instruments and Experimental Techniques*, 2015, vol.58, no.6, pp. 745-750. doi: 10.1134/s0020441215060032.
7. Javorskij B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike* [Handbook of physics]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 624 p. (Rus).
8. Brzhezitskiy V.A., Bilyy I.V., Boyko N.I., Gul' V.I., Gurin A.G., Il'enko O.S., Isakova A.V., Kondra B.M., Kopshin V.A., Kravchenko V.I., Naboka B.G., Protsenko O.R., Rudakov V.V., Khimenko L.T., Khominich V.I., Shostak V.A., Yanishevskiy V.I. *Tehnika i elektrofizika vysokih naprjazhenij* [Technics and Electrophysics of High Voltages]. Kharkiv, Tornado Publ., 2005. 930 p. (Ukr).
9. Iosssel' Yu.Ya., Kochanov E.S., Strunskiy M.G. *Raschet elektricheskoy emkosti* [Calculation of electric capacity]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 288 p. (Rus).
10. 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).

11. Knopfel' G. *Sverkhsil'nye impul'snye magnitnye polia* [Ultra strong pulsed magnetic fields]. Moscow, Mir Publ., 1972. 391 p. (Rus).

12. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki. Tom 3: Teoriya i praktika elektrofizicheskikh zadach* [Selected topics of Electrophysics. Vol. 3: Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2014. 400 p. (Rus).

Поступила (received) 19.02.2018

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: baranovmi@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov

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

Power descriptions of a storm cloud of troposphere of Earth: features of their calculation and applied utilization.

Purpose. Implementation of calculation estimation of such basic power descriptions of the system is a «storm cloud - earth», as total charge of q_{Σ} , electric potential of φ_r , electric energy of W_0 and amplitude-temporal parameters (ATP) of pulse current $i_L(t)$ in the channel of a long air spark discharge of cloud on earth.

Methodology. Electrophysics bases of technique of high voltages and large currents, theoretical bases of the electrical engineering, theoretical electrophysics, theory of the electromagnetic field and technique of the strong electric and magnetic fields. **Results.** The results of calculation estimation of basic power descriptions are resulted in the overhigh voltage electrophysics calculation system a «storm cloud – earth». To such descriptions of a storm cloud behave: total electric charge of q_{Σ} , concentrated in a storm cloud of spherical form of the set volume with the shallow dispersible negatively charged including as particulate dielectric matters the set by an middle

closeness; electric potential of φ_r , is in the spherical volume of a storm cloud of the set size; electric energy of W_0 , accumulated in the spherical volume of a storm cloud of the set radius of R_0 ; PTP (amplitude of I_{mL} and duration of τ_p at level $0.5I_{mL}$) of aperiodic impulse of current $i_L(t)$ of linear lightning in the plasma channel of a long air spark digit of a storm cloud on earth. The ground of possibility of the use is given in close practical calculations in place of the real storm cloud of the simplified calculation model of a storm cloud, containing the spherical volume of V_0 by the radius of R_0 is shown that at $R_0 \approx 985$ m and accordingly $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$ m³ in the examined model of a storm cloud his indicated power descriptions arrive at the followings numeral values: charge of $q_{\Sigma} \approx -55.6$ C, potential on the outward surface of cloud of $\varphi_R \approx -506$ MV, electric energy of $W_0 \approx 14.1$ GJ in a cloud and amplitude of aperiodic impulse of current of $I_{mL} \approx -262.1$ kA at duration of his flowing $\tau_p \approx 142.4$ μ s in the plasma channel of a long air spark digit of cloud on earth. This calculation information well correlates with the known experimental information, characteristic for the short shots of lightning in surface objects. The receive results will be instrumental in possibility of prognostication of a sticky storm wicket specialists at presence of only minimum initial information about a storm cloud in earthly troposphere. **Originality.** First at the analysis of a storm situation in troposphere of Earth offered approach, related to bringing the real storm cloud over the volume of V_0 to an equivalent on volume spherical storm cloud by the radius of R_0 , for which will apply the physical and mathematical vehicle of analysis of flowings in him electrophysics processes developed an author. **Practical value.** Application of the in practice calculation findings will allow to deepen scientific and technical knowledge in area of nature of atmospheric electricity, will be instrumental in further development of physics of linear lightning and successful decision of global problem of protecting from lightning of surface objects and auxiliary them personnel. References 12, figures 2.

Key words: atmospheric electricity, storm cloud, accumulated charge, electric potential and energy of cloud, current in the channel of discharge of cloud on earth, calculation, experimental information.

Yu.V. Batygin, E.A. Chaplygin, S.A. Shinderuk, V.A. Strelnikova

THE MAIN INVENTIONS FOR TECHNOLOGIES OF THE MAGNETIC-PULSED ATTRACTION OF THE SHEET METALS. A BRIEF REVIEW

Purpose. The description of the Equipment for the Magnetic-Pulsed Attraction (or EMF-attraction) of the sheet metals which allows non-contact deforming of ferromagnetics (the low carbon steels, for example), the non-magnetic billets from aluminium alloys and the practical realization of the new advanced technologies in the modern processing manufacture. Methodology. Comparative analysis of characteristics and operating conditions of the systems under consideration. Results. Physically, all magnetic-pulsed methods of attraction are based on the Lorentz repelling forces decreasing and on increasing the attracting forces when the sheet billets being deformed are transparent for the low working frequency acting electromagnetic fields. The ferromagnetic samples attraction is caused by their magnetic properties. For the non-magnetic metals attraction an accessory conducting screen is being introduced in construction of the inductor system which is the method tool. In this case the attraction effect is caused by the force interaction of the unidirectional currents induced in the screen and in sheet billet. The different constructions of the attracting tools attended for fulfilling the different production operations (for example, it can be stamping, flattening etc.) with metals owning by different electrophysical properties are represented. Originality. The novelties in the magnetic pulsed installations used as the power sources in the complex equipment for the automobile bodies repair are given. Practical value. The practical application of the elaborated systems for the dents removing in the sheet metals are suggested and successfully approbated. In the whole these works can be considered as new scientific direction and used for different manufacturing aims though the main attention is paid to the practical application in the field of the automobile bodies repair. The most part of the described inventions is defended by the Ukrainian Patents (23 from total quantity – 33 References) and little known to the west specialists in the area of the magnetic pulsed technologies. From the authors view point this is a main particularity and usefulness of the present paper. References 33, figures 11.

Key words: magnetic-pulse metal working, electromagnetic forming, electromagnetic attractive forces, ferromagnetic materials, non-magnetic metals, low frequency discharges.

В статье описано оборудование, предназначенное для магнитно-импульсного притяжения листовых металлов, которое позволяет бесконтактное деформирование, как ферромагнетиков, так и немагнитных заготовок из алюминиевых сплавов и практического применения новых передовых технологий в современной индустрии. Притяжение ферромагнитных образцов обусловлено их магнитными свойствами. Для притяжения немагнитных металлов в конструкцию индукторной системы, являющейся инструментом метода, вводится вспомогательный проводящий экран. Представлены различные конструкции инструментов притяжения для выполнения различных производственных операций по обработке металлов, обладающих различными электрофизическими свойствами. Описана новизна магнитно-импульсных установок, используемых в качестве источников энергии в комплексах оборудовании для ремонта автомобильных кузовов. Библ. 33, рис. 11.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка металлов, электромагнитная формовка, электромагнитные силы притяжения, ферромагнитные металлы, немагнитные металлы, низкочастотные разряды.

Introduction. The Magnetic-Pulse Metal Working (the abbreviation – MPMW, the other known title is Electromagnetic Forming, the abbreviation – EMF) is a field of the Mechanical Engineering using an impulse or high speed forming technologies united by general principle of action the essence of which consists in the force action of the pulsed electromagnetic fields on the conducting work-pieces. In the recent very detailed review [1] provided a development historical perspective of the MPMW traditional technologies and highlighted the state of the art on modeling, coil design, sheet metal forming, tube forming, crimping, welding, cutting, spring-back calibration and hybrid processes including the Magnetic-Pulsed Methods. Besides it was marked that good electrical conductivity of the work-pieces metal is the major requirement for the traditional MPMW to be efficient. Practically, the last remark means using rather high frequencies of the acting electromagnetic fields. All applications discussed by [1] are based on repelling so named Lorentz forces between the EMF-tool and conductive blank. In such configuration, the tool and other accessories (forming die, mandrel to which the blank is welded or crimped, shearing edge which is cutting the blank) are positioned from opposite sides of the blank. But there is another configuration of the EMF processes where the blank is attracted to the tool working surface. This is the new both scientific and practical development direction the modern Magnetic-Pulse Metal Working.

The goal of the paper is the description of the main inventions and the according technology operations in the field of the Magnetic Pulsed Attraction of the sheet metals which can be realized for different manufacturing aims though the main attention is paid to the practical application in the field of the automobile bodies repair. Concretely this is an external non-contact removal of the dents on their surfaces. A main particularity of this paper consists in a wide illumination of the author's inventions in Ukraine created on a base of the great practical experience and little known to the west specialists in this area of the magnetic pulsed technologies. These inventions defended by the national patents are evidence not only of advancement in the marked new direction of the modern MPMW. They open the real possible ways for creation of the progressive industrial technologies in the present and probably in a future.

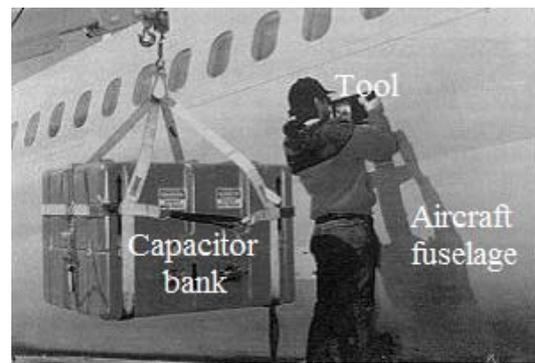
The attraction under superposition of the high and low frequency electromagnetic processes. Chronologically, this review should be started from the first fundamental suggestion by the metals electromagnetic attraction which was formulated in the middle of the last century yet. In 1965 H.P. Furth patented the EMF process with the multiturn coil and an additional single turn with open ends [2]. The electric discharge employed for this process was rather slow and, therefore, allowed diffusion of electromagnetic field through the blank. After the induced voltage

© Yu.V. Batygin, E.A. Chaplygin, S.A. Shinderuk, V.A. Strelnikova

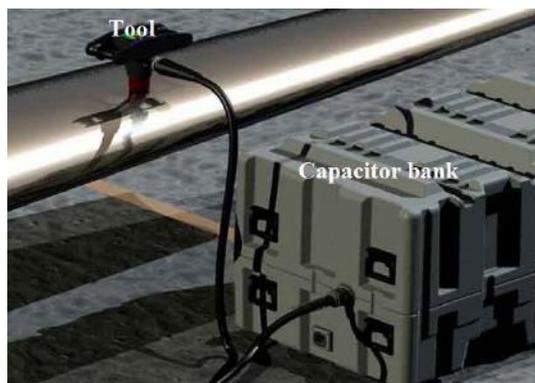
achieves of some determined value the additional single turn with initially opened ends will be short circuited by the electrical discharge spark what will conduct to electromagnetic field eliminating from the side of the blank facing the coil. As result, the electromagnetic pressure from the side of the blank facing the coil was absent, while the pressure from the diffused electromagnetic field to the opposite side of the blank attracted it to the coil. In fact, issuing from the modern physical conceptions the described process consists in generating two frequencies of discharge: slow and fast. The fast discharge eliminates the slow field from the side of the blank facing the coil while the slow field diffused through the thickness of the sheet metal deforms the blank. This physical principle was incorporated in a number of the next electromagnetic tool designs and configurations. So, Hansen and Hendrickson [3] suggested a method and apparatus for electromagnetically removing dents from conductive materials by introducing a slow discharge through a multiturn coil and a rapid pulse of countercurrent. In [4] introduced a system of two coils and portable pulse generator generating both repelling and pulling forces to correct both concave and convex areas of the dent. In [5] introduced a crow bar system capable of shaping the pulse comprised of the fast and slow frequencies in most favorable way for the dent removal process. The final modern construction of the electromagnetic attraction systems with two working frequencies was elaborated by engineers of American firms «Electroimpact» and «Fluxtronic» [6, 7]. Given devices (Fig. 1) are intended for the dents removing on the damaged airplanes bodies panels. Their distinguished particularity is a work in regime of many-times repeating the force actions. As inventors verify this regime is obligatory for the dent removing. Deforming the damaged panel metal is impossible under the single pulse of the force action. The practical possibilities of «Electromagnetic Dent Removers (EDR)» of «Electroimpact» and «Fluxtronic» allow successful straightening the aluminum sheets by thickness about ~ 2 mm. Proceeding from obvious physical evaluations the represented EDR will not be able to work with ferromagnetics. Influence of their magnetic properties will mean the fields penetration intensity decreasing and as consequence the attraction forces falling down.

Another purely theoretical concept of sheet metal attraction by the coil was introduced in 1981 by Shneerson based on sudden interruption of a single frequency discharge [8]. In this case, the diffused electromagnetic field still produces the attraction forces. Should be noted this approach is similar to the before described two-frequency methods. Shneerson's suggestion looks simpler. However, its efficiency is dependent upon how fast the discharge can be interrupted. But it is very complicated technical problem. Generalizing above conducted consideration leads to conclusion: the main disadvantages of all two-frequency suggestions consist in their very complicated technical realizing, the power electronics usage, the different temporal processes synchronization etc. As result the high price of the produced equipment has a place.

The tools of the ferromagnetics attraction by the low frequency electromagnetic fields. The concept of a sheet metal single frequency attraction was introduced in [9, 10] for ferromagnetic materials.



a



b



c

Fig. 1. The equipment and realization of the technological processes: a) the technology of «Electroimpact»; b) the equipment of «Fluxtronic»; c) the technology of «Fluxtronic»

This concept was discovered during EMF experiments with thin steel sheet plates deformed by electric discharges with different frequencies. The suggested concept quickly found its practical application in dent removal devices in automotive bodies where majority of exterior panels are fabricated from low carbon steel. The discovered phenomenon was laid in a base of [11]. The identical Patent Application was given in [12]. They have represented the specific coil designs as well as practical aspects of dent removal in automotive panels. Here should be added that Concern «Betaginnovation» by the representatives of which are the mentioned above applicants of patents have represented the technical complex titled as «Magnetic Dent Remover (MDR)» [13]. The single frequency experiments initially discussed in [14] indicated that the direction of the electromagnetic pressure for ferromagnetic steel sheet metal blanks is a function of the frequency of the discharge. At some limit, the applied electromagnetic force was changing its direction.

For high frequencies repelling took place, but for low frequencies attraction was watched at. Formally, the acceptable low frequencies diapason had been fixed in [9] and in [10] to the ferromagnetics attraction:

$$\omega \ll \frac{1}{\mu \cdot \gamma \cdot d^2}, \quad (1)$$

where $\omega = 2\pi \cdot f$ – the working frequency, μ – the permeability of metal, γ – electrical conductivity of sheet metal, and d – sheet metal thickness.

It should explain that formula (1) provides only the upper limit of the frequency where attraction can be expected. The actual boundary frequency between attraction and repelling can be order of magnitude lower. Physically, formula (1) can be further interpreted in the following way: it compares the sheet metal thickness with the skin-layer value for the given frequency. After not complicated transforming the inequality (1) can be represented in a view:

$$\frac{d}{\Delta} \ll \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (2)$$

where $\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}}$ – the skin-layer value or by other

definition Δ – this is the so named effective depth of the electromagnetic field penetration with the frequency – ω in environment with the permeability – μ and the electrical conductivity – γ .

From a physical view point the formulas (1) and (2) give an approximate notion, what part of the magnetic field's energy remaining in the work-piece goes on excitation of the eddy currents and the Lorentz forces but without taking into account any influence of the magnetic attraction forces. Actually, the formulas (1) and (2) illustrate the approximate conditions when the Lorentz forces integral action is negligible small and the attraction is possible. Often, their fulfilling is quite enough for the necessary engineer evaluations. On principle, workability of the for first time suggested way of the ferromagnetic sheet billets attraction showed in [10] is based on three fundamental statements. The first of them consists in suppressing the natural Lorentz repelling forces. The second one this is excitation of the attraction forces caused by the sheet billets magnetic properties influence. The final third statement consists in the conditions creation when the attraction magnetic forces are prevailing over the repelling Lorentz forces. In the total, three above formulated statements provide the ferromagnetic sheets attraction by the low frequency electromagnetic fields. For effectiveness increasing the patented inductor system as the tool for the ferromagnetic sheet attraction consists of two main components as a rule. This is the single turn inductor (separately it is shown on Fig. 2, *d*) and the matching transformer [14, 15]. By the physical essence the last one this is the usual impulse air transformer. It can have two different constructions. The first of them has a multi turn primary winding on an external surface of an inner hollow lengthy metallic cylinder (with longitudinal cut) playing a role of the secondary winding. The external primary winding is connected to the power source. The inner secondary winding is loaded by the single turn inductor. Such construction type got name «the cylindrical matching transformer» (it is shown on Fig. 2, *a* and Fig. 2, *c* on the left side) [14]. The other type of the matching transformer has a multi

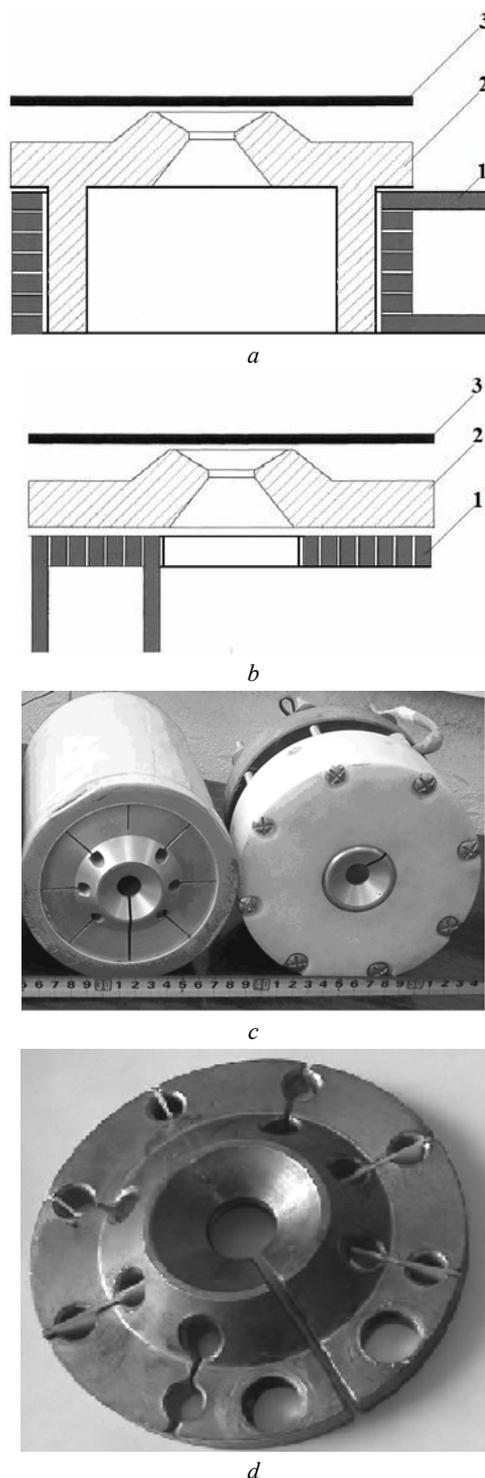


Fig. 2. The matching transformers of different constructive fulfilling, *a*) a principle scheme of the «the matching cylindrical transformer», *b*) a principle scheme of the «the matching disk transformer», 1 – the primary winding, 2 – the single turn inductor, 3 – the sheet billet; *c*) the cylindrical and disk constructions photos; *d*) a single turn inductor with the conical inner bore

turn flat spiral winding placing through isolating insert on a flat surface of the single turn inductor. Such construction type got a name «the matching disk transformer» (it is shown on Fig. 2, *b* and Fig. 2, *c* on the right side) [15]. The appointment of the matching transformer consists in the inductor current increasing under preserving the electromagnetic energy from the power source.

Concerning the matching disk transformers the last useful remark. The primary winding is being experienced the great electro-dynamical efforts repelling it from the massive single turn of the secondary winding. Their action weakens electromagnetic connection between windings, decrease current in the single turn inductor and as consequence decrease the attraction efforts. Eventually, the repelling forces destroy the primary winding coil. In order to avoid these negative effects some damping device can be installed. Two according solutions were suggested and patented [16]. The first one this is application of a damping elastic insert between the primary winding external surface and upper cover of the disk transformer body. The second solution supposes installation of the additional massive conducting screen on the primary winding external surface. In this case the excited repelling forces will act as from the side of the single turn inductor as from the side of the additional screen. Choosing its parameters the result as a sum of two oppositely directed forces will allow unloading the disc transformer primary winding. The elaborated tools for the ferromagnetics attraction were tested in a special experiment with the different sheet steel specimens. A first part of the conducted experiment consisted in creating two convexities on the smooth surface of plates with thickness ~ 0.008 m by the magnetic-pulsed attraction. One of them will be object for further removing but already as a dent and second will stay for comparison. Both convexities had the half-spherical shape with diameter approximately about ~ 0.015 m and depth about ~ 0.002 m. In the experiment next part the plates were being turned over. The plates were placed on the flat insulated surface of inductor so that one of the dents turned out opposite the inductor inner hole. The dent removing was made by the magnetic-pulsed attraction. After the five times force action this dent was disappeared practically.

