

ISSN 2074-272X

**науково-практичний  
журнал**

**2015/5**



# **ЕІЕ** **Електротехніка і** **Електромеханіка**

**Електротехніка. Визначні події. Славетні імена**

**Електричні машини та апарати**

**Електротехнічні комплекси та системи.**

**Силова електроніка**

**Техніка сильних електричних та магнітних полів.**

**Кабельна техніка**

**Дискусії**

**Ювілеї**

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



# "ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА"

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

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

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

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



## ELEKTROTEKHNIKA I ELEKTROMEKHANIKA – ELEKTROTEHNİKA İ ELEKTROMECHANİKA – ELECTRICAL ENGINEERING & ELECTROMECHANICS

### INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

- Klymenko B.V.** Editor-in-Chief, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (NTU "KhPI"), Ukraine  
**Sokol Ye.I.** Deputy Editor, Professor, Corresponding member of NAS of Ukraine, rector of NTU "KhPI", Ukraine  
**Rozov V.Yu.** Deputy Editor, Professor, Corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine"(SI "ITPM NASU"), Kharkiv, Ukraine
- Batygin Yu.V.** Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine  
**Biró O.** Professor, Institute for Fundamentals and Theory in Electrical Engineering, Graz, Austria  
**Bolyukh V.F.** Professor, NTU "KhPI", Ukraine  
**Doležel I.** Professor, University of West Bohemia, Pilsen, Czech Republic  
**Féliachi M.** Professor, University of Nantes, France  
**Gurevich V.I.** Ph.D., Honorable Professor, Central Electrical Laboratory of Israel Electric Corporation, Haifa, Israel  
**Kildishev A.V.** Associate Research Professor, Purdue University, USA  
**Kuznetsov B.I.** Professor, SI "ITPM NASU", Kharkiv, Ukraine  
**Kyrylenko O.V.** Professor, Member of NAS of Ukraine, Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
**Podoltsev A.D.** Professor, Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
**Rainin V.E.** Professor, Moscow Power Engineering Institute, Russia  
**Rezynkina M.M.** Professor, SI "ITPM NASU", Kharkiv, Ukraine  
**Rozanov Yu.K.** Professor, Moscow Power Engineering Institute, Russia  
**Shkolnik A.A.** Ph.D., Central Electrical Laboratory of Israel Electric Corporation, member of CIGRE (SC A2 - Transformers), Haifa, Israel  
**Yuferov V.B.** Professor, National Science Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology", Ukraine  
**Vinitzki Yu.D.** Professor, GE EEM, Moscow, Russia  
**Zagirnyak M.V.** Professor, Corresponding member of NAES of Ukraine, rector of Kremenchuk M.Ostrohradskiy 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., НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ"  
**Боєв В.М.** професор, НТУ "ХПІ"  
**Веприк Ю.М.** професор, НТУ "ХПІ"  
**Гриб О.Г.** професор, НТУ "ХПІ"  
**Гурин А.Г.** професор, НТУ "ХПІ"  
**Данько В.Г.** професор, НТУ "ХПІ"  
**Жемеров Г.Г.** професор, НТУ "ХПІ"  
**Кравченко В.І.** професор, директор НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ"  
**Мілих В.І.** професор, НТУ "ХПІ"  
**Михайлов В.М.** професор, НТУ "ХПІ"  
**Омельяненко В.І.** професор, НТУ "ХПІ"  
**Пуйло Г.В.** професор, ОНТУ, Одеса  
**Резинкін О.Л.** професор, НТУ "ХПІ"  
**Рудаков В.В.** професор, НТУ "ХПІ"  
**Сосков А.Г.** професор, ХНУМГ імені О.М. Бекетова, Харків
- Ткачук В.І.** професор, НУ "Львівська Політехніка"  
**Шинкаренко В.Ф.** професор, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

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

### NATIONAL EDITORIAL BOARD\*

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

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

### Адреса редакції / Editorial office address:

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

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

ISSN (print) 2074-272X

ISSN (online) 2309-3404

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

Підписано до друку 16.10.2015 р. Формат 60 x 90 ½. Папір – офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,5.

Наклад 200 прим. Зам. № 66/172-05-2015. Ціна договірна.

Дизайн та оформлення обкладинки Вировець Л.П. e-mail: vsv\_2007@ukr.net

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



## **ЗМІСТ**

### **Електротехніка. Визначні події. Славенні імена**

**Баранов М.И.** Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 28: Портреты легендарных физиков «высоковольтной бригады» УФТИ..... 3

### **Електричні машини та апарати**

**Байда Е.И.** Особенности расчета магнитных систем с короткозамкнутыми вторичными обмотками в плоскопараллельной постановке ..... 18

**Галиновский А.М., Ленская Е.А., Мельник Н.П.** Непосредственные преобразователи частоты с искусственной и естественной коммутацией в бесконтактных асинхронизированных машинах ..... 23

**Ставинский А.А., Пальчиков О.О.** Сравнительный анализ потерь активной мощности асинхронных двигателей с цилиндрическим и аксиальным рабочим зазором..... 31

### **Електротехнічні комплекси та системи. Силова електроніка**

**Болух В.Ф., Щукін І.С.** Высокоэффективные импульсные электромеханические и электромагнитные устройства уничтожения информации на цифровых накопителях ..... 36

**Кузнецов Б.И., Васи́лец Т.Ю., Варфоломієв О.О.** Синтез нейрорегулятора Model Reference Controller для системы наведения і стабілізації..... 47

**Левицький С.М.** Система керування багаторівневим інвертором сонячної електричної станції ..... 55

**Поднебenna С.К.** Удосконалення системи управління «динамічних конденсаторів» для компенсації реактивної потужності ..... 59

### **Техніка сильних електричних та магнітних полів. Кабельна техніка**

**Беспрозванных А.В., Москвитин Е.С., Кессаев А.Г.** Абсорбционные характеристики фазной и поясной бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей на постоянном напряжении..... 63

### **Дискусії**

**Gurevich V.** Military and political aspects of one of the problems of the modern power industry..... 69

### **Ювілеї**

**Болух Володимир Федорович** (до 60-річчя з дня народження) ..... 75

## **TABLE OF CONTENTS**

### **Electrical Engineering. Great Events. Famous Names**

**Baranov M.I.** An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 28: Portraits of legendary physicists of «high-voltage brigade» of UPhTI..... 3

### **Electrical Machines and Apparatus**

**Baida E.I.** Peculiarities of calculation of magnetic systems with short-circuited secondary windings in in-plane formulation ..... 18

**Galynovskiy A.M., Lenskaya E.A., Melnik N.P.** Direct frequency converter with artificial and natural commutation for brushless asynchronized machines..... 23

**Stavinskii A.A., Palchykov O.O.** Comparative analysis of active power losses of induction motors with cylindrical and axial air gaps ..... 31

### **Electrotechnical Complexes and Systems. Power Electronics**

**Bolyukh V.F., Schukin I.S.** High-performance electromechanical and electromagnetic pulse devices for destruction of information on digital drives ..... 36

**Kuznetsov B.I., Vasilets T.E., Varfolomiyev O.O.** Synthesis of neural network Model Reference Controller for aiming and stabilizing system ..... 47

Levitskiy S.M. Control system for multilevel inverter of solar power station.....	55
Podnebnennaya S.K. An improved control algorithm for «Dynamic Capacitor» VAR compensator .....	59

### **High Electric and Magnetic Field Engineering. Cable Engineering**

Bezprozvannykh G.V., Moskvitin E.S., Kyessaeyv A.G. The absorption characteristics of the phase and zone paper-impregnated insulation of power cable at direct voltage .....	63
--	----

### **Discussions**

Gurevich V. Military and political aspects of one of the problems of the modern power industry.....	69
---	----

### **Anniversaries**

Bolyukh Volodymyr Fedorovych (on the 60th anniversary of his birth) .....	75
---	----

### **ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!**

*Науково-практичний журнал «Електротехніка і Електромеханіка» – передплатне видання. Вартість передплати на 2016 рік – 281,10 грн., на два місяці – 46,85 грн., на чотири місяці – 93,70 грн., на шість місяців – 140,55 грн., на вісім місяців – 187,40 грн., на десять місяців – 234,25 грн. Передплатний індекс: 01216.*

### **ШАНОВНІ АВТОРИ ЖУРНАЛУ!**

*Постановою президії ВАК України від 15 січня 2003 р. № 1-08/5 науково-практичний журнал «Електротехніка і Електромеханіка» внесено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук та перереєстровано постановою президії ВАК України від 10 лютого 2010 р. № 1–05/1. Журнал зареєстровано як фаховий з № 1 2002 року.*

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

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

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

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



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

М.И. Баранов

## **АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 28: ПОРТРЕТЫ ЛЕГЕНДАРНЫХ ФИЗИКОВ «ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ БРИГАДЫ» УФТИ**

*Наведено науково-історичний нарис про відомих харківських фізиках, що входили до складу знаменитої «високовольтної бригади» Українського фізико-технічного інституту, що першими в СРСР розщепили штучно прискореними в високовольтному генераторі з електророзрядною трубкою протонами на енергію до 350 кэВ ядро атома літію і що досягли в недалекому майбутньому своїх наукових академічних вершин і нових науково-технічних звершень в галузі ядерної фізики і фізики високих енергій. Бібл. 46, рис. 15.*

*Ключові слова:* історія, ядерна фізика, фізика високих енергій, ядерна енергетика, фізики-ядерники Харкова, видатні наукові досягнення.

*Приведен научно-исторический очерк об известных харьковских физиках, входивших в состав знаменитой «высоковольтной бригады» Украинского физико-технического института, первыми в СССР расщепивших искусственно ускоренными в высоковольтном генераторе с электроразрядной трубкой протонами на энергию до 350 кэВ ядро атома лития и достигших в недалеком будущем своих научных академических вершин и новых научно-технических свершений в области ядерной физики и физики высоких энергий. Библ. 46, рис. 15.*

*Ключевые слова:* история, ядерная физика, физика высоких энергий, ядерная энергетика, физики-ядерники Харькова, выдающиеся научные достижения.

**Введение.** В настоящее время по прошествии многих десятилетий с 1930-х годов, когда в «стенах» созданного в октябре 1928 года (по решению коллегии ВСНХ УССР) Украинского физико-технического института (УФТИ) фактически «ковалось» будущее ядерной физики СССР направленным в г. Харьков по инициативе директора Ленинградского физико-технического института (ЛФТИ), академика АН СССР Абрама Федоровича Иоффе (1880-1960 гг.) научным «десантом», не ослабевают внимание историков науки и техники к научно-техническим свершениям этой группы талантливых советских физиков. К этому надо добавить то, что большая часть этих свершений долгие годы находилась под запретом для широкой общественности. Интересны особенности этих выдающихся свершений и сами личности делавших их физиков, прибывших тогда в г. Харьков для создания в СССР нового научного центра в области современной физики. Несмотря на наличие весьма обширного числа публикаций и интернет-сообщений по данной тематике, емкого и систематизированного изложения в краткой форме основных событий по ней найти просто невозможно. Автору, как электрофизику, активно занимающемуся вот уже не один десяток лет в НИПКИ «Молния» Харьковского политехнического института (ХПИ), ныне называемого Национальным техническим университетом «ХПИ», разработкой и созданием импульсной техники высокого и сверхвысокого напряжения и больших токов [1-3], близки и хорошо понятны те задачи и проблемы, с которыми столкнулись харьковские физики из так называемой «высоковольтной бригады» УФТИ в 1930-е годы при создании сверхвысоковольтных генераторов для пионерских исследований в области ядерной физики. В рамках предлагаемого научно-исторического очерка остановимся, главным образом, лишь на основных научно-технических результатах многолетней напряженной работы «высоковольтной бригады» УФТИ и «портретах» наших легендарных физиков-энтузиастов, входивших в ее состав. Именно эти харьковские физики и их выдающиеся достижения на многие годы определяли научное «лицо» прославленного в мире УФТИ.

**1. Краткая предыстория создания «высоковольтной бригады» УФТИ.** УФТИ и ЛФТИ в 1930-х годах стали в СССР теми двумя научными центрами, в которых были сосредоточены все советские теоретические и экспериментальные исследования по ядерной физике. Отметим, что до 1931 года в СССР не было не только ни одного института, но и даже ни одной лаборатории, занимающейся этой важной областью физики [4]. Для УФТИ приобщению к ядерной проблематике поспособствовал научный «десант» из ЛФТИ, направленный в мае-июне 1930 года в первую столицу Украины из г. Ленинграда и состоящий из 23 молодых талантливых ученых, включая Гамова Г.А., Ландау Л.Д., Шубникова Л.В., Иваненко Д.Д., Синельникова К.Д., Вальтера А.К., Лейпунского А.И., Латышева Г.Д. и др. [5]. Первым директором УФТИ стал направленный в г. Харьков в 1929 году из ЛФТИ Иван Васильевич Обреимов (1894-1981 гг.), проработавший в этой должности до 1933 года и ставший в 1958 году академиком АН СССР [6]. На основе прибывших ленинградских специалистов в УФТИ организуется одна из бригад ученых (в 1930-е годы практиковался такой организационный способ выполнения работ), в которую и вошли Вальтер А.К., Синельников К.Д., Лейпунский А.И. и Латышев Г.Д. Данной бригаде дали название «высоковольтная». Задачами этой бригады стали исследования передачи энергии на расстоянии, диэлектрических свойств различных материалов и др. [4, 5]. В 1931 г. в тематическом плане работ УФТИ появляется экспериментальная работа, направленная на расщепление (по тогдашней терминологии на разрушение) атомного ядра [4]. Для ее выполнения была необходима соответствующая высоковольтная ускорительная установка (ВУУ), производящая поток искусственно ускоренных заряженных частиц для разрушения ядер мишени. Тематика эта была высоковольтная и поэтому ее поручили «высоковольтной бригаде» (руководитель работ – Лейпунский А.И.) [4].

**2. Успехи «высоковольтной бригады» УФТИ по расщеплению ядра атома лития.** Прежде чем приступить к описанию научно-технических особенностей

© М.И. Баранов

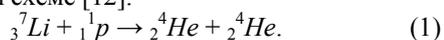
расщепления (разрушения) в УФТИ атомного ядра вкратце грубыми «мазками» общефизической информации обрисует тот научный фон, на котором происходило это уникальное событие, ставшее эпохальным для отечественной науки. Из всемирной истории нашей цивилизации известно, что любая область человеческой деятельности переживает годы бурного развития, спада и затишья. Ученые никогда в процессе научного познания не шагали парадной колонной. Всегда этот процесс был индивидуален, своеобразен и уникален. Овладение ученым истиной всегда напоминает настоящий бой. Упорный бой с собой и теми высокими требованиями, сложными жизненными факторами (обстоятельствами) и условиями, которые постоянно сопровождают и невольно прикрывают (уводят) от нас истинное знание. Как и в настоящем бою, здесь тоже есть свои «броски» вперед и свои «залегания» на раздумье. Из истории мировой физики следует, что 1932 год оказался «годом физических чудес» и серьезного прорыва («броска») в наших знаниях об устройстве окружающей нас материи [6]. В 1932 году выдающийся английский физик-экспериментатор Джеймс Чэдвик (1891-1974 гг.), исследуя вторичное излучение, возникающее при облучении бериллия  ${}^4_2\text{Be}$  альфа-частицами (ядрами атома гелия  ${}^4_2\text{He}$ ), открыл электрически нейтральную частицу – нейтрон [6]. В 1932 году молодой талантливый советский физик Дмитрий Дмитриевич Иваненко (1904-1994 гг.) предложил протонно-нейтронную модель строения ядра любого атома вещества [6]. В начале 1932 года выдающимся английским физиком Джоном Кокрофтом (1897-1967 гг.) и известным ирландским физиком Эрнестом Уолтоном (1903-1995 гг.) был собран высоковольтный каскадный генератор постоянного напряжения (генератор Кокрофта – Уолтона) на расчетный уровень до 800 кВ [6, 7]. Данный генератор, построенный по электрической схеме известного швейцарского электротехника Генриха Грейнахера [8], позволил указанным ученым знаменитой Кавендишской лаборатории (г. Кембридж, Англия) создать электростатический ускоритель протонов (в историю физики он вошел как ускоритель «Кокрофта – Уолтона» [6]) на энергию до 0,8 МэВ [7]. В апреле 1932 года Дж. Кокрофт и Э. Уолтон, постоянно подгоняемые в этой работе своим требовательным руководителем, выдающимся английским физиком Эрнестом Резерфордом (1871-1937 гг.), на указанном электростатическом ускорителе при выходном постоянном напряжении его высоковольтного каскадного генератора в 400 кВ (как видим, практически в 2 раза меньше предельного уровня по напряжению) с помощью искусственно ускоренных протонов впервые в мире осуществили первую ядерную реакцию – трансмутацию лития  ${}^7_3\text{Li}$  [6, 9]. Заметим, что в декабре 1951 года Дж. Кокрофт и Э. Уолтон за эту пионерскую работу в области ядерной физики были удостоены Нобелевской премии по физике [6]. Оказывается недаром Э. Резерфорд, интуитивно предчувствуя важность этих работ для дальнейших исследований в области ядерной физики и возможного использования человечеством внутриядерной энергии, так плотно опекал своих учеников по расщеплению ядра атома лития.

Вот на таком мировом научном фоне «высоковольтная бригада» УФТИ продолжала упорно выпол-

нять в первой половине 1932 года работы по созданию своего высоковольтного ускорителя – ВУУ. В мае 1932 года харьковским физикам стало известно об успешном эксперименте кембриджских физиков по расщеплению атомного ядра. Нашим ученым, закусив «удила», оставалось лишь повторить подобный эксперимент и оказаться первыми в СССР в решении данной задачи из области ядерной физики. Их первые попытки по разработке ВУУ, основанные на электрических схемах как ударного генератора (по сути генератора импульсных напряжений по схеме Аркадьева-Маркса мегавольтного диапазона [3], использующего в отдельных каскадах простейшие плоские конструкции конденсаторов собственного изготовления на напряжение до 40 кВ), так и трансформатора Теслы, а также на использовании специальной электроразрядной ускорительной трубки (ЭРУТ) и обеспечивающие достижение в вакуумном промежутке ЭРУТ требуемых результатов по энергии искусственно ускоренных протонов (в сотни кэВ) завершились безуспешно [4, 10]. Это и не удивительно. При таких схемах импульсного ускорения в ЭРУТ протонов длительность воздействия на них ударного напряжения и соответственно напряженности  $E_p$  сильного электрического поля в разрядном промежутке ЭРУТ не превышала 100 мкс [10, 11]. За такое короткое время передать энергию поля ЭРУТ протонам с положительным зарядом  $e_p=1,602\cdot 10^{-19}$  Кл (ионизированным атомам водорода  ${}^1_1\text{H}$ ) и ускорить их в ЭРУТ до энергии  $W_p$  порядка 400 кэВ и более оказалось невозможно. Ведь в первом приближении  $W_p=e_p E_p S_p$ , где  $S_p$  – длина пути ускорения протонов. При указанных выше схемах ускорения протонов  $S_p \ll S_T$ , где  $S_T$  – длина разрядного промежутка ЭРУТ. Поэтому для членов «высоковольтной бригады» УФТИ единственным выходом на то время было создание ВУУ на выходное постоянное напряжение, обеспечивающее протекание в хорошо откакумированной ЭРУТ постоянного ионного тока.

С июня 1932 года «высоковольтная бригада» УФТИ и приданный ей малочисленный инженерно-технический персонал общим количеством до 15 штатных сотрудников института приступили к разработке необходимой ВУУ, базирующейся на специально изготовляемом ими для этого высоковольтном генераторе постоянного выходного напряжения величиной до  $U_p=350$  кВ, содержащем трансформаторно-выпрямительный каскад, и оригинальной конструкции высоковольтной ЭРУТ с длиной  $S_T$  ускоряющего промежутка около 2 м [10]. Данная ЭРУТ была выполнена из толстостенных стеклянных цилиндров, изготовленных на Мерефянском заводе стекла, находящемся вблизи г. Харькова. Полые стеклоцилиндры ЭРУТ были смонтированы в виде единой вертикальной колонны, содержащей по всей своей длине равномерно размещенные ускоряющие медные электроды-экраны дискообразной формы [10, 11]. Применение таких металлических электродов-экранов способствовало не только ускорению протонов в откакумированной ЭРУТ, но и более равномерному распределению сильного электрического поля вдоль твердой изоляции ЭРУТ и соответственно предотвращению ее электрического пробоя. Созданная к началу октября 1932 года

«высоковольтной бригадой» УФТИ на «старой» производственной площадке, размещенной недалеко от учебных корпусов ХПИ, новая экспериментальная ВУУ, для разрядного промежутка отвакуумированной ЭРУТ которой выполнялось условие  $S_p=S_r$ , обеспечивала получение искусственно ускоренных в ЭРУТ протонов  ${}^1_1p$  до энергии  $W_p=e_pU_p=350$  кэВ. С утра 10 октября 1932 года жилой микрорайон г. Харькова в районе улиц Чайковской, Лермонтовской и Юмовской (ныне Гуданова), прилегающий к территории УФТИ, был оцеплен сотрудниками органов НКВД [4]. В этот день состоялся демонстрационный эксперимент по расщеплению членами «высоковольтной бригады» УФТИ на изготовленной ими ВУУ ядер атомов лития  ${}^7_3Li$ . Ускоренные в ЭРУТ протоны  ${}^1_1p$  были направлены на ядерную мишень, выполненную в виде литиевой пластинки. Вот как описывался этот эксперимент тогдашним газетным репортером [4]: «...В зале – приземистая будка, оклеенная оловянной бумагой. В будку влез человек. И все из зала быстро ушли. Пребывание в нем грозило смертью. Тогда включили ток высокого напряжения. Человек в будке, по фамилии Синельников, изогнувшись, неотрывно глядел в микроскоп, упиравшийся в трубку. Он ждал, не покажутся ли сцинтилляции, вспыхивающие звездочки на пластинке лития? И вот он увидел их, оранжевые мерцающие вспышки на пластинке. В октябре 1932 года высоковольтная бригада по расщеплению атома могла рапортовать ЦК партии: атом разбит! Оранжевые вспышки на пластинке были тому доказательством». С позиций ядерной физики на пластике изотопа лития  ${}^7_3Li$  при этом протекала реакция по трансмутации его ядер с образованием альфа-частиц (ядер  ${}^4_2He$ ) по следующей ядерной схеме [12]:



Энергии искусственно ускоренных протонов  ${}^1_1p$  в 350 кэВ, выступающих в качестве «микроснарядов», бомбардирующих ядра атомов лития, в этом случае оказалось вполне достаточно для их расщепления (разрушения). А почему как кембриджскими, так и харьковскими физиками для первых опытов по расщеплению атомного ядра вещества искусственно ускоренными заряженными частицами был выбран именно стабильный изотоп лития  ${}^7_3Li$ ? Ответ на этот вопрос достаточно прост: щелочно-земельный химический элемент литий  ${}^7_3Li$  имеет сравнительно малую энергию связи ядра, равную 5,57 МэВ/нуклон [12]. Напомним, что энергия связи ядра, состоящего из нуклонов (это общее название элементарных частиц нейтронов и протонов), представляет собой работу, которую надо затратить для того, чтобы расчленив ядро на составляющие его нуклоны и удалить их один от другого на такое расстояние, при котором они практически не будут взаимодействовать между собой [12]. А почему для расщепления ядер атомов лития  ${}^7_3Li$  в качестве «микроснарядов» в 1930-е годы были использованы именно протоны? Во-первых, для ускорения тогда с помощью энергии сильного электрического поля и соответственно высоковольтной техники подобных «микроснарядов» последние должны были иметь электрический заряд. На тот период основными более или менее изученными эле-

ментарными электрически заряженными частицами были протоны с массой покоя  $m_p$  и электроны с массой покоя  $m_e$  (нейтроны были открыты только в конце февраля 1932 года [6], а нейтронная техника находилась в зачаточном состоянии). Во-вторых, для проникновения в область ядра вещества физикам-ядерщикам необходимо было использовать элементарные частицы (квантовые объекты, подчиняющиеся волновой механике [12]), имеющие как можно меньшие значения своих длин дебройлевских волн, стремящихся в лучшем случае к диаметру ядра атома (порядка  $10^{-15}$  м). При прочих равных электрофизических условиях для намечаемого эксперимента по расщеплению атомного ядра (одинаковых значениях ускоряющего напряжения  $U_p$  для ЭРУТ, энергии искусственного ускорения в ЭРУТ заряженных частиц и др.) больше подходили протоны, имеющие для случая дорелятивистских скоростей длину  $\lambda_p$  волны примерно в  $(m_p/m_e)^{1/2} \approx 44$  раза меньшую, чем длина  $\lambda_e$  ускоренных электронов [12]. Кроме того, ускоренные в ЭРУТ протоны, по сравнению с электронами, обладали и большим импульсом или количеством движения (также примерно в 44 раза), играющим важную роль при расщеплении ядра. Надо заметить, что рассматриваемые протоны образовывались в ВУУ внешним источником ионов за счет ионизации атомов водорода  ${}^1_1H$  с их последующим «впрыском» в разрядный промежуток ЭРУТ [4, 10].

Один из участников того исторического эксперимента в УФТИ, будущий академик АН УССР Антон Карлович Вальтер вспоминал [10]: «...Мы просто были счастливы, увидев светящийся пучок электронов, взметнувшийся под потолок над экспериментальной установкой в нашей лаборатории. А ведь нам осталась солидная доза облучения». Почему член «высоковольтной бригады» здесь говорит о «пучке электронов»? Видимо, вылетающие согласно (1) из литиевой пластинки (ядерной мишени), размещенной у пола под вертикальной колонной ЭРУТ,  $\alpha$ -частицы вызывали вторичное электронное излучение от ионизированных атомов и молекул атмосферного воздуха. О знаменательном событии, произошедшем в УФТИ, в г. Москву была направлена телеграмма на имя гг. И. Сталина, В. Молотова и С. Орджоникидзе. 22 октября 1932 года на первой странице центральной газеты СССР «Правда» № 293 (5458) появилась небольшая заметка под названием «Крупнейшее достижение советских ученых» [4]. В данной заметке был приведен короткий текст указанной телеграммы: «Украинский физико-технический институт в результате ударной работы к 15-ой годовщине Октября добился первых успехов в расщеплении ядра лития. 10 октября высоковольтная бригада разрушила ядро лития. Работы продолжаются». Подписана была эта заметка директором института, секретарем парткома и секретарем месткома. Какое же значение имел рассматриваемый нами ядерный эксперимент? Думаю, что непосредственного научного значения он не имел. Это было повторение результатов Дж. Кокрофта и Э. Уолтона по расщеплению атомного ядра. Нового для науки он ничего не принес. Однако для отечественной ядерной физики он имел огромное значение. Во-первых, этот эксперимент продемонстрировал

научно-технические возможности УФТИ и высокий научный уровень советских физиков, из которых состояла «высоковольтная бригада» УФТИ. Во-вторых, он подтолкнул центральные и местные власти СССР к большим финансовым вложениям в отечественную науку и непосредственно в развитие ядерных исследований в УФТИ. После этого успеха в области ядерной физики УФТИ через Наркомат тяжелой промышленности СССР получил необходимое финансирование для дальнейшего продолжения работ в области ядерной физики и создания соответствующей материально-технической базы [13]. В УФТИ тут же приступили к возведению нового высоковольтного лабораторного корпуса, в котором к 1936 году по схеме известного американского физика Роберта Ван де Граафа (1901-1967 гг.) ударными темпами был сооружен крупнейший в Европе сверхвысоковольтный электростатический ускоритель (ЭСУ) протонов на энергию 3,5 МэВ [6, 13]. Последующие события в мировой гонке вооружений показали, что ускоритель ЭСУ-3,5 и накопленный в УФТИ опыт работы на нем имел громадное значение при получении учеными УФТИ специальных данных по «ядерным константам», необходимым для создания в СССР ядерного оружия. Более подробно об этом ускорителе будет изложено в разделе 3.