The surface of the sheet, where it was, had been becoming quite smooth. It should be noted the quite interesting circumstance here. The subsequent magnetic-pulsed attraction could lead to appearance of a new dent with opposite curvature in relation to the initial one. So this experiment demonstrated a possibility of the controlled deforming demanded part of the sheet metal. One of the experimental specimens with initial and removed dents is shown below on Fig. 3.

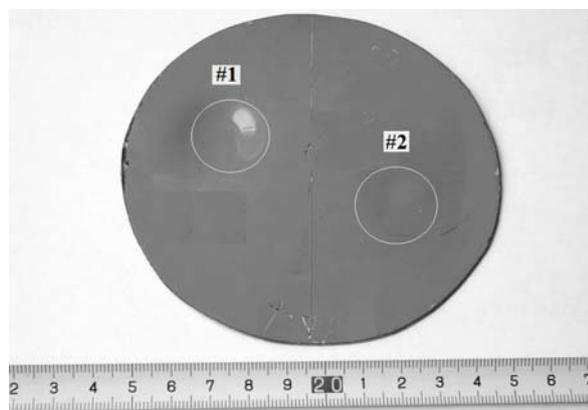


Fig. 3. The experimental specimen from the sheet steel of the body car «Mitsubishi»: #1 – the dent got by the magnetic-pulsed attraction on the sheet assigned part, #2 – the sheet surface part with the removed dent

The low frequency electromagnetic tools of the non-magnetic metals attraction. For a better understanding it should start from the main statements providing operability of the patented way for the non-magnetic metals magnetic-pulsed attraction [17] in comparison of the previous consideration for ferromagnetics [10]. As before the first statement consists in suppressing the natural Lorenz's repelling forces. As before this problem can be solved by work in the low frequency temporal regime (formulas (1) – (2)). The second statement about workability consists in the attracting forces excitation. In the previous consideration these were the forces conditioned by the magnetic properties of the ferromagnetic which is being deformed. The suggested way for non-magnetic metals believes application of the known Ampere's Law according to which the unidirectional currents experience the mutual electro-dynamical attraction. For practical realization of this suggestion it is necessary introducing an auxiliary screen into the inductor system construction. This additional constructive element has to be placed parallel to surface of the sheet which is being deformed. The currents induced in metal of the screen and of the sheet billet will experience the mutual attraction. The electro-dynamical attraction tool of the described action principle was named as «Inductor System with Attracting Screen (ISAS)». The constructive particularity of the ISAS first variant consisted in what the single-turn inductor was located between the sheet metal blank and the accessory attracting screen [17]. The photograph of this construction intended for the model experiments is shown on Fig. 4. The visual notion about physical picture of the occurring processes can be got from the scheme on Fig. 4.

As it is seen from Fig. 4 in the inner space between the screen and the billet the intensities of magnetic fields ($H_{\tau,2}$) which are being excited by the unidirectional induced currents ($J_{1,2}$) are directed oppositely. They are being subtracted from each other. The resultant magnetic intensity will be decreasing and in an idealized case it will be tending to zero. Outside of the system the excited magnetic field intensities have the same directions. They are being summed. The resultant intensity of the external magnetic fields will grow and tend to doubled value of the field intensity excited separately by each from the induced currents (an idealized case). Thus, the inner magnetic field is falling down but the external field is growing. As consequence the magnetic pressure from outside will be a reason of the sheet billet attraction to the fixed screen. Quite conventionally, the corresponding stressed state of the inductor system conditioned by Ampere's attraction forces can be defined as its «compression». But besides of the attraction forces corresponding to Ampere's Law the Lorenz repelling forces are being excited as well. Their action is conditioned by summing the magnetic fields intensities of the induced currents and the inductor current in the inner space and subtracting these intensities in outside the inductor system. So, the Lorenz's forces acting on the screen and sheet billet from inside will exceed the forces acting in outside. Quite conventionally, the corresponding stressed state of the inductor system conditioned by Lorenz's repelling forces can be defined as its «expansion». In integral, if «compression» prevails over «expansion» the represented ISAS will work as the attraction tool of the sheet blanks from metals of any electrophysical nature (as from ferromagnetics as from non-ferromagnetics). In whole all

further cited Patents ISAS are dedicated to their effectiveness increasing. As a rule with this goal some constructive components are being introduced and modified. But presence of the base elements such as low working frequencies (inequalities (1) – (2)), the additional auxiliary screen and the inductor with the exciting current is staying invariable. The review of the patented tools for the non-magnetic metals magnetic pulsed attraction is divided on two main blocks: ISAS of the

cylindrical geometry and ISAS of the rectangular geometry. A physical difference between the marked out constructions shapes consists in the following: in the cylindrical ISAS the induced currents have the circular flowing ways but in the rectangular ISAS they are flowing along the rectilinear trajectories. Taking into account these factors the induced currents densities distribution and the excited fields' concentration in the tools working zones can be varied.

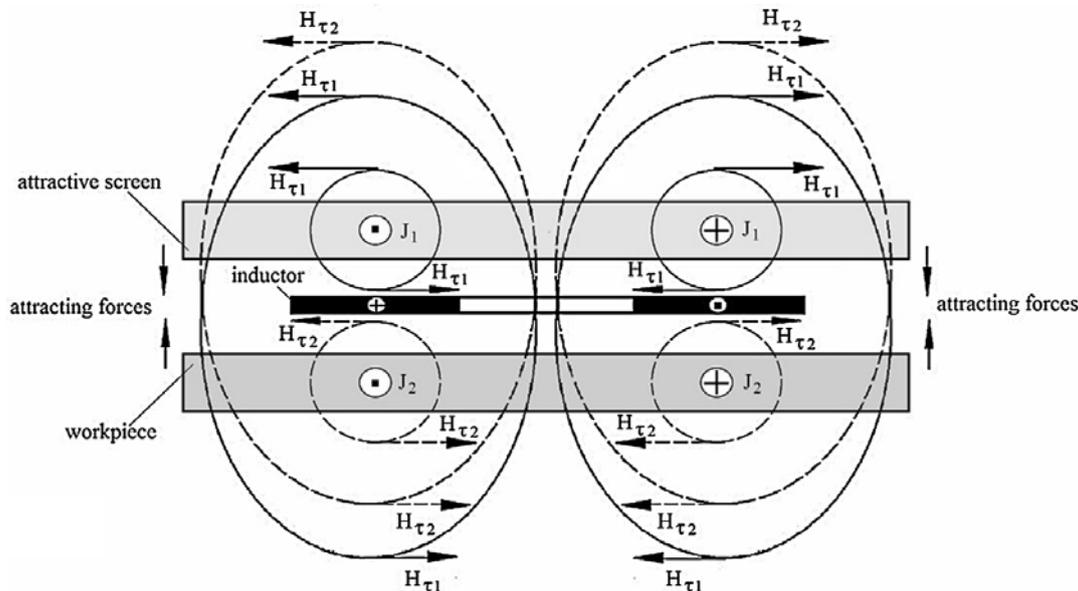


Fig. 4. Schematic illustration of the physical processes in ISAS, $J_{1,2}$ – the unidirectional currents induced in the screen and in the blank, $H_{\tau 1,2}$ – the tangential components of the magnetic field intensity being excited by the currents $J_{1,2}$

«Inductor Systems with Attracting Screens» cylindrical constructions. Placing the single-turn inductor in the slot of the screen with finite thickness from side of the billet which is being processed is suggested in [18]. The present construction modification demands the working frequency limitation by the least value from:

$$f \ll \frac{1}{\pi \cdot D^2 \cdot \mu_0 \cdot \gamma_s} \text{ or } f \ll \frac{1}{\pi \cdot d^2 \cdot \mu_0 \cdot \gamma_b}, \quad (3)$$

where D , d – the thicknesses of the screen and billet accordingly, γ_s , γ_b – the specific conductivity of the screen and billet accordingly.

The aim of [19] consists in increasing the acting field amplitudes. The authors suggested the circular inductor which has to be made of two separate concentric rings with two opposite slits along the diameter axis. The rings have to be connected in such a way as to provide unidirectional currents in the inner turns of ring at connection of the inductor to a power source. A novelty of [20] consists in a possible choice of the screen geometry. Its thickness remains the same along the cross section and can be defined from inequality: $d_s \ll \Delta$, where Δ – a skin layer value. A method of pulsed magnetic attraction of metal objects by a double-coil circular inductor system and with a thin screen is represented in [21 – 23]. The difference of the cited Patents is the difference of the coils constructive fulfilling. The essential novelty being suggested consists in what inductor is designed as two flat coils. One of them is placed under the screen from the billet side. The second is situated above the screen. Current in the coils flows in one direction. The excited fields

are summed. As in the previous patent the thickness of the auxiliary screen is chosen the same along all cross section. Unlike to the previous suggestions, in [24, 25] the inductor represented by the single-turn [24] or multi-turn flat coil [25] is placed on the external surface of the auxiliary screen. This solution permits weakening the repelling Lorentz forces between the current induced in the billet metal and the current in inductor. It occurs because of screening them each of other by the conducting auxiliary screen. Besides of that the external placing the inductor coil allows constructively to increase the strength of the attraction tool in whole. The last what can be added as advantage this is a possibility to place all construction including the inductor winding and auxiliary screen in a closed body. The scheme of the most successful ISAS construction [25] given on Fig. 5.

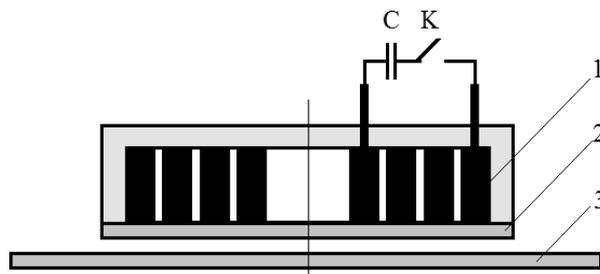


Fig. 5. Schematic representation of ISAS with the external flat multi-turn winding of inductor, 1 – the winding; 2 – the screen; 3 – the sheet billet

Speaking about applications it should be noted the present attraction tool can be very comfortable for exter-

nal non-contact straightening a body of car or aircraft (without disassembly) and as well in machine building where processing a blank can be done only from one side.

«Inductor Systems with Attracting Screens» **rectangular constructions.** The main difference of the below represented inventions from before suggested cylindrical constructions consists in the rectangular form of the inductors used as the magnetic field generators. The demanded frequencies from [18] are the same to [26], but the inductor placed between the screen and billet is already made in the shape of two coplanar loops of rectangular form electrically connected in series to each other. Their current-conductors limiting the working area are parallel. A single-turn rectangular inductor placed between the screen and billet which has two cuts along the axis of symmetry and which divide it into two separate branches, in series or parallel connection of which to each other is patented [27]. This construction allows adjusting

inductance of the inductor and amplitude of exciting fields in dependence on the above mentioned separate branches connection view. The suggestion in [28] is identical to the patented suggestion in [21 – 23]. The main difference and essential novelty consists in what inductor is designed as two single-turn flat rectangular coils. But the same as in [21 – 23] one of them is placed under the screen from the billet side. The second is situated above the screen. Current in the coils flows in one direction. The excited fields are summed. The last variation of the inductor geometrical form (in comparison with solution in [24]) is patented by authors [28]. Unlike previous claims with rectangular inductors this suggestion consists in placing the rectangular single-turn inductor not between the screen and sheet billet but fully above the auxiliary screen. For visual imagine the above described constructions of the inductor systems for the sheet billets attraction are given below on Fig. 6.

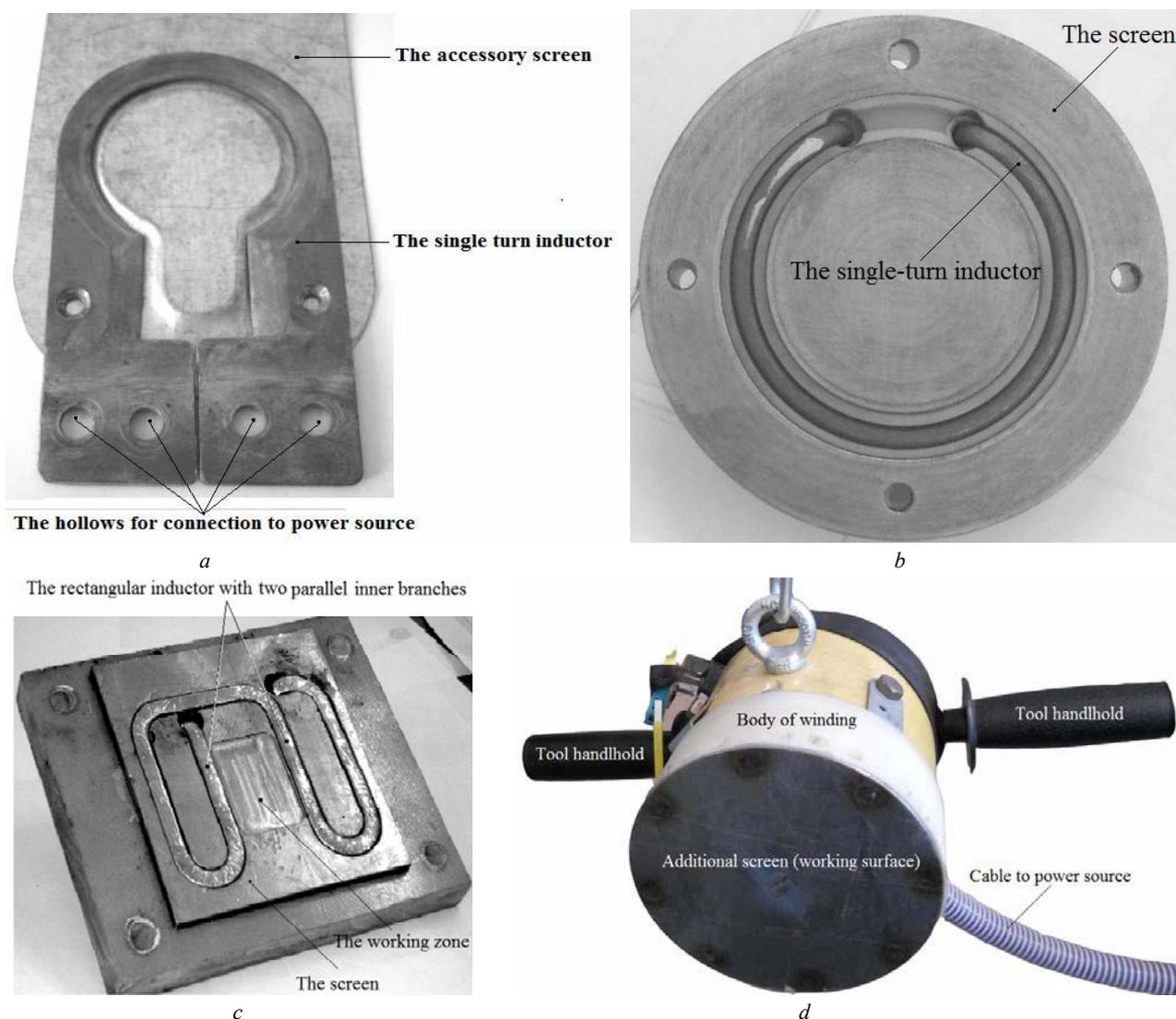


Fig. 6. Experimental models of «Inductor Systems with Attracting Screen», a) the first construction for experiments; b) the circular single-turn inductor in depression on a screen surface; c) the rectangular inductor with two inner parallel branches; d) the construction with the external flat multi-turn winding in assembly

Generalizing of the represented inventions of the «Inductor Systems with Attracting Screens» as the tools for work with the thin-walled metals it should be added

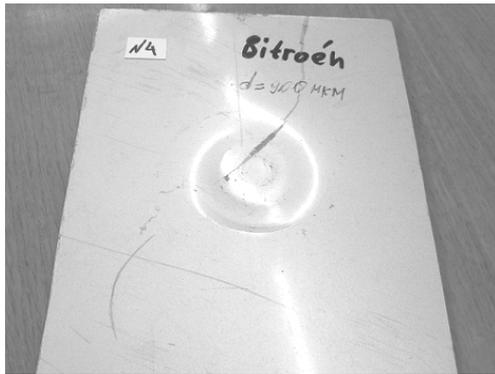
that all described constructions were tested in experiments which affirmed their workability. Some results of the ISAS experimental testing are represented on Fig. 7.



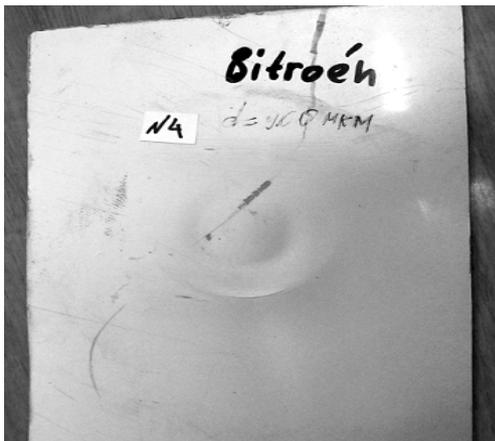
a



b



c

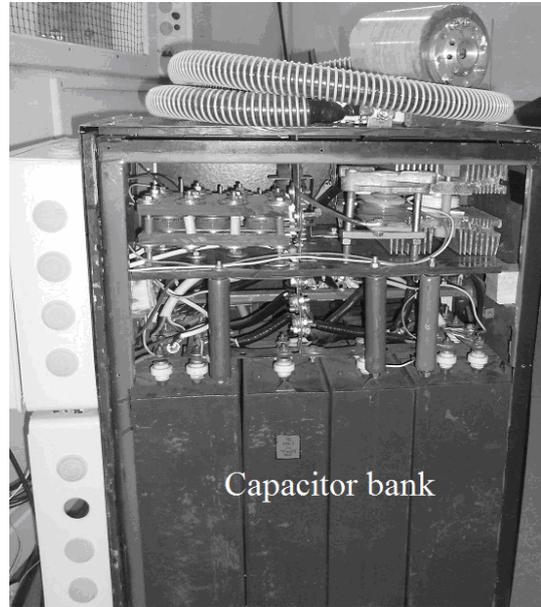


d

Fig. 7. The experimental samples from different automotive steels, «Subaru»: a – before the power action, b – after attraction; «Citroen»: c – before the power action, d – after attraction

The magnetic-pulsed installation as the power source in the equipment for the metal sheets attraction. The experimental investigations were conducted on

the magnetic-pulsed installation – MPIS-2 created in Laboratory of Electromagnetic Technology of the Kharkov National Automobile & Highway University (Fig. 8) and used as the power source with stored energy ~ 2 kJ under maximal voltage ~ 2200 V and own frequency ~ 7.5 kHz.



a



b



c



d

Fig. 8. The main components of MPIS – 2, a) the inner arrangement; b) the external view; c) the control block; d) the remote control panel

Not stopping on the known components of the power source in equipment for the MPMW let us point out the main feature of the represented magnetic-pulsed installation is a work in regime automatically repeating force action pulses with repetition preset frequency (till ~ 10 Hz). The present regime is provided by introduction of the thyristor synchronizing device in the installation electrical scheme [29]. It should be noted the further increasing the repetition frequency of the force action pulses is limited by possibilities of the industrial network. In [30] the patented suggestion consists in usage of the capacitive energy storage special type that is named as «ionistor». Usage of ionistor instead of the traditional capacitive energy storage allows essential decreasing the working voltages without decreasing the working currents what leads to decreasing the power source cost eventually in whole. As it is known the natural discharge of capacitor in an electrical circuit with inductance and resistor has to have the harmonic temporal form for minimum energy losses. But the current and voltage oscillations are decreasing a life cycle the capacitive energy storage. Besides, as it turned out from practice the thyristor commutators in the installation control scheme cannot work in this temporal regime. By this reasons the aperiodic or unipolar temporal form of discharge is more preferential. The problem forming unipolar pulses with minimum energy losses in the discharging circuit is solved by authors [31]. Very interesting scheme of the charging block is patented in [32]. The suggestion essence is based on so named «step-by-step charge» of the capacitive energy storage bank by the serial pulses of the equal energy. This scheme permits excepting the step-up transformer from the charging block and decreasing a cost of the installation in the whole.

The magnetic-pulsed attraction of sheet metals for dents removing on the body car surfaces. The patents [25] and [33] are dedicated to the practical applications of the magnetic pulsed attraction of thin-walled metals. In the [25] the most effective magnetic-pulsed tool of attraction is described (it was represented before as ISAS). Should remind this inductor-tool to remove dents on the surface of the object being processed is fulfilled as a complicated system consisting of the multiturn coil which plays the role of matching transformer and auxiliary attracting screen. The coil is placed on the external surface of the screen. Its opposite inner surface is the tool working surface from side of which the dent in sheet metal is being located. Undoubted advantage of this tool construction is essential decreasing the repelling Lorentz forces at expense of removing the coil current from the current induced in the sheet metal being processed. In [33] the full complex (Fig. 9) of the external non-contact magnetic-pulsed flattening is represented which includes and the tool and the electromagnetic power source.