На рис. 1 приведен общий вид монумента, воздвигнутого не так давно коллективом Национального научного центра (ННЦ) «Харьковский физико-технический институт (ХФТИ)» НАН Украины в память об эксперименте, произведенном в далеком 1932 году «высоковольтной бригадой» по расщеплению атомного ядра. Данный монумент установлен в сквере перед административным корпусом ННЦ «ХФТИ» НАНУ вблизи проспекта академика И.В. Курчатова, так много сделавшего для сохранения УФТИ (ХФТИ) в г. Харькове и развития в нем ядерной физики [14].



Рис. 1. Монумент харьковским ученым-физикам «высоковольтной бригады» УФТИ, впервые в СССР расщепившим в 1932 г. протонами ядро атома лития (г. Харьков) [14]

На рис. 2 крупным масштабом представлена надпись на одной из мраморных плит указанного монумента в честь знаменательного события 1932 года.

**3. Некоторые успехи «высоковольтной бригады» УФТИ по созданию мощных ускорителей заряженных частиц.** Описанная в разделе 2 ВУУ (фактически ЭСУ) стала первой в длинном ряду электро-

статических и линейных ускорителей заряженных частиц (протонов и электронов) с их энергией от единиц до тысяч МэВ, созданных в дальнейшем при активном участии членов «высоковольтной бригады» УФТИ. 17 октября 1934 года дирекцией УФТИ был издан приказ «Об организации работ по сооружению экспериментального генератора Ван де Граафа на 7 МэВ» [13, 15]. А уже в 1936 году в УФТИ под научным руководством Вальтера А.К. и Синельникова К.Д. силами сотрудников института был сооружен уникальный электростатический ускоритель протонов на основе использования генератора по схеме Ван де Граафа на их энергию 3,5 МэВ (ЭСУ-3,5) с металлическим шаровым кондуктором-электродом диаметром 10 м (рис. 3) [13, 15].



Рис. 2. Надпись на мраморной плите монумента легендарным физикам «высоковольтной бригады» УФТИ, успешно осуществившим в 1932 году выдающийся эксперимент по расщеплению на созданной ими ВУУ ядра атома лития [14]



Рис. 3. Внешний вид крупнейшего в Европе сверхвысоковольтного электростатического ускорителя протонов на энергию 3,5 МэВ (ЭСУ-3,5) разработки УФТИ (1936 г.) [15]

Отметим, что в период 1933-1937 гг. директором УФТИ был академик АН УССР (с мая 1934 года) Александр Ильич Лейпунский [6, 16]. Укажем некоторые технические характеристики уникального ускорителя ЭСУ-3,5 [13, 15]: общая высота – 17 м; высота трех несущих изоляционных полых колонн (выполнены



ромагнитного анализатора ускоренных частиц до энергии  $W_p=4$  МэВ [13, 15]. В период 1950-1960 гг. на электростатическом ускорителе типа ЭСУ-5 учеными УФТИ был выполнен ряд важных ядерно-физических исследований [15]: изучено резонансное упругое рассеяние протонов на лёгких ядрах, позволившее обнаружить сильные резонансы (впоследствии последние в ядерной физике получили название аналоговых резонансов); измерена поляризация фотонов (чётность их состояний) с использованием реакции фоторасщепления Дейтона; изучены поляризационные явления при упругом рассеянии протонов ядрами; исследованы ядерная спектроскопия лёгких ядер, спин-флип переходы и «расталкивание» энергетических уровней; разработан метод определения усредненных резонансов для ядерно-спектрометрических исследований.



Рис. 5. Общий вид электростатического ускорителя протонов ЭСУ-5 без корпуса-котла (электрический потенциал на верхнем кондукторе-электроре – до 3 МВ; ток ионного пучка – до 50 мкА; давление изоляционной газовой среды ( $N_2 + 5\% SF_6$ ) в закрытом котле – до 6 атм.; давление остаточного газа в вакуумной ускорительной трубке – до  $2 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст.; высота котла – 7,3 м; 1954 год, г. Харьков, ФТИ) [13, 15]

В 1950-х годах в ФТИ АН УССР был создан ряд линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) на бегущей электромагнитной волне (ЭМВ), начиная с энергии искусственно ускоренных в них частиц 0,7 МэВ и заканчивая 90 МэВ [15, 24]. Апофеозом научных работ ведущих физиков «высоковольтной бригады» УФТИ в области мощных ЛУЭ стала разработка и создание в 1965 году крупнейшего в Европе ускорителя электронов на энергию 2000 МэВ (научный руководитель работ – академик АН УССР А.К. Вальтер) [15, 25]. На рис. 6 приведен общий вид уникального ускорителя типа ЛУЭ-2000, собранного из 50-ти последовательно включенных высоковольтных ускоряющих секций на бегущей ЭМВ и имеющего общую длину 240 м [15].

За результаты работ мирового уровня по созданию в ФТИ АН УССР крупнейшего и наибольшего по

энергии ускоренных электронов на то время линейного ускорителя типа ЛУЭ-2000 (для СССР таким он и остался навсегда) академик АН УССР А.К. Вальтер (рис. 7) в 1965 году был представлен к высокому званию Героя труда. Однако, из-за последовавшей вскоре в августе 1965 года своей кончины (первой в «высоковольтной бригаде» УФТИ) он этого заслужившего своим невероятным по накалу многолетним трудом звания так и не дождался [25]. Поэтому будет логичным с него и начать наше краткое представление научных и общечеловеческих «портретов» легендарных физиков «высоковольтной бригады» УФТИ.



Рис. 6. Общий вид крупнейшего в Европе 50-ти секционного линейного ускорителя электронов на бегущей ЭМВ типа ЛУЭ-2000 на энергию ускоренных частиц до 2 ГэВ и импульсный ток электронного пучка до 100 мА при его длительности до 1,5 мкс (1965 год, ФТИ АН УССР) [15, 25]



Рис. 7. Выдающийся советский и украинский физик XX столетия, д.ф.-м.н., академик АН УССР Антон Карлович Вальтер (1905-1965 гг.) [25]

**4. Портрет первый – академик Антон Карлович Вальтер.** Родился А.К. Вальтер 24 декабря 1905 года в столице Российской империи г. Санкт-Петербурге в дворянской семье [5]. В 1922 году поступил на физико-механическое отделение Петроградского (Ленинградского) политехнического института (ЛПИ). С 1923 года стал заниматься научно-исследовательской работой (НИР) под руководством И.В. Обреимова. В 1925 году для выполнения перспективной НИР перешел в лабораторию ЛФТИ, руководимую его директором, академиком АН СССР А.Ф. Иоффе. Здесь он совместно с К.Д. Синельниковым и И.В. Курчатовым занимался

изучением электрических и механических свойств диэлектриков [26]. С 1930 года после переезда в г. Харьков и начала работы в УФТИ он чувствовал себя готовым к великим свершениям в науке и технике. С 1945 года А.К. Вальтер руководил отделом УФТИ и отвечал за экспериментальные работы в области физики атомного ядра и элементарных частиц.

Особое место в научном наследии А.К. Вальтера занимают результаты исследований, связанные с разработкой и созданием высоковольтных ускорителей заряженных элементарных частиц (протонов и электронов). По сути, он стал «отцом» первых советских как электростатических, так и линейных ускорителей заряженных частиц [26, 27]. В разделах 2 и 3 о некоторых из них были представлены основные физико-технические сведения. Долгое время практически выстрадавший им в течение как минимум 15 лет и понастоящему забравший много его здоровья и сил линейный ускоритель типа ЛУЭ-2000 (см. рис. 6), построенный в 1965 году под г. Харьковом в поселке Пятихатки на «новой» площадке УФТИ (теперь она целиком вошла в городскую черту), оставался мощнейшим в мире [26]. Этот ускоритель содержал 50 отдельных ускоряющих секций на энергию 40 МэВ каждая. Ускоряющая секция имела длину 4,8 м. В своем составе она содержала усиливающий клистрон с выходной импульсной мощностью до 20 МВт, системы управления и синхронизации процесса ускорения электронов [28]. На данном ускорителе за 28 лет его регулярного функционирования в ФТИ АН УССР в рамках отечественной гражданской и оборонной тематики был выполнен огромный объем радиационных исследований и экспериментов по оценке реальной стойкости различных технических средств к воздействию интенсивных электронных пучков [13, 14].

В первой половине 20-го столетия А.К. Вальтер стал основателем украинской научной школы экспериментальной ядерной физики. Вокруг него представители этой научной школы сформировали плодотворный и авторитетный харьковский коллектив физиков-ядерщиков. Круг его научных интересов был широким [5, 26]: ускорительная техника, техника высоких напряжений, ядерная физика, физика и техника вакуума и физика высоких энергий. На основе ставших известными широкой общественности материалов, документов и научно-технических данных приведем краткий перечень основных выдающихся результатов, полученных этим членом «высоковольтной бригады» УФТИ в указанных разделах физики [5, 29]:

- Разработал в ЛФТИ первую в области физики диэлектриков физическую теорию явления диэлектрических потерь в изоляционных материалах, помещенных в изменяющееся электрическое поле [25];
- впервые в СССР с помощью самостоятельно созданного в УФТИ высоковольтного электростатического ускорителя заряженных частиц на энергию до 0,35 МэВ осуществлено расщепление искусственно ускоренными протонами ядра атома лития (1932 год, совместно с К.Д. Синельниковым, А.И. Лейпунским и Г.Д. Латышевым). Этот знаменательный физический эксперимент стимулировал развитие в СССР ядерной физики и существенно приблизил для советской

страны временной рубеж или, по сути, эру начала военного и мирного использования атомной энергии [6, 10];

- предложена и реализована для потребностей отечественной ускорительной техники высоковольтная выпрямительная четырехступенчатая каскадная схема для получения постоянного напряжения  $\pm 400$  кВ (1934 год, в историю техники высоких напряжений она вошла как «схема Вальтера-Синельникова» [30]);
  - разработан и сооружен в УФТИ по схеме Ван де Граафа крупнейший в Европе электростатический ускоритель протонов на энергию до 3,5 МэВ (ЭСУ-3,5) (1936 год, совместно с К.Д. Синельниковым) [15];
  - разработаны и изготовлены первые в СССР вакуумные диффузионные паромасляные насосы, имеющие высокую производительность и большое значение в скором будущем для развития отечественной атомной промышленности (1938-1941 гг., совместно с К.Д. Синельниковым) [26];
  - в рамках Атомного проекта СССР под научным руководством А.К. Вальтера харьковскими физиками были получены важные данные по изучению радиоактивных свойств различных ядерных материалов и измерению так называемых «ядерных констант» (1946-1950 гг.). Принято считать, что эти результаты ФТИ АН УССР позволили как минимум на год ускорить создание первой советской атомной бомбы [4];
  - разработана и практически реализована широкая гамма как усовершенствованных классических электростатических, так и принципиально новых линейных ускорителей заряженных частиц (протонов и электронов) на бегущей ЭМВ на энергию от единиц до сотен МэВ (1950-1960 гг., совместно с К.Д. Синельниковым, Н.А. Хижняком и И.А. Гришаевым) [6];
  - под научным руководством А.К. Вальтера разработан и введен в эксплуатацию на территории ФТИ АН УССР крупнейший и мощнейший в Европе линейный ускоритель электронов на бегущей ЭМВ на энергию до 2000 МэВ (1965 год, ЛУЭ-2000) [15, 26];
  - получены первые в мировой практике новые данные по радиационной стойкости различных материалов и конструкций к воздействию на них интенсивных электронных пучков ЛУЭ-2000, а также по сопровождающим такие воздействия малоизученным ядерным эффектам и реакциям (1965 год) [26].
- Свою научную деятельность А.К. Вальтер успешно совмещал с педагогической работой в ведущих харьковских вузах [29]. С 1937 года в Харьковском государственном университете (ХГУ) им. В.Н. Каразина он возглавил кафедру «Физики атомного ядра», позже ставшую кафедрой «Экспериментальной ядерной физики», которой он руководил до конца своей жизни [31]. Многие годы сотрудничал с ХПИ, читая лекции на ставшем с 1966 года родным автору очерка инженерно-физическом факультете [25]. В 1962 году А.К. Вальтер совместно с академиком АН УССР К.Д. Синельниковым добился организации в ХГУ физикотехнического факультета. За свою плодотворную научно-педагогическую работу получил общественное признание, о чем говорит то, что он стал [32]:
- Академиком АН УССР (1951 год);
  - Заслуженным деятелем науки и техники УССР (1955 год);

• Лауреатом Государственной премии Украины в области науки и техники за учебник «Ядерная физика» (1993 год, посмертно).

Антон Карлович запомнился харьковчанам не только как известный ученый-физик и ценный педагог, но и как неординарный человек, способный удивлять людей. Он увлекался спортом (альпинизмом) и автомобилями, был энциклопедически образован и слыл в узком кругу друзей тонким знатоком художественной литературы. Как немец по происхождению очень любил пиво и иногда устраивал для незнакомых людей целые соревнования на число выпитых его бокалов [4]. Как правило, победителем здесь оказывался он сам. Наш выдающийся физик-ядерщик, академик АН УССР Антон Карлович Вальтер скоропостижно скончался 13 августа 1965 года в г. Харькове [5, 26].

**5. Портрет второй – академик Кирилл Дмитриевич Синельников.** Другой член «высоковольтной бригады» УФТИ К.Д. Синельников (рис. 8) родился 29 мая 1901 года в г. Павлограде (Екатеринославская губерния Российской империи) в семье земского врача [20]. В 1920 году поступил на физико-математический факультет Крымского (Таврического) университета им. М.В. Фрунзе (г. Симферополь), а уже в 1923 году досрочно его окончил. С 1924 года стал работать в ЛФТИ и в ряде исследований пересекся с И.В. Курчатовым [20].



Рис. 8. Выдающийся советский и украинский физик XX века, д.ф.-м.н., академик АН УССР Кирилл Дмитриевич Синельников (1901-1966 гг.) [20]

В период 1928-1930 гг. пребывал в научной стажировке от ЛФТИ в Кавендишской лаборатории (г. Кембридж, Англия), руководимой Э. Резерфордом – лауреатом Нобелевской премии по химии за 1908 год [6]. Здесь, по-видимому, и был заложен фундамент для его последующих исследований в УФТИ по физике атомного ядра, ускорителям заряженных частиц и физике плазмы, а также по вакуумной металлургии [20]. Кстати, к маю 1930 года им была написана диссертация на соискание ученой степени доктора философии Кембриджского университета «Влияние магнитного поля на электропроводность монокристаллов кадмия». Однако из-за окончания срока стажировки защитить ее он

не успел. С 1930 по 1942 годы К.Д. Синельников возглавлял в УФТИ отдел физики ядра. Именно тогда он в составе «высоковольтной бригады» УФТИ совместно с А.К. Вальтером, А.И. Лейпунским и Г.Д. Латышевым осуществил описанный в разделе 2 исторический эксперимент по расщеплению ускоренными протонами ядра атома лития  ${}^7_3\text{Li}$ . Для исследования взаимодействия пучков заряженных элементарных частиц с ядрами более тяжелых элементов физикам-ядерщикам УФТИ требовались более мощные ускорители заряженных частиц. Поэтому в УФТИ под руководством К.Д. Синельникова и А.К. Вальтера в 1930-х годах начало развиваться новое научное направление – разработка и создание мощной высоковольтной ускорительной техники [15, 20]. Первенцем такой техники стал построенный в УФТИ еще до войны сверхвысоковольтный электростатический генератор Ван де Граафа на энергию ускоряемых протонов до 3,5 МэВ. Для откачки ЭРУТ данного генератора требовались мощные высоковакуумные насосы. Вот поэтому колыбелью отечественной физики и техники вакуума опять становится УФТИ и его отделы, возглавляемые К.Д. Синельниковым и А.К. Вальтером [15, 20]. Созданные в предвоенные годы в УФТИ вакуумные насосы пригодились в военное время в период эвакуации института для выполнения оборонных работ, одним из направлений которых было создание вакуумной технологии нанесения антирефлексных покрытий на оптику приборов управления артиллерийским огнем (руководители работ – К.Д. Синельников и А.К. Вальтер) [20, 33]. Начиная с 1944 года, при активной поддержке академика АН СССР И.В. Курчатова, женатого на его родной сестре Марине Дмитриевне (это родство было немаловажным фактором для него), он как директор ФТИ АН УССР восстанавливает институт (в то время на высоких властных уровнях рассматривался вопрос о нецелесообразности восстановления УФТИ и о его переводе в г. Киев и слиянии с Институтом физики АН УССР – здесь перевесила все же хорошо аргументированная позиция И.В. Курчатова (рис. 9), ответственного за весь комплекс работ по созданию в СССР ядерного и термоядерного оружия) и затем полностью переключает его работу на нужды Атомного проекта СССР [22]. Первоочередными задачами института становятся экспериментальные работы по изучению результатов воздействия быстрых и медленных нейтронов на такие делящиеся ядерные материалы как уран  ${}^{235}_{92}\text{U}$  и плутоний  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$  [4, 22]. После завершения этих закрытых работ в ФТИ АН УССР (к концу 1950-х годов) он и соответственно его институт берется за два новые научные направления, одно из которых было связано с изучением конструкционных материалов для ядерного реакторостроения, а другое – с изучением высокотемпературной плазмы и управляемых термоядерных реакций [20]. Эти работы сразу вытеснили из тематики ФТИ АН УССР ядерную физику на задний план. Поэтому в СССР инициатива по ее дальнейшему развитию перешла к Объединенному институту ядерных исследований (г. Дубна) и Институту физики высоких энергий (г. Серпухов) [23]. Заметным в научном мире апогеем научно-технических достижений в 1970-х годах ученых ФТИ АН УССР в поисковых НИР СССР по

экспериментальному изучению высокотемпературной плазмы и в дальнейшем управляемого термоядерного синтеза легких ядер стало создание в г. Харькове на «новой» площадке ФТИ мощного экспериментального образца сверхпроводящего стелларатора типа «Ураган-2» (рис. 10) [6, 14, 34].



Рис. 9. Два наиболее выдающихся физика-ядерщика СССР в 20-ом столетии, трижды удостоенные Героя труда и внесшие неоценимый научно-организационный вклад в создание отечественного «ядерного щита» – академик АН СССР Игорь Васильевич Курчатов (1903-1960 гг.) (слева) и академик АН СССР Юлий Борисович Харитон (1904-1996 гг.) (справа), являвшиеся друзьями К.Д. Синельникова [23]

В период 1950-1960 гг. не забывал К.Д. Синельников и о дальнейшем развитии в ФТИ АН УССР высоковольтных ускорителей электронов и протонов. В это время была создана целая серия ЛУЭ (на энергию электронов до 300 МэВ) и линейных ускорителей протонов (ЛУП) на их энергию до 20 МэВ [13, 15, 33]. Например, вступивший в 1952 году в действие новый ускоритель протонов на энергию 20 МэВ (ЛУП-20), содержащий электростатический агрегат на выходное напряжение до 3 МВ, являлся на то время крупнейшим в СССР линейным ускорителем данных частиц. На этом ускорителе в ФТИ АН УССР были выполнены многочисленные исследования в области тонких ядерных структур и свойств различных ядер, изучения физических механизмов протекания ряда новых ядерных реакций и определения важных для оборонной тематики некоторых «ядерных констант» [13, 15].

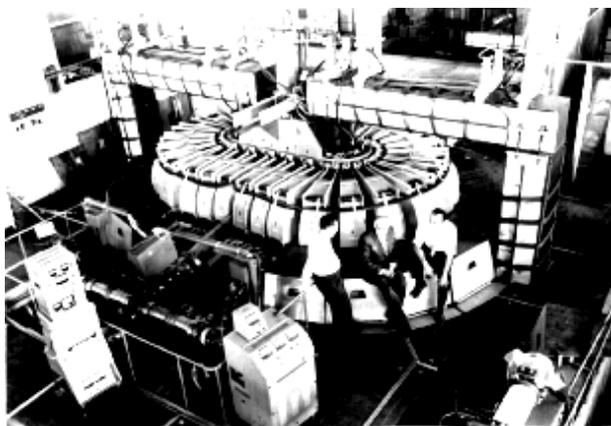


Рис. 10. Внешний вид сверхпроводящего стелларатора типа «Ураган-2» разработки ФТИ АН УССР (г. Харьков) [14, 20]

А как обстояло дело с учеными степенями и званиями у харьковского физика К.Д. Синельникова? Кандидатом физико-математических наук он стал в г. Харькове уже в 1930 году без защиты диссертации (по результатам подготовленной еще в Кавендишской лаборатории своей диссертации на соискание степени доктора философии). В 1937 году ему была присвоена ученая степень доктора физико-математических наук, а чуть позже он получил ученое звание профессора [23]. Исследования К.Д. Синельникова охватывают ядерную физику, физику и технику высоковольтных ускорителей, физику и технику вакуума, физическое материаловедение, физику плазмы и управляемого термоядерного синтеза, физику диэлектриков и полупроводников, физическую и электронную оптику [20].

Какими же научными свершениями прославился наш герой-земляк К.Д. Синельников? Постараемся с учетом его ряда опубликованных научных трудов [11, 35-37] и имеющейся у нас о нем немалой научно-технической информации авторитетных украинских историков науки и техники [6, 16, 21, 22, 34] в краткой форме привести основные выдающиеся достижения этого легендарного харьковского физика, ставшего в 20-ом столетии одним из творцов «атомного века»:

- открыл в экспериментальной лаборатории ЛФТИ новый механизм электрического пробоя твердого диэлектрика, названный «электролитическим пробоем» (середина 1920-х годов) [20];

- осуществил в составе «высоковольтной бригады» УФТИ впервые в СССР расщепление атомного ядра щелочно-земельного элемента лития искусственно ускоренными в созданной с его непосредственным участием ВУУ на напряжение 350 кВ протонами до энергии 0,35 МэВ (1932 год; совместно с А.К. Вальтером, А.И. Лейпунским и Г.Д. Латышевым) [6];

- предложил в области техники высоких напряжений новую схему каскадного построения источника постоянного напряжения на  $\pm 400$  кВ (1934 год), названную «схемой Вальтера-Синельникова» [30];

- разработал и построил в УФТИ крупнейший в Европе электростатический ускоритель протонов на энергию до 3,5 МэВ (ЭСУ-3,5), содержащий генератор Ван де Граафа на постоянное напряжение до 3,5 МВ (1936 год, совместно с А.К. Вальтером) [15, 20];

- разработал и смонтировал первые в нашей стране вакуумные диффузионные паромасляные насосы, широко использовавшиеся в высоковольтной ускорительной технике и ядерных технологиях СССР (1938-1941 гг., совместно с А.К. Вальтером) [20, 26];

- создал высокопроизводительные диффузионные криогенные насосы для нужд атомной энергетики и промышленности, сыгравшие определяющую роль при производстве ядерных делящихся материалов (1946-1949 гг., совместно с Б.Г. Лазаревым) [20, 34];

- разработал физические основы современных высоковольтных электростатических и линейных ускорителей заряженных частиц на бегущей ЭМВ, позволивших создать многочисленную серию (линейку) ЛУЭ и ЛУП на энергию электронов и протонов от единиц до тысяч МэВ (1950-1960 гг., совместно с А.К. Вальтером, А.И. Ахизером, Я.Б. Файнбергом, Н.А. Хижняком и И.А. Гришаевым) [6, 15, 33];

- предложил применение глубокого вакуума для создания новых материалов с высокими физико-химическими характеристиками, что позволило впервые в СССР создать физические основы вакуумной металлургии (1950-е годы) [20, 34];

- развил физическое материаловедение в направлении получения чистых и сверхчистых металлов, ядерного топлива для реакторов и конструкционных реакторных материалов (1950-е годы) [34, 38];

- впервые построил вакуумные прокатные станы и на них провел экспериментальные исследования по прокатке бериллия, циркония, урана и других металлов, используемых в ядерной энергетике (1952-1953 гг., совместно с В.Е. Ивановым) [20, 38];

- экспериментально открыл в ФТИ АН УССР радиационный рост урана (начало 1950-х годов, совместно с В.Ф. Зеленским) [20, 34];

- провел экспериментальные исследования задач по удержанию и высокочастотному нагреву высокотемпературной плазмы в магнитных ловушках, а также по динамике в них плазменных потоков и сгустков (1960-е годы) [20, 38];

- изучил инжекцию заряженных элементарных частиц в магнитные ловушки, удерживающие высокотемпературную плазму (1960-е годы) [20, 38];

- предложил новую магнитную ловушку для удержания высокотемпературной плазмы с пространственно-периодическим магнитным полем (1960-е годы), названную «ловушкой Синельникова» [20, 38].

Кирилл Дмитриевич о себе весьма скромно говорил следующее [20]: «...*Двадцатый век создал новую профессию для ученого-физика – профессию организатора науки. Это моя профессия*». Результаты его трудовой деятельности в УФТИ, а затем и в ФТИ АН УССР красноречиво свидетельствуют о том, что он прекрасно освоил данную профессию. Свою научно-организационную работу в физико-техническом институте, который посчастливилось ему возглавлять более 20 лет (с 1944 по 1965 годы), он удачно сочетал с преподавательской работой: в период 1930-1936 гг. в Харьковском механико-машиностроительном институте (с 1950 года этот вуз вошел в состав ХПИ), а в период 1936-1966 гг. – в ХГУ [20]. В Харьковском университете за 30 лет своей работы он руководил кафедрами электронных и ионных процессов, экспериментальной физики и ускорителей [33]. Он способствовал организации в ХГУ новых специализаций, на основе которых позже были созданы кафедры физической оптики и физики плазмы [20]. Он по праву считается одним из организаторов в послевоенное время ядерного отделения на физико-математическом факультете ХГУ, а позже (в 1962 году) и его физико-технического факультета. В ХГУ сформировался «синельниковский стиль» непрерывной подготовки студентов, основанный на «интеграции научного учреждения с учебным» [33]. Заслуги проф. К.Д. Синельникова как на ниве образования, так и на поприще науки были отмечены следующими знаками отличия [34]:

- избран академиком АН УССР (1948 год);
- стал лауреатом Государственной (Сталинской) премии СССР в области науки и техники (1949 год);

- удостоен звания «Заслуженный деятель науки и техники УССР» (1951 год);

В памяти харьковчан Кирилл Дмитриевич остался не только как известный ученый-физик и прекрасный педагог высшей школы, но и как заботливый семьянин, интеллигентный и интересный собеседник. Соседские по месту его жительства дети-очевидцы запомнили нашего героя «сухопарым, седым, непрерывно курящим стариком в очках и сером костюме» [38]. В заключении отметим, что за выдающиеся работы в области физики Президентом АН УССР в 1975 году учредил премию им. К.Д. Синельникова. Умер выдающийся физик современности и наш соотечественник, академик АН УССР Кирилл Дмитриевич Синельников 16 октября 1966 года в г. Харькове [20].

**6. Портрет третий – академик Александр Ильич Лейпунский.** Третий член «высоковольтной бригады» УФТИ А.И. Лейпунский (рис. 11) родился 7 декабря 1903 года в селе Драгли (Гродненская губерния Российской империи) в семье военнослужащего [19]. В 1921 поступил на физико-механический факультет Петроградского политехнического института (ЛПИ) [19, 39].



Рис. 11. Выдающийся физик современности, д.ф.-м.н., академик АН УССР Александр Ильич Лейпунский (1903-1972 гг.), заложивший основы ядерной энергетики СССР [19]

С весны 1923 года А.И. Лейпунский одновременно с учёбой в ЛПИ начал подрабатывать в Государственном физико-техническом рентгеновском институте, преобразованном в 1931 году в ЛФТИ [39]. Обучаясь в ЛПИ, он женился на сокурснице – терской казачке Антонине Федоровне Прихотько [5] (рис. 12).

Глядя на молодую и улыбающуюся на рис. 12 чегу физиков Лейпунских, так и хочется сказать вслух чуть ни словами из известной всем нам песни: «...*Как молоды они были и как верили в себя!*». Думаю, что небезынтесным для читателя окажется тот факт, что в дальнейшем А.Ф. Прихотько стала директором Института физики АН УССР (г. Киев) и академиком АН УССР [39]. В 1926 году А.И. Лейпунский защитил в ЛПИ дипломную работу на тему «*Столкновение электронов с атомами и молекулами*» и продолжил далее трудиться в «стенах» ЛФТИ и учиться в его аспирантуре.



Рис. 12. Молодые и полные творческих сил советские физики и будущие оба академика АН УССР – А.И. Лейпунский и А.Ф. Прихотько (его жена) (1928 год, г. Ленинград) [39]

В 1930-е годы его научная деятельность была связана с УФТИ. С 1930 года он уже старший физик и одновременно заместитель директора УФТИ [19]. В 1932 году принял активное участие в известном физическом эксперименте, проведенном в УФТИ по расщеплению (разрушению) атомного ядра элемента лития  ${}^7_3\text{Li}$  и достаточно подробно описанном нами в разделе 2. Добавим к изложенному в указанном разделе то, что в день того решающего эксперимента 10 октября 1932 года в УФТИ случайно оказался известный советский физик-экспериментатор (тогда еще чл.-корр. АН СССР) и будущий лауреат Нобелевской премии по физике за 1978 год Петр Леонидович Капица [6, 18]. Своими глазами П.Л. Капица увидел, что по мере увеличения в экспериментальной ВУУ и соответственно в ЭРУТ ускоряющего протоны высокого напряжения в поле зрения микроскопа, нацеленного на литиевую пластинку (ядерную мишень), появляются многочисленные искры, свидетельствующие о распаде ядер лития [41]. С 1933 года А.И. Лейпунский становится директором УФТИ, а с 17 мая 1934 года – самым молодым действительным членом АН УССР [39]. В этот период времени в УФТИ кроме работ по созданию высоковольтных ЭСУ и ядерным исследованиям (отдел К.Д. Синельникова) активно проводились работы по физике низких температур (отдел Л.В. Шубникова) и теоретической физике (отдел Л.Д. Ландау) [17, 19]. УФТИ становится самым современным научным центром страны, который посещают известные отечественные и зарубежные физики (рис. 13).

С сентября 1935 года научные интересы А.И. Лейпунского были сосредоточены на изучении взаимодействия нейтронов с тяжелыми ядрами. Он одним из первых в бывшем СССР оценил роль открытых в 1932 году нейтронов в качестве эффективного инструментария для ядерно-физических исследований [39]. Он стал углубляться в эту ядерную проблематику и соответственно в нейтронную физику, ставшую в недалеком будущем научной основой ядерной энергетики [19]. Поэтому в 1939 году после прохождения апогея «смутного времени», связанного с арестами и «чистками» в его институте [17], когда УФТИ приступил к работам по проблеме изучения деления урана, научным

руководителем этих исследований был назначен именно А.И. Лейпунский [39]. В предвоенное время он участвует в работе Ядерной и Урановой комиссий АН СССР, подготовке и принятии первого в СССР комплексного плана НИР по проблеме урана [39].



Рис. 13. Ряд выдающихся советских физиков-теоретиков и физиков-экспериментаторов, расположившихся в сентябре 1934 года на ступеньках главного корпуса УФТИ по улице Юмовской (в первом ряду слева направо: Шубников Л.В., Лейпунский А.И., Ландау Л.Д., Капица П.Л.; во втором ряду третий слева: Синельников К.Д.; г. Харьков, УССР) [19]

В ноябре 1941 года Президиум АН УССР назначил академика А.И. Лейпунского директором Института физики АН УССР, эвакуированного в связи с войной из г. Киева на Приуралье в г. Уфу. Оставаясь директором этого института до 1949 года, он с 1944 года становится консультантом Лаборатории №2 (сейчас это РИЦ «Курчатовский институт»), а с 1946 года – членом НТС Первого главного управления при Совете Министров (СМ) СССР, руководившего тогда советской атомной наукой и техникой [39]. В 1947 году был привлечён к работам по созданию в СССР первых образцов ядерного оружия [39]. В 1949 году А.И. Лейпунский сформулировал основные физические идеи по ядерным реакторам на быстрых нейтронах. В том же году стал заведующим отдела Обнинского физико-энергетического института (ФЭИ), а с 1959 года – научным руководителем этого ФЭИ. С 1950 года становится научным руководителем советской программы создания ядерных реакторов на быстрых нейтронах [19, 39]. С 1952 года Александр Ильич возглавил в СССР работы по созданию ядерных энергетических установок (ЯЭУ) со свинцово-висмутовым теплоносителем для атомных подводных лодок [39]. С середины 1950-х годов он руководитель работ по созданию в СССР ЯЭУ для космических аппаратов. Атомные подводные лодки типа К-27 проекта 705 и космические аппараты с ЯЭУ типа «БУК» и «ТОПАЗ» составляли важную часть оборонного комплекса советской страны [19, 39]. Тогда в СССР руководители соответствующих ведомств, включая и ВПК при СМ СССР, денежных средств на достижение и сохранение паритета в ядерно-физических исследованиях, а тем более советского приоритета, не жалели.

На рис. 14 запечатлен момент участия проф. А.И. Лейпунского в одном из ядерных экспериментов [39].



Рис. 14. Момент проведения научного эксперимента на ядерном реакторе с участием проф. А.И. Лейпунского (слева) (1960-е годы, г. Обнинск, Калужской обл., Россия) [39]

Сформулируем вкратце основные научные достижения этого выдающегося советского физика, заложившего научный фундамент ядерной энергетики:

- расщепил впервые в СССР в составе «высоковольтной бригады» УФТИ атомное ядро лития  ${}^7\text{Li}$ , что послужило мощным стимулирующим научно-техническим импульсом для дальнейшего развития советской ядерной физики (1932 год, совместно с А.К. Вальтером, К.Д. Синельниковым и Г.Д. Латышевым);
- дал первое косвенное подтверждение гипотезы существования нейтрино, предсказанной в 1930 году Вольфгангом Паули, на основе измерений энергии отдачи ядер при их бета-распаде (1936 год) [39];
- на основе результатов развития ядерных исследований в предвоенные годы в УФТИ и собственных теоретических построений первым предсказал возможность осуществления цепной ядерной реакции в металлах с тяжелыми ядрами (1938-1939 гг.) [39];
- пришел к физической идее построения ядерного реактора на быстрых нейтронах и указал физические особенности цепной ядерной реакции на быстрых нейтронах в уране и тории (1946-1948 гг.) [39];
- впервые в мире предложил использование в качестве теплоносителей в первых контурах быстрых реакторов (ядерных реакторов с быстрыми нейтронами) жидких металлов (1950-е годы) [39, 42];
- исследовал большой комплекс актуальных физико-технических проблем, связанных с разработкой в СССР первых ядерных ракетных двигателей (1950-е годы, совместно с Д.И. Блохинцевым) [39, 42];
- сформулировал важнейшую задачу ядерной энергетики, связанную с оценкой нейтронного баланса в активной зоне ядерного реактора, и предложил возможные пути ее практического решения (в мировую историю ядерной физики она вошла как задача «Ферми-Лейпунского» [6, 12], 1950-е годы) [39, 42];
- под его научным руководством впервые в СССР был выполнен комплекс исследований по физике и

технике быстрых реакторов, завершившийся созданием методов расчета и постройкой ряда экспериментальных ядерных реакторов марок БР-1, БР-5 и БОР-60 на быстрых нейтронах (1960-е годы) [39, 42];

- участвовал как научный руководитель работ в разработке и создании ядерных реакторов нового поколения на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями для определенного класса советских атомных подводных лодок и космических аппаратов – спутников (1960-е годы) [39, 42];
- участвовал как научный руководитель работ в создании первенца советской промышленной ядерной энергетики на быстрых нейтронах – реактора марки БН-350, сочетающего функции энергоагрегата АЭС и опреснителя морской воды (1960-е годы) [39, 42];
- сформировал вокруг себя известную в мире Обнинскую научную школу физиков-ядерщиков [43].

Александр Ильич был прекрасным педагогом и замечательным лектором. В период 1932-1941 гг. с перерывами в работе был профессором ХММИ и ХЭТИ (в 1950 году эти вузы влились в ХПИ). С 1946 по 1960 годы работал заведующим кафедрой «Прикладной ядерной физики» (теперь она называется «Теоретической и экспериментальной физики ядерных реакторов») и деканом инженерно-физического факультета Московского механического института (ныне это всемирно известный вуз РФ – МИФИ) [19].

Страны, в которых плодотворно трудился наш ученый-физик, высоко оценили его вклад в развитие отечественной науки, техники и высшего образования, о чем может свидетельствовать то, что он был:

- избран академиком АН УССР (1934 год);
- стал лауреатом Ленинской премии (1960 год);
- стал Героем труда (1963 год);
- награжден тремя орденами Ленина (1949, 1963 и 1968 гг.); орденами Октябрьской революции (1967 год) и «Знак Почета» (1953 год);
- стал Почётным гражданином известного физикам российского г. Обнинска (1996 год, посмертно).

Работая с 1949 года в Обнинском ФЭИ, А.И. Лейпунский стал признанным в мире научным лидером в области быстрых реакторов. Александр Ильич самоотверженно отдавал себя делу, которое выбрал на всю жизнь. Этим делом была для него наука, а точнее – ядерная физика. Обладал большим научным авторитетом и организационными способностями, а также еще одним важным качеством – необыкновенным личным обаянием [42]. Окружающие его сотрудники высоко ценили культуру научного творчества, созданную им в ФЭИ. В 1996 году ГНЦ РФ «Физико-энергетический институт» было присвоено имя А.И. Лейпунского [42]. Скончался выдающийся физик-ядерщик А.И. Лейпунский 14 августа 1972 года и был похоронен на Кончаловском кладбище г. Обнинска [39]. На его похоронах легендарный советский физик-атомщик Ю.Б. Харитон (рис. 9) о своем «ушедшем» от нас навсегда друге сказал следующее [39]: «...Мы разводили цветы, а Александр Ильич сажал деревья».

**7. Портрет четвертый – академик Георгий Дмитриевич Латышев.** Четвертый член «высоковольтной бригады» УФТИ Латышев Г.Д. (рис. 15)

родился 4 февраля 1907 года в г. Бежице (Орловская губерния Российской империи) [44]. В 1929 году окончил ЛПИ и поступил на работу в ЛФТИ. В период 1930-1941 гг. трудился в УФТИ и заведовал лабораторией в отделе К.Д. Синельникова. В 1932 году стал участником эксперимента по расщеплению протонами ядра атома лития.



Рис. 15. Известный советский физик-ядерщик, д.ф.-м.н., академик АН Казахской ССР, чл.-корр. АН УССР Георгий Дмитриевич Латышев (1907-1973 гг.) [44]

Как сложилась научная судьба у Г.Д. Латышева после описанного нами в разделе 2 знаменательного ядерного эксперимента по расщеплению атомного ядра лития, проведенного в УФТИ? Его судьба сложилась спокойнее в сравнении с тремя другими членами «высоковольтной бригады» УФТИ. Доктором физико-математических наук и профессором он стал в 1940 году [45]. В период 1941-1954 гг. работал снова в ЛФТИ, поддерживая связи с ФТИ АН УССР. В 1948 году он был избран чл.-корр. АН УССР. За результаты цикла работ по атомной тематике, связанной с экспериментальными исследованиями в области физики атомного ядра, в 1949 году он стал лауреатом Государственной (Сталинской) премии СССР в области науки и техники [44, 46]. В 1958 году был направлен в г. Алма-Ату для организации там Института ядерной физики Казахской ССР. До 1965 года он был директором этого института. За время работы в Казахстане Георгий Дмитриевич был избран академиком АН КазССР [44]. Далее судьба его вновь привела на Украину и он с 1965 по 1970 год проработал в Институте физики АН УССР. С 1970 года и до конца своей жизни он занимался наукой в Институте ядерных исследований АН УССР [45]. В круг его научных интересов входила исключительно ядерная физика [44-46]: экспериментальные исследования взаимодействия гамма-излучения с веществом, ядерный магнитный резонанс, гамма-дефектоскопия и ядерная спектроскопия высокой разрешающей способности.

Научный вклад Г.Д. Латышева в отечественную сокровищницу знаний был отмечен следующими государственными и общественными знаками отличия:

- избран чл.-корр. АН УССР (1948 год);
- стал лауреатом Государственной (Сталинской) премии СССР в области науки и техники (1949 год);

- избран академиком АН КазССР (1958 год).

Умер известный советский физик Георгий Дмитриевич Латышев 3 апреля 1973 года в г. Киеве [45].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: Изд-во НТУ «ХПИ», 2009. – 384 с.
2. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: Изд-во «Точка», 2010. – 407 с.
3. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: Изд-во «Точка», 2014. – 400 с.
4. [http://fictionbook.ru/author/vladislav\\_karnacevich/100\\_znameniyih\\_harkovchan](http://fictionbook.ru/author/vladislav_karnacevich/100_znameniyih_harkovchan).
5. <http://eternaltown.com.ua/биографии/906-в/10594-вальтер-антон-карлович>.
6. Храмов Ю.А. История физики. – К.: Изд-во «Феникс», 2006. – 1176 с.
7. Баранов М.И., Веселова Н.В. Основные достижения отечественных и зарубежных научных школ в области техники высоких напряжений. Часть 2: Харьковская, Донецкая, Николаевская и некоторые зарубежные школы ТВН // История науки и техники. – 2012. – №11. – С. 13-22.
8. Greinacher H. Schaltung des hochspannungs kaskadengenerators der gleichspannung // Bulletin Schweizlerland Electrotechnik. – 1920. – №11. – S. 59-66.
9. Croft J.D., Walton E.T. Experiments with high velocity positive ions // Proceedings Royal Society. – 1932. – vol.A136. – №830. – pp. 619-630.
10. Вальтер А.К. Атака атомного ядра. – Х.: Гостехиздат УССР, 1934. – 192 с.
11. Синельников К.Д., Вальтер А.К., Гуменюк В.С. Некоторые приемы вакуумной техники // Журнал технической физики. – 1938. – №21. – С. 1908-1922.
12. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.
13. Баранов М.И., Веселова Н.В. Основные достижения Харьковской научной школы в области высоковольтной ускорительной техники // История науки и техники. – 2013. – №11. – С. 51-63.
14. <http://www.kipt.kharkov.ua>.
15. Айзацкий Н.И., Аркатов Ю.М., Бомко В.А. и др. Харьковский физико-технический институт – колыбель ядерной физики и ускорителей заряженных частиц в СССР. К 70-летию расщепления атомного ядра (1932-2002 гг.) / Под ред. проф. А.Н. Довбни. – Х.: ННЦ «ХФТИ», 2002. – 43 с.
16. Таньшина А.В. Основатели Харьковских научных школ в физике. Учеб. пособие по истории физики. Ч.1. – Х.: ХГУ, 2002. – 512 с.
17. Павленко Ю.В., Ранюк Ю.Н., Храмов Ю.А. «Дело» УФТИ. 1935-1938. – К.: Феникс, 1998. – 324 с.
18. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Х.: Изд-во НТУ «ХПИ», 2008. – 252 с.
19. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Лейпунский\\_Александр\\_Ильич](https://ru.wikipedia.org/wiki/Лейпунский_Александр_Ильич).
20. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Синельников\\_Кирилл\\_Дмитриевич](https://ru.wikipedia.org/wiki/Синельников_Кирилл_Дмитриевич).
21. Коган В.С. «До» и «После». – Х.: ННЦ «ХФТИ», 2004. – 97 с.
22. Ранюк Ю.Н., Шевченко О.С. Лаборатория № 1 и Атомный проект СССР. Документы и материалы (1938-1956 гг.) / Под ред. проф. А.Н. Довбни. – Х.: ННЦ «ХФТИ», 2011. – 370 с.
23. [http://pavlonews.info/news/categ\\_16/624.html](http://pavlonews.info/news/categ_16/624.html).
24. Довбня А.Н., Егоров А.М., Ранюк Ю.Н. и др. К пятидесятилетию запуска первого линейного ускорителя электронов в ННЦ «ХФТИ» // Вопросы атомной науки и техники. – 2001. – №3. – С. 3-5.

25. <http://kharkov.vbelous.net/politex1/walter.htm>.
26. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Вальтер, Антон Карлович](https://ru.wikipedia.org/wiki/Вальтер,_Антон_Карлович).
27. Электростатические генераторы / Сборник статей под ред. А.К. Вальтера. – М.: Гостехиздат, 1959. – 255 с.
28. Айзацкий Н.И., Довбня А.Н., Митроченко В.В. Разработка ускоряющих секций для линейных ускорителей электронов // Вопросы атомной науки и техники. – 1999. – №1. – С. 80-84.
29. Власов В.В., Залюбовский И.И., Сафроний В.В. Академик Антон Карлович Вальтер – педагог и учитель (к 100-летию со дня рождения) // Universitates. Наука и просвещение. – 2006. – №4(28). – С. 72.
30. Бржезицкий В.О., Исакова А.В., Рудаков В.В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В.О. Бржезицкого, В.М. Михайлова. – Х.: НТУ «ХПІ». – Торнадо, 2005. – 930 с.
31. Вальтер А.К., Залюбовский И.И. Ядерная физика: Учебник. – Х.: ХГУ, 1963. – 423 с.
32. Храмов Ю.А. Вальтер Антон Карлович // Физики: Биографический справочник / Под ред. А.И. Ахиезера. – М.: Наука, 1983. – 400 с.
33. [http://www-nuclear.univer.kharkov.ua/russ/p01\\_2\\_94.htm](http://www-nuclear.univer.kharkov.ua/russ/p01_2_94.htm).
34. Храмов Ю.А. Синельников Кирилл Дмитриевич // Физики: Биографический справочник / Под ред. А.И. Ахиезера. – М.: Наука, 1983. – 400 с.
35. Вальтер А.К., Синельников К.Д. Электростатические генераторы постоянного высокого напряжения // Журнал технической физики. – 1936. – Т.6. – №1. – С. 715-725.
36. Вальтер А.К., Латышев Г.Д., Синельников К.Д. и др. Высоковольтная разрядная трубка на 3000000 вольт // Журнал технической физики. – 1938. – Т.8. – №11. – С. 985-993.
37. Вальтер А.К., Латышев Г.Д., Синельников К.Д. и др. Поглощение быстрых электронов в литии, углеороде, алюминии, меди и свинце // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1939. – Т.9. – №2. – С. 127-142.
38. <http://100v.com.ua/ru/Sinelnikov-Kirill-Dmitrievich-person>.
39. <http://iobninsk.ru/aleksandr-ilyich-leypunskiy>.
40. Храмов Ю.А. Лейпунский Александр Ильич // Физики: Биографический справочник / Под ред. А.И. Ахиезера. – М.: Наука, 1983. – 400 с.
41. <http://kharkovchanin.kh.ua>.
42. [http://www.warheroes.ru/hero/hero.asp?Hero\\_id=15500](http://www.warheroes.ru/hero/hero.asp?Hero_id=15500).
43. Горобец Б.С. Секретные физики из Атомного проекта СССР: Семья Лейпунских. – М.: Эдиториал, 2009. – 312 с.
44. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Латышев, Георгий Дмитриевич](https://ru.wikipedia.org/wiki/Латышев,_Георгий_Дмитриевич).
45. Храмов Ю.А. Латышев Георгий Дмитриевич // Физики: Биографический справочник / Под ред. А.И. Ахиезера. – М.: Наука, 1983. – 400 с.
46. <http://www.puteshestvie32.ru/content/latyshev>.

#### REFERENCES

1. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 2, Kn. 1: Teorija elektrofizicheskikh effektorov i zadach* [Selected topics of Electrophysics: Monograph in 2 vols. Vol. 2, book 1: Theory of electrophysics effects and tasks]. Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2009. 384 p. (Rus).
2. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 2, Kn. 2: Teorija elektrofizicheskikh effektorov i zadach* [Selected topics of Electrophysics: Monograph in 2 vols. Vol. 2, book 2: Theory of electrophysics effects and tasks]. Kharkov, «Tochka» Publ., 2010. 407 p. (Rus).
3. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki. Tom 3: Teorija i praktika elektrofizicheskikh zadach* [Selected topics of Electrophysics. Vol. 3: Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkov, «Tochka» Publ., 2014. 400 p. (Rus).
4. Available at: [http://fictionbook.ru/author/vladislav\\_karnacevich/100\\_znameniy-harkovchan](http://fictionbook.ru/author/vladislav_karnacevich/100_znameniy-harkovchan) (accessed 18 September 2013). (Rus).

5. Available at: <http://eternaltown.com.ua/биографии/906-в/10594-вальтер-антон-карлович> (accessed 10 April 2014). (Rus).
6. Khramov Yu.A. *Istoriia fiziki* [History of Physics]. Kiev, Feniks Publ., 2006. 1176 p. (Rus).
7. Baranov M.I., Veselova N.V. Basic achievements of domestic and foreign scientific schools in area of technique of high voltage. Part 2: Kharkov, Donetsk, Nikolaev and some foreign schools THV. *Istoriia nauki i tehniki – History of Science and Engineering*, 2012, no.11, pp.13-22. (Rus).
8. Greinacher H. Schaltung des hochspannungs kaskadengenerators der gleichspannung. *Bulleten Switzerland Electrotechnik*, 1920, no.11, pp. 59-66. (Ger).
9. Cocroft J.D., Walton E.T. Experiments with high velocity positive ions. *Proceedings Royal Society*, 1932, vol.A136, no.830, pp. 619-630.
10. Walter A.K. *Ataka atomnogo jadra* [Attack atomic kernel]. Kharkov, Gostekhizdat Ukrainian SSR, 1934. 192 p. (Rus).
11. Sinelnikov K.D., Walter A.K., Gumenyuk V.S. Some methods of vacuum technique. *Zhurnal tehnichejskoj fiziki – Journal Technical Physics*, 1938, no.21, pp. 1908-1922. (Rus).
12. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).
13. Baranov M.I., Veselova N.V. The main achievements of the Kharkov scientific school in the field of high-voltage accelerator technique. *Istoriia nauki i tehniki – History of Science and Engineering*, 2013, no.11, pp.51-63. (Rus).
14. Available at: <http://www.kipt.kharkov.ua> (accessed 10 April 2014). (Rus).
15. Ayzatskiy N.I., Arkatov Y.M., Bomco V.A. *Har'kovskij fiziko-tehnichejskij institute – kolybel' jadernojs fiziki i uskoritelej zarjzhennyh chastic v SSSR. K 70-letiju rassheplenija atomnogo jadra (1932-2002 gg.)* / Pod red. prof. A.N. Dovbni [Kharkov Physic-Technical Institute – a cradle of nuclear physics and particle accelerators in the USSR. On the 70-th anniversary of the nuclear kernel (1932-2002 yy.) / Edited by prof. A.N. Dovbnya]. Kharkov, NSC «KhPTI» Publ., 2002. 43 p. (Rus).
16. Tanshina A.V. *Osnovately Har'kovskih nauchnyh shkol v fizike. Ucheb. posobie po istorii fiziki. Ch.1* [Founders of the Kharkov scientific Schools in Physics. History of Physics Textbook. Part 1]. Kharkov, KhSU Publ., 2002. 512 p. (Rus).
17. Pavlenko Yu.V., Ranjuk Yu.N., Khramov Yu.A. «Delo» UFTI. 1935-1938 [«Case» of UPhTI. 1935-1938]. Kiev, Feniks Publ., 1998. 324 p. (Rus).
18. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 1: Elektrofizika i vydajushiesja fiziki mira* [Selected topics electrophysics: Monographs in 2 vols. Vol.1: Electrophysics and outstanding physics of the world]. Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2008. 252 p. (Rus).
19. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Лейпунский, Александр Ильич](https://ru.wikipedia.org/wiki/Лейпунский,_Александр_Ильич). (accessed 12 May 2011). (Rus).
20. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Синельников, Кирилл Дмитриевич](https://ru.wikipedia.org/wiki/Синельников,_Кирилл_Дмитриевич) (accessed 23 July 2013). (Rus).
21. Kogan V.S. «Do» i «Posle» [«Before» and «After»]. Kharkov, NSC «KhPTI» Publ., 2004. 97 p. (Rus).
22. Ranyuk Y.N., Shevchenko O.S. *Laboratorija № 1 i Atomnyj proekt SSSR. Dokumenty i materialy (1938-1956 gg.)* / Pod red. prof. A.N. Dovbni [Laboratory no.1 and USSR Atomic Project. Documents and materials (1938-1956 yy.) / Edited by prof. A.N. Dovbnya]. Kharkov, NSC «KhPTI» Publ., 2011. 370 p. (Rus).
23. Available at: [http://pavlonews.info/news/categ\\_16/624.html](http://pavlonews.info/news/categ_16/624.html). (accessed 06 April 2002). (Rus).
24. Dovbnya A.N., Egorov A.M., Ranyuk Yu.N. On the 50th anniversary of launching the first linear electrons accelerator in the NSC «KhPTI». *Voprosy atomnoj nauki i tehniki – Problems of Atomic Science and Technique*, 2001, no.3, pp.3-5. (Rus).
25. Available at: <http://kharkov.vbelous.net/politex1/walter.htm> (accessed 21 May 2012). (Rus).
26. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Вальтер, Антон Карлович](https://ru.wikipedia.org/wiki/Вальтер,_Антон_Карлович) (accessed 11 April 2013). (Rus).