In main the equipment for the external magnetic pulsed straightening unites previously described and patented components. A detailed description of such complexes is showed in «The complex of the external magnetic pulsed straightening» [25]. The complex contents a remote portable tool allowing processing any demanded parts of the sheets with dents. The magnetic-pulsed installations are being connected to the inductor-tool by flexible cable. If the tool for ferromagnetics attraction is being used then this connection fulfils through the matching

transformer. The charging and discharging circuits are connected through the thyristor-electronic device which synchronizes the work of these circuits. Their interconnection determines the resistor value for limitation of the charging current which provides the installation functionality in the whole:

$$R_{ch} \gg 2\delta_0 \cdot \sqrt{\frac{L_{disch}}{C}}, \quad (4)$$

where R_{ch} – the resistor in the charging circuit, δ_0 and L_{disch} – the relative damping decrement and the integral inductance of the discharging circuit.

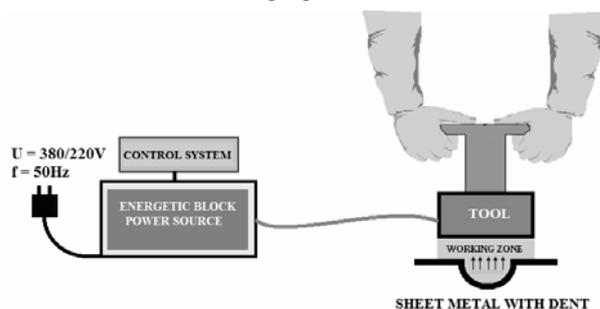


Fig. 9. Schematic illustration of magnetic-pulsed removing the dents in the sheet metal

The discharging circuit of the magnetic-pulsed installation can be represented by several parallel branches which consist of the same capacitors and synchronized thyristor commutators with a common exit to the inductor-tool. Their quantity has to provide the normal work conditions of all power electronics devices. The «ionistor» can be used as the energy storage in the magnetic pulsed installation. But its including in the working scheme demands reforming of the charging and discharging circuits accordingly to the nomenclatorial characteristics of the concrete «ionistor». The discharging circuit has to contain the system for transformation the natural harmonic temporal form of the discharging current pulses to the aperiodic one. This can be the bridge circuit or the well known from the Electrical Engineering «a crow-bar circuit». The own frequency of the magnetic pulsed installation is being determined by its parameters and is fixed value. That is why the integral characteristics of the power action tools (with the matching transformer or without this component in the charging circuit) have to be chosen by such way in order to provide the needed working frequency of the fields being excited. The constructions of the inductor-tools, its parameters (independently on the principle action) and its location place on the sheet metal being processed have to be chosen so in order to the high effectiveness providing the dents removing operation according to all previous recommends. Should add that place location of any inductor system has to provide the best electrodynamical tie between the sheet metal being processed and the dent removing tool. In conclusion of the present consideration some documental illustration of the practical magnetic pulsed removing the dents by the flattening complex are represented. The first photographs (Fig. 10) illuminate the repair technology of the automobile «Audi» door by the tool «Inductor System with Attracting Screen».

The next photos (Fig. 11) illustrate a technological route as algorithm of the dent removing on the automobile «Subaru» door.

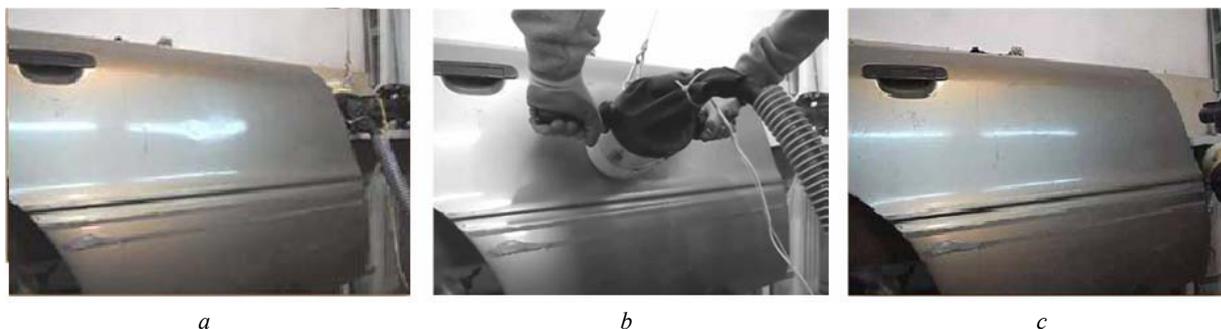


Fig. 10. The external EMF flattening in the real repair process, *a)* the door before flattening; *b)* the tool ISAS in action; *c)* the door after flattening

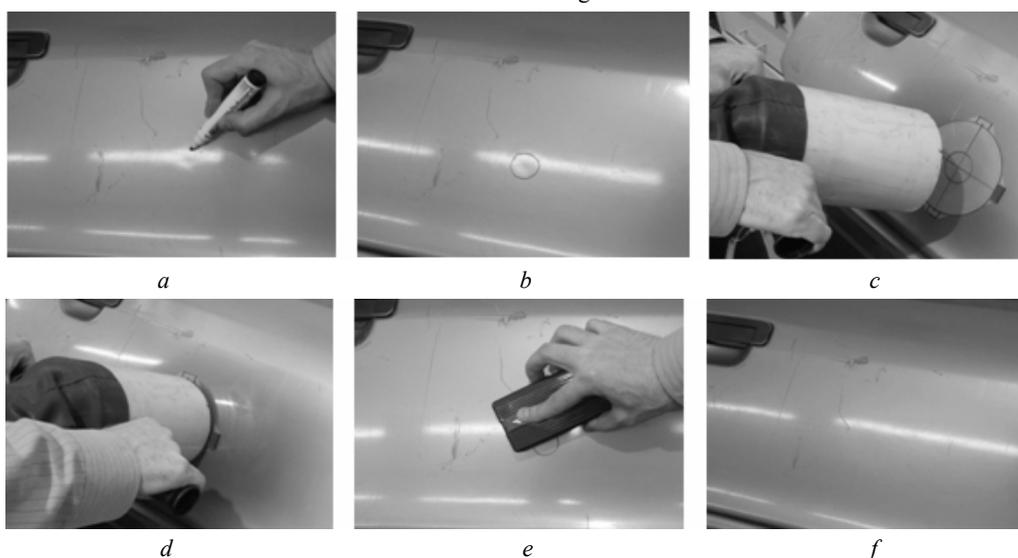


Fig. 11. Photo-illustrations of the technological route, *a)* determination of the dent; *b)* marking the boundary dimensions; *c)* fixing the tool over the dent; *d)* the magnetic pulsed action; *e)* the marker removing; *f)* the car door panel after the flattening

Technological process. It should be noted that during the experiments of the magnetic-pulsed removing the dents there were approbated many samples steel coverings of the bodies European and Japanese cars. Visual car body parts surface inspection in order to determine a dent to be removed (Fig. 11,*a*). The geometrical dimensions and nature of this dent determine the level and intensity of the required force action. A special dielectric insert is placed on the car panel element over the dent. Its purpose consists in fixation of the tool working area toward to the external boundaries of the dent to be removed (Fig. 11,*c*). The necessary energy level and the pulses quantity are set by the operator on the control panel (Fig. 11,*d*). The operator places the tool working surface above the dent area (Fig. 11,*d*). The operator turns the system on and implements an external non-contact flattening (Fig. 11,*e*). The excited forces attract metal of the dent to the surface needed level. After flattening the tool and the insert are taken away and the surface is cleaned up (Fig. 11,*f*). If it is necessary, technological process is repeated few times, till the complete damage removing. In the case, when the dent has big enough size another approach may be used. It consists in its gradual removing. The process should be begun from the edges of the dent and move to its centre.

Conclusions. The fundamental inventions in the field of the Magnetic Pulsed Attraction of the sheet metals using low frequency discharges are illuminated. The most part of them is defended by the Ukrainian Patents and little known to the west specialists in the area of the magnetic pulsed technologies.

The different types of the attracting tools based on different physical principles and attended for work with metals owning by different electrophysical properties are represented. They can deform the ferromagnetics such as low carbon steels and the non-magnetic metals such as alloys of aluminum for example.

The novelties in the magnetic pulsed installations used as the power sources in the complex equipment for the automobile bodies repair are given.

The practical application of the elaborated systems for the dents removing in the sheet metals are suggested and successfully approbated.

In the whole these works can be considered as new scientific direction and used for different manufacturing aims though the main attention is paid to the practical application in the field of the automobile bodies repair.

REFERENCES

1. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A.E., Kleiner M. Electromagnetic forming – A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol.211, no.5, pp.787-829. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012).
2. Furth H. et al. Devices for metal-forming by magnetic tension. US Patent, no.3,196,649, 1965.
3. Karl A. Hansen, Iver Glen Hendrickson. Electromagnetic dent puller. US Patent, no.3,998,081, 1976.
4. I. Glen Hendrickson, Karl A. Hansen. Electromagnetic dent remover with tapped work coil. US Patent, no.4,986,102, 1991.
5. Peter B. Zieve. Power supply for electromagnetic proof load tester and dent remover. US Patent, no.5,046,345, 1991.

6. Available at: <http://www.electroimpact.com> (accessed 15 January 2018).
7. Available at: <http://www.fluxtronic.com> (accessed 15 January 2018).
8. Shneerson G.A. *Polya i perehodnye processy v apparature sverhsilnykh tokov* [Fields and transients in equipment superstrong currents]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 200 p. (Rus).
9. Batygin Yu.V., Lavinsky V.I., Khimenko L.T. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field. *Proceedings of the 1st International Conference on High Speed Metal Forming*. March 31/April 1, 2004. Dortmund, Germany, pp. 157-160.
10. Batygin Yu.V., Lavinskiy V.I. Khavin V.L., Khimenko L.T. *Sposib magnitno-impul'snoi' obrobky tonkostinnykh metalevykh zagotovok* [Method of magnetic-pulse working of thin-walled metallic billets]. Patent UA, no.75676, 2006.
11. Meichtry R., Kouba I. International Patent Application, no.2006119661, 2006.
12. Meichtry R., Basler B., Kouba I. International Patent Application, no.20160044748, 2016.
13. Available at: <http://www.betaginnovation.com> (accessed 15 January 2018).
14. Argun Sh.V., Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Smirnov D.O., Trunova I.S., Chaplygin Ye.A., Shchigoleva S.A. *Sposib magnitno-impul'snoi' obrobky tonkostinnykh metalevykh zagotovok z vykorystannjam uzgodzhuval'nogo prystroju* [The method of magnetic pulsed processing of thin-walled metal billets with using a matching device]. Patent UA, no.69467, 2013.
15. Argun Sh.V., Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Trunova I.S., Chaplygin Ye.A. *Sposib magnitno-impul'snoi' obrobky tonkostinnykh metalevykh zagotovok* [The method of magnetic pulsed processing of thin-walled metal billets]. Patent UA, no.68745, 2011.
16. Argun Sh.V., Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Trunova I.S., Chaplygin Ye.A., Shchigoleva S.A. *Sposib magnitno-impul'snogo prythagannja metalevykh ob'ektiv sumishhenym diskovym pogodzhuval'nym prystrojem z dempfernoju konstrukcijeju* [The method of magnetic pulsed processing of the metal objects by integrated matching disk device with a damping construction]. Patent UA, no.75790, 2012.
17. Batygin Yu.V., Lavinskiy V.I., Khavin V.L. *Sposib magnitno-impul'snoi' obrobky tonkostinnykh metalevykh zagotovok* [Method of the magnetic-pulse processing thin metal work pieces]. Patent UA, no.74909, 2006.
18. Chaplygin Ye.A., Batygin Yu.V., Bondarenko A.Yu. *Sposib magnitno-impul'snoi' obrobky metalevykh zagotovok metodom prythagannja do induktora* [Method of magnetic-pulse working of metallic billets by attraction to inductor]. Patent UA, no.31751, 2008.
19. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin Ye.A., Smirnov D.O. *Sposib magnitno-impul'snogo prythagannja metalevykh ob'ektiv odnovytkovym cylindrychnym induktorom, rozdilenny na dvi gilky* [Method of magnetic pulse attraction of metal objects by two-wind cylindrical inductor divided into two branches]. Patent UA, no.54753, 2010.
20. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Argun Sh.V., Chaplygin Ye.A., Gopko A.V., Drobinin A.M. *Sposib magnitno-impul'snogo prythagannja metalevykh ob'ektiv odnovytkovuju induktornoju systemoju z tonkym ekranom* [Method of pulsed magnetic attraction of metal objects by single-turn inductor system with thin screen]. Patent UA, no.70055, 2012.
21. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Shchigoleva S.A., Chaplygin Ye.A., Gopko A.V., Drobinin A.M. *Sposib magnitno-impul'snogo prythagannja metalevykh ob'ektiv dvovytkovuju krugovuju induktornoju systemoju z tonkym ekranom* [The method of magnetic-pulse attraction of metal objects by double-turn circular inductor system with a thin screen]. Patent UA, no.70734, 2012.
22. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin Ye.A., Shinderuk S.A., Sabokar O.S. *Sposib magnitno-impul'snogo prythagannja tonkostinnykh lystovykh metaliv bagatovytkovuju krugovuju induktornoju systemoju* [The method of pulsed magnetic attraction of thin sheet metals by induction multiturn rotary inductor system]. Patent UA, no.92037, 2014.
23. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin Ye.A., Shinderuk S.A., Sabokar O.S. *Bagatovytkova krugova indukcyjna induktorna systema dlja magnitno-impul'snogo prythagannja tonkostinnykh lystovykh metaliv* [The multiturn rotary induction coil system for pulsed magnetic attraction of thin sheet metals]. Patent UA, no.92436, 2014.
24. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin Ye.A., Trunova I.S., Gopko A.V., Sabokar O.S. *Sposib magnitno-impul'snogo prythagannja metalevykh zagotovok odnovytkovim krugovim induktorom, rozdashovanim 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.
25. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin Ye.A., Sabokar O.S. *Sposib magnitno-impul'snoi' obrobky poverhon' kuzovnykh elementiv* [The method of magnetic pulsed processing surface body elements]. Patent UA, no.104509, 2015.
26. Batygin Yu.V., Bondarenko A.Yu., Serikov G.S. *Sposib magnitno-impul'snoi' obrobky metalevykh zagotovok* [Method of magnetic-pulse working of metallic billets]. Patent UA, no.31752, 2008.
27. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Serikov G.S., Drachenko S.A. *Sposib magnitno-impul'snogo prythagannja metalevykh ob'ektiv prjamokutnym induktorom, z dvoma rozrizamy* [Method of magnetic pulse attraction of metal objects by rectangular inductor with two slots]. Patent UA, no.53968, 2010.
28. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin Ye.A., Shinderuk S.A., Shchigoleva S.A., Sabokar O.S. *Sposib magnitno-impul'snogo prythagannja metalevykh zagotovok induktornoju systemoju z dvoma prjamokutnyimi vytkami ta tonkym ekranom* [The method of the magnetic pulsed attraction of the metallic billets by the inductor system with two rectangular turns and by the thin screen]. Patent UA, no.78243, 2013.
29. Batygin Yu.V., Bondarenko A.Yu., Gnatov A.V., Serikov G.S., Chaplygin Ye.A. *Generator bagatorazovykh impul'siv strumu dlja magnitno-impul'snoi' obrobky metaliv* [Generator of repeated current pulses for magnetic pulse working metals]. Patent UA, no.44933, 2009.
30. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin Ye.A., Gnatova Sh.V., Trunova I.S. *Generator bagatokratnykh impul'siv strumu dlja obrobky metaliv tyskom impul'snogo magnitnogo polja* [Generator of multiple pulses of current for metal forming by pulsed magnetic field pressure]. Patent UA, no.61417, 2011.
31. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin Ye.A., Dzubenko A.A., Argun Sh.V., Drobinin A.M. *Generator bagatorazovykh unipoljarnykh impul'siv strumu dlja magnitno-impul'snoi' obrobky metaliv* [The generator of multiple unipolar current pulses for magnetic-pulse metal working]. Patent UA, no.73733, 2012.
32. Batygin Yu.V., Chaplygin Ye.A., Sabokar O.S. *Peretvorjuvach energii' zarjadnogo konturu magnitno-impul'snoi' ustanovky* [The energy transducer for the magnetic pulsed installation charging circuit]. Patent UA, no.110809, 2016.
33. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin Ye.A., Argun Sh.V., Shinderuk S.A., Sabokar O.S. *Kompleks zovnishn'ogo magnitno-impul'snogo ryhtuvannja* [The complex of the external magnetic pulsed straightening]. Patent UA, no.101413, 2015.

Received 06.02.2018

Yu.V. Batygin¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,
 E.A. Chaplygin¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
 S.A. Shinderuk¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
 V.A. Strelnikova¹, Postgraduate Student,
¹ Kharkiv National Automobile and Highway University,
 25, Yaroslava Mudrogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine,
 e-mail: yu.v.batygin@gmail.com; chaplygin.e.a@gmail.com;
 s.shinderuk.2016102@ukr.net; v.strelnikova91@gmail.com

Н.И. Бойко, А.В. Макогон, А.И. Маринин

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБЕЗЗАРАЖИВАЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ТЕКУЧИХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ ПРИ ПОМОЩИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Мета. Експериментально визначити раціональні режими і енергоефективність знезаражуючої обробки текучих харчових продуктів за допомогою високовольтних імпульсних дій у порівнянні з традиційною пастеризацією. *Методика.* Для одержання високовольтних імпульсів на робочих камерах – навантаженні генератора застосована методика генерування імпульсів за допомогою підвищувального трансформатора, високовольтних імпульсних конденсаторів і розрядників з системою загострення фронту імпульсів. Імпульси на навантаженні вимірювалися за допомогою низькоомного резистивного діляника напруги, передавалися по широкопоздовговому коаксіальному кабелю і реєструвалися за допомогою аналогового осцилографа С8-12 або цифрового осцилографа Rigol DS1102E зі смугою пропускання 100 МГц у кожного. Робочі камери заповнювалися водою, молоком або молочною сироваткою і складалися з кільцевидного корпусу, який виготовлено з фторопласта, і металевих електродів, що створюють дно і кришку камери, мають плоскі накладки з харчової неіржавіючої сталі для контакту з харчовим продуктом усередині камери. *Результати.* Одержано високовольтні імпульси на навантаженні генератора з тривалістю по основі 300-1200 нс при частотах проходження імпульсів до 500 імп/с. Експериментально одержані амплітуди імпульсів напруги на навантаженні генератора – до 75 кВ, а напруженості електричного поля – до 35 кВ/см в робочих камерах з зазором 22 мм і до 50 кВ/см в робочих камерах з зазором 15 мм. Вказані характеристики імпульсів дозволили здійснити повну і незворотну інактивізацію мікроорганізмів в харчових рідинах в робочих камерах. *Наукова новизна.* Показано, що існують режими обробки харчових продуктів за допомогою високовольтних імпульсних дій, які дозволяють краще зберегти біологічну і харчову цінність продуктів порівняно з тепловою обробкою при їх повному знезараженні і при суттєво менших питомих енерговитратах. *Практична значущість.* Одержані експериментально режими обробки молока, молочної сироватки і води зі зменшеними питомими енерговитратами відкривають перспективу промислового застосування комплексу високовольтних імпульсних дій для знезаражуючої обробки водовмісних харчових продуктів. Бібл. 7, табл. 3, рис. 10.

Ключові слова: генератор високовольтних імпульсів, трансформатор, конденсатор, багатозазорний розрядник, багатоканальний розрядник, робоча камера, знезаражуюча обробка харчових продуктів.

Цель. Экспериментально определить рациональные режимы и энергоэффективность обеззараживающей обработки текучих пищевых продуктов при помощи высоковольтных импульсных воздействий в сравнении с традиционной пастеризацией. *Методика.* Для получения высоковольтных импульсов на рабочих камерах – на нагрузке генератора применена методика генерирования импульсов при помощи повышающего трансформатора, высоковольтных импульсных конденсаторов и разрядников с системой обострения фронта импульсов. Импульсы на нагрузке измерялись при помощи низкоомного резистивного делителя напряжения, передавались по широкополосному коаксиальному кабелю и регистрировались при помощи аналогового осциллографа С8-12 или цифрового осциллографа Rigol DS1102E с полосой пропускания 100 МГц у каждого. Рабочие камеры заполнялись водой, молоком или молочной сывороткой и состояли из кольцеобразного корпуса, выполненного из фторопласта, и металлических электродов, образующих дно и крышку камеры, имеющих плоские накладки из пищевой нержавеющей стали для контакта с пищевым продуктом внутри камеры. *Результаты.* Получены высоковольтные импульсы на нагрузке генератора с длительностью по основанию 300-1200 нс при частотах следования импульсов до 500 имп/с. Экспериментально полученные амплитуды импульсов напряжения на нагрузке генератора – до 75 кВ, а напряженности электрического поля – до 35 кВ/см в рабочих камерах с зазором 22 мм и до 50 кВ/см в рабочих камерах с зазором 15 мм. Указанные характеристики импульсов позволили осуществить полную и необратимую инактивацию микроорганизмов в пищевых жидкостях в рабочих камерах. *Научная новизна.* Показано, что существуют режимы обработки пищевых продуктов при помощи высоковольтных импульсных воздействий, позволяющие лучше сохранить биологическую и пищевую ценность продуктов по сравнению с тепловой обработкой при их полном обеззараживании и при существенно меньших удельных энергозатратах. *Практическая значимость.* Полученные экспериментально режимы обработки молока, молочной сыворотки и воды с уменьшенными удельными энергозатратами открывают перспективу промышленного применения комплекса высоковольтных импульсных воздействий для обеззараживающей обработки водосодержащих пищевых продуктов. Библ. 7, табл. 3, рис. 10.