27. Valter A.K. *Elektrostaticheskie generatory / Sbornik statej pod red. A.K. Val'tera* [Electrostatic generators / Collection of articles]. Moscow, Gostehizdat Publ., 1959. 255 p. (Rus).
28. Ayzatskiy N.I., Dovbnya A.N., Mitrochenko V.V. Development of accelerating sections for linear electrons accelerators. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki – Problems of Atomic Science and Technique*, 1999, no.1, pp.80-84. (Rus).
29. Vlasov V.V., Zaljubovskiy I.I., Safroniy V.V. Academician Anton Karlovich Walter – pedagog and teacher (to 100th anniversary of his birth). *Universitates. Nauka i prosveshhenie – Universitates. Science and education*, 2006, no.4 (28), p.72. (Rus).
30. Brzhezitskiy V.A., Isakova A.V., Rudakov V.V. *Tekhnika i elektrofizyka vysokikh napruhv* [Technics and Electrophysics of High Voltages]. Kharkov, Tornado Publ., 2005. 930 p. (Rus).
31. Walter A.K., Zalyubovskiy I.I. *Jadernaja fizika: Uchebnik* [Nuclear Physics: Textbook]. Kharkov, KhSU Publ., 1963. 423 p. (Rus).
32. Khramov Yu.A. *Val'ter Anton Karlovich. Fiziki: Biograficheskij spravocnik / Pod red. A.I. Ahieзера* [Walter Anton Karlovich. Physics: Biographical Directory. Edited by A.I. Ahiezer]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 400 p. (Rus).
33. Available at: [http://www-nuclear.univer.kharkov.ua/russ/p01\\_2\\_94.htm](http://www-nuclear.univer.kharkov.ua/russ/p01_2_94.htm) (accessed 18 September 2013). (Rus).
34. Khramov Yu.A. *Sinel'nikov Kirill Dmitrievich. Fiziki: Biograficheskij spravocnik / Pod red. A.I. Ahieзера* [Sinelnikov Kirill Dmitrievich. Physics: Biographical Directory. Edited by A.I. Ahiezer]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 400 p. (Rus).
35. Walter A.K., Sinelnikov K.D. Electrostatic generators of constant high voltage. *Zhurnal tehnichekoj fiziki – Journal Technical Physics*, 1936, vol.6, no.1, pp.715-725. (Rus).
36. Walter A.K., Latyshev G.D., Sinelnikov K.D. High voltage discharge tube at 3000000 volts. *Zhurnal tehnichekoj fiziki – Journal Technical Physics*, 1938, vol.8, no.11, pp.985-993. (Rus).
37. Walter A.K., Latyshev G.D., Sinelnikov K.D. Absorption of fast electrons in lithium, carbon, aluminum, copper and lead. *Zhurnal tehnichekoj fiziki – Journal Technical Physics*, 1939, vol.9, no.2, pp.127-142. (Rus).
38. Available at: <http://100v.com.ua/ru/Sinelnikov-Kirill-Dmitrievich-person> (accessed 02 May 2011). (Rus).
39. Available at: <http://iobninsk.ru/aleksandr-ilyich-leypunskiy> (accessed 11 August 2013). (Rus).
40. Khramov Yu.A. *Leypunskij Aleksandr Il'ich. Fiziki: Biograficheskij spravocnik / Pod red. A.I. Ahieзера* [Leypunskiy Alexander Ilyich. Physics: Biographical Directory. Edited by A.I. Ahiezer]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 400 p. (Rus).
41. Available at: <http://kharkovchanin.kh.ua> (accessed 11 May 2014). (Rus).
42. Available at: [http://www.warheroes.ru/hero/hero.asp?Hero\\_id=15500](http://www.warheroes.ru/hero/hero.asp?Hero_id=15500) (accessed 20 August 2012). (Rus).
43. Gorobets B.S. *Sekretnye fiziki iz Atomnogo proekta SSSR: Sem'ja Leypunskih* [Secret Physics of the Soviet Atomic Project: Family of Leypunskiy]. Moscow, Editorial Publ., 2009. 312 p. (Rus).
44. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Латышев,\\_Георгий\\_Дмитриевич](https://ru.wikipedia.org/wiki/Латышев,_Георгий_Дмитриевич) (accessed 12 March 2014). (Rus).
45. Khramov Yu.A. *Latyshev Georgij Dmitrievich. Fiziki: Biograficheskij spravocnik / Pod red. A.I. Ahieзера* [Latyshev George Dmitrievich. Physics: Biographical Directory. Edited by A.I. Ahiezer]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 400 p. (Rus).
46. Available at: <http://www.puteshestvie32.ru/content/latyshev> (accessed 20 September 2011). (Rus).

Поступила (received) 29.04.2015

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

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

**An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 28: Portraits of legendary physicists of «high-voltage brigade» of UPhTI.**

**Purpose.** Description of the basic distinguished scientific achievements of members of «high-voltage brigade» of the Ukrainian Physical-Technical Institute (UPhTI) and future Academicians in area of nuclear physics – Valter A.C., Sinelnikov C.D., Leypunskiy A.I. and Latyshev G.D. **Methodology.** Scientific approaches at treatment and systematization of physical knowledges. Historical method at research of development in Ukraine and Russia of nuclear physics and mastering of intranuclear energy for military and peaceful aims. **Results.** The basic creative and vital stages, and also prominent scientific results, obtained by the indicated scientists in the area of nuclear physics, physics of high energies and nuclear energy, are resulted in the compressed and systematized way. Some technical descriptions created by these Kharkov physicists of powerful high-voltage electrostatic and linear dynamitrons and protons, and also nuclear reactors fast-neutron are indicated. **Originality.** Firstly in the area of history of scientific-technological authoritative enough scientist-electro-physicist, which is engaged not alone ten of years by creation of powerful generators of very high voltage and large currents, and also presents a theoretical electrophysics a wide reader a scientifically-historical essay with not popular details about the first in the USSR breaking up the physicists of UPhTI of atomic kernel of lithium by artificially speed-up protons. Firstly the basic distinguished scientific achievements of the considered physicists-nuclear engineers are resulted in the concentrated way. **Practical value.** Scientific popularization of physical knowledges and achievements of the known compatriots, bringing in a big contribution to development of nuclear physics, physicists of high energies and nuclear energy. References 46, figures 15.

**Key words:** history, nuclear physics, physics of high energies, nuclear energy, Kharkov physicists-nuclear engineers, distinguished scientific achievements.

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ СИСТЕМ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМИ ВТОРИЧНЫМИ ОБМОТКАМИ В ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПОСТАНОВКЕ

*У статті аналізуються проблема, пов'язана з питаннями коректного завдання первинних джерел струмів і помилок у визначенні параметрів вторинних короткозамкнених контурів при вирішенні задач плоскопараллельного поля. Наводяться фізичний і математичний аналіз помилки та запропоновано спосіб вирішення подібних завдань на прикладі розрахунку трансформатора струму і електромагніту змінного струму. Бібл. 3, рис. 11.*

*Ключові слова:* плоскопараллельне магнітне поле, граничні умови.

*В статье анализируются проблема, связанная с вопросами корректного задания первичных источников токов и ошибок в определении параметров вторичных короткозамкнутых контуров при решении задач плоскопараллельного поля. Приводятся физический и математический анализ ошибки и предложен способ решения подобных задач на примере расчета трансформатора тока и электромагнита переменного тока. Библ. 3, рис. 11.*

*Ключевые слова:* плоскопараллельное магнитное поле, граничные условия.

**Введение и постановка проблемы.** В практике расчетов магнитных систем электрических аппаратов довольно часто встречаются задачи, в которых присутствуют вторичные короткозамкнутые обмотки (например, трансформаторы тока, электромагниты с короткозамкнутыми витками и пр.). Подобные задачи часто решают в плоскопараллельной постановке. При этом корректность решения таких задач сильно зависит от способа задания первичных источников поля и способа задания граничных условий. Так как реальные магнитные системы электрических аппаратов не являются двухмерными, то любая плоскопараллельная постановка задачи будет в той или иной мере приближенной, а некорректное задание первичных источников и граничных условий увеличивает погрешность полученных результатов.

Например, при расчетах магнитных систем трансформаторов тока иногда и первичная, и вторичная обмотки рассматриваются как бесконечные проводники [1], как это показано на рис. 1.

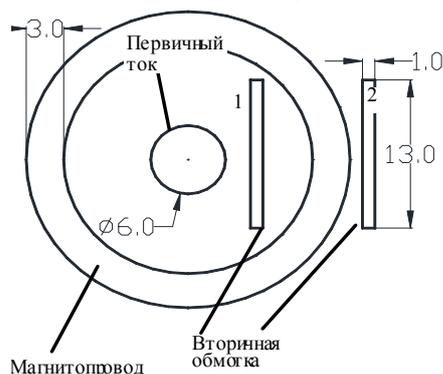


Рис. 1. Расчетная схема: 1, 2 – проводники вторичной катушки (все размеры указаны в мм)

Ошибка такой расчетной схемы заключается в способе задания контура первичного тока, который состоит из одного бесконечного провода. Ток провода задается в соответствии с условиями задачи и должен определяться параметрами источника и нагрузки.

Из физических соображений понятно, что ток в такой системе (рис. 1) протекать не будет по причине отсутствия обратного провода, но задача может быть решена в программе, например в [2]. Рассмотрим, что из этого следует.

Исходными данными расчета являются:

- ток первичной цепи;
- материал магнитопровода;
- материал плоских шин, имитирующих вторичную обмотку трансформатора;
- свойства окружающей среды;
- граничные условия.

Решение задачи может быть получено методом конечных элементов при помощи программы Femm [2].

Для получения однозначного решения задача (рис. 1) должна быть дополнена внешней границей, на которой задается одно из граничных условий:

- нулевое значение векторного магнитного потенциала на достаточно удаленной границе;
- имитация бесконечно удаленной границы заданием некоторого значения векторного магнитного потенциала;
- имитация бесконечной границы с помощью преобразования Кельвина, как указано в [2].

В расчете первичный ток принимался равным 100 А при частоте 50 Гц в квазистационарном приближении. Магнитопровод – шихтованная электротехническая сталь с толщиной пластин 0,15 мм и нелинейной характеристикой намагничивания.

При любом из указанных выше граничных условий расчет показывает, что токи первого и второго проводника вторичной обмотки неодинаковы и равны  $-99,5 - j \cdot 3,0$  А для первого и  $-0,11 + j \cdot 0,002$  А для второго проводников (рис. 1).

Но такого быть не должно, так как проводники являются частями одной вторичной обмотки и должны обтекаться одним током.

**Математическая постановка задачи.** Проанализируем задачу [1].

Уравнение для векторного магнитного потенциала для плоскопараллельного поля [3] запишется:

$$\frac{\partial^2 A_z(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z(x, y)}{\partial y^2} = -\mu \cdot \delta_z(x, y), \quad (1)$$

где  $A_z$  – векторный магнитный потенциал;  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $\delta_z$  – плотность тока.

Решение уравнения (1) при низких частотах для точки  $z = 0$  можно записать [3]:

$$A_z(x, y) = \lim_{L \rightarrow \infty} \left( \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \cdot \int_V \frac{\delta_z(x_0, y_0, z_0)}{r} \cdot dV_0 \right), \quad (2)$$

где  $x_0, y_0, z_0$  – координаты нити с плотностью тока  $\delta_z(x_0, y_0, z_0)$ ;  $V_0$  – объем проводника с плотностью тока  $\delta_z(x_0, y_0, z_0)$ ;  $L$  – длина проводника с током;  $r$  – расстояние от нити с плотностью тока  $\delta_z(x_0, y_0, z_0)$  до точки вычисления поля с координатами  $x, y$ .

Интегрирование уравнения (2) приводит к результату [3]:

$$A_z(x, y) = \frac{\mu}{2 \cdot \pi} \cdot \int_S \frac{\delta_z(x_0, y_0)}{r} \cdot dS_0 + \lim_{L \rightarrow \infty} C, \quad (3)$$

где при больших значениях  $L$ :

$$\lim_{L \rightarrow \infty} C = \frac{\mu}{2 \cdot \pi} \cdot \Sigma i \cdot \ln(L). \quad (4)$$

Если полный ток ( $\Sigma i$ ), протекающий сквозь сечение всех проводников, отличен от нуля, то значение векторного магнитного потенциала в бесконечно удаленной точке не равно нулю и принимать его таковым нельзя.

Очевидно, что во всех практических расчетах должно выполняться условие:

$$\Sigma i = 0. \quad (5)$$

Следовательно, для получения правильных расчетных данных при решении задач плоскопараллельного магнитного поля методом конечных элементов необходим учет обратного провода (т.е. выполнение условия (5)) и соответствующая формулировка граничных условий.

**Цель статьи** – исследование особенностей, возникающих в задачах расчета плоскопараллельного поля в электрических аппаратах с короткозамкнутыми вторичными контурами.

Учет обратного провода и выполнение условия (5) моделируется с помощью преобразования Кельвина, которое отображает внешнее пространство на внутреннюю область второй окружности (рис. 2).

Расчеты проведенные по предложенной модели показывают что алгебраическая сумма токов вторичной обмотки практически равна нулю (абсолютная ошибка имеет порядок  $10^{-6}$  А при токе в 100 А).

При некорректной физической постановке задачи ток в проводнике 1 вторичной обмотки (как указывалось ранее) имеет практически правильное значение:  $-99,5 - j \cdot 3,0$  А. Причина этого заключается в том, что в основе метода конечных элементов лежит минимизация функционала энергии поля, т.е. фундаментальный физический закон, на основании которого система пытается исправить физическую некорректность задачи (отсутствие обратного провода) путем «подбора» значений токов вторичного контура.

Картинки магнитного поля для рассмотренных вариантов при одинаковом первичном токе показаны на рис. 3.

Значимость задания граничных условий и корректность постановки задачи в плоскопараллельных полях можно проиллюстрировать на примере расчета

Ш-образного электромагнита переменного тока, половина которого показана на рис. 4 (все размеры приведены в мм).

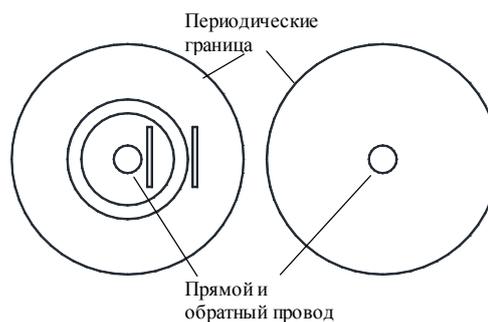


Рис. 2. Расчетная модель

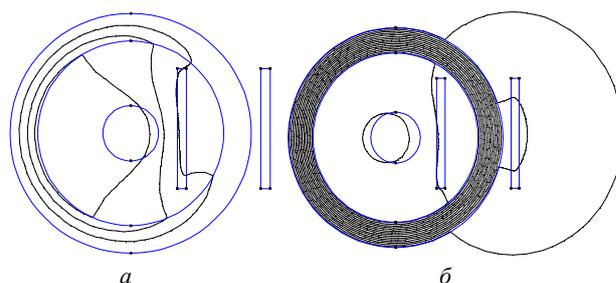


Рис. 3. Картина поля для некорректного (а) и корректного (б) вариантов расчета

Граничные условия:  $A = 0$  на границе симметрии и ряд условий, описанных ниже, на внешней границе. Частота сети равна 50 Гц, короткозамкнутые витки 2 охватывают часть боковых стержней магнитопровода.

Размеры рассчитываемого магнита были сняты с реального магнита, стоящего на лабораторном стенде.

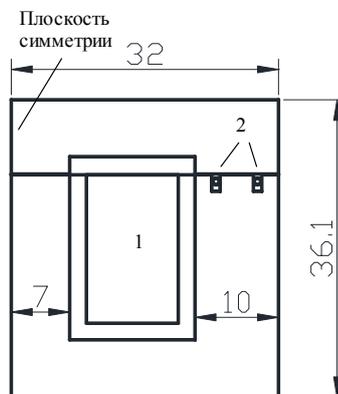


Рис. 4. Размеры электромагнита переменного тока с короткозамкнутыми витками на крайних стержнях: 1 – катушка; 2 – короткозамкнутые витки; глубина магнита – 18 мм

Расчет проводился для шихтованного магнитопровода в квазистационарном режиме, МДС катушки – 400 А.

Результаты расчета при любых внешних граничных условиях (за исключением, естественно, границы симметрии) – ноль поля на удаленной границе, имитация бесконечного пространства, задание значения потенциала на удаленной границе, и т.п. показывают: алгебраическая сумма токов в короткозамкнутом витке не равна нулю. Результат расчета тока в витке будет аналогичным и при решении задачи для всей конструкции магнита в целом.

Расчетные значения токов в разных частях одного витка:

- внутренняя часть  $(-48,6-j\cdot 86,7)$  А;
- внешняя часть витка  $(-24-j\cdot 22,5)$  А.

Более того, расчет дает неправильную картину поля, показанную на рис. 5 (полос, охваченный короткозамкнутым витком).

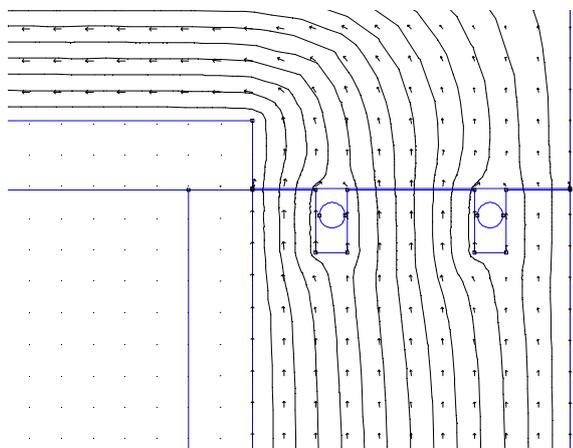


Рис. 5. Поле расщепленного полюса магнита

Из рис. 5 следует, что потоки в неэкранированных частях неодинаковы. На рис. 6. показана картина нормальной составляющей магнитной индукции под расщепленным полюсом.

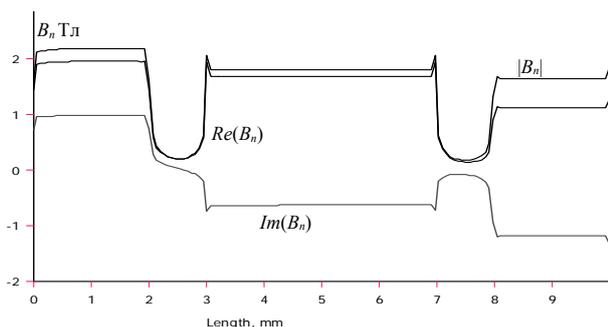


Рис. 6. Нормальная составляющая индукции под расщепленным полюсом по его длине

Как следует из рис. 6, в неэкранированных частях полюса векторы индукции имеют различные значения, направления и различный сдвиг по фазе. Электромагнитная сила, действующая на якорь, пульсирует с двойной частотой в пределах  $(41,1...356)$  Н, что недопустимо. Полученные значения подтверждают вывод о физической некорректности полученного решения задачи в плоскопараллельном поле методом конечных элементов в данной постановке.

Однако с математической точки зрения задача решена правильно. Если предположить, что среда однородна, а расстояния до точки наблюдения велико по сравнению с размерами сечения проводника, то уравнение (2) можно записать:

$$A_z(Q) = \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \cdot \int_L \frac{i(M) \cdot dz_M}{r_{QM}}, \quad (6)$$

где  $r_{QM}$  – расстояние от нити с током до точки наблюдения.

Из (4) следует: если точки, в которых вычисляется значение магнитного потенциала, находятся на

разных расстояниях от нити с током, то значения векторного потенциала в них разные. Следовательно, программа решает задачу правильно с математической точки зрения в рамках специфических условия плоскопараллельного поля.

В связи с этим была предпринята попытка добиться равенства токов в прямой и обратной ветви короткозамкнутого (кз) витка при помощи задания антисимметричных условий на их поверхностях. В результате расчетов равенство токов было получено. Но:

- значения токов в кз витке получились небольшими (порядка 40 А) и не обеспечивают требуемый сдвиг потоков в экранированной и неэкранированной частях полюса;
- картина магнитного потока в расщепленной части полюса не соответствует реальной картине поля (рис. 7);
- пульсация электромагнитной силы велика и не может обеспечить нормальную работу электромагнита  $(4,1...367)$  Н.

Следовательно, такой электромагнит работать не будет. Тем не менее, указанный электромагнит уже много лет используется при проведении лабораторных занятий и за все годы работы ни разу не выходил из строя.

Из чего можно сделать вывод: *специфика задачи плоскопараллельного поля в указанной выше постановке не позволяет получить правильные результаты расчета токов в кз витке.*

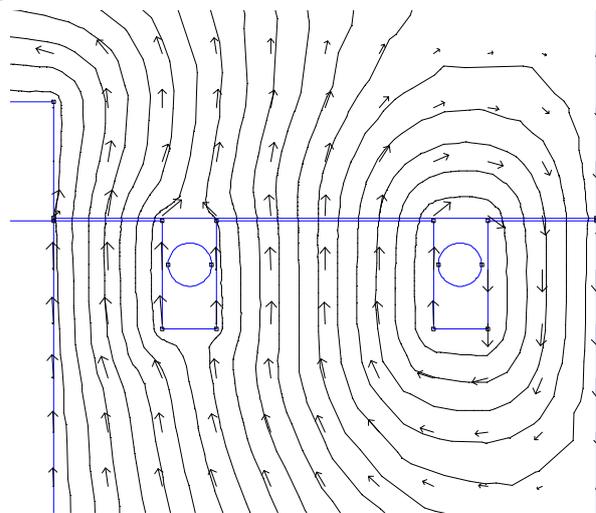


Рис. 7. Картина поля в расщепленной части полюса

Но расчеты электромагнитов переменного тока достаточно важны. Поэтому автором статьи предлагается следующая, не бесспорная, методика расчета электромагнита переменного тока методом конечных элементов в квазистационарном режиме. Предложенную методику можно и нужно критиковать, если имеются на то основания.

В качестве исходных положений примем следующее:

- программа правильно рассчитывает значения векторного магнитного потенциала, в том числе и внутри проводников кз витка;
- значения токов в ветвях кз витка должны быть одинаковыми и направленными противоположно, т.е. суммарный ток витка равен нулю.

Ожидаемые результаты:

- значения магнитных индукций и потоков одинаковы в неэкранированных частях полюса (размеры одинаковы);
- поток в экранированной части полюса отстает по фазе от потоков в неэкранированных частях;
- пульсации электромагнитной силы должны быть такими, чтобы обеспечивать нормальную работу электромагнита в притянутом положении якоря.

Дальнейшие рассуждения основаны на следующем.

Предположим, что в левом и правом проводниках кз витка усредненные комплексные значения векторного магнитного потенциала соответственно равны  $\dot{A}_z(Ql)$  и  $\dot{A}_z(Qp)$  и представляют собой поток на единицу длины. На основании второго уравнения Максвелла и условия  $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$  при отсутствии движения проводника и стороннего источника энергии, можно записать известное соотношение:

$$E_z = -\partial A_z / \partial t, \quad (7)$$

где  $E_z$  – вектор напряженности электрического поля;  $-\partial \vec{A} / \partial t$  – наведенное электрическое поле;  $A_z$  – векторный магнитный потенциал.

Вектор напряженности электрического поля в каждом проводнике кз витка с учетом квазистационарности процесса будет:

$$\begin{aligned} \dot{E}_z(Ql) &= -j \cdot \omega \cdot \dot{A}_z(Ql) \\ \dot{E}_z(Qp) &= -j \cdot \omega \cdot \dot{A}_z(Qp) \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\omega$  – круговая частота.

Так как проводники кз витка замкнуты, а проводник – линейная структура, то суммарная напряженность электрического поля будет являться алгебраической суммой напряженностей с учетом направления обхода контура:

$$\dot{E} = \dot{E}_z(Ql) + \dot{E}_z(Qp). \quad (9)$$

Согласно закону Ома дифференциальной форме:

$$\dot{\delta}_z = \sigma \cdot \dot{E}_z, \quad (10)$$

где  $\dot{\delta}_z$  – плотность тока в проводнике;  $\sigma$  – удельная проводимость материала;  $\dot{E}_z$  – суммарная напряженность электрического поля.

Или

$$\dot{\delta}_z = \sigma \cdot (\dot{E}_z(Ql) + \dot{E}_z(Qp)). \quad (11)$$

Ток витка

$$Tok = \int_S \dot{\delta}_z \cdot dS. \quad (12)$$

В этом случае алгоритм решения задачи может быть следующим:

1. Задаем материал кз витка (медь) и проводим расчет задачи плоскопараллельного поля в квазистационарном режиме.
2. Определяем суммарный ток в проводниках кз витка интегрированием по левой и правой областям, определяя суммарный ток.
3. Полученное значение тока заносим в исходные данные, как сторонний ток ( $Tok_{kz}$ ).
4. Устанавливаем свойства областей кз витка – воздух.

5. Задаем ток кз витка, равный суммарному току ветвей ( $Tok_{kz}$ ) с определенным чередованием знаков, зависящим от направления тока в катушке: – плюс  $i\omega$ ; – минус  $Tok_{kz}$ ; – плюс  $Tok_{kz}$  в соответствии с физическим направлением потоков.

Изменение материала кз витка на непроводник необходимо для устранения наведенных токов, которые появляются в проводнике при протекании по нему стороннего тока.

По приведенной методике был проведен расчет электромагнита (рис. 4), показанный на рис.8.

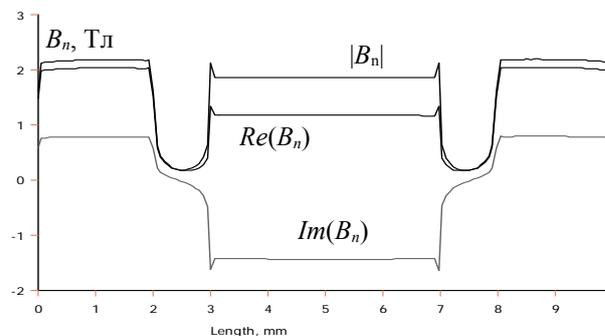


Рис. 8. Картина поля в расщепленной части по длине полюса

Как следует из рис. 8, картина поля в расщепленной части полюса соответствует физике процесса: равенство потоков в неэкранированных частях и отставание потока в экранированной части.