Ключевые слова: генератор высоковольтных импульсов, трансформатор, конденсатор, многозазорный разрядник, многоканальный разрядник, рабочая камера, обеззараживающая обработка пищевых продуктов.

Введение. Традиционные тепловые способы обеззараживающей обработки (пастеризация и тепловая стерилизация) жидких пищевых продуктов, виноматериалов, напитков являются энергозатратными и не позволяют в достаточной степени сохранить их исходную биологическую и пищевую ценность [1, 2]. Одним из наиболее перспективных способов нетепловой обеззараживающей обработки продуктов является способ обработки при помощи комплекса высоковольтных импульсных воздействий (КВИВ). В англоязычной научной литературе используется термин – PEF-treatment (PEF – pulsed electric field, обработка при по-

мощи импульсного электрического поля). В большинстве своем жидкие пищевые продукты являются водосодержащими. Поэтому важным является вопрос и о рациональных режимах обеззараживающей КВИВ обработки воды.

Цель работы – экспериментально определить рациональные режимы и энергоэффективность обеззараживающей обработки текучих пищевых продуктов при помощи высоковольтных импульсных воздействий в сравнении с традиционной пастеризацией.

© Н.И. Бойко, А.В. Макогон, А.И. Маринин

Экспериментальная установка. Для проведения экспериментальных исследований использовалась установка, которая впервые описана в [3]. Электрическая схема установки с системой управления приведена на рис. 1.

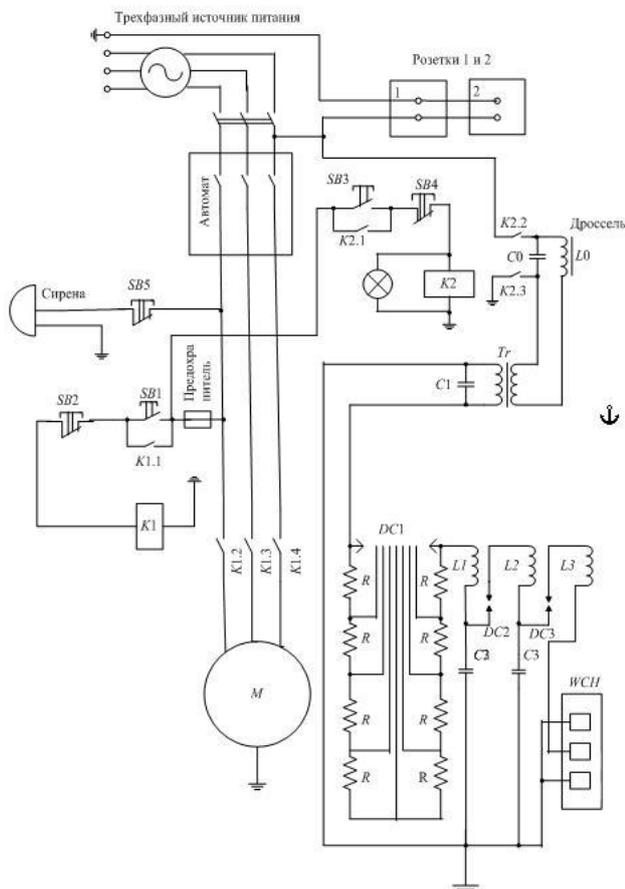


Рис. 1. Электрическая схема КВИВ-установки с системой управления

Установка состоит из низковольтной и высоковольтной частей. Высоковольтная часть состоит из генератора высоковольтных импульсов и нагрузки – рабочей камеры *WCH*. Генератор содержит стартовый каскад ($C1, DC1$) и два каскада обострения ($C2, DC2$ и $C3, DC3$). Каждый каскад содержит конденсатор и разрядник. Разрядник $DC1$ стартового каскада является многоззорным. Все разрядники – многоканальные. В простейшем режиме работы установки используется только первый каскад. Недостатком этого режима является недостаточная крутизна фронта импульсов на нагрузке – рабочей камере *WCH*. Поэтому основная часть экспериментов проведена с использованием всех трех каскадов.

После подключения к трехфазному источнику питания при проточной обработке нажатием кнопки $SB1$ запускается электродвигатель M насоса, перекачивающего обрабатываемый продукт через рабочую камеру *WCH*. Нажатием кнопки $SB3$ подается напряжение на реле $K2$, замыкаются его контакты $K2.1, K2.2, K2.3$, и фазное напряжение силовой сети через фильтр $L0 - C0$ подается на первичную (низковольтную) обмотку трансформатора Tr , запуская в работу установку. В результате на нагрузке – рабочей камере *WCH*,

формируются импульсы высокого напряжения (до 120 кВ) и тока обеих полярностей с частотой следования до 500 имп/с. Кнопкой $SB4$ отключается подача напряжения на фильтр $L0 - C0$ и на первичную обмотку трансформатора Tr . Нажатием кнопки $SB2$ выключается электродвигатель M насоса.

Рабочие камеры. Рабочие камеры (РК), которые являются нагрузкой для КВИВ установки, делятся на стационарные и проточные. В стационарных камерах замена порций продукта осуществляется вручную, а в проточных камерах – благодаря потоку через камеру, который обеспечивает насос и система перекачивания. Последняя содержит емкости для подачи и приема обрабатываемого текучего продукта и шланги. Именно в РК выделяется энергия, яка исходно запасается в основном высоковольтном конденсаторе установки.

Типовые стационарные и проточные камеры приведены на рис. 2 и рис. 3 соответственно.



Рис. 2. Вариант стационарной РК с крышкой – электродом, расположенным рядом

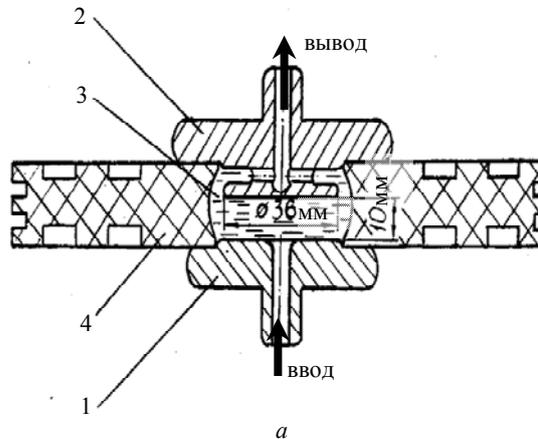


Рис. 3. а – вариант конструкции проточной технологической РК: 1, 2 – электроды, 3 – внутренний объем камеры, 4 – диэлектрический корпус; б – фото РК

Экспериментальные исследования методов КВИВ обработки (PEF-treatment) пищевых продуктов и очистки воды. Экспериментально исследовали влияние КВИВ обработки на микробиологическую обсемененность, санитарно-гигиенические свойства и органолептические показатели молока, молочной сыворотки и воды. Исследования проводились в разных режимах обработки в стационарных и проточных РК на КВИВ установке, описанной выше.

Фото работающей КВИВ установки во время проведения экспериментов показано на рис. 4. Обрабатываемый продукт заливали в РК, которую предварительно стерилизовали при помощи спиртовой горелки, и закрывали камеру стерилизованной крышкой. Использовались камеры двух типоразмеров: с межэлектродным промежутком (расстояние между дисковой крышкой камеры и ее днищем) 15 мм и с межэлектродным промежутком 22 мм. Варьировали время обработки от 10 с до 30 с. На рис. 5 показана РК с межэлектродным промежутком 22 мм.



Рис. 4. Фото работающей КВИВ установки

Для измерения характеристик импульсов на нагрузке КВИВ установки – рабочей камере использовался резистивный низкоомный делитель напряжения

с коэффициентом деления $k_d=1000$. В качестве регистрирующего устройства использовался аналоговый запоминающий осциллограф С8-12 с полосой пропускания 100 МГц и цифровой осциллограф RIGOL DS1102E с полосой пропускания 100 МГц.

Для защиты от электромагнитных помех осциллограф располагался в экранирующей кабине с экранированной по контуру дверью. Сигнал от низковольтного плеча делителя напряжения до осциллографа в измерительной кабине подавался при помощи коаксиального кабеля с двойной оплеткой. Дверь в измерительной кабине может открываться и закрываться плотно как извне, так и изнутри.

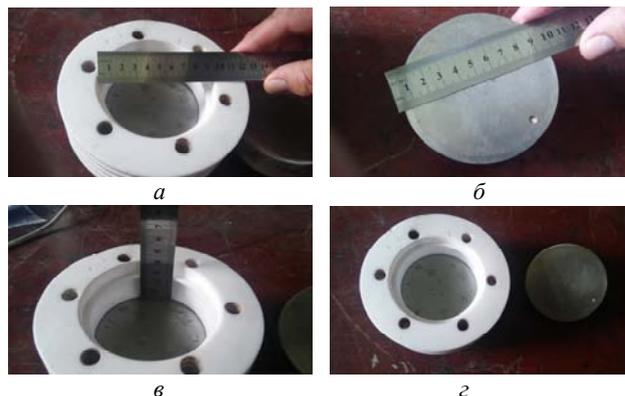


Рис. 5. Рабочая камера с межэлектродным промежутком 22 мм: а – корпус из фторопласта, б – крышка, в – межэлектродный промежуток 22 мм, г – крышка возле камеры

Исследовалось инактивирующее действие КВИВ на различные молочные продукты (молоко, сыворотку, йогурт), а также на воду. При этом воду к экспериментам готовили наши коллеги – соисполнители из Национального университета пищевых технологий (НУПТ), город Киев. Брли воду «София киевская» и обсеменяли ее бактериями группы кишечной палочки (E-coli). При каждом режиме обработки всех исследуемых жидкостей делали три повторения.

Величины межэлектродных промежутков в искровых разрядниках имели следующие значения: для многозазорного разрядника (МЗР) величина отдельного промежутка – приблизительно 5 мм, для первого обостряющего разрядника – приблизительно 20 мм, для второго обостряющего разрядника – приблизительно 20 мм. При этом количество задействованных промежутков в МЗР составляла от 4 до 7 включительно.

Обработка образцов текучих продуктов и воды в РК во всех режимах проводилась импульсами обеих полярностей. За период 20 мс сетевого переменного напряжения в течение полупериода положительного напряжения 10 мс в РК поступало приблизительно 4 импульса одной полярности, а за полупериод отрицательного напряжения 10 мс в РК поступало приблизительно 4 импульса другой полярности.

Результаты экспериментальных исследований методов КВИВ обработки (PEF-treatment). На рис. 6 приведена осциллограмма импульсов на РК с молоком при 7 раскороченных зазорах из 8 в многозазорном разряднике – МЗР без влияния электромагнитных помех и с явно видимым фронтом импульса.

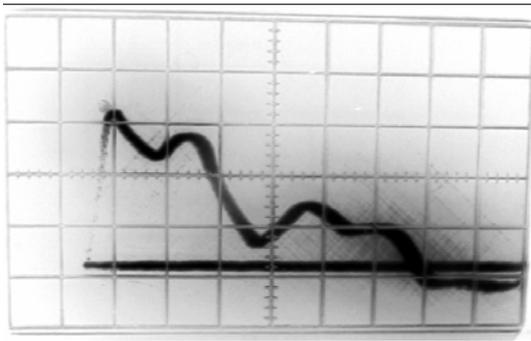


Рис. 6. Типичная осциллограмма импульса напряжения на РК с сырым молоком. Цена деления по оси времени 50 нс/дел; по оси процесса 20 кВ/дел. В многозачорном разряднике раскорочено 7 зазоров из 8. Зазор в РК $d = 22$ мм

Из осциллограммы следует, что длительность фронта импульса в молоке составляет примерно 20 нс, а длительность импульса по основанию до перехода через нуль составляет примерно 300 нс. Амплитуда импульса напряжения – не менее 60 кВ. Отсюда следует, что амплитуда напряженности электрического поля в молоке $60/2,2 \approx 27,3$ кВ/см. Важно и то, что в молоке, которое имеет удельное сопротивление меньше, чем водопроводная или столовая вода, форма импульса – слабо колебательная.

На рис. 7 представлена типичная осциллограмма импульсного напряжения на РК с водой, обсемененной *E.coli*. Осциллограмма получена при помощи цифрового осциллографа Rigol 1102 E.

Из осциллограммы на рис. 7 следует, что амплитуда напряжения на РК с водой в данном режиме КВИВ обработки не меньше, чем 72 кВ, длительность импульса по основанию составляет приблизительно 1200 нс, а форма импульса – аperiodическая, однополярная, через нулевую линию не переходит. Нулевая линия указана на рис. 7 и далее стрелкой, расположенной слева от осциллограммы.

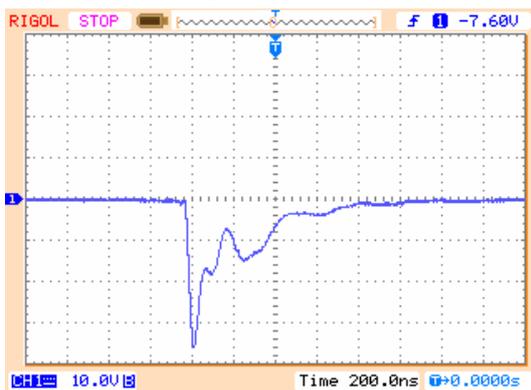


Рис. 7. Типичная осциллограмма импульса напряжения на рабочей камере с водой «София киевская», обсемененной *E.coli*. Цена деления по оси времени 200 нс/дел; по оси процесса 20 кВ/дел. В многозачорном разряднике раскорочено 6 зазоров из 8. Зазор в РК $d=22$ мм. Использован низкоомный резистивный делитель напряжения с коэффициентом деления $k_d \approx 2000$

Два дополнительных всплеска на спаде импульса на этой осциллограмме, а также на других осциллограммах, обусловлены наличием трех высоковольтных емкостных накопителей: основного и двух обостряю-

щих. Фронтальная часть импульса обусловлена последним (вторым) каскадом обострения со вторым обостряющим емкостным накопителем, первый дополнительный всплеск на спаде импульса обусловлен наличием первого каскада обострения с первым обостряющим емкостным накопителем, а второй дополнительный всплеск на спаде импульса обусловлен наличием основного высоковольтного емкостного накопителя.

Результаты микробиологических анализов воды приведены в табл. 1.

Таблица 1

Обнаружение бактерий семейства *E.coli* в воде

| Наименование показателя (единицы измерения КОЕ/см ³) | Результаты исследований, КОЕ/см ³ | Режим обработки (приблизительный, E , кВ/см) | Режим обработки (расчетный, E , кВ/см) | Время обработки (t , с) |
|--|--|--|--|----------------------------|
| Вода стерильная. Разведение <i>E.coli</i> 10 ⁶ | 210 | 30 | 20,09 | 10 |
| Вода стерильная. Разведение <i>E.coli</i> 10 ⁶ | 0 | 30 | 31,8 | 20 |
| Вода стерильная. Разведение <i>E.coli</i> 10 ⁸ | 60 | 30 | 19,0 | 10 |
| Вода стерильная. Разведение <i>E.coli</i> 10 ⁸ | 0 | 30 | 1,8 | 20 |

*Прим.: КОЕ – колониеобразующие единицы.

На рис. 8 представлена типичная осциллограмма импульсного напряжения на РК с молочной сывороткой.

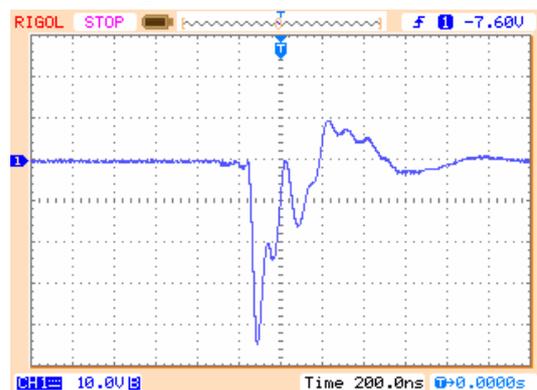


Рис. 8. Типичная осциллограмма импульсного напряжения на РК с молочной сывороткой. Цена деления по оси времени 200 нс/дел; по оси процесса 10 кВ/ дел. В многозачорном разряднике раскорочено 6 зазоров из 8. Зазор в РК $d=22$ мм. Использован низкоомный резистивный делитель напряжения с коэффициентом деления $k_d \approx 1000$

Длительность импульса по основанию на осциллограмме (рис. 8) приблизительно 350 нс. Форма импульса – колебательная с большим декрементом колебаний. Амплитуда импульса напряжения на этой осциллограмме – приблизительно 45 кВ, а амплитуда напряженности – приблизительно 20,45 кВ/см.

На рис. 9 представлена типичная осциллограмма импульсного напряжения на РК с сырым молоком.

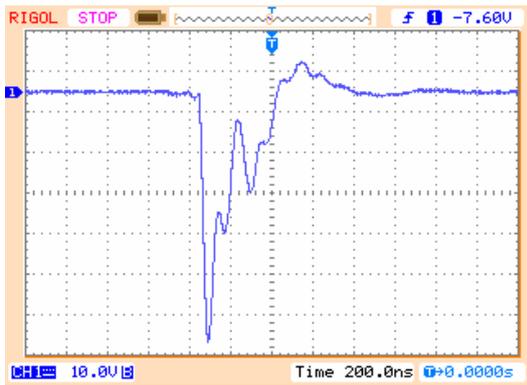


Рис. 9. Типичная осциллограмма импульсного напряжения на РК с сырым молоком. Цена деления по оси времени 200 нс/дел; по оси процесса 10 кВ/дел. В многоззорном разряднике раскорочено 6 зазоров из 8. Зазор в РК $d=22$ мм. Использовался низкоомный резистивный делитель напряжения с коэффициентом деления $k_n \approx 1000$

Результаты микробиологических анализов молочной сыворотки, обработанной при помощи КВИВ импульсами, образец-осциллограмма которых представлен на рис. 8, приведены в табл. 2-5.

Таблица 2

Результаты анализов по выявлению бактерий семейства *E.coli* в молочной сыворотке после КВИВ обработки

| Наименование показателя, единицы измерения КОЕ/см ³ <i>E.coli</i> | Результат, КОЕ/см ³ |
|--|--------------------------------|
| при $E \approx 30$ кВ/см, общем времени обработки $t=10$ с и разведении 10^6 | 30 |
| при $E \approx 30$ кВ/см, общем времени обработки $t=20$ с и разведении 10^6 | 0 |
| при $E \approx 30$ кВ/см, общем времени обработки $t=10$ с и разведении 10^8 | 20 |
| при $E \approx 30$ кВ/см, общем времени обработки $t=20$ с и разведении 10^8 | 0 |

Из табл. 2 следует, что после КВИВ обработки молочной сыворотки в РК в течение 20 с высоковольтными импульсами (см. рис. 8), гарантировано

происходит полная инактивация бактерий *E. coli*. При обработке в течение 10 с остаются не инактивированными от 20 до 30 колониеобразующих единиц. Т.е. подтверждено экспериментально существование режима полной гарантированной инактивации при КВИВ – обработке продуктов. В контрольных (не обработанных при помощи КВИВ) образцах молочной сыворотки наблюдался сплошной рост бактерий *E.coli* ($>>1000$ КОЕ/см³).

Длительность импульса по основанию на осциллограмме на рис. 9. приблизительно 350 нс. Форма импульса – колебательная с большим декрементом колебаний (слабо колебательная). Амплитуда импульса напряжения на этой осциллограмме – приблизительно 60 кВ, а амплитуда напряженности – приблизительно $60/2,2 \approx 27,3$ кВ/см.

Результаты лабораторных исследований физико-химических показателей молока после КВИВ обработки (см. рис. 9) приведены в табл. 3.

Из результатов, приведенных в табл. 6, следует, что в КВИВ-обработанном молоке есть фермент пероксидаза, отсутствие которого характерно для топленого, ультрапастеризованного, стерилизованного молока, то есть молока, которое поддавалось обработке большими температурами (больше 100 °С). Однако, в КВИВ-обработанном молоке не выявлен фермент фосфатаза, отсутствие которого характерно для пастеризованного молока. Кроме того, из данных табл. 6 следует, что количество витамина С, весьма чувствительного к различным обработкам, после КВИВ-обработки сохранилось на уровне, отвечающем требованиям нормативной документации (НД), то есть КВИВ-обработка – мягкая обработка. Все анализы (микробиологические и санитарно-гигиенические) обработанных и контрольных проб водосодержащих пищевых продуктов и воды провели специалисты коммунального предприятия «Санэпидсервис» (КП «СЭС», г. Харьков). Это предприятие аккредитовано Национальным агентством Украины по аккредитации (аттестат аккредитации № 2Н1207 от 25.02.2015 г.).

Таблица 3

Физико-химические показатели исходно сырого молока после КВИВ обработки

| Наименование показателя, единицы измерения | НД на методы испытаний | Результат исследования | Значение показателя согласно НД | Соответствие НД |
|--|------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Определение массовой части витамина С титриметрическим методом в пищевых продуктах | | | | |
| массовая часть витамина С, млн ⁻¹ | ГОСТ 30627.2-98 | 5,0 | не регламентировано | соответствует НД |
| Определение пероксидазы методом качественного анализа в пищевых продуктах | | | | |
| пероксидаза для топленого, ультрапастеризованного, стерилизованного молока | ДСТУ 7380:2013 | выявлена | отсутствует | не соответствует |
| Определение фосфатазы молока и молочных продуктов методом качественного анализа | | | | |
| фосфатаза для пастеризованного молока | ДСТУ 7380:2013 | не выявлена | отсутствует | соответствует |

Энергетическая эффективность высоковольтного макета КВИВ-установки. Энергетическая эффективность определяется двумя составляющими: высокой степени микробиологического (микробиального) обеззараживания обрабатываемого продукта при дан-

ном удельном энергокладе и уменьшенного удельного энергопотребления по сравнению с известными методами (например, тепловой стерилизацией и пастеризацией). Первую составляющую можно оценить, проведя КВИВ-обработку и сделав соответствующие

микробиологические анализы обработанного продукта (воды, молока, молочной сыворотки). Вторую составляющую энергетической эффективности можно оценить, исходя из того, какая часть энергии, потребленной из сети электропитания КВИВ-установкой, доставлена в РК и там выделена, приведя к требуемой степени инактивации микроорганизмов в воде. Поскольку во всех элементах КВИВ-установки, в том числе в высоковольтных конденсаторах, трансформаторе и разрядниках выделяется суммарно не более 0,1 потребленной из сети энергии, то к.п.д. установки можно оценить как 0,9, или 90 % [4-6]. Сложнее оценить сколько же энергии выделено в РК. Сделаем это при помощи осциллограмм импульсов напряжения на РК с обрабатываемым продуктом. Типичная осциллограмма импульса напряжения на камере с обрабатываемой водой приведена на рис. 10.

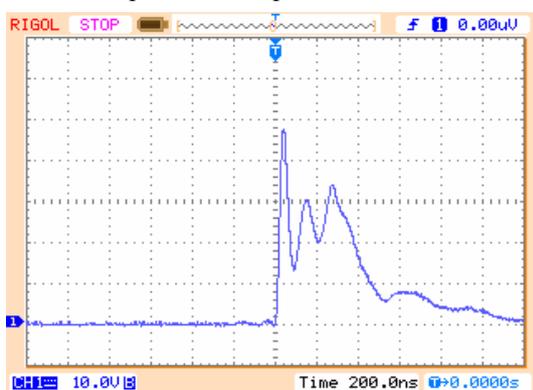


Рис. 10. Типичная осциллограмма импульса напряжения на рабочей камере с обрабатываемой водой

Три пика (максимума), как указывалось выше, на осциллограмме соответствуют процессам разряда трех емкостей (C_1 , C_2 , C_3) на нагрузку – рабочую камеру, в данном случае заполненную водой (см. рис. 1). Первый (наибольший) пик после фронта импульса – максимум напряжения на РК вследствие поступления энергии в камеру от наиболее низкоиндуктивного разрядного контура с емкостным накопителем C_3 . Второй пик соответствует процессу подключения и разряда на РК емкости C_2 . Третий пик соответствует процессу подключения к разряду на РК емкости C_1 , более удаленной от РК и имеющей наибольшую индуктивность.

Энергию, которая выделяется в РК за время обработки, можно оценить по формуле

$$E = nT \int i u dt = nT i_{av} u_{av} t, \quad (1)$$

где i – ток как функция времени, u – напряжение как функция времени, i_{av} – средний ток, u_{av} – среднее напряжение, t – длительность одного импульса по полувысоте – отрезок времени, в течение которого энергия импульса выделяется в РК, n – частота следования импульсов, T – время обработки.

Считаем, что вода в РК является чисто резистивной нагрузкой. Длительность импульсов определяется из осциллограмм.

По осциллограмме напряжения можно найти активное сопротивление R_{wch} воды в камере, зная величину высоковольтной ёмкости C_{hv} , в которой предварительно накапливается энергия после трансформации в трансформаторе ИОМ 100/100 [7]

$$(t/0,7) = R_{wch} \cdot C_{hv}, \quad (2)$$

где t – длительность импульса по полувысоте, а $t/0,7$ – длительность импульса до спада измеряемой величины от амплитудного значения в $e \approx 2,71828$ раз.

Для данной установки $C_{hv} \approx 10^{-8}$ Ф, $t \approx 380$ нс (см. осциллограмму на рис. 10). Таким образом

$$R_{wch} = (t/0,7)/C_{hv} = (3,8 \cdot 10^{-7}/0,7)/10^{-8} \approx 54,3 \text{ (Ом)}.$$

Учитывая, что $u_{av} \approx 40$ кВ, $i_{av} = u_{av}/R_{wch} = 40000 \text{ В}/54,3 \text{ Ом} \approx 736,65 \text{ А}$. Отсюда вытекает, что при $n = 400$ имп/с, $T = 10$ с, $t = 3,8 \cdot 10^{-7}$ с, энергия E_{wch} , которая выделяется в камере, равна

$$E_{wch} = nT i_{av} u_{av} t = 400 \text{ имп/с} \times 10 \text{ с} \times 736,65 \text{ А} \times 40000 \text{ В} \times 3,8 \times 10^{-7} \text{ с} = 16 \times 736,65 \times 3,8 \approx 44,8 \text{ кДж}.$$

При этом средняя мощность P , потребленная в РК камере с водой, составляет приблизительно $P = E_{wch}/T = 44,8 \text{ кДж}/10 \text{ с} \approx 4,5 \text{ кВт}$.

Энергию E_{1C1} , первично запасенную в высоковольтной разрядной цепи в конденсаторе C_1 перед каждым разрядом, можно оценить по формуле

$$E_{1C1} = C_1 \cdot u_{C1}^2 / 2 \approx 10^{-8} \cdot (50 \cdot 10^3)^2 / 2 = 12,5 \text{ Дж}.$$

Оценим суммарную энергию E_{C1} , запасенную в C_1 за время T

$$E_{C1} = nT E_{1C1} = 400 \text{ имп/с} \times 10 \text{ с} \times 12,5 \text{ Дж} = 50000 \text{ Дж} = 50 \text{ кДж}.$$

$$E/E_{C1} \approx 44,8/50 = 0,896.$$

Удельное сопротивление воды в РК можно оценить по формуле

$$\rho = R_{wch} \times S/l, \quad (3)$$

где S – площадь поперечного сечения РК с обрабатываемой жидкостью относительно направления протекания тока, l – длина межэлектродного промежутка в РК камере, т.е. ее (рабочей камеры) высота.

$$\text{При } S = 3,14 \cdot 4,75^2 \cdot 10^{-4} = 7,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2, l = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м:}$$

$$\rho = 54,3 \text{ Ом} \times 7,1 \times 10^{-3} \text{ м}^2 / 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 25,7 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Оценим нагрев Δt воды в непроточной (стационарной) РК за $T = 10$ с при выделенной в камере энергии $E \approx 44,8$ кДж. Если считать, что половина этой энергии пошла на нагрев воды, а другая половина – на нагрев металлических электродов – крышек РК и ее изоляционного (фторопластового) корпуса, то

$$E = 2 \cdot c \cdot V \cdot \gamma \cdot \Delta t, \text{ т.е. } \Delta t = 0,5 \cdot E / (c \cdot V \cdot \gamma), \quad (4)$$

где $c = 4200$ Дж/(кг·град) – удельная теплоемкость воды, V – объем воды в РК, $\gamma = 10^3$ кг/м³ – плотность воды.

$$V = S \cdot l = 7,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м} \approx 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Таким образом:

$$\Delta t = 0,5 \cdot 44,8 \cdot 10^3 \text{ Дж} / (4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град}) \times 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3) = 53,3 \text{ град}.$$

Полученный расчетный результат хорошо совпадает с экспериментальным результатом по нагреву воды в данной РК при КВИВ-обработке. Измерения проводились тестером М890G при помощи термопары. Измеренный перепад температур от начальной (стартовой) t_{start} до конечной t_{final} составил $\Delta t_{exp} = t_{final} - t_{start} \approx 74 - 20 = 54$ град. Отсюда следует вывод о том, что практически вся электромагнитная энергия, дошедшая до РК, выделяется в ней в виде тепла. Это принципиально важно, поскольку как электромагнитные факторы (напряженность электрического и магнитного поля,

напряжение и ток в РК), так и тепловая энергия являются синергически направленными (однонаправленными) факторами. Такое однонаправленное воздействие приводит к увеличению степени инактивации микроорганизмов в текучих пищевых продуктах, обрабатываемых в РК. При этом вся энергия, поступающая в РК, используется по назначению – на микробиологическое обеззараживание обрабатываемого в камере продукта. Если теперь предположить, что все выделившееся в камере тепло при помощи теплообменника передается в необработанный продукт, не прошедший еще через РК, то коэффициент полезного действия по энергии η_e для данного технологического процесса $\eta_e \approx 85-99,5\%$.

Важным показателем являются также удельные энергозатраты E_{sp} , то есть количество затраченной энергии на обработку единицы (например, единицы объема или массы) продукта. При КВИВ-обработке в промышленном проточном варианте, когда задействован рациональный теплообмен, это количество введенной в РК электромагнитной энергии E_{flow} , которая в камере переходит в тепловую энергию. При этом обеспечивается нагрев Δt_{flow} продукта в проточном режиме, пока он протекает через РК, на несколько градусов Цельсия (например, на 5 °С) и переход от докритической температуры до сверхкритической температуры продукта, которая гарантирует при действии сильного внешнего импульсного электрического поля необратимую инактивацию микроорганизмов.

Оценим E_{flow} и E_{sp}

$$E_{flow} \approx c \cdot V \cdot \gamma \cdot \Delta t_{flow} = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град}) \times 10^{-4} \text{ м}^3 \times 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3 \times 5 \text{ град} = 2100 \text{ Дж};$$

$$E_{sp} = E_{flow}/V = c \cdot \gamma \cdot \Delta t_{flow} = 2100 \text{ Дж}/10^{-4} \text{ м}^3 = 2,1 \cdot 10^7 \text{ Дж}/\text{м}^3 = 2,1 \cdot 10^4 \text{ кДж}/\text{м}^3 = (21000/3600) \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 = 5,83 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3.$$

Таким образом, оценочная величина удельных энергозатрат в проточном режиме при КВИВ обработке продуктов составляет $E_{sp} = 5,83 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$. При традиционной схеме микробиологического обеззараживания молока (при помощи тепловой обработки – пастеризации) удельные энергозатраты больше, по меньшей мере, в 4 раза [1, 2].

Выводы.

1. Рациональные режимы работы КВИВ установки для опробованных рабочих камер имеют место при амплитудах напряженностей импульсного электрического поля $E \approx 30 \text{ кВ}/\text{см}$ в жидкости в рабочей камере и при времени обработки в течение 20 с высоковольтными импульсами длительностью 300-1200 нс при частоте следования импульсов $n \approx 400 \text{ имп}/\text{с}$.

2. При рациональных режимах в обработанной воде, молочной сыворотке и молоке полностью и необратимо инактивируются показательные бактерии *E.coli*. При этом фермент пероксидаза в молоке сохраняется. Следовательно, опробованный рациональный режим обеззараживающей обработки молока мягче, чем режим тепловой стерилизации, и примерно соответствует пастеризации.

3. Количество витамина С, весьма чувствительного к различным обработкам, после обработки молока в

рациональных режимах сохраняется на уровне, отвечающем требованиям нормативной документации, то есть КВИВ обработка – мягкая обработка, сохраняющая биологическую и пищевую ценность продуктов.

4. Оценочная величина удельных энергозатрат в проточном режиме при КВИВ обработке продуктов составляет $E_{sp} \approx 6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$, что примерно в 4 раза меньше, чем при традиционной тепловой обработке. При этом энергоэффективность предлагаемого комплекса высоковольтных импульсных воздействий в 4 раза выше по сравнению с пастеризацией.

5. Результаты выполненных исследований открывают перспективу промышленного применения комплекса высоковольтных импульсных воздействий для обеззараживающей обработки водосодержащих пищевых продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минухин Л.А., Гаффнер В.В., Меньшенин Г.А. Анализ путей снижения энергозатрат при пастеризации на малых молочных предприятиях // *Аграрное образование и наука*. – 2016. – №3.
2. Соловьёв С.В. Повышение эффективности процесса тепловой обработки молока путем обоснования конструктивных и технологических параметров нагревателя: дисс. ... канд. техн. наук (05.20.01). – Великие Луки, 2016. – 155 с.
3. Бойко Н.И., Тур А.Н., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М. Высоковольтный генератор импульсов со средней мощностью до 50 кВт для обработки пищевых продуктов // *Приборы и техника эксперимента*. – 1998. – №2. – С. 120-126.
4. Кучинский Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. – Ленинград: Энергия, 1973. – 176 с.
5. Потери и КПД в трансформаторах. Режим доступа: www.ets.ifmo.ru/usolzev/SEITEN/u2/tr/1_9.htm.
6. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
7. Богатенков И.М., Иманов Г.М., Кизеветтер В.Е. и др. Техника высоких напряжений: Учебное пособие для вузов. Под ред. Г.С. Кучинского. – СПб: Изд. ПЭИПК, 1998. – 700 с.

REFERENCES

1. Minuhin L.A., Gaffner V.V., Menshenin G.A. Study the possibility of reducing energy consumption during the pasteurization of milk on small enterprises. *Agrarnoe obrazovanie i nauka*, 2016, no.3. (Rus).
2. Solovyov S.V. *Povyshenie effektivnosti protsessy teplovooy obrabotki moloka putem obosnovaniya konstruktivnykh i tekhnologicheskikh parametrov nagrevatelya. Diss. cand. techn. nauk* [Improving the efficiency of the process of milk thermal processing by justifying the design and technological parameters of the heater. Cand. tech. sci. diss.]. Velikie Luki, Russia, 2016. 155 p. (Rus).
3. Boyko N.I., Tur A.N., Evdoshenko L.S., Zarochentsev A.I. High-voltage pulse generator with an average power of up to 50 kW for treatment of food products. *Instruments and experimental technique*, 1998, no.2, pp. 120-126. (Rus).
4. Kuchinskiy G.S. *Vysokovoltnye impulsnye kondensatory*. [High-voltage pulse capacitors]. Leningrad, Energiya Publ., 1973. 176 p. (Rus).
5. *Losses and efficiency in transformers*. Available at: www.ets.ifmo.ru/usolzev/SEITEN/u2/tr/1_9.htm (accessed 15 May 2017). (Rus).

6. Mesiats G.A. *Impul'snaia energetika i elektronika* [Pulsed power and electronics]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 704 p. (Rus).
7. Bogatenkov I.M., Imanov G.M., Kizevetter V.E. *Tekhnika vysokikh napriazhenii: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [High voltage techniques]. Saint Petersburg, PEIPK Publ., 1998. 700 p. (Rus).

Поступила (received) 13.03.2018

Бойко Николай Иванович¹, д.т.н., проф.,

Макогон Артём Витальевич¹,

Маринин Андрей Иванович², к.т.н., доц.,

¹ Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,

61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,

тел/phone +380 57 7076245, e-mail: qnaboyg@gmail.com

² Национальный университет пищевых технологий,

01601, Киев, ул. Владимирская, 68,

e-mail: andrii_marynin@ukr.net

M.I. Boyko¹, A.V. Makogon¹, A.I. Marynin²

¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

² National University of Food Technologies,
68, Volodymyrska Str., Kyiv, 01601, Ukraine.

Energy efficiency of the disinfection treatment of liquid food-stuffs by high-voltage pulse effects.

Purpose. Experimentally determine the rational modes and energy efficiency of decontamination treatment of flowing food products using high-voltage impulse actions in comparison with traditional pasteurization. **Methodology.** We used pulse generation method with the help of a step-up transformer, high-

voltage pulse capacitors and spark gaps with a system of peaking of pulse front to obtain high-voltage pulses in working chambers - the generator load. The pulses on the load were measured by a low-resistance resistive voltage divider, were transmitted over a broadband coaxial cable and recorded using an analog C8-12 oscilloscope or a Rigol DS1102E digital oscilloscope with a bandwidth of 100 MHz for each. The working chambers were filled with water, milk or milk whey and consisted of an annular hull made of PTFE and metal electrodes forming the bottom and the chamber cover having flat linings of food grade stainless steel for contact with the food product inside the chamber. **Results.** We obtained high-voltage pulses on the generator load with a base duration of 300 to 1200 ns at pulse repetition rates up to 500 pulses per second. We obtained experimentally the amplitude of the voltage pulses on the generator load up to 75 kV, and the electric field strength up to 35 kV/cm in working chambers with a gap of 22 mm and up to 50 kV/cm in working chambers with a gap of 15 mm. These characteristics of the pulses allowed complete and irreversible inactivation of microorganisms in food liquids in working chambers. **Originality.** We showed that there are modes of treatment food products with the help of high-voltage pulse actions, which allow better to preserve the biological and nutritional value of the products in comparison with heat treatment with their complete disinfection and at a significantly lower specific energy consumption. **Practical value.** The experimental regimes for treating milk, whey and water with reduced specific energy consumption open the prospect of industrial application of a complex of high-voltage pulse actions for the disinfecting treatment of water-containing food products. References 7, tables 3, figures 10.

Key words: generator of high-voltage pulses, transformer, capacitor, multi-gap discharger, multichannel switch, working chamber, disinfecting food treatment.

H. Glaoui, A. Harrouz

SLIDING MODE CONTROL OF THE DFIG USED IN WIND ENERGY SYSTEM

This paper, presents the application of the direct vector control using the sliding mode control (SMC) on the doubly fed induction generators (DFIG). The synthesis of the control laws is based on the model obtained by the orientation of the stator flux. The active and reactive powers that are generated by the doubly fed induction generators will be decoupled by the orientation of the stator flux and controlled by sliding mode controllers that have been developed. In order to rule on the validity as well as the performance of this type of adjustment, we will check its robustness by varying some parameters of the machine doubly fed induction. References 34, figures 9.

Key words: doubly fed induction generators (DFIG), vector control, sliding mode control.

Цель. В статье представлено применение прямого векторного управления с использованием управления режимом скольжения (SMC) на индукционных генераторах двойного питания (DFIG). Синтез законов управления основан на модели, полученной с помощью ориентации потока статора. Активные и реактивные мощности, генерируемые индукционными генераторами двойного питания, разделены ориентацией потока статора и управляются разработанными контроллерами режима скольжения. Чтобы определить достоверность и эффективность данного типа регулирования, проверяется его надежность путем варьирования ряда параметров машины двойного питания. Библ. 34, рис. 9.

Ключевые слова: индукционные генераторы двойного питания (DFIG), векторное управление, управление режимом скольжения.

Introduction. The technique of sliding mode control (SMC) was first developed for a linear system of the second order, and since then, the spectrum of its use has been extended to a larger case of linear, nonlinear, discrete and multi-variable systems [1, 2]. Variable structure control has gained some popularity because of its simplicity and efficiency. In such a system, the command by switching makes it possible to bring the figurative point of the evolution of the system on the super sliding surface. When this hyper-surface is reached, the sliding regime occurs [3-5].

Many strategies have been developed over the past decade to optimize the power extracted from the wind energy conversion system. Several authors have tackled the control problem of electrical machines operating in the field-weakening region. For example, Tarafit and all [6], Saleh Mobayen, Fairouz Tchier [7], Ansarifar, and all [8], Bartolini and al. [9], Benbouzid and al. [10], Seibel and al. [11] which used the sliding mode approach to achieve active and reactive power control. Hongchang Sun and all [12] explored the maximum wind power tracking of doubly fed wind turbine system based on adaptive gain second-order sliding mode. Kassem and all [13], Belmokhtar and all [14] proposed a dynamic modeling and robust power control of doubly fed induction generators (DFIG) driven by wind turbine at infinite grid. Weng and al. [15] a sliding mode regulator for maximum power tracking and copper loss minimisation of a doubly fed induction generator. Abdeddaim and all [16] Optimal tracking and robust power control of the DFIG wind turbine.

With the planned strategy, the generated wind energy can reach twice its nominal value thanks to a fast and reliable electric control completely robust. Indeed, by employing an appropriate control technique where the power produced in DFIG mode is derived from both the stator and the rotor. In addition, the power supplied by the rotor increases in this case by 100 % with respect to the nominal power of the stator. However, this solution makes it possible to maintain the operation of the wind energy conversion system in its stable zone.