На рис. 9 показаны временные графики потоков в экранированной и неэкранированной части полюса в установившемся режиме.

Угол сдвига между потоками равен 71 электрическому градусу, что вполне соответствует реальным значениям (40...80)° с учетом того, что зазор между якорем и сердечником был принят равным 0,05 мм (шлифованные поверхности).

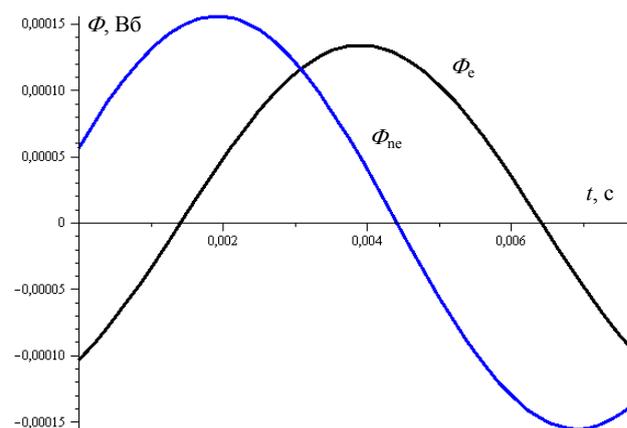


Рис. 9. Потоки в расщепленном полюсе

На рис. 10 приведен график электромагнитной силы в установившемся режиме.

Как следует из рис. 10, пульсация электромагнитной силы существует, как и в реальных магнитах. Максимальное значение силы – 354 Н; минимальное – 78 Н. Необходимо отметить, что пульсацию силы в данной задаче можно значительно уменьшить, увеличив сечение кз витка, что несколько увеличит его ток.

В конце необходимо отметить, если кз виток расположен на центральном стержне магнита и симметричен относительно плоскости симметрии (рис. 4), то все обозначенные выше проблемы с несимметричностью токов отпадают. На рис. 11 показана расчетная картина поля для этого случая. Стрелки показывают действительную и мнимую составляющую магнитной индукции. Электромагнитная сила при этом изменяется в диапазоне (70,5...305) Н.

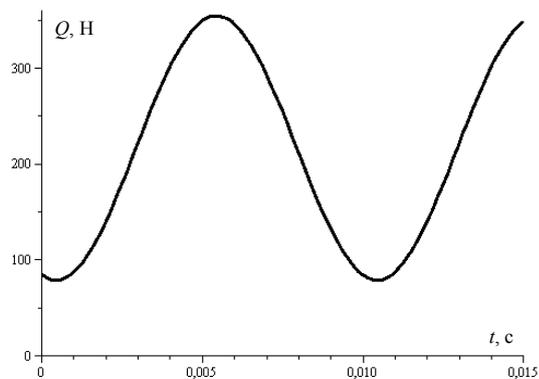


Рис. 10. Электромагнитная сила, действующая на якорь

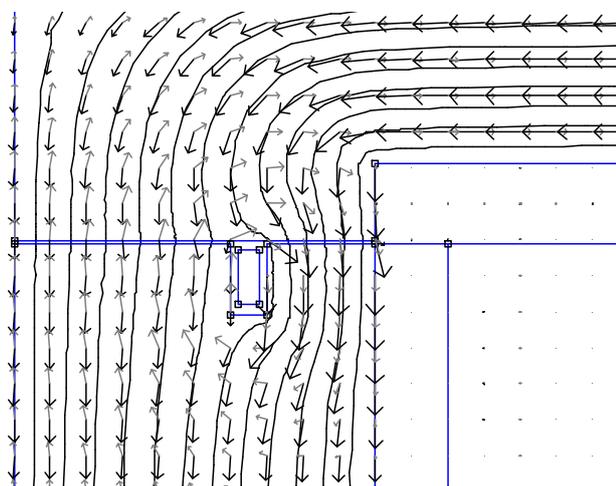


Рис. 11. Картина поля расщепленного полюса магнита с указанием направления действительной и мнимой составляющих магнитной индукции

#### Выводы.

1. В связи со спецификой задач плоскопараллельного поля (неограниченность объема занимаемого током), требуется определенный подход к выбору граничных условий, которые должны соответствовать физике процесса.

2. При наличии замкнутых вторичных контуров, решение задачи плоскопараллельного поля методом конечных элементов дает для наведенных токов неправильный результат ввиду того, что метод принципиально не учитывает замкнутость контура.

3. Предложен метод, позволяющий обойти указанные выше ограничения и получить результат соответствующий физике процесса.

4. Угол сдвига потоков в расщепленной части полюса практически не зависит от значения МДС.

5. Уменьшить пульсацию силы можно увеличением сечения кз витка и выравнивание амплитуд потоков в расщепленном полюсе, что известно и подтверждается проведенными расчетами.

6. Симметричное расположение кз витка на центральном полюсе электромагнита значительно упрощает методику расчета плоскопараллельного поля магнита в квазистационарном режиме.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клименко К.А. Исследование магнитного поля трансформаторов промышленной частоты с короткозамкнутыми витками: автореф. дис. ...канд. техн. наук / К.А. Клименко; Омск, 2013. – 20 с.
2. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2. Режим доступа: [www.femm.info/wiki/HomePage](http://www.femm.info/wiki/HomePage).
3. Тозони О.В. Расчет электромагнитных полей на вычислительных машинах. - Киев: Техника, 1967. – 251 с.

#### REFERENCES

1. Klimentenko K.A. *Issledovanie magnitnogo polia transformatorov promyshlennoi chastoty s korotkozamknutyimi vitkami*. Autoref. diss. kand. techn. nauk [A study of magnetic field of industrial frequency transformers with closed loop. Abstracts cand. tech. sci. diss.]. Omsk, 2013. 20 p. (Rus).
2. Meeker D. *Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2*. Available at: [www.femm.info/wiki/HomePage](http://www.femm.info/wiki/HomePage) (accessed 10 July 2010).
3. Tozoni O.V. *Raschet elektromagnitnykh polei na vychislitel'nykh mashinakh* [Calculation of electromagnetic fields on computers]. Kiev, Tekhnika Publ., 1967. 251 p. (Rus).

Поступила (received) 20.05.2015

Байда Евгений Иванович, к.т.н., доц.,  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,  
тел/phone +38 057 7076976, e-mail: baida\_kpi@mail.ru

E.I. Baida  
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

#### Peculiarities of calculation of magnetic systems with short-circuited secondary windings in in-plane formulation.

**Introduction.** A feature of quasi-static calculation of plane electromagnetic fields is unlimited volume occupied by the current. This condition imposes certain requirements on the choice of boundary conditions for solving such problems (the vanishing of the algebraic sum of the currents flowing through the cross section of all wires), failure of which leads to incorrect results.

**Purpose.** The mathematical formulation of the boundary conditions corresponding to real physical processes in solving problems of plane quasi-static field by Kelvin transformation and development of a technique for calculating the induced currents in closed circuits in the calculation of AC electromagnet in the quasi-static mode. **Methods.** Investigation of nonlinear model of the current transformer in in-plane electromagnetic field calculation and the AC electromagnet is carried by the finite element method using a specific software package. **Results.** A possible error in the boundary conditions and summarizes the estimated model corresponds to the physics of the process using the Kelvin transform, proposed method of calculating currents in closed loop AC electromagnet in the calculation of plane problems of the field. **Conclusions.** The specificity of the problem of calculating the electromagnetic field in in-plane formulation requires a special approach to the assignment of boundary conditions and calculation of the currents induced in a closed loop. References 3, figures 11.

**Key words:** in-plane magnetic field, boundary conditions.

## НЕПОСРЕДСТВЕННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ С ИСКУССТВЕННОЙ И ЕСТЕСТВЕННОЙ КОММУТАЦИЕЙ В БЕСКОНТАКТНЫХ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ МАШИНАХ

*Приведені порівняльний аналіз безпосередніх перетворювачів частоти з штучною та природною комутацією при циклічному алгоритмі управління, рекомендації по їх застосуванню в безконтактних асинхронізованих машинах з трифазними обмотками збудження. Перетворювачі з обмеженим числом повністю керованих вентилів мають великі втрати в захисних ланках вентилів, вони можуть застосовуватися в системах автоматичного регулювання збудження. Найкращу якість форми напруги і струму навантаження забезпечують перетворювачі з природною комутацією при модульованій вхідній напрузі, комбінованому потенційному з'єднанні обмоток джерела живлення і комбінованому способі управління тиристорами. При розділенні навантаження перетворювача на дві трифазні групи, парному числі фаз джерела живлення на одну фазу навантаження застосовуються мостові схеми перетворення. Регулювання струму навантаження здійснюється по струму збудження збудників і куту управління тиристорами. Перетворювачі можуть застосовуватися в потужних асинхронізованих двигунах і генераторах. У асинхронізованих компенсаторах можливе застосування діодно-тиристорних перетворювачів без передачі сигналів управління на оберткову частину. Найменше збільшення розрахункової потужності джерела живлення мають перетворювачі частоти без модуляції вхідної напруги. Проте вони мають низьку якість форми вихідної напруги при високому коефіцієнті потужності навантаження. Бібл. 10, табл. 1, рис. 6.*

*Ключові слова:* безконтактна асинхронізована машина, перетворювач, діод, транзистор, тиристор.

*Приведены сопоставительный анализ непосредственных преобразователей частоты с искусственной и естественной коммутацией при циклическом алгоритме управления, рекомендации по их применению в бесконтактных асинхронизированных машинах с трехфазными обмотками возбуждения. Преобразователи с ограниченным числом полностью управляемых вентилей имеют большие потери в защитных цепях вентилей, они могут применяться в системах автоматического регулирования возбуждения. Наилучшее качество формы напряжения и тока нагрузки обеспечивают преобразователи с естественной коммутацией при модулированном входном напряжении, комбинированном потенциальном соединении обмоток источника питания и комбинированном способе управления тиристорами. При разделении нагрузки преобразователя на две трехфазные группы, четном числе фаз источника питания на одну фазу нагрузки применяются мостовые схемы преобразования. Регулирование тока нагрузки осуществляется по току возбуждения возбудителей и углу управления тиристорами. Преобразователи могут применяться в мощных асинхронизированных двигателях и генераторах. В асинхронизированных компенсаторах возможно применение диодно-тиристорных преобразователей без передачи сигналов управления на вращающуюся часть. Наименьшее увеличение расчетной мощности источника питания имеют преобразователи частоты без модуляции входного напряжения. Однако они имеют низкое качество формы выходного напряжения при высоком коэффициенте мощности нагрузки. Библ. 10, табл. 1, рис. 6.*

*Ключевые слова:* бесконтактная асинхронизированная машина, преобразователь, диод, транзистор, тиристор.

**Введение.** Асинхронизированные машины с контактными кольцами (АСМ) применяются как генераторы крупных и автономных электроэнергетических систем, генераторы-двигатели гидроаккумулирующих станций, регулируемый электропривод, компенсаторы, электромеханические устройства связи энергосистем [1, 2]. Актуальна разработка и внедрение бесконтактных асинхронизированных машин (БАСМ).

БАСМ состоит из основной электрической машины (ОЭМ), возбудителя и автоматического регулятора возбуждения. Возбудители состоят из преобразователей частоты (ПЧ) и вспомогательных электрических машин. Синхронный (асинхронный) возбудитель содержит синхронную (асинхронную) машину.

Возбудители БАСМ разрабатываются на базе непосредственных ПЧ (НПЧ) с искусственной (НПЧИ) и естественной (НПЧЕ) коммутацией при циклическом алгоритме управления, который обуславливает применение простых устройств передачи сигналов управления на вращающуюся часть.

В работе [3] предложено применять диодно-транзисторные НПЧИ в возбудителях бесконтактных асинхронизированных турбогенераторов. В работах [4-6] показаны методы определения расчетных соот-

ношений и параметров защитных цепей вентилей преобразователей. В работах [6-7] показано, что диодно-транзисторные НПЧИ не могут применяться в возбудителях БАСМ в связи с большими потерями в защитных цепях вентилей. В НПЧЕ применяются комбинированное потенциальное разделение фаз источника питания и комбинированный закон управления тиристорами, при котором совместное управление встречно включенными тиристорами осуществляется при токах нагрузки меньших тока уставки [8]. НПЧЕ БАСМ работоспособны только при передаче активной мощности в обмотку возбуждения ОЭМ [9, 10]. В БАСМ средних и больших мощностей в обмотку возбуждения ОЭМ передается и реактивная мощность. Реактивная мощность передается в преобразователь только в асинхронизированных компенсаторах и турбогенераторах в режимах глубокого потребления реактивной мощности из сети [8-10]. НПЧЕ обеспечивает высокое качество формы тока нагрузки при низких величинах  $\cos\varphi_n$ . Неудовлетворительное качество формы кривой тока нагрузки при инфранизких частотах – один из недостатков НПЧЕ при циклическом алгоритме управления [8].

Высоким качеством формы кривой тока нагрузки при инфранизких частотах отличаются многофазные НПЧЕ с модулированным входным напряжением (НПЧЕМ) [8-10]. В мостовых тиристорных и диодно-тиристорных НПЧЕМ применяется четное число фаз источника питания на одну фазу нагрузки, разделенную на две трехфазные группы [5].

Работоспособность НПЧЕ и НПЧЕМ подтверждена результатами исследований математических моделей и физических макетов возбудителей БАСМ [8-10]. Однако в литературе недостаточно сопоставлена работа разных типов НПЧ в возбудителях БАСМ разных мощностей с разными диапазонами изменения скольжения.

**Цель работы** – сопоставительный анализ результатов исследований моделей многофазно-трехфазных НПЧ с искусственной и естественной коммутацией, разработка рекомендаций по применению НПЧ в возбудителях БАСМ разных мощностей.

**Материал и результаты исследований.** Схема замещения и векторные диаграммы ОЭМ показаны на рис. 1. Обозначения на схеме (рис. 1,а):  $U_{1C}$ ,  $I_1$ ,  $U_{2C}$ ,  $I_2$  – напряжения и токи статора и ротора;  $r_1$ ,  $x_1$ ,  $r_2$ ,  $x_2$  – активные и индуктивные сопротивления обмоток;  $s$  – скольжение;  $x_m$ ,  $I_\delta$  – сопротивление и ток намагничивающего контура;  $E_\delta$  – результирующая ЭДС. Параметры ротора приведены к статору.

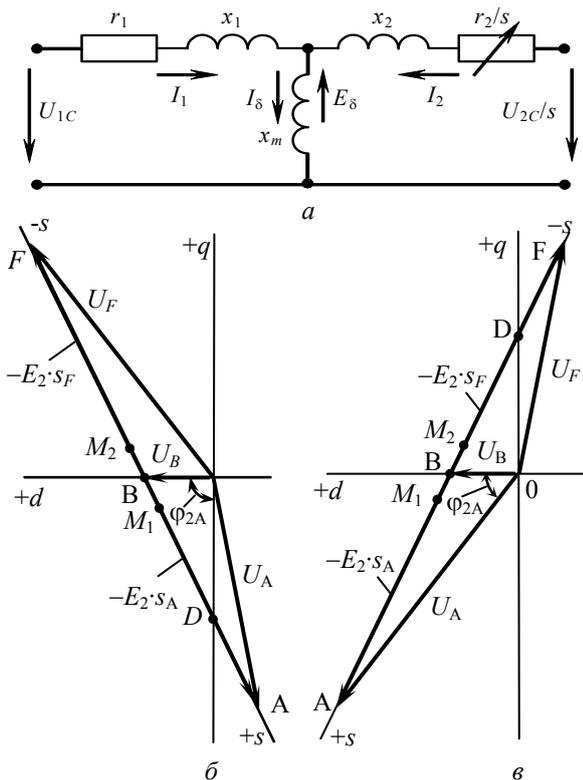


Рис. 1. Схема замещения (а) и векторные диаграммы ОЭМ (б, в)

Уравнения напряжений и намагничивающих сил:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 + \dot{E}_\delta - j\dot{I}_1 x_1 - \dot{I}_1 r_1 = 0 \\ \frac{\dot{U}_2}{s} + \dot{E}_\delta - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 \frac{r_2}{s} = 0, \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_\delta \end{cases} \quad (1)$$

откуда находим

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 r_2 - \dot{E}_\delta \cdot s, \quad (2)$$

где результирующая ЭДС ротора  $\dot{E}_\delta = \dot{E}_{\delta-j} \dot{I}_2 x_2$ .

На рис. 1,б,в показаны векторные диаграммы ОЭМ бесконтактного асинхронизированного двигателя (БАСД) и генератора (БАСГ) при неизменных параметрах первичной сети. При скольжении  $s = 0$   $U_2 = I_2 r_2$  (точка В на рис. 1). При изменении скольжения конец вектора  $U_2$  перемещается по линии напряжений АF, проведенной через точку В параллельно вектору  $\dot{E}_\delta$ . В БАСД активная мощность передается от ПЧ в обмотку ротора при  $s_D > s > -\infty$ . В БАСГ активная мощность поступает в обмотку ротора при  $\infty > s > s_D$ . Нижними индексами обозначены скольжения величин, указанные точками на рисунках.

Нагрузка преобразователей частоты БАСМ средних и больших мощностей имеет индуктивный характер независимо от знака скольжения [8]. На рис. 2 показаны зависимости параметров нагрузки ПЧ БАСГ-250 от скольжения, где  $P_2$ ,  $Q_2$ ,  $S_2$  – активная, реактивная и полная мощности,  $\varphi_2$  – угол нагрузки. Зависимости построены при номинальной нагрузке БАСГ:  $P_{1N} = 250$  кВт;  $U_{1N} = 400$  В;  $\cos\varphi_{1N} = 0,8$ .

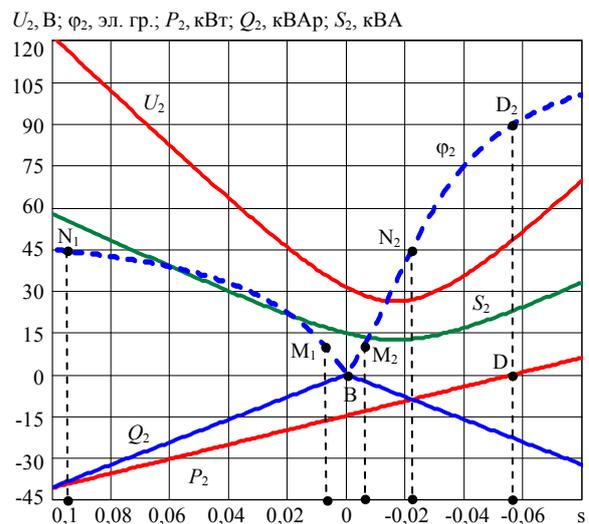


Рис. 2. Параметры ПЧ БАСГ мощностью 250 кВт в зависимости от скольжения

Схемы моделей НПЧ в программе Micro Cap показаны на рис. 3. На рис. 3,а приведена схема возбудителя с трехфазно-трехфазным тиристорно-транзисторным НПЧИ. При замене тиристорных на диоды получим схему диодно-тиристорного НПЧИ. При закорачивании транзисторов получим тиристорный НПЧЕ с нулевыми схемами преобразования [6, 7]. На рис. 3,б показана схема тиристорного НПЧЕ при переносе тиристорных на сторону нагрузки (Ан, Вн, Сн).

На рис. 3,в показана схема каскадного возбудителя с двенадцати-трехфазным мостовым НПЧЕМ. Нагрузка НПЧЕМ разделена на две трехфазные группы (Ан1, Вн1, Сн1 и Ан2, Вн2, Сн2) [4]. На входы трех фазных тиристорных переключателей подаются три системы напряжений частоты заполнения, промодулированные трехфазной системой частоты биений напряжений.

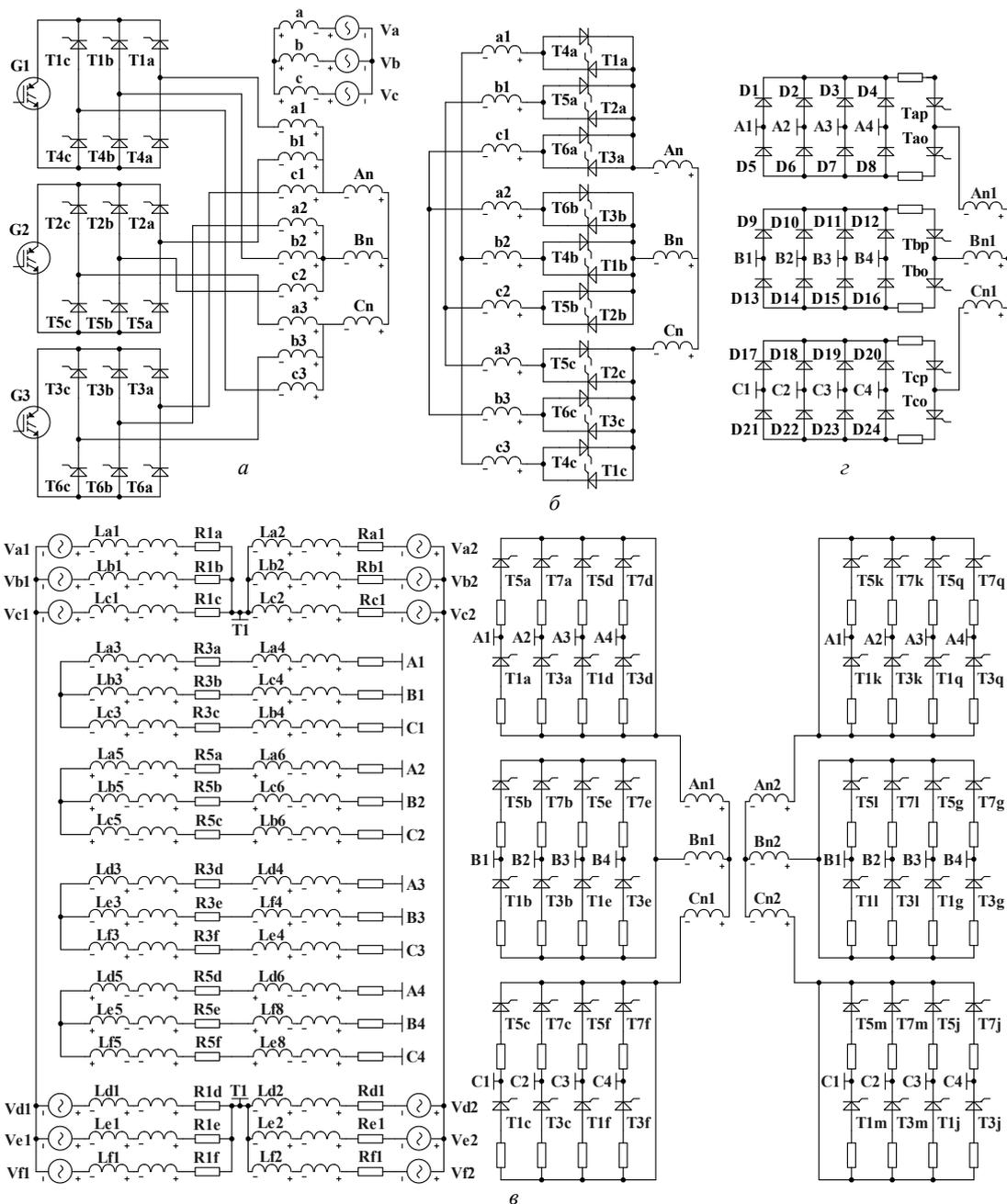


Рис. 3. Схемы моделей НПЧ с искусственной (а) и естественной коммутацией (б-з)

В режиме холостого хода:

$$\begin{aligned}
 e_{A1} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t) \cdot \cos(\omega_b t); \\
 e_{A2} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t + 90) \cdot \cos(\omega_b t); \\
 e_{A3} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t + 180) \cdot \cos(\omega_b t); \\
 e_{A4} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t + 270) \cdot \cos(\omega_b t). \\
 e_{B1} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t) \cdot \cos(\omega_b t - 120); \\
 e_{B2} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t + 90) \cdot \cos(\omega_b t - 120); \\
 e_{B3} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t + 180) \cdot \cos(\omega_b t - 120); \\
 e_{B4} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t + 270) \cdot \cos(\omega_b t - 120). \\
 e_{C1} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t) \cdot \cos(\omega_b t + 120); \\
 e_{C2} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t + 90) \cdot \cos(\omega_b t + 120); \\
 e_{C3} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t + 180) \cdot \cos(\omega_b t + 120); \\
 e_{C4} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t + 270) \cdot \cos(\omega_b t + 120),
 \end{aligned}$$

(3)

где  $\omega_z = 2\pi f_z$  – частота заполнения,  $\omega_b = 2\pi f_b$  – частота биений напряжений,  $f_z = |f_{21} + f_{22}|/2$ ,  $f_b = |f_{21} - f_{22}|/2$ ,  $f_{21}, f_{22}$  – частоты ЭДС двух источников питания.

Частота нагрузки равна частоте скольжения ОЭМ,  $f_n = f_s = f_b$ . Частота управления тиристорами равна частоте заполнения (частоте источника)  $f_u = f_z = f_i$ .

На рис. 3,з показана схема одного фазного блока диодно-тиристорного переключателя НПЧЕМ [5, 10].

**Исследование моделей НПЧ бесконтактных асинхронизированных генераторов** проводим сначала при одинаковых параметрах источников питания и нагрузки. Числа пар полюсов ОЭМ  $p = 2$ , возбудителей и управляющих машин (УМ)  $p_w = p_u = 4$ . Частота сети  $f = 50$  Гц, скольжение  $s = 0,04$ , частота скольжения  $f_s = s f = 2$  Гц. Модели преобразователей построены в программе Micro Cap на транзисторах IRG4PH50S\_IR, диодах MR2510 и тиристорах B25RIA120. Нагрузка НПЧ:  $f_n = f_s = 2$  Гц;  $z_n = 12,5$  Ом; угол нагрузки  $\varphi_n = 24^\circ$ .

В каскадном возбудителе применены два асинхронных возбудителя, на статорные обмотки которых подается напряжение частоты скольжения. Направления вращения полей противоположны. Частоты ЭДС якорных обмоток возбудителей:

$$f_{2w1} = p_w \cdot f(1-s) / p - f_s = 98 \text{ Гц};$$

$$f_{2w2} = p_w \cdot f(1-s) / p - f_s = 94 \text{ Гц}.$$

Сопротивление последовательно соединенных якорных обмоток (фаз источников питания)  $z_i = 3 \text{ Ом}$ ; относительная величина активного сопротивления источника питания  $k_r = r/x_i = 0,25$ ; амплитуды ЭДС источников питания  $A_{i1} = A_{i2} = 55 \text{ В}$ ; наибольшая величина амплитуды ЭДС  $A_i = A_{i1} + A_{i2} = 110 \text{ В}$ ; частота источника питания  $f_i = f_3 = (f_{2w1} + f_{2w2})/2 = 96 \text{ Гц}$ .