The system considered consists of a dual-feed induction generator whose stator is directly connected to

the gate and its rotor is powered by a matrix converter. In this paper, the sliding-mode approach to performing active and reactive power control is used.

This last enjoys interesting strong properties such as the insensitivity to the variations of the parameters of the controlled part as well as to the disturbances, which can act on this last one. Its behavior does not depend any more than the parameters that define the hyperactive surface of the slip. Despite having various advantages, this control technique also has a disadvantage that limited its use initially. Indeed, in practice, imperfections such as switching delays and hysteresis generate oscillations around the sliding surface. Several techniques have been proposed to overcome this disadvantage [11, 17]. Some consist in approximating the discontinuous function by a continuous function in the vicinity of the switching surface, the reduction of chattering taking place at the cost of a loss of precision. Due to the many advantages of variable structure control, such as robustness, speed, and simplicity of implementation, this type of control seems to us quite suitable for dual feed generators for which performance can be required. Moreover, as some parameters of the generator prove to vary during the operation and that the load is often unknown; the control will have to take into account these parametric disturbances and variations to avoid a degradation of performances [18]. The main objective of this paper is to advance the understanding of the controlled SMC in the wind system, by studying its behavior with wind energy system. Taking into account many unresolved issues associated with wind energy, the results of the analysis and evaluation of discretization behaviors in the SMC systems are essential for their applications in the control of renewable energies [19].

However, the analysis and evaluation of discretization behaviors in SMC systems has proved to be a difficult task due to the lack of work done on this topic. There is apparently a gap between the expected ideal dynamic performance based on continuous-time system models and the actual dynamic performance when the

control system is discretized. Delay in delivery of control signals due to discretization is the key factor affecting control performance. This is especially true when the control is of a discontinuous nature, such as SMC. «Disruptive» switching may cause incorrect actions due to the timely delivery of control signals. These behaviors can cause serious damage to industrial control devices such as actuators [19]. In addition, the deteriorated invariance property can worsen the reliability of SMC systems, making controlled industrial processes vulnerable to unexpected environmental changes.

Issues of interest in studying discretization behaviors in SCM systems include:

- conditions to ensure stability;
- steady state boundary conditions;
- system trajectory models (periodicity);
- sensitivity of trajectories to initial conditions;
- relationship between trajectory models and their symbolic sequences;
- dynamic behavior change with respect to the sampling period.

To our knowledge, this research is the first to systematically study the discretization behaviors of SMC systems, and to develop methods for controlling the wind system based on the DFIG generator. The significance of this work lies in the fact that it promotes the understanding of discretization behaviors in SMC systems, thus providing useful measures to prevent potential behavior from occurring. It also results in new methods useful not only for the analysis of the discretization of the SMC systems, but also for the synthesis of the laws of the controls as a function of the model obtained by the orientation of the stator flux.

The characteristic feature of a continuous time SMC systems is that a sliding mode occurs on a prescribed manifold, or switching surface, where a switching control is employed to maintain the state on that surface [20-23]. Since the theory has been originally developed from a continuous time perspective, implementation of sliding mode for sampled data systems encounters several incompatibilities due to limited sampling rate, sample/hold effect, and discretization errors. As a result, a direct translation of continuous-time SMC design for discrete implementation leads to the chattering phenomenon in the vicinity of the switching surface.

In this paper, basic results obtained in the study of continuous-time and discrete-time SMC systems theory during its over twenty years history are reviewed. The discretization issue of SMC systems is introduced.

Machine model. Flux-Oriented Vector Control presents an attractive solution for achieving better performance in variable speed applications for the doubly fed induction machine in both generator and motor operation. With this in mind, we have proposed a control law for the DFIM (doubly fed induction machine) based on the orientation of the stator flux, used to make it work as a generator. The latter highlights the relationships between the stator and rotor quantities [24-26]. These relationships will allow to act on the rotor signals to control the active power exchange and reactivate between the stator of the machine and the power system.

The wind turbine rotates at a speed that depends on the wind speed (Fig. 1). This speed is matched to that of the electric generator through a gearbox [27, 28].

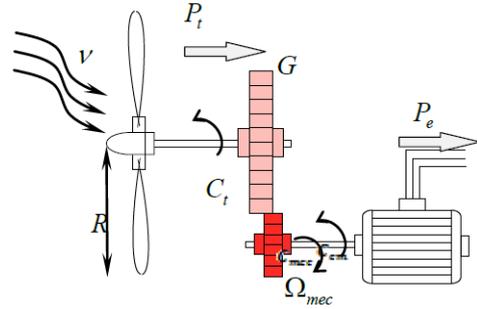


Fig. 1. Wind turbine model

The output power of wind turbine is given as

$$p_m = \frac{\rho A}{2} C_p(\lambda, \beta) v_{wind}^3, \quad (1)$$

where, p_m is mechanical output power of the turbine (W); ρ is air density (kg/m^3); A is turbine swept area (m^2); β is blade pitch angle (deg); λ is tip speed ratio of the rotor blade tip speed to wind speed; C_p is performance coefficient of wind turbine, which is a function of β and λ ; v_{wind} is wind speed (m/s).

The tip speed ratio λ is calculated as

$$\lambda = \frac{R \omega_r}{v_{wind}}. \quad (2)$$

From an engineering point of view, there are many different representing methods of performance coefficient C_p .

But they all represent C_p as a nonlinear function of β and λ . In this paper, C_p is denoted as

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3(\beta + 2.5) - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda_i \right), \quad (3)$$

where $C_1 = 0.645$, $C_2 = 116$, $C_3 = 0.4$, $C_4 = 5$, $C_5 = 21$, $C_6 = 0.00912$.

Variable λ_i can be calculated as

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08(\beta + 2.5)} - \frac{0.035}{(\beta + 2.5)^3 + 1}. \quad (4)$$

Wind turbine dynamics simulations have been run for wind step changes. The characteristic feature of the dependence of the wind turbine power upon the wind speed has been illustrated in Fig. 2 (the nominal power being 2 MW) [29].

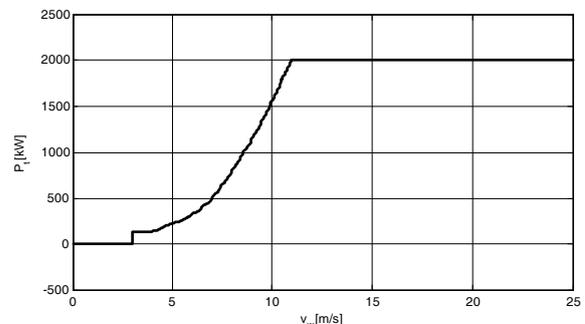


Fig. 2. Static characteristic of wind turbine mechanical power as a function of mean wind speed

For a given wind speed v_m the wind turbine power p_t and the moment $m_t = p_t / \omega_t$.

We take the general form proposed by Slotine [24]:

$$S = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{(n-1)} e, \quad (13)$$

where $e = x - x_d$ is the tracking error; x_d the desired state, is n the system order and λ is a positive coefficient.

After choosing the sliding surface, we must choose the control law where the reaching condition defined by Lyapunov equation satisfied

$$S \dot{S} < 0 \quad \forall t. \quad (14)$$

The control law has the following form.

Thus, the vector control to be applied to the system is obtained by adding two control terms such as

$$U = U_{eq} + U_n, \quad (15)$$

where U_{eq} on the sliding mode; U_n allows to influence the approach mode.

In order that the condition (19) is verified at any time, is chosen as follows [32] (a complete study of sliding-mode with ERL can be found in [32])

$$\dot{S} = - \frac{k}{\delta_0 + (1 - \delta_0) e^{-\alpha |S|^p}} \text{sat} \left(\frac{S}{\phi} \right), \quad (16)$$

where k is the discontinuous gain,

$$t_{rd} = \delta_0 \frac{|S(0)|}{k} + \frac{(1 - \delta_0)}{k \alpha^{1/p}},$$

is the desired reaching time, $\alpha \geq 0$, $0 < \delta_0 < 1$ and $p > 0$,

$\text{sat} \left(\frac{S}{\phi} \right)$ is the saturation function

$$\text{sat} \left(\frac{S}{\phi} \right) = \begin{cases} 1, & \text{if } \frac{S}{\phi} > 1; \\ \frac{S}{\phi}, & \text{if } -1 \leq \frac{S}{\phi} \leq 1; \\ -1, & \text{if } \frac{S}{\phi} < -1. \end{cases} \quad (17)$$

The use of saturation function instead of *sign* function is justified to avoid chattering phenomenon.

The sliding mode applied to DFIG. We will use this technique to control the rotor currents of DFIG with a strongly coupled model [33, 34] (Fig. 5).

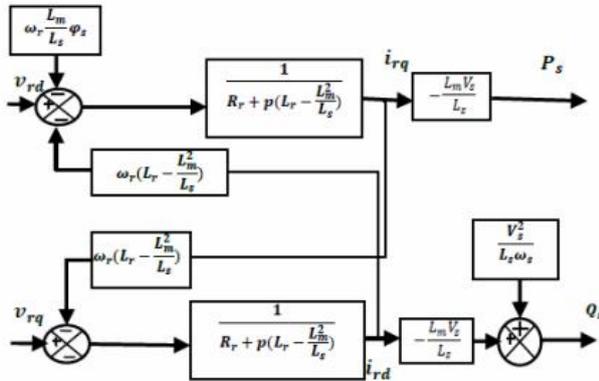


Fig. 5. Global scheme mode of the DFIG control

Recall the model of DFIG in Park's Den which is given by the following equations:

$$\begin{cases} V_{dqs} = R_s I_{dqs} + \frac{d\Phi_{dqs}}{dt} \mp \omega_s \cdot \Phi_{dqs}; \\ V_{dqr} = R_s I_{dqr} + \frac{d\Phi_{dqr}}{dt} \mp \omega_r \cdot \Phi_{dqr}; \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \Phi_{dqs} = L_s I_{dqs} + M \cdot I_{dqr}; \\ \Phi_{dqr} = L_s I_{dqr} + M \cdot I_{dqs}. \end{cases} \quad (19)$$

The vector of the state variables chosen for the control of the machine is given by:

$$x = \begin{pmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{pmatrix}.$$

The model of the machine with the consideration of the state variables is given by the following equations:

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_{ds} \\ \dot{V}_{qs} \\ \dot{V}_{dr} \\ \dot{V}_{qr} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R_s \cdot a \Phi_{ds} - R_s \cdot c \left(L_r \sigma_{dr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{qs} \right) - \omega_s \Phi_{qs} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt}; \\ R_s \cdot a \Phi_{qs} - R_s \cdot c \left(L_r \sigma_{qr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{ds} \right) + \omega_s \Phi_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt}; \\ R_r \cdot b \left(L_r \sigma_{dr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{qs} \right) - R_r \cdot c \Phi_{ds} - \omega_r \left(L_r \sigma_{qr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{ds} \right) + L_r \sigma \frac{dI_{dr}}{dt}; \\ R_r \cdot b \left(L_r \sigma_{qr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{ds} \right) - R_r \cdot c \Phi_{qs} + \omega_r \left(L_r \sigma_{dr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{qs} \right) + L_r \sigma \frac{dI_{qr}}{dt}. \end{bmatrix}$$

$$a = \frac{1}{\sigma L_s}, \quad b = \frac{1}{\sigma L_r}, \quad c = \frac{M}{\sigma L_s L_r}.$$

The state model of the machine is put in the following form:

$$\dot{X} = f(x, t) + g(x, t) U_{dq}; \quad (20)$$

$$\dot{X} = \begin{pmatrix} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \\ \frac{dI_{dr}}{dt} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} \end{pmatrix} \cdot g(x, t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix};$$

$$U_{dq} = [V_{ds} V_{qs} V_{dr} V_{qr}]^T;$$

$$\begin{bmatrix} -R_s \cdot a \Phi_{ds} + R_s \cdot c \left(L_r \sigma_{dr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{qs} \right) + \omega_s \Phi_{qs} \\ -R_s \cdot a \Phi_{qs} + R_s \cdot c \left(L_r \sigma_{qr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{ds} \right) - \omega_s \Phi_{ds} \\ \frac{1}{\sigma L_r} \left(-R_r \cdot b \left(L_r \sigma_{dr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{qs} \right) + R_r \cdot c \Phi_{ds} + \omega_r \left(L_r \sigma_{qr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{ds} \right) \right) \\ \frac{1}{\sigma L_r} \left(-R_r \cdot b \left(L_r \sigma_{qr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{ds} \right) + R_r \cdot c \Phi_{qs} - \omega_r \left(L_r \sigma_{dr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{qs} \right) \right) \end{bmatrix} = f(x, t).$$

Sliding surfaces in the Park marker are defined to control the rotor currents. They are given by the following equations:

$$\begin{cases} S_d = \lambda(I_{drref} - I_{dr}) \\ S_q = \lambda(I_{qrref} - I_{qr}) \end{cases}$$

where V_{dr} and V_{qr} are the two control vectors, to force the system path to converge to surfaces $S_{dq} = 0$.

The control vector U_{dqeq} is obtained by imposing $S_{dq} = 0$

$$f(x,t) + g(x,t)U_{dq} = 0; \quad (21)$$

$$U_{dqeq} = \begin{bmatrix} -\left(-R_r \cdot b \left(L_r \sigma_{dr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{qs} \right) + R_r \cdot c \Phi_{ds} + \omega_r \left(L_r \sigma_{qr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{ds} \right) \right) \\ -\left(R_r \cdot b \left(L_r \sigma_{qr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{ds} \right) + R_r \cdot c \Phi_{qs} - \omega_r \left(L_r \sigma_{dr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{qs} \right) \right) \end{bmatrix}$$

To have good performance, good dynamics and good switching around surfaces the control vector is imposed as follows:

$$U_{dq} = U_{dqeq} + K \text{sign}(S_{dq}). \quad (22)$$

Simulation results. The figures below (Fig. 6) represent the different curves by the simulation of the DFIG with sliding mode controllers.

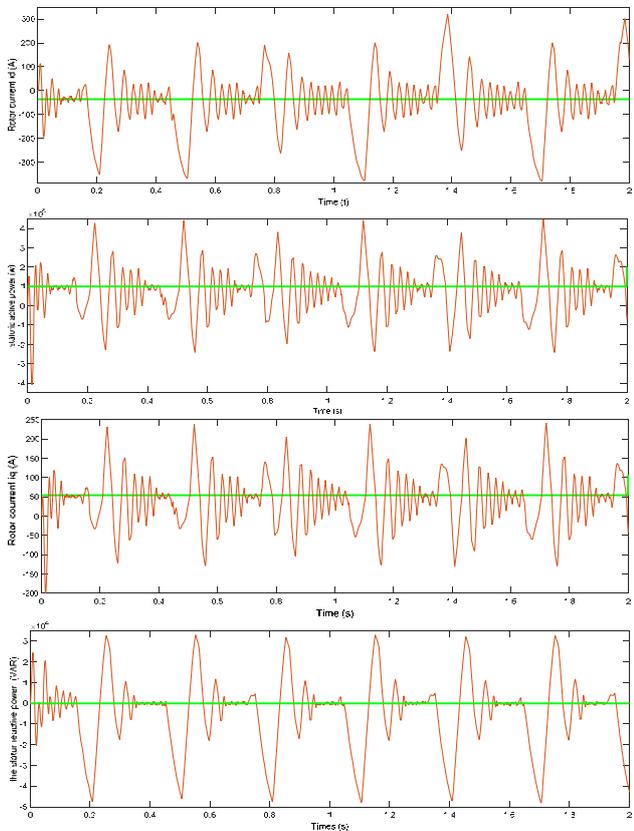


Fig. 6. Simulation results of the system GADA and voltage inverter

Its characteristics have allowed us to cite the performance of regulators in sliding mode, such as:

- good continues stator currents compared to references;
- perfect decoupling between the two components of the stator current.

Therefore, the control of the active power of the stator is by the direct component of the current, while the reactive power of the stator of the quadratic component of the stator current.

In order to test the robustness of this control structure by sliding mode, we studied the influence of

parametric variations on the performance of the adjustment. We consider variations on all parameters that can undergo changes (stator and rotor resistors, stator, rotor and mutual inductors, and moment of inertia).

The results of the test of robustness to variations of the reference power simulation obtained show that decoupling is ensured at all times of the active and reactive powers, despite the presence of slight oscillations which are due to the Chattering phenomenon (Fig. 7).

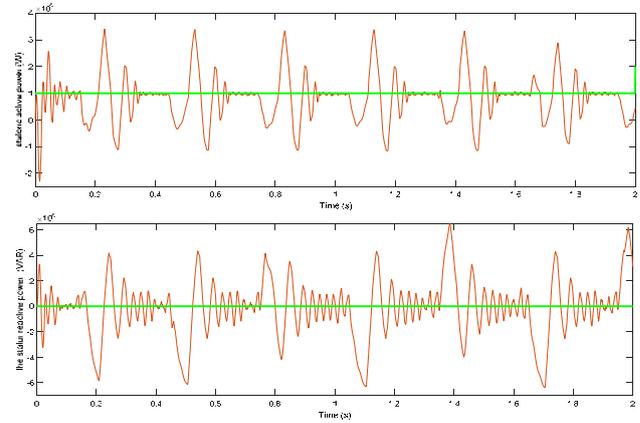


Fig. 7 Results of the system with the function sign

The results obtained in Fig. 8, 9 show that decoupling is ensured at all times of the active and reactive powers, despite the presence of slight oscillations that are due to the Chattering phenomenon.

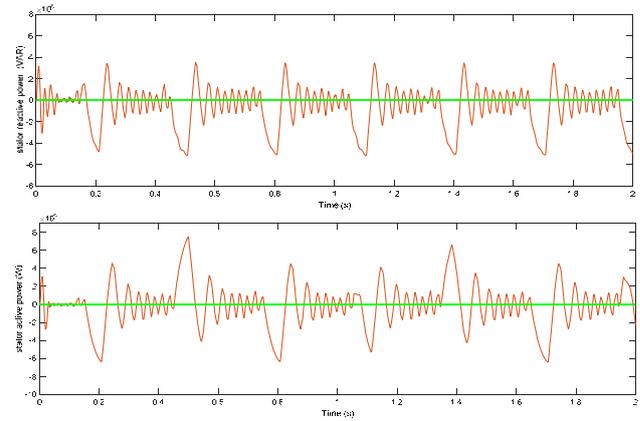


Fig. 8. Robustness test for a variation of R_s

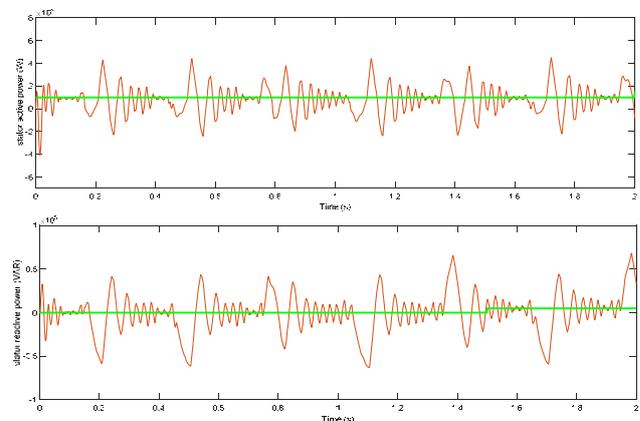


Fig. 9. Robustness test for a variation of R_r

Conclusion. In this paper, a complete system for electrical energy production has been done via wind

turbine by use of the doubly fed induction generator (DFIG). The studied system has been formed of a DFIG with stator and rotor, which in that stator has connected to the grid directly, machine converter and grid converter. With the consideration of turbine variable velocity state and design controller for DFIG in form of using of the sliding mode.

Firstly, we have introduced the simplicity of the control variable structure by sliding mode non-linear switching surface. Then, we are interested more closely in the application of this type of control on the asynchronous machine with double feeding. The setting of the active and reactive powers by the sliding mode brings a remarkable improvement and good system performance with DFIG.

The results of the simulations obtained are evaluated and carried out using the Matlab / Simulink software and show the performance and the effectiveness of the proposed control.