В БАСГ с тиристорным НПЧЕМ применена УМ синхронного типа с двумя обмотками возбуждения. Частота ЭДС якорной обмотки (частота управления)

$$f_u = p_u \cdot f(1-s) / p = 96 \text{ Гц}.$$

Угол управления тиристорами  $\alpha_u = 0$ .

Параметры возбудителей с НПЧЕ и НПЧИ:

$$f_u = 96 \text{ Гц}; f_i = f_u \pm f_s; A_i = 110 \text{ В}; z_i = 3 \text{ Ом}; k_r = 0,25.$$

Модель каскадного возбудителя применена также для исследования одномашинного возбудителя с НПЧЕ. Для этого принимается амплитуда ЭДС одного возбудителя  $A_i = 110 \text{ В}$ , в другом возбудителе  $A_i = 0$ .

Для ограничения внутренних перенапряжений диоды и тиристоры ПЧ шунтируют защитными  $R_F C_F$  – цепями. Параметры защитных цепей НПЧЕ и НПЧЕМ принимают равными параметрам защитных цепей вентилях выпрямителей, рассчитанных при условии ограничения максимального обратного напряжения на вентилях при максимальном напряжении источника питания с учетом всех режимов работы выпрямителя.

В трехфазном мостовом выпрямителе [4, 5]:

$$C_{F \min} = \frac{4}{9} \cdot \frac{\tau^2}{L_i}; R_{Fm} = \frac{\sqrt{3} \cdot \tau}{C_{F \min}}; \quad (4)$$

$$C_{F3} = k_{CF} \cdot C_{F \min}; R_{F3} = R_{Fm}/k_{RF}. \quad (5)$$

Величина  $R_{Fm}$  определяется на границе периодического и апериодического режимов переходного процесса в защитной цепи. При  $k_{CF} = 4-6$  и  $k_{RF} < k_{CF}$  коммутационные перенапряжения практически отсутствуют. Принимаем  $k_{CF} = 6$ ,  $k_{RF} = 0,8 \cdot k_{CF}$ .

Емкость защитной цепи выпрямителя с нулевой схемой преобразования в два раза больше, чем в мостовом выпрямителе. В  $m$ -фазном выпрямителе [5]

$$C_{Fm} = 3 \cdot C_{F3}/m. \quad (6)$$

Расчет защитных цепей диодов и тиристоров моделей НПЧИ проводим из условия ограничения напряжений на вентилях на одинаковом уровне, меньшем допустимого повторяющегося напряжения.

В табл. 1 приведены результаты исследований НПЧ. Все величины определены по текущим средним значениям при интегрировании по времени в квазиустановившихся режимах работы [5]. Приняты такие обозначения величин:  $P_n, V_{in}$  – мощность и амплитуда тока нагрузки;  $p_G, p_D, p_T, p_f$  – потери на транзисторах, диодах, тиристорах и защитных цепях соответственно;  $\eta$  – коэффициент полезного действия НПЧ;  $T_{suG}, T_{suT}$  – длительности сигналов управления транзисторами и тиристорами в эл. градусах.

На рис. 4 показаны временные диаграммы напряжений и токов НПЧ:  $a$  – диодно-транзисторный НПЧИ;  $b$  – тиристорно-транзисторный НПЧИ при комбинированном способе управления тиристорами и удлинённом сигнале управления транзисторами;  $c$  – каскадный тиристорный НПЧЕМ с мостовыми схемами преобразования;  $d$  – каскадный диодно-тиристорный НПЧЕМ с мостовыми схемами преобразования.

На диаграммах обозначены:  $u_{nA}$  – напряжение нагрузки;  $i_{nA}, i_{nB}, i_{nC}, i_{nAs} = (i_{nA1} + i_{nA2})/2, i_{nBs} = (i_{nB1} + i_{nB2})/2, i_{nCs} = (i_{nC1} + i_{nC2})/2$  – токи нагрузки;  $e_{aa} = e_{a1} + e_{a2}, e_{bb} = e_{b1} + e_{b2}, e_{cc} = e_{c1} + e_{c2}$  – напряжения биений НПЧЕМ в режиме холостого хода;  $u_{G1}, u_{D1}, u_{T1a}$  – напряжения на транзисторе, диоде и тиристоре;  $i_{G1}, i_{D1a}, i_{T1a}$  – токи через транзистор, диод и тиристор;  $su$  – сигналы управления тиристорами прямого и обратного блоков.

Диодно-транзисторные НПЧИ обеспечивают высокое качество токов нагрузки как при  $f_u < f_i$  (рис. 4,  $a$ ), так и при  $f_u > f_i$ . НПЧИ работоспособны при изменении направления передачи активной мощности и неизменном законе изменения частоты  $f_u$ . Однако в связи с большими потерями в защитных цепях вентилях (по табл. 1  $p_F = 15,4\%$  от  $P_n$ ) НПЧИ можно применять только в системах АРВ БАСМ.

В табл. 1 приведены результаты расчетов тиристорно-транзисторных НПЧИ при комбинированном способе управления тиристорами и разной длительности сигналов управления транзисторами ( $T_{suG} = 120^\circ$  и  $T_{suG} = 200^\circ$ ). При увеличении длительности сигналов управления транзисторами потери в защитных цепях уменьшаются более чем в 100 раз (п. №3 и №4 табл. 1). При сравнительно больших частотах нагрузки НПЧИ работает подобно НПЧЕ. Транзисторы «включаются в работу» при малых частотах нагрузки. Уменьшение амплитуды ЭДС источника питания, малая величина тока отключаемого тиристора на участке коммутации приводит к улучшению качества формы кривой тока нагрузки при ограниченных коммутационных перенапряжениях. Поэтому НПЧИ работоспособны при сравнительно малых частотах нагрузки. Однако в связи со сложностью силовой части и устройства управления НПЧИ не могут применяться в возбудителях БАСМ.

Потери в защитных цепях НПЧЕ и НПЧЕМ не превышают 0,05 % мощности нагрузки (п. №№ 5 – 8 табл. 1). Мощность нагрузки НПЧЕ превышает мощность нагрузки НПЧЕМ на 10 % при применении нулевых схем преобразования и на 20 % при применении мостовых преобразователей.

Отметим: при одинаковых электромагнитных нагрузках и наружных диаметрах магнитопроводов длина активной части вспомогательной электрической машины возбудителя с мостовым НПЧ примерно на 25 % меньше, чем в возбудителе на базе НПЧ с нулевыми схемами преобразования. Поэтому в мощных БАСМ рекомендуется применять возбудители с многофазными мостовыми НПЧЕ и НПЧЕМ. Однако с целью упрощения конструкции возбудителей в целом в БАСМ мощностью до 1000 кВт целесообразно применять НПЧ с нулевыми схемами преобразования.

Результаты расчетов моделей НПЧ

№ п/п	Параметры преобразователя	Расчетные величины и единицы измерения						
		$P_n$ , Вт	$V_{in}$ , А	$p_G$ , %	$p_D$ , %	$p_T$ , %	$p_F$ , %	$\eta$ , %
Трехфазно-трехфазный диодно-транзисторный НПЧИ								
1	$f_u > f_i, T_{suG} = 120^\circ, k_{CF} = 96$	659,1	6,28	1,77	1,37	-	15,4	79,0
2	$f_u < f_i, T_{suG} = 120^\circ, k_{CF} = 96$	662,5	6,20	1,52	1,34	-	12,1	81,8
Трехфазно-трехфазный тиристорно-транзисторный НПЧИ								
3	$f_u < f_i, T_{suG} = T_{suT} = 120^\circ, k_{CF} = 240$	713,4	6,45	1,4	-	1,75	5,83	85,5
4	$f_u < f_i, T_{suG} = 200^\circ, T_{suT} = 120^\circ, k_{CF} = 6$	778,3	6,74	0,86	-	1,8	0,044	91,5
Многофазно-трехфазные каскадные тиристорные НПЧЕМ и НПЧЕ с нулевыми схемами преобразования								
5	$A_{i1} = A_{i2} = A, f_u = f_i, k_{CF} = 6$	703,2	6,41	-	-	1,7	0,025	93,3
6	$A_{i1} = 2A, A_{i2} = 0, f_u < f_i, k_{CF} = 6$	770,2	6,71	-	-	1,77	0,015	94,5
Многофазно-трехфазные каскадные тиристорные НПЧЕМ и НПЧЕ с мостовыми схемами преобразования								
7	$A_{i1} = A_{i2} = A, f_u = f_i, k_{CF} = 6$	1331	6,23	-	-	1,74	0,024	93,2
8	$A_{i1} = 2A, A_{i2} = 0, f_u < f_i, k_{CF} = 6$	1598	6,83	-	-	1,78	0,05	91,4
Многофазно-трехфазный каскадный диодно-тиристорный НПЧЕМ с мостовыми схемами преобразования								
9	$A_{i1} = A_{i2} = A, k_{CF} = 6$	1308	6,17	-	1,35	1,66	0,05	91,6

Качество формы тока возбуждения ОЭМ БАСМ зависит от типа НПЧ, диапазона изменения скольжения, соотношения параметров источника питания и нагрузки преобразователя.

НПЧЕ следует разрабатывать только при  $f_u < f_i$ , так как при  $f_u > f_i$  получаем неудовлетворительное качество формы кривой тока нагрузки.

В БАСМ с синхронным возбудителем (СВ) и НПЧЕ применяется асинхронная УМ. Числа пара полюсов СВ и УМ одинаковые. На обмотку статора УМ подается напряжение частоты скольжения. Направление вращения поля статора УМ согласно с направлением вращения вала машины. При этом  $f_u < f_i$ . Амплитуда и фаза тока возбуждения ОЭМ регулируются величиной тока возбуждения СВ и фазой напряжения возбуждения УМ.

Качество формы кривой тока нагрузки НПЧЕ зависит от относительной величины сопротивления источника питания при номинальном (расчетном) скольжении  $M_z = z_i/Z_n$  и от относительной величины активного сопротивления источника питания  $k_r = r_i/x_i$ .

Увеличение рабочего диапазона скольжения ОЭМ приводит к увеличению сопротивления источника питания, увеличению величины  $M_z$ . При этом в зоне малых скольжения происходит увеличению углов коммутации, ухудшается качество формы тока нагрузки НПЧЕ.

Исследуем модель двенадцати-трехфазного мостового НПЧЕ при разных величинах  $M_z$ . На рис. 5 показаны диаграммы токов нагрузки НПЧЕ, рассчитанные при:

а) принятых раньше параметрах ( $Z_n = 12,5$  Ом,  $\varphi_n = 24^\circ$ ,  $M_z = 0,24$ ,  $k_r = 0,25$ ,  $A_{i1} = 110$  В,  $A_{i2} = 0$  и др.);

б) изменении величин –  $Z_n = 3$  Ом,  $M_z = 1$ ,  $A_{i1} = 40$  В.

Коэффициент нелинейного искажения тока нагрузки НПЧЕ составляет:

•  $k_{in} = 3,84$  % при  $M_z = 0,24$ ;

•  $k_{in} = 8,16$  % при  $M_z = 1$ .

На рис. 6 показаны токи нагрузки двенадцати-трехфазного мостового НПЧЕМ при принятых раньше параметрах нагрузки ( $Z_n = 12,5$  Ом,  $\varphi_n = 24^\circ$ ) и изменении параметров источника питания:

а)  $A_{i1} = A_{i2} = 90$  В,  $M_z = 1$ ;

б)  $A_{i1} = A_{i2} = 165$  В,  $M_z = 0,24$ ,  $\alpha_u = 70^\circ$ .

Как видно из рис. 4, в и рис. 6, высокое качество формы токов нагрузки НПЧЕМ сохраняется как при увеличении относительной величины полного сопротивления источника питания до значения  $M_z = 1$ , так и при угле управления тиристорами  $\alpha_u = 70^\circ$ .

Регулирование тока нагрузки НПЧЕМ углом управления тиристорами  $\alpha_u$  возможно при угле нагрузки  $\varphi_n < 30^\circ$ . При  $\varphi_n = 30^\circ \div 45^\circ$  высокое качество формы токов нагрузки обеспечивается при упреждающем угле управления  $\alpha_u = -(0 \div 40^\circ)$  [8].

Диодно-тиристорные НПЧЕМ обеспечивают высокое качество токов нагрузки (рис. 4, з). В БАСМ отсутствует устройство передачи сигналов управления на вращающуюся часть [4, 10]. Амплитуда и фаза тока возбуждения ОЭМ регулируются напряжением статорных обмоток возбудителей. Однако НПЧЕМ работоспособны только при  $\varphi_{2n} < 30^\circ$ . Принципиально возможно применение НПЧЕМ в бесконтактных асинхронизированных компенсаторах.

Выбор типа НПЧ зависит от мощности, режима работы и диапазона изменения скольжения БАСМ.

На рис. 2 точками  $N_1$  и  $N_2$  (скольжения  $s_{N1}$  и  $s_{N2}$ ) ограничена зона работы БАСГ при угле нагрузки НПЧЕМ  $\varphi_n = 0 \div 45^\circ$ . При этом коэффициент изменения скорости вращения вала генератора  $k_n = n_{max}/n_{min} = 1,12$ . При  $\cos\varphi_{1N} = 0,9$   $k_n \approx 1,25$ .

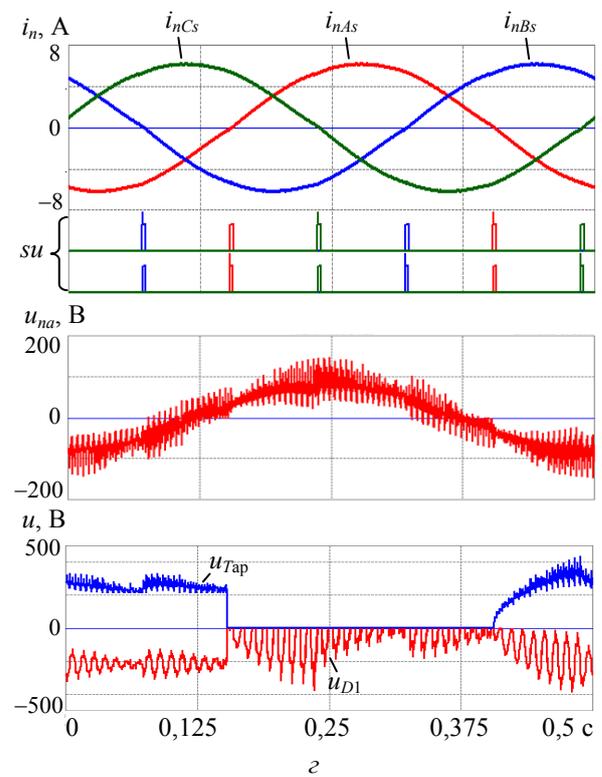
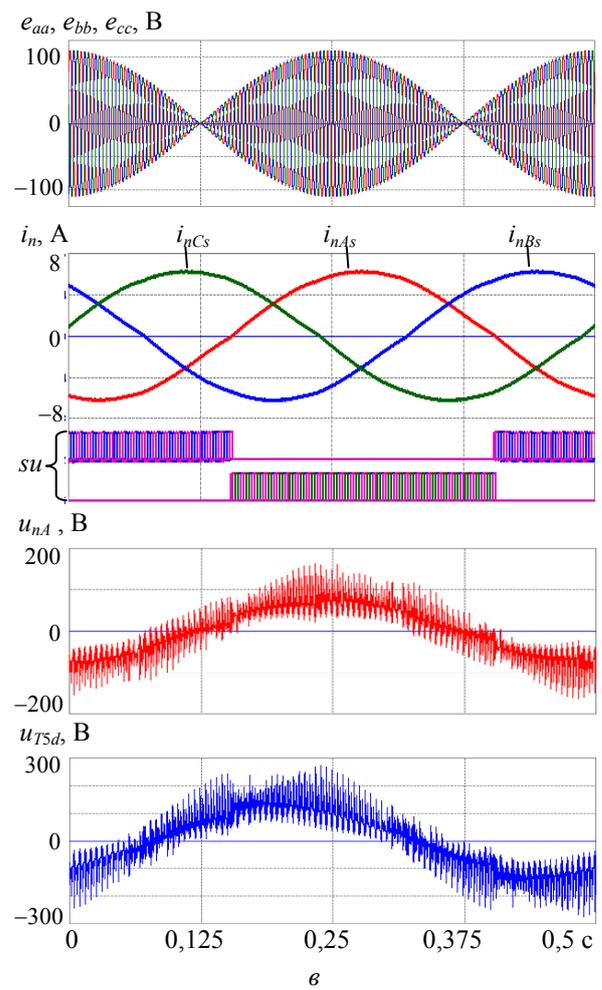
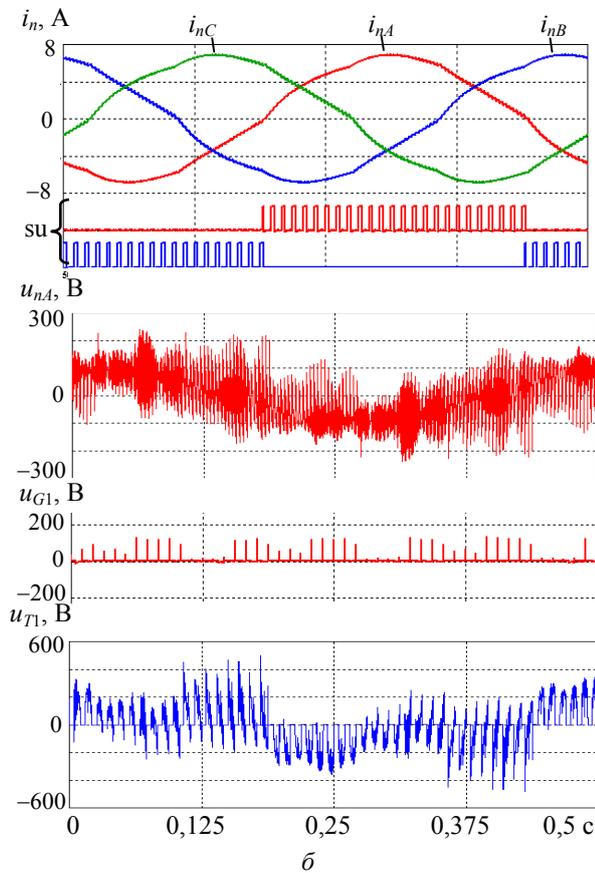
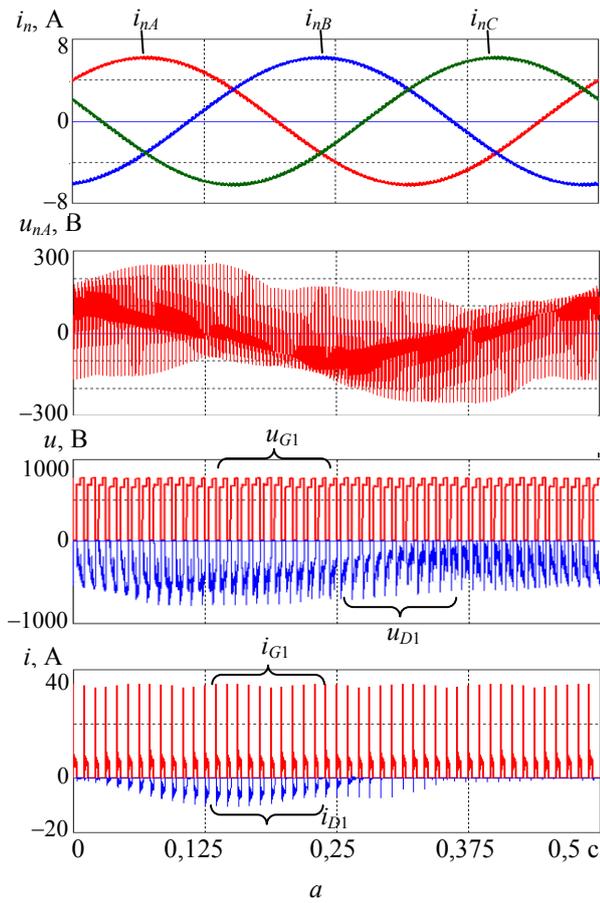


Рис. 4. Напряжения и токи НПЧ: а – диодно-транзисторный НПЧ при  $f_u < f_i$ ; б – тиристорно-транзисторный НПЧ при комбинированном управлении,  $T_{suG} = 200^\circ$ ,  $T_{suT} = 120^\circ$ ,  $f_u < f_i$ ; в – тиристорный НПЧЕМ; г – диодно-тиристорный НПЧЕМ

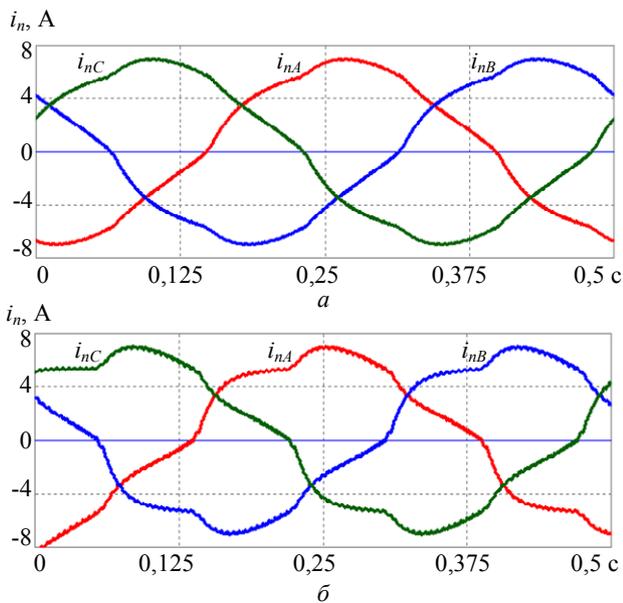


Рис. 5. Токи нагрузки мостового НПЧЕ при разных соотношениях параметров источника питания и нагрузки

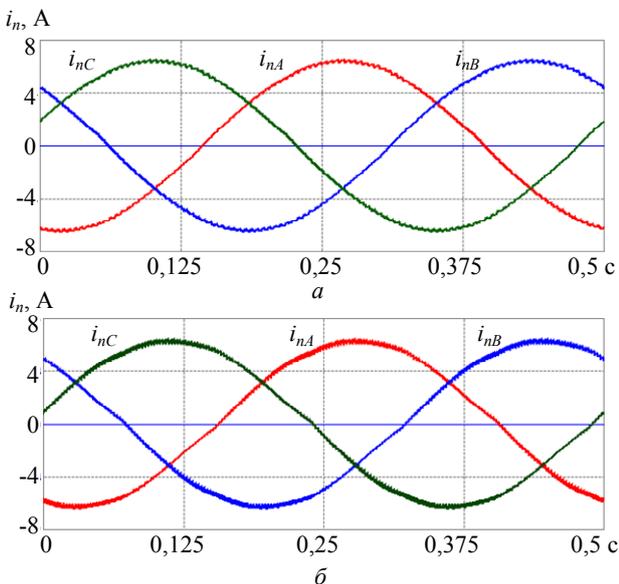


Рис. 6. Токи нагрузки мостового НПЧЕМ при разных параметрах источника питания

Возбудители с НПЧЕ могут работать в двух зонах рабочих скольжений БАСМ. На рис. 1, в и рис. 2 показаны зоны рабочих скольжений БАСГ:  $s_A \div s_{M1}$  – зона положительного скольжения;  $s_{M2} \div s_{MD}$  – зона отрицательного скольжения. Зоны рабочих скольжений БАСД (рис. 1, б):  $s_{MD} \div s_{M1}$ ;  $s_{M2} \div s_{MF}$ . Зоны  $s_{M1} \div s_{M2}$  – нерабочие зоны НПЧЕ в БАСГ и БАСД.

Особенности работы преобразователей учитываются при разработке БАСМ. Например, в [10] рекомендуется работа бесконтактного асинхронизированного турбогенератора при скольжениях:  $s = 0$  в режиме глубокого потребления реактивной мощности;  $s < 0$  при выдаче реактивной мощности в сеть. При этом обеспечивается: равномерный нагрев трехфазных обмоток возбуждения ОЭМ в номинальном режиме и режимах выдачи реактивной мощности; высокое качество формы кривых токов нагрузки НПЧЕМ во всех режимах работы.

БАСГ автономных газозенергетических установок разрабатываются на базе НПЧЕМ с нулевыми схемами преобразования.

Перспективна разработка бесконтактных асинхронизированных генераторов-двигателей гидроаккумулирующих станций [2] на базе каскадных возбудителей с мостовыми НПЧЕМ. Устранение высоковольтных щеточно-контактных узлов существенно повысит надежность работы агрегатов.

#### Выводы.

1. Диодно-транзисторные НПЧИ, обеспечивающие высокое качество токов нагрузки при изменении направления передачи активной мощности, рекомендуется применять в системах АРВ БАСМ.

2. В возбудителях БАСМ могут применяться многофазно-трехфазные НПЧЕ и НПЧЕМ с мостовыми и нулевыми схемами преобразования.

3. Возбудители бесконтактных асинхронизированных турбогенераторов, компенсаторов и электромеханических устройств связи энергосистем можно построить только на базе НПЧЕМ. В указанных устройствах рекомендуется применять многофазные мостовые НПЧЕМ с управлением по напряжению возбуждения возбудителей и углу управления тиристорами.

4. В возбудителях БАСМ мощностью до 1000 кВт рекомендуется применять НПЧЕ и НПЧЕМ с нулевыми схемами преобразования.

5. Достоинство возбудителей с НПЧЕ – высокое качество формы кривой тока нагрузки при малых величинах  $\cos\phi_n$ , недостаток – неработоспособность в зоне малых скольжений БАСМ. Достоинство каскадных возбудителей с НПЧЕМ – работа в зоне изменения знака скольжения БАСМ, недостаток – увеличенные габариты. Актуальна разработка совмещенных возбудителей БАСМ с достоинствами возбудителей на базе НПЧЕ и НПЧЕМ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шакарян Ю.Г., Лабунец И.А. Внедрение асинхронизированных генераторов и компенсаторов на объектах единой энергетической системы // Энергетик. – 2005. – №6. – С. 12-19.
2. Абубакиров Ш.И. Опыт и перспективы использования асинхронизированных гидрогенераторов в проектах ОАО «Институт Гидропроект» // Гидротехника. – 2010. – №2. – С. 6-11.
3. Савельев Ю.Е., Быков С.В., Зозулин Ю.В., Козлов Ю.А. Устройство для возбуждения асинхронизированной синхронной машины. А.с. СССР № 1534744 5Н02Р 9/14. Оpubл. в БИ, №1, 1990.
4. Галиновский А.М., Ленская Е.А., Эрхард Айхофер. Методика расчета защитных цепей вентилей выпрямителя // Технічна електродинаміка. – 2005. – №4. – С. 43-50.
5. Галиновский А.М. Исследование электромашино-вентильных преобразователей бесконтактных синхронных и асинхронизированных машин в системе схемотехнического моделирования. // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – №5. – С. 23-29.
6. Галиновский А.М., Ленская Е.А., Эрхард Айхофер. Исследование моделей электромашино-вентильных преобразователей с ограниченным числом полностью управляемых вентилей // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – №5. – С. 22-29.
7. Ленская Е.А. Преобразователи частоты с искусственной коммутацией в системе возбуждения асинхронизированной машины // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – №1. – С. 40-45.

8. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Ленская Е.А. Электромашино-вентильные преобразователи машин двойного питания (часть 2) // Гірничі електромеханіка та автоматика. – 2010. – №85. – С. 159-169.
9. Галиновский А.М., Бобер В.А., Дубчак Е.М. Режимы работы преобразователей частоты в бесконтактных асинхронизированных машинах с инфранизкими частотами возбуждения // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. – 2012. – №2. – С. 56-61.
10. Галиновский А.М., Бобер В.А., Дубчак Е.М. Бесконтактный асинхронизированный турбогенератор с вращающимся преобразователем частоты в режимах глубокого потребления и выдачи реактивной мощности // Технічна електродинаміка. – 2015. – №1. – С. 72-77.

#### REFERENCES

1. Shakaryan Y.G., Labunets I.A. Implementation of asynchronous generators and condensers at the facilities of the Unified Energy System. *Energetik – Power Engineer*, 2005, no.6, pp. 12-19. (Rus).
2. Abubakirov Sh.I. Experience and prospects of use of asynchronous hydro generators in the projects of LTD «Institute Hydroproject». *Gidrotekhnika – Hydrotechnika*, 2010, no. 2, pp. 6-11. (Rus).
3. Savelyev Y.E., Bykov S.V., Zozulin Y.V., Kozlov Y.A. *Ustroystvo dlya vozvuzhdeniya asinhronizirovannoy sinhronnoy mashiny* [Device for the excitation of asynchronous a synchronous machine]. USSR Certificate of Authorship, no. 1534744, 1990. (Rus).
4. Galinovskiy A.M., Lenska E.A., Erhard Ayhofer. Methods of calculating protection circuits valves rectifier. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodyamics*, 2005, no.4, pp. 43-50. (Rus).
5. Galinovskiy A.M. Research into valve-engine transducers of brushless synchronous and asynchronous machines in a circuit simulation system. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.5, pp. 23-29. (Rus).
6. Galinovskiy A.M., Lenska E.A., Erhard Ayhofer. Research on electric machine valve converters with a limited number of fully-controlled valves. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2006, no.5, pp. 22-29. (Rus).
7. Lenska E.A. Frequency converters with forced switching system excitation of asynchronous machines. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy – Electromechanical and energy saving systems*, 2012, no.1, pp. 40-45. (Rus).
8. Galinovskiy A.M., Dubchak E.M., Lenska E.A. Electric machine valve converters of machines dual power (Part 2). *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka – Mining electrical engineering and automation*, 2010, no.85, pp. 159-169. (Rus).
9. Galinovskiy A.M., Bober V.A., Dubchak E.M. Modes of operation of frequency converters in the proximity of asynchronous machines with infra-low frequency excitation. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy – Electromechanical and energy saving systems*, 2012, no.2, pp. 56-61. (Rus).
10. Galinovskiy A.M., Beaver V.A. Dubchak E.M. Brushless asynchronous turbine generators with rotary converter in modes of deep consumption and issuance of reactive power. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical Electrodyamics*, 2015, no.1, pp. 72-77. (Rus).

Поступила (received) 30.03.2015.

Галиновский Александр Михайлович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
Ленская Елена Александровна<sup>2</sup>, начальник отдела,  
Мельник Николай Петрович<sup>3</sup>, председатель,  
<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»,

03056, Киев, просп. Победы, 37,  
тел/phone: +38 044 2580154, e-mail: alga40@mail.ru

<sup>2</sup> Государственное агентство по энергоэффективности и энергосбережению Украины,

02094, Киев, ул. Краковская, д. 17, к. 207,

тел/phone: +38 044 5585835, e-mail: A\_Lenskay@ukr.net

<sup>3</sup> ФХ «Свитанок»,

03056, Киев, пр. Победы, 89/1,

тел/phone: +38 044 5229439, e-mail: svitrad2004@mail.ru

A.M. Galynovskiy<sup>1</sup>, E.A. Lenskaya<sup>2</sup>, N.P. Melnik<sup>3</sup>

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»,

37, Prospect Peremohy, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

<sup>2</sup> State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine,

17, Krakovskaya Str., apt. 207, Kyiv, 02094, Ukraine.

<sup>3</sup> FH «Svitanok»,

89/1, Prospect Peremohy, Kyiv, 03056, Ukraine.

#### **Direct frequency converter with artificial and natural commutation for brushless asynchronous machines.**

*The comparative analysis of direct frequency converters with artificial and natural- switching term of the cyclical control algorithm is presented; the recommendations for their using in brushless asynchronous machines with three-phase winding are developed. Converters with a limited number of full-controlled valves have large losses in safety circuits of gates, they can be used in system of automatic excitation control. The best quality of voltage and current load are provided by converters with natural commutation using modulated input voltage, the combined potential compounds windings supply and the combined method of thyristor controlling. When the load is divided into two three-phase groups, an even number of phases of the power supply for single phase of the load are applied the bridge converter circuit. Regulation of the load current is carried out by the excitation current of field exciters and by the control angle of thyristor. Converters can be used in high-power asynchronous motors and generators. In asynchronous compensators it is possible to use diode-thyristor converters without transmitting the control signals to the rotating part. The frequency converters without modulation of input voltage have the smallest increase in rated capacity of power supply. However, they have a low quality form of the output voltage at high power factor of load. References 10, table 1, figures 6.*

**Key words:** brushless asynchronous machine, inverter, diode, transistor, thyristor.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ И АКСИАЛЬНЫМ РАБОЧИМ ЗАЗОРОМ

На основі методу показників технічного рівня з відносними керованими змінними отримані аналітичні залежності визначення оптимальних геометричних співвідношень активної частини торцевого асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором за критерієм мінімуму втрат та виконано порівняльний аналіз показників втрат активної потужності електромагнітно-еквівалентних двигунів класичного циліндричного і аксіального виконань. Бібл. 14, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: показники втрат, оптимальні геометричні розміри, двигуни класичного циліндричного і аксіального виконань.

На основе метода показателей технического уровня с относительными управляемыми переменными получены аналитические зависимости определения оптимальных геометрических соотношений активной части торцевого асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по критерию минимума потерь и выполнен сравнительный анализ показателей потерь активной мощности электромагнитно-эквивалентных двигателей классического цилиндрического и аксиального исполнений. Библ. 14, табл. 2, рис. 3.

Ключевые слова: показатели потерь, оптимальные геометрические размеры, двигатели классического цилиндрического и аксиального исполнений.

**Введение. Постановка проблемы.** В [1] в дополнение к известным «традиционным» возможностям усовершенствования и конструктивно-технологическим решениям определены способы повышения технического уровня электромеханических устройств и комплексов «системным подходом», разработкой «нетрадиционной» активной и конструктивной части, а также специальных исполнений электрических ма-

шин, в частности асинхронных двигателей (АД). Одно из направлений реализации таких способов заключается в обеспечении функционального соответствия элементов активной части и узлов приводимых в движение механизмов на основе конструктивно-структурных отличий вариантов (рис. 1, а – в) аксиальной электромагнитной системы (ЭМС) [2, 3] от АД «классического» (АДК) исполнения.

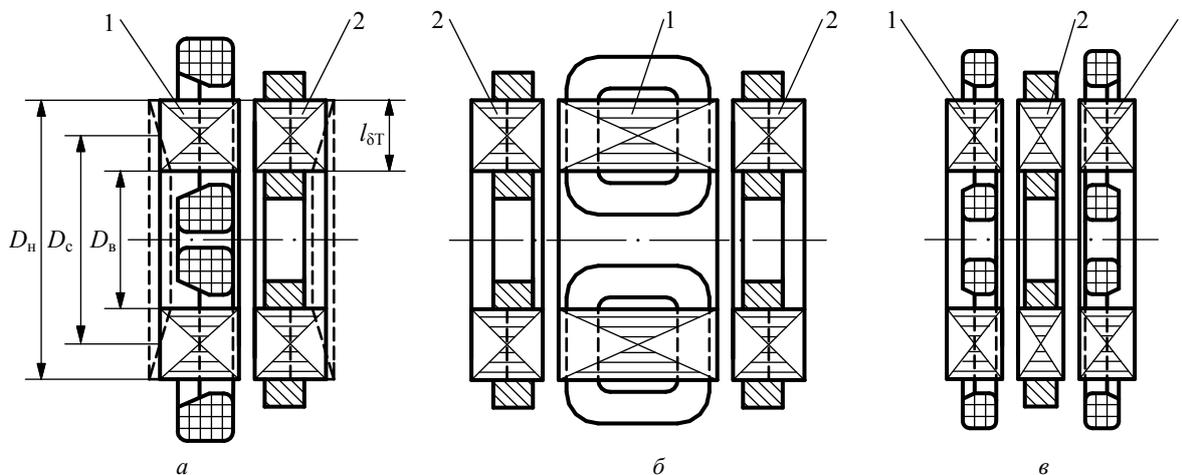


Рис. 1. Конструктивные схемы вариантов аксиальной электромагнитной системы с одним (а) и двумя (б) роторами, а также с двухсекционным статором и дисковым ротором (в): 1 – статор; 2 – ротор

Возможные примеры интеграции механической и нетрадиционной электромеханической компонент с однороторной (рис. 1,а) и двухроторной (рис. 1,б) ЭМС торцевого АД (ТАД) представлены в [3], а также на схемах поршневого компрессора (рис. 2,а) и двухступенчатого центрального вентилятора (рис. 2,б) [4, 5]. Из [6] известна система электромеханического дифференциала, который содержит ЭМС схемы (рис. 1,б) с двумя роторами, установленными на отдельных валах трансмиссии ведущих колес электромобиля. Согласно [7, 8] встраиванием и упомянутой интеграцией элементов ТАД и механизмов достигается оптимизация соотношения вращающего момента и массы, повышение энергетических показателей и техниче-

ского уровня электромеханизмов в целом. На основе использования аксиальных ЭМС (рис. 1,а,в) в диапазоне мощности 37...250 кВт выпускаются высокооборотные (5000...6500 об/мин) центробежные компрессоры и насосы с частотным регулированием и встроенными электромеханическими, преобразовательными и микропроцессорными компонентами [9].

Представленные выше факты и возможности разработки и применения вариантов аксиальных ЭМС (рис. 1,а – в) обуславливают целесообразность дополнения известных, например из [10], оптимизационных методик расчета АДК работами по определению рациональной геометрии и оптимизации активной части

ТАД. Также представляет, согласно [2, 3], теоретический и практический интерес сравнительный аналитический анализ ТАД и АДК.

**Целью работы**, представляющей продолжение [11], является решение двух задач. Первая задача – определение оптимизационной целевой функции (ЦФ) потерь активной мощности ТАД (рис. 1,а). Вторую задачу представляет обобщенный (вне зависимости от номинальной мощности и проектных ограничений) оптимизационный сравнительный анализ показателей потерь активной мощности ТАД (рис. 1,а) и АДК с короткозамкнутым ротором.

**Изложение полученных результатов.** Аналогично ЦФ [12, 13] и на основе метода [12, 14] потери в ЭМС ТАД определяются уравнением вида

$$F_{\text{ПТ}} = \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ИД}}} \right)^3 K_{\text{П}} \Pi_{\text{ПТ}}^* \quad (1)$$

где  $\Pi_{\text{ИД}}$  – показатель исходных данных и электромагнитных нагрузок (ЭМН), являющийся идентичным для сравниваемых вариантов АД с цилиндрическим и аксиальным рабочим зазором;  $K_{\text{П}}$  – коэффициент удельных характеристик электротехнических материалов;  $\Pi_{\text{ПТ}}^*$  – безразмерный и не зависящий от мощности показатель в виде коэффициента потерь ЭМС ТАД, являющийся функцией соотношения ЭМН,

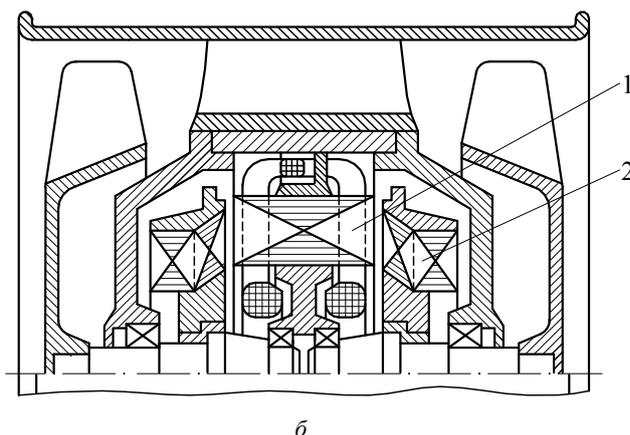
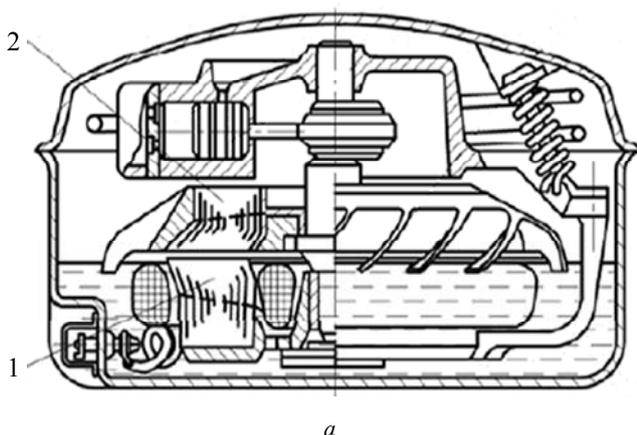


Рис. 2. Примеры конструктивных схем механизмов герметичного компрессора и осевого вентилятора со встроенным однороторным (а) и двухроторным встречного вращения (б) торцевыми асинхронными двигателями: 1 – статор; 2 – ротор

Для определения геометрических соотношений и потерь в обмотках статора и ротора используются известные рекомендации выбора и выражения расчета [12] зубцов статора  $z_1$ , чисел витков фазы  $w_1$ , активных сопротивлений обмоток  $r_{1T}$ ,  $r_{2T}$ , типа и длины лобовых частей обмотки статора  $l_{л1}$ , а также коэффициента приведения тока кольца к току стержня  $K_{\text{пр}}$ :

$$z_1 = 2pm_1q_1; \quad (2)$$

$$w_1 = U_{\text{пр}}pq_1/a_1; \quad (3)$$

$$r_{1T} = 2w_1(l_{\delta T} + l_{л1})/(\sigma_{\text{м20}}a_1S_{\text{эф}}); \quad (4)$$

$$r_{2T} = l_{\delta T}/(\sigma_{\text{а20}}S_{\text{ст}}) + \pi(D_{\text{н}} + l_3 + D_{\text{в}} - l_3) \div (\sigma_{\text{а20}}m_2S_{\text{кл}}K_{\text{пр}}^2); \quad (5)$$

$$l_{л1} = K_{\text{л}}\beta\pi(D_{\text{н}} + l_{\text{В1}} + D_{\text{в}} - l_{\text{В1}})/(2p); \quad (6)$$

$$K_{\text{пр}} = 2 \sin(\pi p / m_2), \quad (7)$$

где  $U_{\text{пр}}$  – число эффективных проводников паза статора;  $a_1$  – число параллельных ветвей;  $q_1$  – число пазов

а также управляемых переменных (УП) – параметра  $a_{\text{МТ}}$  [12] и параметра-соотношения  $\xi_T$  [11] наружного  $D_{\text{н}}$  и внутреннего  $D_{\text{в}}$  диаметров активной поверхности статора (рис. 1,а),  $\xi_T$  является преобразованным, применительно к ТАД, параметром относительной длины статора  $\lambda_{\text{БК}}$  АДК [11, 12].

Значения  $\Pi_{\text{ИД}}$  на основе усреднения расчетно-экспериментальных зависимостей радиального распределения индукции в рабочем зазоре ТАД представляются выражением [11]

$\Pi_{\text{ИД}} = K_{\text{Е}}pP_{\text{н}}/(2,22K_{\text{р}}K_{\text{у}}f_1J_1B_{\delta\text{н}}(1 - K_{\text{в}})\eta\cos\varphi)$ , где  $K_{\text{Е}}$  – соотношение ЭДС фазы статора и напряжения  $U_1$ ;  $p$  – число пар полюсов;  $P_{\text{н}}$  – номинальная мощность;  $K_{\text{р}}$ ,  $K_{\text{у}}$  – коэффициенты распределения и укорочения обмотки;  $f_1$  и  $J_1$  – частота и плотность тока статора;  $B_{\delta\text{н}}$  – значение индукции в рабочем зазоре на наружном диаметре  $D_{\text{н}}$  при пренебрежении краевым эффектом;  $K_{\text{в}}$  – усредненный коэффициент распределения индукции в рабочем зазоре [11], который для ЭМС ТАД с эффективным использованием активного объема (с трапецидальными ярмами) определяется

$$K_{\text{в}} = (0,167/(\xi_T - 1)) \int_1^{\xi_T} (\xi_T - 1)^{1,36} \xi_T^{0,15} d\xi_T.$$

на полюс и фазу;  $m_{1(2)}$  – число фаз статора (ротора);  $\sigma_{\text{м20}}$  и  $\sigma_{\text{а20}}$  – удельные электрические проводимости меди и алюминия при 20° С;  $S_{\text{эф}}$ ,  $S_{\text{ст}}$  и  $S_{\text{кл}}$  – соответственно площади сечений эффективного проводника обмотки статора, стержня и клетки обмотки ротора;  $K_{\text{л}}$  – коэффициент пропорциональности между  $l_{л1}$  и полюсным делением на  $D_{\text{н(в)}}$ ;  $l_{\delta T}$  – активная длина ЭМС ТАД [11];  $\beta$  – относительное укорочение шага обмотки статора;  $l_{3(\text{В1})}$  – вылет лобовых частей обмотки ротора (статора).

При составлении ЦФ потерь активной мощности ТАД также учитывались соотношения геометрических параметров зубцово-пазовых структур [11]:

$$S_{1\Sigma} = \Pi_{\text{ИД}} / (K_{\text{зп}} D_{\text{с}}^2 2(1 - 1/\xi_T) / (1 + 1/\xi_T)) = \sqrt{\Pi_{\text{ИД}}} / (K_{\text{зп}} \sqrt{a_{\text{МТ}}} 2(1 - 1/\xi_T) / (1 + 1/\xi_T)); \quad (8)$$

$$S_{2\Sigma} = \frac{\sqrt{\Pi_{\text{ИД}}} \gamma_1 (1 + 1/\xi_T)}{\sqrt{a_{\text{МТ}}} 2(1 - 1/\xi_T)}; \quad (9)$$

$$h_{z1} = \frac{S_{1\Sigma}}{(1 - K_{рш1})b_{п\Sigma1}} = \frac{\sqrt[4]{\Pi_{ИД}}}{\sqrt[4]{a_{МТ}^3 (1 - K_{рш1})K_{зп} 4\pi \frac{(1 - 1/\xi_T)(1 - \alpha_{н1})}{(1 + 1/\xi_T)^2}}}, \quad (10)$$

$$h_{z2} = \frac{S_{2\Sigma}}{(1 - K_{рш2})b_{п\Sigma2}} = \frac{\sqrt[4]{\Pi_{ИД}}\gamma_1}{\sqrt[4]{a_{МТ}^3 (1 - K_{рш2})4\pi \frac{(1 - 1/\xi_T)(1 - \alpha_{н2})}{(1 + 1/\xi_T)^2}}}, \quad (11)$$

$$b_{п\Sigma1(2)} = 2\pi D_c(1 - \alpha_{н1(2)})/(1 + 1/\xi_T), \quad (12)$$

где  $S_{1\Sigma}$  и  $S_{2\Sigma}$  – суммарные площади пазов в каждом из поперечных сечений сердечников статора и ротора;  $K_{зп}$  – полный коэффициент заполнения паза статора;  $D_c$  – средний диаметр ЭМС ТАД (рис. 1,а);  $K_{рш1(2)}$  – расчетный коэффициент соотношения высоты шлица и клина статора (ротора) к высоте зубца статора (ротора)  $h_{z1(2)}$ ;  $\gamma_1$  – расчетный коэффициент трансформации статора относительно ротора [11 – 13];  $b_{п\Sigma1(2)}$  – суммарная ширина паза статора (ротора);  $\alpha_{н1(2)}$  – расчетный коэффициент зубцов статора (ротора), зависящий от отношения  $K_{Вн\Sigma1(2)}$  [11] амплитуд индукции в зубце  $B_{zn\Sigma1(2)}$  на  $D_n$  и индукции в рабочем зазоре  $B_{\delta n}$ , а также коэффициента заполнения пакета магнитопровода электротехнической сталью (ЭТС)  $K_{зс}$ ,

$$\alpha_{н1(2)} = 1/(K_{зс}K_{Вн\Sigma1(2)}).$$

Потери в обмотке статора определяются, согласно [12], с использованием (2 – 4), (6), (8) и (12)

$$P_{эл1Т} = m_1 I_1^2 r_1 = \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}}\right) (J_1^2 / \sigma_{m20}) \Pi_{w1Т}^*, \quad (13)$$

где  $I_1$  – ток обмотки статора;  $\Pi_{w1Т}^*$  – безразмерный показатель основных потерь обмотки статора ТАД

$$\Pi_{w1Т}^* = \frac{1 + 1/\xi_T}{\sqrt[4]{a_{МТ}^3} 2(1 - 1/\xi_T)} \left[ \frac{1 - 1/\xi_T}{1 + 1/\xi_T} + \frac{K_{л}\beta\pi}{2p} \right]. \quad (14)$$

Основные потери в обмотке ротора ТАД находятся на основе (5), (7), (9), (11) и (12)

$$P_{эл2Т} = m_2 I_2^2 r_2 = \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}}\right)^3 (J_2^2 / \sigma_{a20}) \Pi_{w2Т}^*, \quad (15)$$

где  $I_2$  и  $J_2$  – ток и плотность тока обмотки ротора;  $\Pi_{w2Т}^*$  – безразмерный показатель основных потерь обмотки ротора, которые определяются при использовании коэффициента  $\gamma_2$ , учитывающего уменьшение плотности тока короткозамыкающего кольца  $J_3$  относительно плотности  $J_2$

$$\Pi_{w2Т}^* = \frac{\gamma_1}{\sqrt[4]{a_{МТ}^3} 2} \left[ 1 + \frac{\gamma_2(1 + 1/\xi_T)}{(1 - 1/\xi_T)p} \right]. \quad (16)$$

Потери в ЭТС зубцов  $P_{мz1Т}$  и ярма  $P_{ma1Т}$  магнитопровода статора ТАД определяются из (10), (12) и с учетом известных коэффициентов увеличения потерь зубцов  $K_{дз}$  и ярма  $K_{да}$  [10], значений плотности ЭТС  $\rho_c$ , удельных потерь ЭТС  $P_c$  при частоте сети 50 Гц и индукции 1 Тл, а также выражений коэффициента  $\alpha_{з1}$  и массы ярма  $m_{a1Т}$  [11]

$$P_{мz1Т} = P_c K_{дз} B_{\delta n}^2 \rho_c K_{зс} h_{z1} f_{ПzТ} D_c^2 = P_c B_{\delta n}^2 \rho_c K_{дз} \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}}\right)^3 \Pi_{z1Т}^*; \quad (17)$$

$$P_{Ma1Т} = P_c K_{да} K_{та} B_{a1}^2 m_{a1Т} = P_c B_{\delta n}^2 \rho_c K_{да} K_{Ba}^2 K_{та} \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}}\right)^3 \Pi_{a1Т}^*, \quad (18)$$

где  $f_{ПzТ}$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения индукции зубцов статора вдоль  $l_{\delta T}$ ;  $K_{та}$  – коэффициент повышения массы ярма трапецидального сечения относительно эквивалентного по площади ярма прямоугольного сечения (трапецидальность обеспечивает равномерное распределение индукции  $B_{a1}$  в ярме вдоль  $l_{\delta T}$ );  $\Pi_{z1Т}$  и  $\Pi_{a1Т}^*$  – относительные показатели потерь зубцов и потерь ярма статора ТАД:

$$f_{ПzТ} = \int_0^{2\pi} \int_{\xi_T}^1 \left( \frac{1}{4\xi_T} - \frac{(1 - \alpha_{н1})}{4} \right) \times \left( \frac{1 - 0,167(\xi_T - 1)^{1,36} \xi_T^{0,15}}{K_{зс}(1 - \xi_T)(1 - 1/(K_{Вн\Sigma1} K_{зс}))} \right)^2 d(1/\xi_T) d\varphi;$$

$$\Pi_{z1Т}^* = K_{зс} f_{ПzТ} \div \sqrt[4]{a_{МТ}^3 (1 - K_{рш1})K_{зп} 4\pi \frac{(1 - 1/\xi_T)(1 - \alpha_{н1})}{(1 + 1/\xi_T)^2}}; \quad (19)$$

$$K_{та} = \frac{1 + \frac{1 - 0,167(\xi_T - 1)^{1,36} \xi_T^{0,15}}{\xi_T}}{(1 + 1/\xi_T)(1 - K_{в})};$$

$$\Pi_{a1Т}^* = \sqrt[4]{a_{МТ}^3} K_{зс} K_{та} (\pi/p) \alpha_{з1} \frac{1 - 1/\xi_T}{1 + 1/\xi_T}, \quad (20)$$

где  $\alpha_{з1}$  – известный из [11] расчетный коэффициент ярма.

Потери в ЭМС ТАД определяются на основе [13] и с использованием (14), (16), (19), (20) уравнением вида (1)

$$P_{ПТ} = K_{дМТ} (P_{эл1Т} + P_{эл2Т} + P_{Mz1Т} + P_{Ma1Т}) = \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}}\right)^3 K_{дМТ} (J_2^2 / \sigma_{a20}) \Pi_{ПТ}^*, \quad (21)$$

где  $K_{дМТ}$  – коэффициент приближенного учета повышения основных потерь ЭМС ТАД до суммарных потерь;  $\Pi_{ПТ}^*$  – показатель потерь, позволяющий определять оптимальные геометрические соотношения ЭМС ТАД по критерию максимума КПД с использованием значений геометрических относительных УП  $a_{МТЭ}$  и  $\xi_{МТЭ}$ , соответствующих минимуму потерь,

$$\Pi_{ПТ}^* = \frac{P_c B_{\delta}^2 \rho_c \sigma_{a20}}{J_2^2} (K_{дз} K_{Вн\Sigma1}^2 \Pi_{z1Т}^* + K_{да} K_{Ba}^2 \Pi_{a1Т}^*) + \frac{J_1^2 \sigma_{a20}}{J_2^2 \sigma_{m20}} \Pi_{w1Т}^* + \Pi_{w2Т}^*.$$

Коэффициент  $K_{дМТ}$  представляется на основе [13] выражением

$$K_{дМТ} = K_{дхТ} K_{МТ} K_{днТ},$$

где  $K_{дхТ}$  – коэффициент поверхности холостого хода;  $K_{МТ}$  – коэффициент механических потерь;  $K_{днТ}$  – коэффициент добавочных нагрузочных потерь ТАД.