REFERENCES

1. Johnstone C.M., Nielsen K., Lewis T., Sarmiento A., Lemonis G. EC FPVI co-ordinated action on ocean energy: A European platform for sharing technical information and research outcomes in wave and tidal energy systems. *Renewable Energy*, 2006, vol.31, no.2, pp. 191-196. doi: **10.1016/j.renene.2005.08.015**.
2. Ben Elghali S.E. et al. Les systèmes de génération d'énergie électriques à partir des courants de mer. *Revue 3EI*, 2008, no.52, pp. 73-85.
3. Benbouzid M.E.H. et al. Marine tidal current electric power generation technology: State of the art and current status. *Proceedings of IEEE IEMDC'07*, May 2007, Antalya (Turkey), vol.2, pp. 1407-1412.
4. Myers L., Bahaj A.S. Simulated electrical power potential harnessed by marine current turbine arrays in the Alderney Race. *Renewable Energy*, 2005, vol.30, no.11, pp. 1713-1731. doi: **10.1016/j.renene.2005.02.008**.
5. Couch S.J., Bryden I. Tidal current energy extraction: Hydrodynamic resource characteristics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2006, vol.220, no.4, pp. 185-194. doi: **10.1243/14750902jeme50**.
6. Tarafit S., Rekioua D., Aouzellag D., Bacha S. A proposed strategy for power optimization of a wind energy conversion system connected to the grid. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol.101, pp. 489-502. doi: **10.1016/j.enconman.2015.05.047**.
7. Mobayen S., Tchier F. Robust global second-order sliding mode control with adaptive parameter-tuning law for perturbed dynamical systems. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, June 2017, p. 014233121770883. doi: **10.1177/0142331217708832**.
8. Ansarifard G.R., Rafiei, M. Second-order sliding-mode control for a pressurized water nuclear reactor considering the xenon concentration feedback. *Nuclear Engineering and Technology*, 2015, vol.47, no.1, pp. 94-101. doi: **10.1016/j.net.2014.11.003**.
9. Bartolini G., Levant A., Pisano A., Usai E. Adaptive second-order sliding mode control with uncertainty compensation. *International Journal of Control*, 2016, vol.89, no.9, pp. 1747-1758. doi: **10.1080/00207179.2016.1142616**.
10. Benbouzid M., Beltran B., Mangel H., Mamoune A. A high-order sliding mode observer for sensorless control of DFIG-based wind turbines. *IECON 2012 – 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Oct. 2012, Montreal, Canada. pp. 4288-4292. doi: **10.1109/iecon.2012.6389200**.
11. Evangelista C.A., Valenciaga F., Puleston P. Multivariable 2-sliding mode control for a wind energy system based on a double fed induction generator. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, vol.37, no.13, pp. 10070-10075. doi: **10.1016/j.ijhydene.2011.12.080**.
12. Sun H., Han Y., Zhang L. Maximum Wind Power Tracking of Doubly Fed Wind Turbine System Based on Adaptive Gain Second-Order Sliding Mode. *Journal of Control Science and Engineering*, vol. 2018, pp. 1-11. doi: **10.1155/2018/5342971**.
13. Kassem A.M., Hasaneen K.M., Yousef A.M. Dynamic modeling and robust power control of DFIG driven by wind turbine at infinite grid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013, vol.44, no.1, pp. 375-382. doi: **10.1016/j.ijepes.2011.06.038**.
14. Belmokhtar K., Doumbia M.L., Agbossou K. Novel fuzzy logic based sensorless maximum power point tracking strategy for wind turbine systems driven DFIG (doubly-fed induction generator). *Energy*, 2014, vol.76, pp. 679-693. doi: **10.1016/j.energy.2014.08.066**.
15. Weng Y.-T., Hsu Y.-Y. Sliding mode regulator for maximum power tracking and copper loss minimisation of a doubly fed induction generator. *IET Renewable Power Generation*, 2015, vol.9, no.4, pp. 297-305. doi: **10.1049/iet-rpg.2014.0125**.
16. Abdeddaim S., Betka A. Optimal tracking and robust power control of the DFIG wind turbine. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013, vol.49, no.1, pp. 234-242. doi: **10.1016/j.ijepes.2012.12.014**.
17. Myers L., Bahaj A.S. Power output performance characteristics of a horizontal axis marine current turbine. *Renewable Energy*, 2006, vol.31, no.2, pp. 197-208. doi: **10.1016/j.renene.2005.08.022**.
18. Bossanyi E. *Wind Energy Handbook*. New York: Wiley, 2000.
19. Bin Wang. *On Discretization of Sliding Mode Control Systems*. Theses doctorate, School of Electrical and Computer Engineering RMIT University Melbourne, Australia, 2008.
20. Harmouche M. Contribution to the theory of higher order sliding mode control and the control of underactuated mechanical systems. Theses Doctorate, Université de technologie de Belfort-Montbéliard, France, 2017.
21. Laghrouche S., Chitour Y., Harmouche M., Ahmed F.S. Path Following for a Target Point Attached to a Unicycle Type Vehicle. *Acta Applicandae Mathematicae*, 2012, vol.121, no.1, pp. 29-43. doi: **10.1007/s10440-012-9672-8**.
22. Harmouche M., Laghrouche S., Ahmed F.S., Bagdouri M.E. Second-order sliding mode controllers: an experimental comparative study on a mechatronic actuator. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2012, vol.226, no.9, pp. 1231-1248. doi: **10.1177/0959651812454061**.
23. Batten W.M.J., Bahaj A.S., Molland A.F., Chaplin J.R. Hydrodynamics of marine current turbines. *Renewable Energy*, 2006, vol.31, no.2, pp. 249-256. doi: **10.1016/j.renene.2005.08.020**.
24. Harrouz A., ben Atialah A., Harrouz O. Modeling of small wind energy based of PMSG in south of Algeria. *2012 2nd International Symposium On Environment Friendly Energies And Applications*, Jun. 2012, pp. 191-195. doi: **10.1109/efea.2012.6294042**.
25. Bahaj A.S., Molland A.F., Chaplin J.R., Batten W.M.J. Power and thrust measurements of marine current turbines under various hydrodynamic flow conditions in a cavitation tunnel and a towing tank. *Renewable Energy*, 2007, vol.32, no.3, pp. 407-426. doi: **10.1016/j.renene.2006.01.012**.

26. Muller S., Deicke M., De Doncker R.W. Doubly fed induction generator systems. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2002, vol.8, no.3, pp. 26-33. doi: **10.1109/2943.999610**.
27. Park J.W., Lee K.W., Lee H.J. Wide speed operation of a doubly-fed induction generator for tidal current energy. *30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004*. Busan (South Korea). doi: **10.1109/iecon.2004.1431771**.
28. Multon B., Robin G., Gergaud O., Ben Ahmed H. Le génie électrique dans le vent : Etat de l'art dans le domaine de la génération éolienne. *congres Jeunes Chercheurs en Genie Electrique 2003*, June 2003, Saint Nazaire, France. 10 p.
29. Carrasco J.M., Franquelo L.G., Bialasiewicz J.T., Galvan E., PortilloGuisado R.C., Prats M.A.M., Leon J.I., Moreno-Alfonso N. Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, vol.53, no.4, pp. 1002-1016. doi: **10.1109/tie.2006.878356**.
30. Tapia G., Tapia A., Ostolaza J.X. Proportional–integral regulator-based approach to wind farm reactive power management for secondary voltage control. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, vol.22, no.2, pp. 488-498. doi: **10.1109/tec.2005.858058**.
31. Tapia A., Tapia G., Ostolaza J.X., Saenz J.R. Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2003, vol.18, no.2, pp. 194-204. doi: **10.1109/tec.2003.811727**.
32. Koutroulis E., Kalaitzakis K. Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, vol.53, no.2, pp. 486-494. doi: **10.1109/tie.2006.870658**.
33. Xu L., Cartwright P. Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, vol.21, no.3, pp. 750-758. doi: **10.1109/tec.2006.875472**.
34. Glaoui H., Abdelkader H., Messaoudi I., Saab H. Modelling of Wind Energy on Isolated Area. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, 2014, vol.4, no.2, pp. 274-280. doi: **10.11591/ijpeds.v4i2.4859**.

Received 06.03.2018

Hachemi Glaoui¹, Ph.D.,

Abdelkader Harrouz², Ph.D.,

¹ Department of Electrical Engineering,

Tahri Mohamed Bechar University,

Bechar, Algeria,

e-mail: glaouih@yahoo.fr

² Department of Hydrocarbon and Renewable Energy,

Ahmed Draia University,

Adrar, Algeria,

e-mail: harrouz@univ-adrar.dz

И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский

МЕТОДИКА НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Розглянуто вимірювання опору заземлювальних пристроїв різного призначення за допомогою трьохелектродної установки в реальних умовах. На основі використання трьохелектродної установки представлено обґрунтування методики вимірювання опору заземлювального пристрою будь якої конструкції в довільній структурі ґрунту. За результатами вимірювань вирішується система рівнянь шостого порядку, що дозволяє визначити власні і взаємні опори в трьохелектродної установці з досить високою точністю і без відшукування точки нульового потенціалу. Бібл. 9, табл. 6, рис. 2.

Ключові слова: заземлювальний пристрій, опір заземлення, натурні вимірювання, методика, трьохелектродна установка, точка нульового потенціалу, система рівнянь.

Рассмотрены измерения сопротивления заземляющих устройств различного назначения с помощью трехэлектродной установки в реальных условиях. На основе использования трехэлектродной установки представлено обоснование методики измерения сопротивления заземляющего устройства любой конструкции в произвольной структуре грунта. По результатам измерений решается система уравнений шестого порядка, что позволяет определить собственные и взаимные сопротивления в трехэлектродной установке с достаточно высокой точностью и без отыскания точки нулевого потенциала. Библ. 9, табл. 6, рис. 2.

Ключевые слова: заземляющее устройство, сопротивление заземления, натурные измерения, методика, трехэлектродная установка, точка нулевого потенциала, система уравнений.

Введение и постановка проблемы. В настоящее время для измерения сопротивления заземляющих устройств (ЗУ) получила широкое распространение трехэлектродная измерительная установка [1]. Одной из главных задач, которую необходимо решить для получения с помощью этой установки достаточно точных результатов, является, как указано в работе [2], правильный выбор мест расположения измерительных электродов, т.е. такая их расстановка, при которой измеренное значение сопротивления отличается от его истинного значения не более чем на 10 % в ту или иную сторону. Однако в ряде случаев измерение сопротивления ЗУ городских и промышленных подстанций представляет серьезную проблему и до настоящего времени.

Анализ последних исследований и публикаций. Проблемой повышения точности измерения электрических параметров земли и ЗУ занимаются многие отечественные и зарубежные ученые.

Расчетный метод определения оптимального расположения измерительных электродов при измерении сопротивления заземлителей больших размеров с помощью рассматриваемых моделей заземлителей имеет лишь ограниченное применение, связанное с их внешними полями [3].

На основании критического анализа существующих методов определения сопротивления заземления в работе [4] рассмотрен уточненный вариант его определения. Путем введения понятия особой и квазиэквипотенциальной областей заземлителя предложен и экспериментально проверен новый метод измерения его сопротивления. Однако предложенный метод в ряде случаев не позволяет выполнить измерения сопротивления заземляющих устройств с приемлемой точностью.

В работе [5] предложен метод повышенной точности для измерения сопротивления заземления подстанции при присоединении ЛЭП путем измерения тока в заземлении с помощью разработанного специ-

ального беспроводного датчика тока, использующего GPS. Несмотря на то, что опробование метода на действующей подстанции 500 кВ подтвердило его правомерность, в отдельных случаях его применение вызывает много вопросов и требует серьезного и детального анализа.

Принципиальная возможность точного измерения сопротивления заземлителя отмечена в работе [6]. Однако, к сожалению, и в этом случае необходимо будет определять местоположение потенциального электрода путем многократного отыскания точки нулевого потенциала на месте измерений.

Математическое моделирование процесса измерений сопротивления заземлителя току промышленной частоты в многослойном грунте показало [7], что выбрать такое расположение электродов, при котором измеренное сопротивление заземлителя равняется истинному, экспериментальным путем при измерениях на местности невозможно.

В работе [8] приводится теоретическое, а на основе использования метода физического моделирования в работе [9] представлено экспериментальное обоснование нового метода измерения сопротивления заземлителя с помощью трехэлектродной измерительной установки при любом характере неоднородности грунта, любых размерах и конфигурации ЗУ и произвольном размещении измерительных электродов без отыскания точки нулевого потенциала.

Целью работы является разработка методики натуральных измерений сопротивления заземлителя с помощью трехэлектродной измерительной установки без отыскания точки нулевого потенциала.

Рекомендуемая методика натуральных измерений в группе заземлителей и обработки результатов измерений для получения величин собственных и взаимных сопротивлений в трехэлементной системе. Подготовка и проведение измерений электрических параметров ЗУ действующих подстанций

© И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский

классом напряжения выше 1 кВ должны исключать опасные ситуации, которые могут при этом возникнуть. Например, в условиях промышленной или городской застройки вынос электродов на большие расстояния связан с возможностью выноса потенциалов, что представляет серьезную опасность.

Провода и кабели, соединяющие источник электроэнергии, приборы, заземлители, обычно имеют значительную длину, особенно при больших размерах испытываемого заземлителя. При этом необходимо соблюдать два правила [2]:

а) соединительные линии недопустимо прокладывать параллельно или под небольшим острым углом к трассе воздушных линий (ВЛ). Положение электродов (заземлителей), кроме испытываемого, должно быть выбрано так, чтобы соединительные линии были расположены по отношению к трассе ВЛ либо под углом, близким к прямому, либо в направлении, противоположном трассе ВЛ, подходящей к подстанции (последнее относится лишь к тупиковым подстанциям).

б) вначале монтируют токовый заземлитель и потенциальный электрод и присоединяют к ним соединительные провода. Затем их начинают раскладывать и подключают к испытываемому.

По окончании работ измерительную схему разбирают в обратной последовательности. Вначале отключают соединительные провода от испытываемого ЗУ и от приборов, затем провода сматывают и лишь в конце отсоединяют от токового и потенциального электродов.

В связи с изложенным, методика натуральных измерений в группе заземлителей заключается в следующем.

На рис. 1 приведена в плане схема для осуществления способа измерения сопротивления отдельных взаимовлияющих заземлителей в последовательности операций.

В исходном состоянии используют систему трех независимых (проверяется отсутствие гальванической связи) заземлителей 1, 2, 3, каждый из которых имеет свое значение R_{xi} , где $i = 1, 2, 3$. Один из заземлителей может быть заданным для измерения его сопротивления, другие либо уже существуют, либо создаются дополнительно. В общем случае измерений заземлители 1, 2 и 3 расположены в земле (грунте).

Ниже рассмотрена система из трех взаимовлияющих заземлителей в виде круглых пластин диаметром 4 м, 2 м и 3,6 м. Пластины изготовлены из покрытого утолщенной фольгой пенопласта и размещены на поверхности водоема (30×20 м) с удельным сопротивлением воды $\rho = 12$ Ом·м при расстояниях между ними 0,4 м. Вначале выполнено измерение сопротивлений заземлителей по однолучевой схеме [1], т.е. по существующей методике (значения см. в табл. 6). Измерения выполнены ранней весной.

По новой методике производят серию измерений в опытах А (рис. 1,а), В (рис. 1,б) и С (рис. 1,в).

Собирают схему цепи для измерений: вольтметр 8 с помощью проводов 7 подключают к паре заземлителей (1-2), вольтметр 10 с помощью проводов 9 подключают к паре заземлителей (2-3), вольтметр 12 с помощью проводов 11 подключают к паре заземлите-

лей (1-3). Источник 6 контролируемого амперметром 5 тока с помощью проводов 4 подключают к паре заземлителей (1-2) и обеспечивают протекание тока по цепи (рис. 1,а). Фиксируют показания амперметра 5 (I_{1-2}), вольтметра 8 (U_{1-2}), вольтметра 10 (U_{2-3}), вольтметра 12 (U_{1-3}). От заземлителя 2 отключают провод 4, перемещают его к заземлителю 3 и подключают к нему. Обеспечивают протекание тока по цепи (рис. 1,б). Фиксируют показания амперметра 5 (I_{1-3}), вольтметра 8 (U_{1-2}), вольтметра 10 (U_{2-3}), вольтметра 12 (U_{1-3}). От заземлителя 1 отключают провод 4, перемещают его к заземлителю 2 и подключают к нему. Обеспечивают протекание тока по цепи (рис. 1,в). Фиксируют показания амперметра 5 (I_{2-3}), вольтметра 8 (U_{1-2}), вольтметра 10 (U_{2-3}), вольтметра 12 (U_{1-3}).

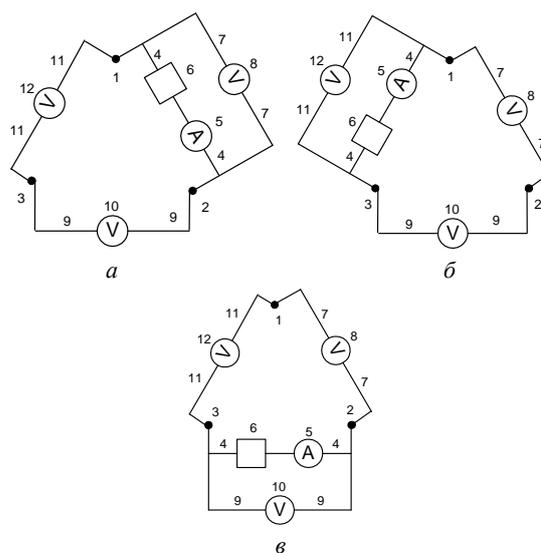


Рис. 1. Схематическое расположение заземлителей и подключение приборов для измерений

В результате измерений получаем значения параметров, которые заносим в табл. 1.

Таблица 1
Результаты натуральных измерений параметров

| Опыт | А | В | С |
|---------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Измеряемый параметр | Ввод источника в точки 1 и 2 | Ввод источника в точки 1 и 3 | Ввод источника в точки 2 и 3 |
| I_{12} , А | 112,64 | — | — |
| I_{13} , А | — | 165,76 | — |
| I_{23} , А | — | — | 112,16 |
| U_{12} , В | 379,9 | 169,41 | 243,275 |
| U_{13} , В | 128,296 | 351,4 | 124,273 |
| U_{23} , В | 251,638 | 182 | 367,5 |

Обработка приведенных в табл. 1 данных позволяет получить входные сопротивления для каждой пары заземлителей в системе трех взаимовлияющих заземлителей. Входное сопротивление при вводе источника между заземлителями, например 1 и 2, определяем по выражению

$$R_{12\text{inp}} = U_{12} / I_{12}.$$

Аналогично получаем значения входных сопротивлений $R_{13\text{inp}}$ и $R_{23\text{inp}}$. Результаты сводим в табл. 2.

Таблица 2
Входные сопротивления для соответствующих пар заземлителей

| Определяемый параметр | Входные сопротивления между заземлителями, Ом | | |
|-----------------------|---|-------------|-------------|
| | R_{12inp} | R_{13inp} | R_{23inp} |
| Значение параметра | 3,37 | 2,11 | 3,27 |

По результатам табл. 2 с учетом рис. 2 составляем систему трех уравнений с шестью неизвестными величинами трехэлементной системы заземлителей:

$$\begin{cases} R_1 + R_2 - 2R_{12} = R_{12inp}; \\ R_1 + R_3 - 2R_{13} = R_{13inp}; \\ R_2 + R_3 - 2R_{23} = R_{23inp}. \end{cases} \quad (1)$$

Пренебрегая (допущение) взаимными сопротивлениями (R_{12} , R_{13} и R_{23}) и влиянием третьего заземлителя в пределах каждой пары, путем решения полученной таким образом системы трех уравнений с тремя неизвестными, рассчитываем приближенные значения собственных сопротивлений заземлителей (R_{10} , R_{20} и R_{30}), которые сводим в табл. 3.

Таблица 3
Приближенные значения собственных сопротивлений заземлителей

| Определяемый параметр | Собственные сопротивления, Ом | | |
|-----------------------|-------------------------------|----------|----------|
| | R_{10} | R_{20} | R_{30} |
| Значение параметра | 1,11 | 2,26 | 1 |

Полученные приближенные значения собственных сопротивлений заземлителей позволяют оценить приближенные значения взаимных сопротивлений между заземлителями в пределах каждой пары. Такая оценка основывается на том, что взаимное сопротивление между двумя заземлителями всегда меньше наименьшего из них. Результаты расчетов сводим в табл. 4.

Таблица 4
Оценка взаимных сопротивлений между соответствующими парами заземлителей

| Определяемый параметр | Взаимные сопротивления между заземлителями, Ом | | |
|-----------------------|--|-------------|-------------|
| | R_{12mut} | R_{13mut} | R_{23mut} |
| Значение параметра | 1 | 0,8 | 1 |

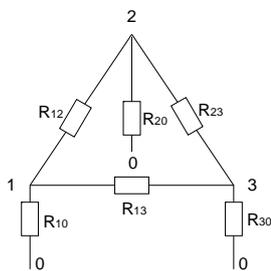


Рис. 2. Схема замещения системы трех взаимовлияющих заземлителей

По данным измерений (табл. 1) величин токов (I_{12} , I_{13} , I_{23}) и напряжений (U_{12} , U_{13} , U_{23}), полученных при каждом измерении тока, составляем систему шести уравнений с шестью неизвестными, представляющими схему замещения (рис. 2) системы трех взаимовлияющих заземлителей. Система имеет следующий вид:

$$\begin{cases} R_{(1-3)A} = \left[(R_1 - R_{12}) - \frac{(R_{13} - R_{32})R_{13}}{R_3} \right] - (R_{13} - R_{32}); \\ R_{(3-2)A} = \left[(R_2 - R_{12}) + \frac{(R_{13} - R_{32})R_{32}}{R_3} \right] + (R_{32} - R_{13}); \\ R_{(1-2)B} = \left[(R_1 - R_{13}) - \frac{(R_{23} - R_{12})R_{12}}{R_2} \right] - (R_{23} - R_{12}); \\ R_{(3-2)B} = \left[(R_3 - R_{13}) + \frac{(R_{23} - R_{12})R_{23}}{R_2} \right] - (R_{23} - R_{12}); \\ R_{(1-2)C} = \left[(R_2 - R_{32}) + \frac{(R_{13} - R_{12})R_{12}}{R_1} \right] + (R_{12} - R_{13}); \\ R_{(1-3)C} = \left[(R_3 - R_{32}) - \frac{(R_{13} - R_{12})R_{13}}{R_1} \right] + (R_{12} - R_{13}). \end{cases} \quad (2)$$

Полученные приближенные значения параметров схемы (см. табл. 3 и табл. 4), в соответствии с методикой, изложенной в работе [8], используем в качестве начальных значений для решения системы шести уравнений с шестью неизвестными (2), у которых левые части представлены на основе измерений, приведенных в табл. 1, следующим образом.

Например, в опыте А результаты измерений напряжений U_{13} и U_{23} и тока I_{12} при вводе источника между заземлителями 1 и 2 позволяют получить входные сопротивления, т.е. левые части системы уравнений (2):

$$\begin{aligned} R_{13A} &= U_{13} / I_{12}; \\ R_{32A} &= U_{23} / I_{12}. \end{aligned}$$

Результаты аналогичных расчетов при вводе источника между заземлителями 1 и 3 (опыт В), а также заземлителями 2 и 3 (опыт С) сводим в табл. 5.

Таблица 5
Результаты оценки левых частей уравнений при вводе источника между соответствующими заземлителями

| Подключение источника | Точки 1 и 2 | | Точки 1 и 3 | | Точки 2 и 3 | |
|------------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| | R_{13A} | R_{32A} | R_{12B} | R_{32B} | R_{12C} | R_{13C} |
| Значение параметра, Ом | 1,139 | 2,234 | 1,022 | 1,098 | 2,169 | 1,108 |

Используя в качестве начальных приближенные значения собственных (табл. 3) и взаимных (табл. 4) сопротивлений заземлителей и подставляя полученные левые части (табл. 5) в уравнения (2), решаем систему уравнений с помощью разработанной в пакете Mathcad программы и результаты сводим в табл. 6.

Таблица 6
Результаты измерений собственных и взаимных сопротивлений заземлителей по новой и существующей методикам и оценка расхождений

| Параметр, Ом | R_1 | R_2 | R_3 | R_{12} | R_{13} | R_{23} |
|--------------------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| Начальное значение | 1,11 | 2,26 | 1 | 1 | 0,8 | 1 |
| По новой методике | 1,534 | 2,694 | 1,594 | 0,525 | 0,464 | 0,565 |
| По существующей | 1,5 | 2,7 | 1,6 | 0,53 | 0,47 | 0,57 |
| Расхождение, % | 2,26 | 0,22 | 0,37 | 0,94 | 1,27 | 0,87 |

Анализируя данные табл. 6, приходим к выводу, что результаты расчетов удовлетворительно согласу-

ются с результатами измерений, полученных в опытах. При этом расхождение не превышает 2,3 %, что является очень хорошим результатом погрешности.

Таким образом, получаем искомые величины собственных и взаимных сопротивлений заземлителей, составляющих трехэлементную систему.

Выводы.

Впервые приводится методика натуральных измерений сопротивления заземляющих устройств различного назначения с помощью трехэлектродной установки без отыскания точки нулевого потенциала.

Предложенная методика обеспечивает минимально возможный разнос измерительных электродов за пределами ЗУ, что снимает ограничения по застройке территории за пределами исследуемого заземляющего устройства, в несколько раз уменьшает длину соединительных проводов схемы измерения, что увеличивает отношение «сигнал – помехи».

Экспериментальные натурные измерения показали, что разработанная методика позволяет получить достаточно точный результат во всех случаях измерений сопротивления ЗУ электроустановок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-19:2009 – [Чинний від 2010–03–29]. – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – 54 с. – (Національний стандарт України).
2. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
3. Ослон А.Б., Коструба С.И. Измерение сопротивлений заземлителей больших размеров // Электричество. – 2006. – №8. – С. 49-56.
4. Чернов К.П. Сопротивление заземлителя и метод его определения с помощью двух дополнительных заземлителей с неизвестными сопротивлениями // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2012. – №5-6. – С. 55-61.
5. Yue Yong-gang, Huang Zhi, Dang Da-wei, Meng Qing-da, Wang Ya-ping, Huo Feng, Ye Tao. Grounding impedance measurement for 500 kV substation with lightning line // Journal of Electric Power Science and Technology. – 2013. – №4. – pp. 83-87.
6. Ослон А.Б., Целебровский Ю.В. Пересечение потенциальных кривых и сопротивление заземляющего устройства // Третья Российская конференция по заземляющим устройствам: Сборник докладов (27-31 октября 2008 года). – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия. – 2008. – С. 121-130.
7. Ослон А.Б., Коструба С.И. Математическое моделирование процесса измерений сопротивления заземлителя току промышленной частоты в многослойном грунте // Электричество. – 2008. – №5. – С. 12-17.
8. Нижевский И.В., Нижевский В.И. Методика измерения сопротивления заземляющего устройства // Электротехника і електромеханіка. – 2016. – №3. – С. 50-57. doi: 10.20998/2074-272X.2016.3.08.
9. Нижевский И.В., Нижевский В.И., Бондаренко В.Е. Экспериментальное обоснование метода измерения сопротивления заземляющего устройства // Электротехніка і електромеханіка. – 2016. – №6. – С. 60-64. doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.10.

REFERENCES

1. Natsional'nyy standart Ukrayiny. SOU 31.2-21677681-19:2009. Viprobuвання та контроль' prystryoyiv zazemlennyya elektroustanovok. Tipova instruksiya [National Standard of

Ukraine SOU 31.2-21677681-19:2009. Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrayiny Publ., 2010. 54 p. (Ukr).

2. Burgsdorf V.V., Yakobs A.I. Zazemlyayushchie ustroystva elektroustanovok [Grounding device of electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 400 p. (Rus).

3. Oslon A.B., Kostruba S.I. Measuring the resistance of large grounding devices. *Electrichestvo*, 2006, no.8. pp. 49-56. (Rus).

4. Chernov K.P. Resistance of grounding conductor and method of its determination with the help of two additional earth leads with unknown resistances. *Proceedings of higher educational establishments. Energy problems*. 2012, no.5-6, pp. 55-61. (Rus).

5. Yue Yong-gang, Huang Zhi, Dang Da-wei, Meng Qing-da, Wang Ya-ping, Huo Feng, Ye Tao. Grounding impedance measurement for 500 kV substation with lightning line. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2013, iss.4, pp. 83-87. (Chinese).

6. Oslon A.B., Tselebrovskii Iu.V. The intersection of the potential curves and the resistance of the grounding device III Rossiiskaia konferentsiia po zazemliayushchim ustroystvam: Sbornik dokladov [3rd Russian Conf. on Grounding Devices: Collected Papers]. Novosibirsk, Russia, 27-31 October 2008, pp. 121-130. (Rus).

7. Oslon A.B., Kostruba S.I. Mathematical modeling of the process of grounding resistance measurement current of industrial frequency in multilayer soil. *Electrichestvo*, 2008, no.5, pp. 12-17. (Rus).

8. Nizhevskiy I.V., Nizhevskiy V.I. A technique of measuring of resistance of a grounding device. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.3, pp. 50-57. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.3.08.

9. Nizhevskiy I.V., Nizhevskiy V.I., Bondarenko V.E. The experimental validation of the grounding device resistance measurement method. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.6, pp. 60-64 (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.10.

Поступила (received) 01.02.2018

Нижевский Илья Викторович¹, к.т.н.,
Нижевский Виктор Ильич¹, к.т.н., доц.

¹ Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичова, 2,
тел/phone +380 57 7076977,
e-mail: victornizhevski@gmail.com

I.V. Nizhevskiy¹, V.I. Nizhevskiy¹

¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

A technique of full-scale measurements of the resistance of the grounding device.

Purpose. The measurements of the resistance of grounding devices for various purposes using a three-electrode installation under real conditions are considered. **Methodology.** On the basis of the use of a three-electrode installation, a technique for full-scale measurements of the resistance of a grounding device of any design in an arbitrary soil structure is presented. **Results.** Based on the measurement results, a system of sixth-order equations is solved which allows to determine the own and mutual resistances in a three-electrode installation with a sufficiently high accuracy. **Originality.** It is not necessary to find a point of zero potential. **Practical value.** The proposed technique allows to perform measurements in conditions of dense urban and industrial development. References 9, tables 6, figures 2.

Key words: grounding device, grounding resistance, full-scale measurements, technique, three-electrode installation, zero potential point, system of equations.

ЮХИМЧУК ВЛАДИМИР ДАНИЛОВИЧ

(к 80-летию со дня рождения)

30 мая свой 80-летний юбилей отмечает профессор кафедры электрических машин Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» Юхимчук Владимир Данилович.

С 1962 года Юхимчук В.Д. – студент-вечерник, а параллельно – лаборант, механик, учебный мастер, инженер и заведующий лабораторией кафедры электрических машин.

В 1971 году начинается его научно-педагогическая деятельность – он ассистент, старший научный сотрудник, а в 1980 году, после окончания заочной аспирантуры – успешная защита кандидатской диссертации на тему «Модернизация двигателей постоянного тока при питании от пульсирующего напряжения».

С 1982 года Владимир Данилович – доцент кафедры «Электрические машины». С этого времени начинает ярко проявляться его дар педагога, методиста, ученого-практика. Основные усилия Юхимчук В.Д. направляет на объединение теоретических знаний с практической подготовкой будущих специалистов на электромашиностроительных предприятиях Харькова и других городов.

За время работы на кафедре Владимир Данилович подготовил и преподавал курсы – «Эксплуатация, ремонт и диагностика электрических машин», «Технология обмоточно-изоляционного производства», «Технология производства электрических машин», «Технология производства электрических микромашин», «Технология производства электрических машин большой мощности».

В декабре 2007 года Ученый Совет НТУ «ХПИ» присваивает Юхимчуку В.Д. звание профессора нашего университета. Он является автором более ста научных работ, из них 24 авторских заявок и патентов, автор 30 учебно-методических пособий, трех учебных пособий с грифом Министерства образования Украины – «Технология ремонта машин постоянного тока» и «Технология производства электрических машин» в двух томах. Эти труды, без преувеличения, стали настольными книгами десятков специалистов-электромашиностроителей в нашей стране, а также в ближнем и дальнем зарубежье. Свой юбилей Владимир Данилович отметил выходом в свет учебника «Технологія виробництва

електричних машин» для студентов высших учебных заведений, а Академия технологических наук приняла его в свои ряды.

Владимир Данилович уделяет много внимания совершенствованию учебного процесса, подготовке молодых преподавателей. Особенно следует отметить его работу по обновлению лабораторной базы и созданию учебно-методического обеспечения всех видов учебных занятий, созданию и приобретению плакатов, стендов, деталей, узлов и макетов электрических машин.

Юхимчук В.Д. имеет тесные связи практически со всеми электротехническими предприятиями Украины. Бывшие студенты Владимира Даниловича стали директорами электромашиностроительных предприятий, главными инженерами, главными конструкторами, начальниками управлений, служб, отделов, ведущими специа-

листами. Для многих из них первое знакомство с предприятием началось на тех заводских экскурсиях, которые проводил по своим читаемым дисциплинам Владимир Данилович.

Основные направления его научной деятельности – расчет, конструирование и экспериментальные исследования электрических машин общепромышленного назначения и рудничных тяговых электродвигателей, а также конструктивная разработка и исследования высокомоментных низкооборотных электродвигателей с катящимся ротором.

В начале 70-х он разработал логотип нашей институтской многотиражки, который просуществовал около 20 лет.

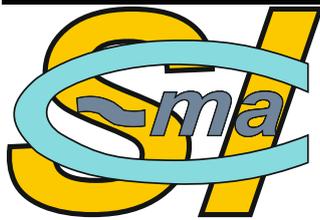
Человек высокой эрудиции, такта, доброжелательности и юмора – таким его любят и уважают студенты и сотрудники кафедры и университета.

Такие люди делают нашу историю.

Коллектив учебно-научного института электроэнергетики, электроники и электромеханики, кафедры «Электрические машины», многочисленные друзья и коллеги поздравляют Владимира Даниловича с юбилеем, желают ему и его близким крепкого здоровья, счастья и творческих успехов во всех сферах его многогранной деятельности.

Редакция журнала «Електротехніка і Електромеханіка» присоединяется к этим пожеланиям.





**МІЖНАРОДНИЙ СИМПОЗИУМ
ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ
ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ (SIEMA'2018)**

**INTERNATIONAL SYMPOSIUM
PROBLEMS OF ELECTRIC POWER ENGINEERING, ELECTRICAL
ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS (SIEMA'2018)**

Шановні колеги!

Оргкомітет Симпозіуму має честь запросити Вас і зацікавлених співробітників Вашої установи прийняти участь у XXI Міжнародному симпозіумі «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (SIEMA'2018), який відбудеться 25 - 26 жовтня 2018 р. за адресою: НТУ «ХПІ» (електротехнічний корпус) вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

У симпозіумі приймуть участь:

- завідувачі кафедр, що ведуть підготовку фахівців за спеціальністю 141 Електроенергетика, Електротехніка і Електромеханіка, а також провідні викладачі ВНЗ України та інших країн;
- представники науково-дослідних організацій, що займаються проблемами, пов'язаними з електроенергетикою, електротехнікою і електромеханікою;
- представники підприємств – розробників електричних машин, апаратів та інших електротехнічних пристроїв;
- представники підприємств – споживачів електроустаткування;
- представники проектних організацій;
- представники комерційних організацій електротехнічного профілю.

Учасникам симпозіуму надається можливість опублікувати доповіді. Публікації будуть видані як спеціальний випуск Вісника НТУ «ХПІ» та в журналі «Електротехніка і електромеханіка» (EIE), що входять до Переліку фахових видань ВАК України та індексується у наукометричних базах (Index Copernicus, РИНЦ, тощо), а журнал EIE, починаючи з 2015 р., індексується в базі Web of Science Core Collection.

Учасники можуть виступити на пленарному засіданні та на засіданнях секцій.

СЕКЦІЇ СИМПОЗИУМУ

1. Теоретична електротехніка та електромагнітна сумісність.
2. Електричні машини.
3. Електричні апарати.
4. Сильні електричні і магнітні поля.
5. Електроізоляційна і кабельна техніка.
6. Передача електричної енергії.
7. Автоматизація та кібербезпека енергетичних систем

Детальнішу інформацію стосовно Симпозіуму та умов участі у ньому можна отримати на сайті кафедри «Електричні апарати»:

web.kpi.kharkov.ua/ea, web.kpi.kharkov.ua/siema

З повагою до Вас

Голова оргкомітету Ректор НТУ «ХПІ»

Професор Є.І. Сокол

Координатор симпозіуму

Професор Б.В. Клименко

Телефони для довідок:

(057) 707 62 81, 050 653 49 82, 096 987 20 85

Факс: (057) 707 66 01.

E-Mail: korolelgn@gmail.com

Dear Colleagues,

the Organizing Committee of the Symposium has the honor to invite you and interested employees of your institution to participate in XXI International Symposium «Problems of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics» (SIEMA'2018) which will take place on 25th – 26th of October, 2018 at the NTU «KhPI» (Electrical Engineering Building), Kyrpychov Str. 2, Kharkiv, UA-61002.

In the Symposium will take part:

- Heads of Departments conducting training in the specialty 141 Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics as well as leading University Professors from Ukraine and other countries;
- representatives of research institutions dealing with problems related to Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics;
- representatives of enterprises - developers of electric machines, apparatus and other electrical equipment;
- representatives of enterprises - consumers of electrical equipment;
- representatives of design institutions;
- representatives of commercial institutions of electrical engineering profile.

Participants of the Symposium will have the opportunity to publish their papers. Papers will be published as a special issue of the Bulletin of the NTU «KhPI» and in the Journal «Electrical Engineering & Electromechanics» (E&E) which are included in the list of professional editions of the Higher Attestation Commission of Ukraine and indexed in scientometric databases (Index Copernicus, РИНЦ, etc.), and the E&E Journal since 2015 is indexed in the Web of Science Core Collection database.

Participants can make presentations at the plenary and sectional sessions.

SYMPOSIUM SECTIONS

1. Theoretical electrical engineering and electromagnetic compatibility.
2. Electric machines.
3. Electrical apparatus.
4. High electric and magnetic fields.
5. Electrical insulating and cable engineering.
6. Transmission of electric energy.
7. Automation and cybersecurity of power systems.

More detailed information regarding the Symposium and conditions of participation can be found on the site of the Department for Electric Apparatus:

web.kpi.kharkov.ua/ea, web.kpi.kharkov.ua/siema

Sincerely yours,

Head of the Organizing Committee

Rector of the NTU “KhPI” Professor Ye.I. Sokol

Symposium Coordinator

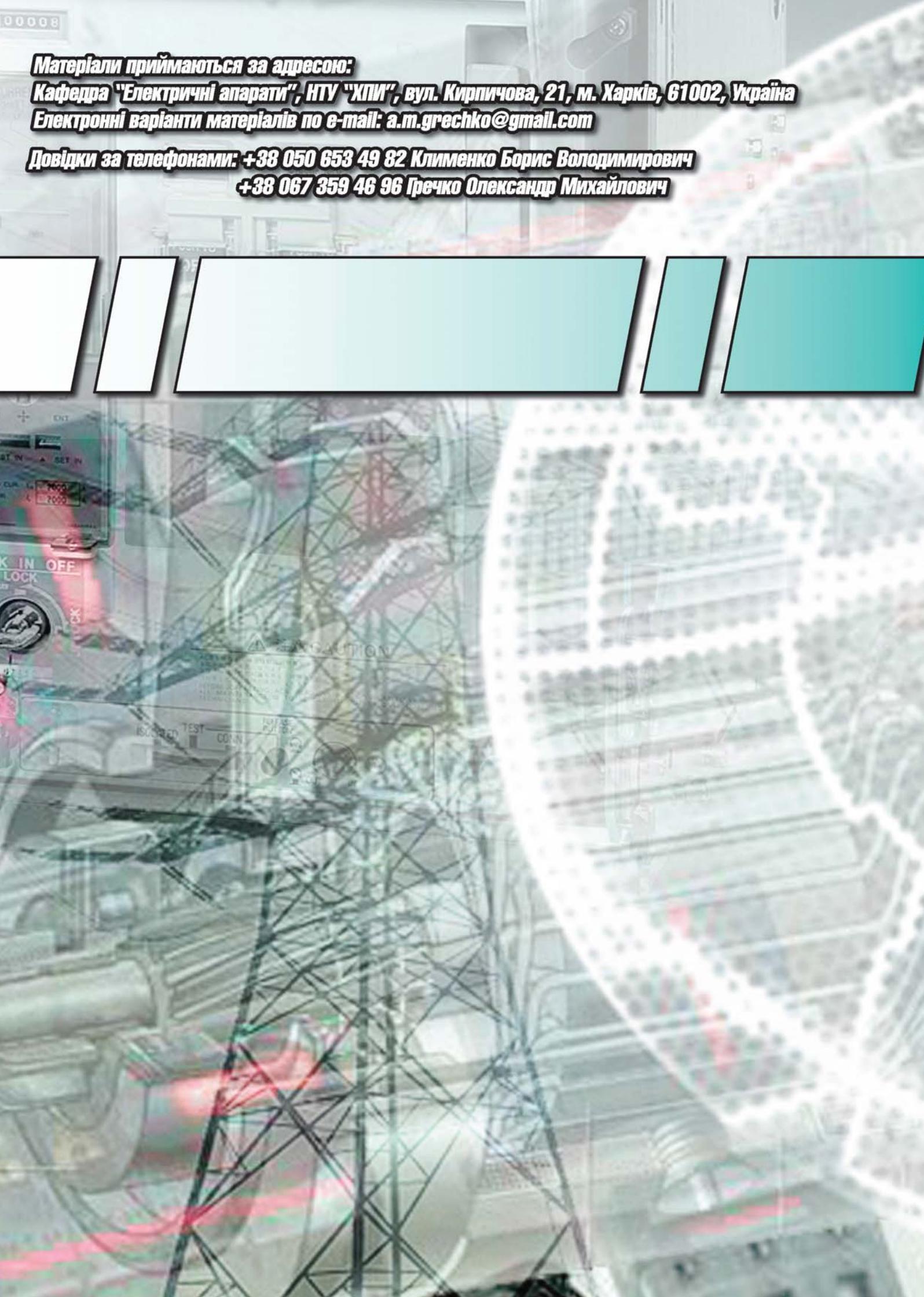
Professor B.V. Klymenko

Contact:

phone (+380) 57 707 62 81, (+380) 50 653 49 82,

(+380) 96 987 20 85, fax: (+380) 57 707 66 01.

E-Mail: korolelgn@gmail.com



00008

Матеріали приймаються за адресою:

Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПИ", вул. Кирпичова, 21, м. Харків, 61002, Україна

Електронні варіанти матеріалів по e-mail: a.m.grechko@gmail.com

Довідки за телефонами: +38 050 653 49 82 Клименко Борис Володимирович

+38 067 359 46 96 Гречко Олександр Михайлович