Учитываемое  $K_{дхТ}$  и  $K_{МТ}$  повышение потерь в ЭТС поверхностными  $P_{пов1(2)}$  и пульсационными  $P_{пул1(2)}$  составляющими, а также механическими и вентиляционными потерями  $P_{мехТ}$  определяются интегральными зависимостями с использованием [10]

Таблица 2

Экстремумы показателей потерь классических асинхронных короткозамкнутых двигателей

$\gamma_1$ , о.е.	$\lambda_{жэ}$	$a_{МКЭ}$ , о.е.	$\Pi_{ПКЭ}^*$ , о.е.	$\lambda_{жэ}$	$a_{МКЭ}$ , о.е.	$\Pi_{ПКЭ}^*$ , о.е.
	ЭТС 2013			ЭТС 2412		
	$p=1$					
1,338	2,20	2,50	5,825	2,40	5,10	4,544
1,903	2,35	4,09	8,108	2,60	6,50	6,422
2,785	2,75	4,50	12,01	2,95	8,00	9,664
	$p=2$					
1,338	1,15	13,50	3,998	1,30	20,75	3,123
1,903	1,30	16,25	5,575	1,45	25,75	4,432
2,785	1,50	19,50	8,295	1,60	32,50	6,699
	$p=3$					
1,338	0,80	40,33	3,036	0,95	56,83	2,379
1,903	0,95	45,17	4,243	1,05	70,00	3,386
2,785	1,05	56,67	6,333	1,15	90,50	5,134
	$p=4$					
1,338	0,65	67,25	2,647	0,75	98,625	2,076
1,903	0,75	77,50	3,703	0,85	117,63	2,958
2,785	0,85	94,25	5,534	0,95	147,25	4,491

$$P_{\text{мехТ}} = K_{\text{ТТ}}(f_1/p)^2 \frac{D_n^3}{8} \int_{\xi_T}^1 1/\xi_T^2 d(1/\xi_T) =$$

$$= (K_{\text{ТТ}}/24)(f_1/p)^2 D_n^3 (1 - 1/\xi_T^3);$$

$$P_{\text{пов1(2)}} = 0,25K_{\text{О1(2)}}(z_{2(1)}60f/p)^{1,5}(\pi/z_{2(1)})^2 B_{\delta n}^2 z_{1(2)} D_n^4 \times$$

$$\times \int_{\xi_T}^1 \frac{\beta_{\text{О1(2)}}^2}{\xi_T^2} (1 + K_{b_{\text{ш1(2)}}}) / \left( \frac{\pi \xi_T}{z_{2(1)}} - K_{b_{\text{ш1(2)}}} + \frac{5K_D \pi \xi_T^2}{z_{1(2)} K_{b_{\text{ш1(2)}}}} \right)^2 \times$$

$$\times (1 - 0,167(\xi_T - 1)^{1,36} \xi_T^{0,15})^2 \left( \frac{\pi}{z_{1(2)} \xi_T} - K_{b_{\text{ш1(2)}}} \right) d(1/\xi_T);$$

$$P_{\text{пул1(2)}} = 1,1 \times 10^{-7} (z_{2(1)}60f_1/p)^2 \rho_c K_{зс} B_{\delta n}^2 h_{z1(2)} z_{1(2)}^2 D_n^2 \times$$

$$\times \int_{\xi_T}^1 K_{b_{\text{ш1(2)}}}^4 / (5K_D \xi_T^2 + K'_{b_{\text{ш1(2)}}} \xi_T)^2 \times$$

$$\times (1 - 0,167(\xi_T - 1)^{1,36} \xi_T^{0,15}) / (K_{зс}(1 - \xi_T)(1 - 1/(K_{\text{ВнЭ1(2)}} K_{зс})))^2 \times$$

$$\times (1/(16\pi \xi_T) - (1 - \alpha_{\text{н1(2)}})/(16\pi^2)) d(1/\xi_T),$$

где  $K_{\text{ТТ}}$  – эмпирический коэффициент трения;  $K_{\text{О1(2)}}$  – коэффициент обработки активных поверхностей статора (ротора);  $\beta_{\text{О1(2)}}$  – коэффициент, зависящий от отношения ширины шлица пазов ротора (статора)  $b_{\text{ш2(1)}}$  к рабочему зазору  $\delta$ ;  $K_{b_{\text{ш1(2)}}}$  и  $K_D$  – коэффициенты отношения  $b_{\text{ш1(2)}}$  и  $\delta$  к  $D_n$  соответственно;  $K'_{b_{\text{ш1(2)}}}$  – относительный коэффициент раскрытия паза.

Примеры расчетов показателя (22), соответствующих средним значениям расчетных коэффициентов для  $\gamma_1$  восьми полюсных ЭМС ТАД и АДК представлены на рис. 3. При сравнении ЭМС ТАД и АДК принимается допущение  $K_{\text{дМТ}} \approx K_{\text{дМК}}$  ввиду идентичности геометрических соотношений зубцов и шлицевых зон ЭМС электромагнитно-эквивалентных ТАД и АДК. Результаты расчетов экстремумов  $\Pi_{\text{ПТЭ}}^*$  по уравнению (22) для ЭМС ТАД, полученных при  $K_{\text{зп}} = 0,3$ ;  $K_{зс} = 0,97$ ,  $K_{\text{Ба}} = 2$  при  $p \leq 2$  и  $K_{\text{Ба}} = 1,5$  при  $p > 2$ ,  $\gamma_2 = 0,85$ ,  $K_{\text{рш}} = 0,12$ , а также трех (минимальном 1,338, среднем 1,903 и максимальном 2,785) значениях  $\gamma_1$ , выполненных для марок ЭТС 2013 и 2412, представлены в табл. 1. Экстремальные показатели потерь  $\Pi_{\text{ПКЭ}}^*$  для электромагнитно-эквивалентных АДК [13] представлены в табл. 2.

Таблица 1

Экстремумы показателей потерь торцевых асинхронных короткозамкнутых двигателей

$\gamma_1$ , о.е.	$\xi_{ТЭ}$	$\lambda_{ТЭ}$	$a_{\text{МТЭ}}$ , о.е.	$\Pi_{\text{ПТЭ}}^*$ , о.е.	$\xi_{ТЭ}$	$\lambda_{ТЭ}$	$a_{\text{МТЭ}}$ , о.е.	$\Pi_{\text{ПТЭ}}^*$ , о.е.
	ЭТС 2013				ЭТС 2412			
	$p=1$							
1,338	2,60	0,444	10,020	4,872	2,65	0,452	18,409	4,035
1,903	2,65	0,452	14,328	7,087	2,65	0,452	27,053	5,915
2,785	2,65	0,452	21,322	10,98	2,70	0,459	40,471	9,215
	$p=2$							
1,338	2,35	0,403	16,293	2,929	2,40	0,412	27,703	2,396
1,903	2,40	0,412	21,646	4,211	2,40	0,412	38,812	3,483
2,785	2,40	0,412	30,879	6,456	2,45	0,420	59,202	5,385
	$p=3$							
1,338	2,15	0,365	29,940	2,091	2,20	0,375	50,114	1,781
1,903	2,20	0,375	41,783	2,985	2,25	0,385	73,952	2,455
2,785	2,25	0,385	58,539	4,547	2,25	0,385	105,78	3,778
	$p=4$							
1,338	2,00	0,333	40,021	1,756	2,05	0,344	66,176	1,418
1,903	2,05	0,344	55,495	2,495	2,10	0,355	93,732	2,044
2,785	2,10	0,355	74,219	3,785	2,10	0,355	138,01	3,136

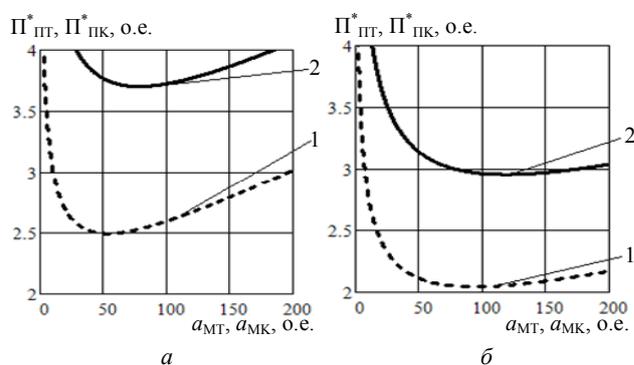


Рис. 3. Зависимости показателей потерь восьми полюсных вариантов электромагнитных систем асинхронных двигателей: торцевого (1) и классического (2) исполнения при использовании электротехнических сталей 2013 (а) и 2412 (б)

### Выводы.

1. Функциональные зависимости потерь активной части ТАД являются унимодальными функциями с соответствующими экстремумами потерь значениями  $a_{\text{МТЭ}}$  и  $\xi_{\text{ТЭ}}$ , которые возрастают при использовании ЭТС с меньшими удельными потерями

2. Установлено, что ЭМС ТАД с трапецевидными сечениями ярем отличаются от электромагнитно-эквивалентных ЭМС АДК при  $p=1$ ,  $p=2$ ,  $p=3$  и  $p=4$  улучшенными (сниженными) показателями потерь активной мощности соответственно на 8...12 %, 21...24 %, 28...30 % и 31 %, что обусловлено меньшими объемами ЭТС ярем статоров ТАД.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ставинский А.А. Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики // Электротехника и электромеханика. – 2004. – №1. – С. 57-61.
2. Казанский В.М., Зонов В.Н., Британчук В.М. К вопросу о сравнении асинхронных электродвигателей торцевого и цилиндрического исполнения малой мощности // Материалы межвузовской научно-технической конференции «Асинхронные микромашины». – Каунас: КПИ. – 1969. – С. 216-219.
3. Игнатов В.Я., Вильданов К.Я. Торцевые асинхронные электродвигатели интегрального изготовления. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.
4. А.с. 920258 СССР, МКИ2 F04B39/06, F25B31/02. Герметичный холодильный компрессор / А.А. Ставинский,

В.И. Гидулян. – № 2758809/26 – 06; Заявл. 19.04.79; Опубл. 15.04.82, Бюл. №14.

5. Ставинский А.А. Совершенствование судовых электро-механических систем встречного вращения на основе специальных асинхронных двигателей // Судостроение. – 2011. – №6. – С. 35-38.

6. Caricchi F. Axial flux electromagnetic differential induction motor. 17th Int. Conf. on Electrical Machines and Drives. Institution of Engineering and Technology (IET), 11-13 Sept. 1995, pp. 1-5.

7. Igelspacher J., Herzog H.-G. Analytical description of a single-stator axial-flux induction machine with squirrel cage. XIX Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM 2010). Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 6-8 Sept. 2010, pp. 1-6.

8. Profumo F., Zheng Zhang, Tenconi A. Axial flux machines drives: a new viable solution for electric cars. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, vol.44, no.1, pp. 39-45.

9. [http://www.axcomotors.com/axial-flux\\_technology.html](http://www.axcomotors.com/axial-flux_technology.html).

10. Домбровский В.В., Зайчик В.М. Асинхронные машины: теория, расчет, элементы проектирования. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 368 с.

11. Ставинский А.А., Пальчиков О.О. Сравнительный анализ массо-стоимостных показателей асинхронных двигателей с цилиндрическим и аксиальным рабочим зазором // Электротехника і електромеханіка. – 2015. – №3. – С. 20-26.

12. Ставинский А.А., Пальчиков О.О. Использование метода относительных коэффициентов показателей технического уровня в решении задач оптимизации асинхронных двигателей // Электротехника і електромеханіка. – 2014. – №5. – С. 37-44.

13. Ставинский А.А., Пальчиков О.О. Целевые функции сравнительного анализа энергетической эффективности электромагнитных систем асинхронных двигателей с внутренними и внешними роторами // Электротехника і електромеханіка. – 2015. – №1. – С. 41-45.

14. Ставинский А.А., Ставинский Р.А., Авдеева Е.А. Оптимизационный сравнительный анализ структур статических электромагнитных систем. Ч.1. Варианты и метод оценки преобразований // Электричество. – 2014. – №9. – С. 34-43.

#### REFERENCES

1. Stavinskii A.A. Problem and directions of further evolution of electromechanical devices. *Elektrotekhnik i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2004, no.1, pp. 57-61. (Rus).

2. Kazanskii V.M., Zonov V.N., Britanchuk V.M. To the question about the comparison of axial and cylindrical low-power versions of induction motors. *Materialy mezhvuzovskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Asinkhronnye mikro-mashiny»*. [Abstracts of Int. Sci.-Pract. Conf. «Induction micro-machines»]. Kaunas, 1969, pp. 216-219. (Rus).

3. Ignatov V.Ya., Vil'danov K.Ya. *Tortsevye asinkhronnye elektrodvigateli integral'nogo izgotovleniia* [Axial field induction integrated manufacturing motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 304 p. (Rus).

4. Stavinskii A.A., Gidulian V.I. *Germetichnyi kholodil'nyi kompressor* [Hermetic refrigeration compressor]. Inventor's certificate USSR, no.2758809, 1979. (Rus).

5. Stavinskii A.A. Improving marine counter rotating electromechanical systems based on specific induction motors. *Sudostroenie – Shipbuilding*, 2011, no.6, pp. 35-38. (Rus).

6. Caricchi F. Axial flux electromagnetic differential induction motor. 17th Int. Conf. on Electrical Machines and Drives. Institution of Engineering and Technology (IET), 11-13 Sept. 1995, pp. 1-5. doi: 10.1049/cp:19950824.

7. Igelspacher J., Herzog H.-G. Analytical description of a single-stator axial-flux induction machine with squirrel cage. XIX Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM 2010). Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 6-8 Sept. 2010, pp. 1-6. doi: 10.1109/icelmach.2010.5608227.

8. Profumo F., Zheng Zhang, Tenconi A. Axial flux machines drives: a new viable solution for electric cars. *IEEE Transactions*

on Industrial Electronics, 1997, vol.44, no.1, pp. 39-45. doi: 10.1109/41.557497.

9. Available at: [http://www.axcomotors.com/axial-flux\\_technology.html](http://www.axcomotors.com/axial-flux_technology.html) (accessed 11 May 2014).

10. Dombrovskii V.V., Zaichik V.M. *Asinkhronnye mashiny: teoriia, raschet, elementy proektirovaniia* [Asynchronous machines: theory, calculation, design elements]. Leningrad, Energoatomizdat. Publ., 1990. 368 p. (Rus).

11. Stavinskii A.A., Palchykov O.O. Comparative analysis of weight and cost indications of induction motors with cylindrical and axial air gaps. *Elektrotekhnik i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.3, pp. 20-26. (Rus).

12. Stavinskii A.A., Palchykov O.O. Application of a relative technical level index method to induction motor optimization problems. *Elektrotekhnik i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.5, pp. 37-44. (Rus).

13. Stavinskii A.A., Palchykov O.O. Objective functions of the comparative analysis of the energy efficiency of electromagnetic systems of induction motors with inner and outer rotors. *Elektrotekhnik i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.1, pp. 41-45. (Rus).

14. Stavinskii A.A., Stavinskii R.A., Avdeeva E.A. Optimization comparative analysis of static electromagnetic systems structures. Part. 1. Options and method of assessment of change. *Elektrichestvo – Electricity*, 2014, no.9, pp. 34-43. (Rus).

Поступила (received) 24.02.2015

Ставинский Андрей Андреевич<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Пальчиков Олег Олегович<sup>1</sup>, аспирант,

<sup>1</sup> Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова,  
54025, Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9,  
тел./phone +38 0512 399453, e-mail: ole2013hulk@yandex.ua

A.A. Stavinskii<sup>1</sup>, O.O. Palchykov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Admiral Makarov National University of Shipbuilding,  
9, Geroyev Stalingrada Ave., Mykolaiv, 54025, Ukraine.

#### Comparative analysis of active power losses of induction motors with cylindrical and axial air gaps.

**Purpose.** To find the analytical expressions of determining the optimum geometric dimensions by criteria of the losses minimum of axial field squirrel-cage induction motors and to compare traditional and axial field motors. **Methodology.** We have applied the method of the relative indications of the technical level with relative controlled variables. We have used the approximation of the experimental dependence of the distribution of the induction in the air gap and the integral averaging of the magnetic flux. **Results.** We have developed the mathematical model for determining the optimum geometric dimensions by criteria of the losses minimum of the active part of axial field squirrel-cage induction motors taking into account the radial distribution of the induction in the air gap and teeth. We have considered the comparative analysis of the indications of active power losses of traditional and axial designs of electromagnetic equivalent motors. **Originality.** For the first time we have created the mathematical model of the active power losses of the active part of axial field squirrel-cage induction motors with the uneven distribution of the magnetic flux in the core and investigated the effect of the geometric relationships on the energy efficiency of axial field motors. **Practical value.** Based on the superior parametric compatibility and the high energy efficiency of axial motors the expediency of replacing traditional induction motors to axial field induction motors has been proved in the special drives, which operates in continuous duty. Also obtained by simulation optimal geometric relationships of the magnetic circuit can be used in the manufacture and design of axial motors by criteria of the losses minimum. References 14, tables 2, figures 3.

**Key words:** losses indication, optimum geometric dimensions, traditional and axial field motors.

## **ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА УНИЧТОЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ НА ЦИФРОВЫХ НАКОПИТЕЛЯХ**

*Розроблено комплекс високоефективних автономних імпульсних електромеханічних та електромагнітних пристроїв знешкодження інформації на цифрових носіях. Зазначені пристрої при обмежених масогабаритних показниках збуджують потужні механічні та магнітні імпульси. Розглянуті електромеханічні пристрої індукційно-динамічного типу, з акумулюванням механічної енергії та пристрої комбінованої дії, що використовують індукційно-динамічні, електродинамічні та електромагнітні сили. Запропоновані конструкції пристроїв, що призначені для знешкодження інформації на USB флеш-накопичувачах та твердотільних SSD накопичувачах. Запропонована конструкція імпульсного магнітно-механічного пристрою, в якому знешкодження інформації здійснюється механічним та магнітним імпульсами одночасно. Бібл. 22, табл. 1, рис. 21.*

*Ключові слова:* імпульсні електромеханічні і електромагнітні пристрої, знищення інформації на цифрових накопичувачах, конструкції пристроїв, механічні та магнітні імпульси.

*Разработан комплекс высокоэффективных автономных импульсных электромеханических и электромагнитных устройств уничтожения информации на цифровых накопителях. Указанные устройства при ограниченных массогабаритных показателях возбуждают мощные механические или магнитные импульсы. Рассмотрены электромеханические устройства индукционно-динамического типа, с аккумулярованием механической энергии и устройства комбинированного действия, использующие индукционно-динамические, электродинамические и электромагнитные силы. Предложены конструкции устройств, предназначенных для уничтожения информации на USB флеш-накопителях и твердотельных SSD накопителях. Предложена конструкция импульсного магнитно-механического устройства, в котором уничтожение информации осуществляется механическим и магнитным импульсами одновременно. Библ. 22, табл. 1, рис. 21.*

*Ключевые слова:* импульсные электромеханические и электромагнитные устройства, уничтожение информации на цифровых накопителях, конструкции устройств, механические и магнитные импульсы.

**Введение.** В настоящее время на цифровых накопителях хранятся значительные объемы информации, имеющие большую важность, конфиденциальность и коммерческую ценность. К цифровым накопителям предъявляются высокие требования по защите хранящейся информации при несанкционированном доступе. В качестве цифровых накопителей информации (ЦНИ) используются накопители на жестких магнитных дисках (НЖМД), USB-Flash накопители, SSD накопители, оптические диски, карты памяти SD, CF и др. Надо иметь ввиду, что в мире ежегодно производят около 5 млрд Гбайт оригинальной информации, около 80 % которой хранится и передается при непосредственном участии накопителей, использующих принципы магнитной записи [1, 2].

Наиболее эффективным путем сохранения важной информации при несанкционированном доступе или при необходимости гарантированного ее уничтожения рассматриваются методы, при которых разрушается или необратимо повреждается ЦНИ, расположенный внутри или вне компьютера [3].

Решение на уничтожение информации ЦНИ принимает либо оператор, либо автоматика, которая должна обеспечивать высокую скорость, надежность, безопасность, автономность и т.п. [4]. Наибольшее распространение получили следующие способы уничтожения информации на ЦНИ [5, 6]:

**Механический способ,** при котором ЦНИ механически разрушается так, чтобы исключить возможность прочтения информации каким-либо способом. Данный способ можно реализовать путем измельчения ЦНИ шредером, нарушения герметичности камеры,

поскольку вскрытие корпуса гермокамеры приводит к загрязнению пластин и выводу НЖМД через несколько часов из строя, путем сверления ЦНИ, воздействием ударной нагрузки, например при помощи молота и др.

**Магнитный способ,** при котором осуществляется либо размагничивание НЖМД медленно затухающим магнитным полем, либо его намагничивание сильным магнитным полем. Наибольшее распространение получили импульсные установки, которые создают сильные магнитные поля кратковременного воздействия.

**Термический способ,** при котором осуществляется нагрев ЦНИ до температуры плавления. Гарантия уничтожения информации наступает при разогреве накопителя до температуры 800-1000 °С. Так при нагревании ферромагнетика до температуры, превышающей точку Кюри, материал становится парамагнетиком. Ферромагнитный материал рабочего слоя НЖМД теряет свою остаточную намагниченность, и все следы записанной информации уничтожаются.

**Пиротехнический способ,** при котором разрушение ЦНИ осуществляется при помощи взрыва.

**Металлотермический способ,** при котором уничтожение основы НЖМД, на который непосредственно нанесено магнитное покрытие, осуществляется высокой температурой самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Для этого на основу наносится специальный слой термитного покрытия.

**Химический способ,** при котором разрушение рабочего слоя или основы НЖМД осуществляется путем применения химически агрессивных сред.



Такой цикл повторяется до проникновения бойка в ЦНИ на глубину, задаваемую датчиком положения ДП, после чего коммутатор **К** прекращает процесс [9].

На рис. 2 показаны ЭУЗИ индукционно-динамического типа моноблочного и двухблочного исполнения. В двухблочном исполнении имеется силовой и электронный блоки, которые соединены между собой гибкими проводами. В этих ЭУЗИ имеется круглый якорь, наружный диаметр которого совпадает с диаметром обмотки индуктора. С якорем соединена силовая пластина.



а



б

Рис. 2. Общий вид ЭУЗИ моноблочного исполнения с НЖМД (а) и двухблочного исполнения (б), с силовым (на переднем плане) и электронным (на заднем плане) блоками

Указанные ЭУЗИ имеют следующие параметры **обмотки индуктора**: внешний диаметр  $D_{ex1} = 100$  мм, внутренний диаметр  $D_{in1} = 10$  мм, высота  $H_1 = 10$  мм, количество витков  $N_1 = 46$  шт, сечение шины  $a \times b = 1,8 \times 4,8$  мм<sup>2</sup>; **медного якоря**: внешний диаметр  $D_{ex2} = 100$  мм, внутренний диаметр  $D_{in2} = 6$  мм, высота  $H_2 = 3$  мм; **ЕНЭ**: емкость  $C = 2850$  мкФ, зарядное напряжение  $U_0 = 400$  В.

Математическая модель импульсного индукционно-динамического преобразователя, описывающая комплекс взаимосвязанных электромагнитных, механических и тепловых процессов, представлена в работах [10-12].

На рис. 3 показаны временные характеристики ЭУЗИ: плотность тока в индукторе  $j_1$ , усредненная по сечению плотность тока в якоре  $j_2$ , величина  $f_z$  и импульс  $F_z = \int f_z dt$  СЭД, действующие на якорь в аксиальном направлении.

Разрядный ток в индукторе, индуцированный ток в якоре и СЭД имеют характер полярных импульсов. В результате сохранения полярности величины СЭД  $f_z$  происходит увеличение аксиального импульса СЭД  $F_z$  в начале рабочего процесса с последующим насыщением к его окончанию.

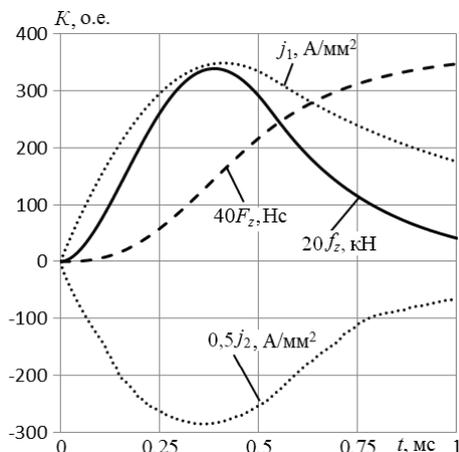


Рис. 3. Временные характеристики ЭУЗИ индукционно-динамического типа

В каждый момент времени наблюдается пространственная неравномерность электромеханических процессов. На рис. 4 показано 2D распределение магнитной индукции в активных элементах ЭУЗИ в момент максимума СЭД (0,37 мс). В последующем все распределения параметров будем рассматривать при максимуме СЭД, действующих на якорь. Можно отметить существенную неравномерность распределения индукции магнитного поля, как в радиальном, так и в аксиальном направлениях в активных элементах ЭУЗИ. Наибольшая индукция возникает в центральной области индуктора и в зоне между индуктором и якорем, а наименьшая – внутри индуктора.

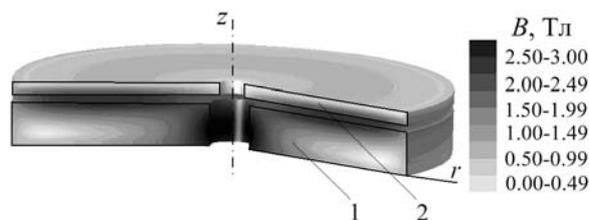
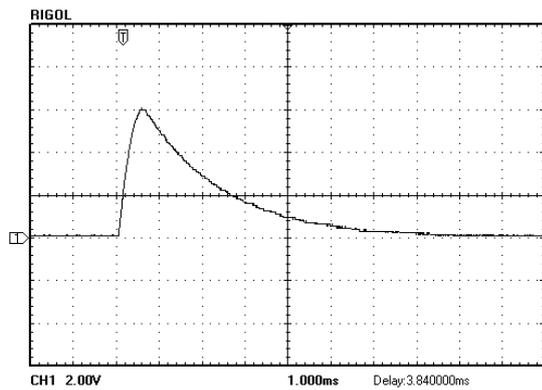
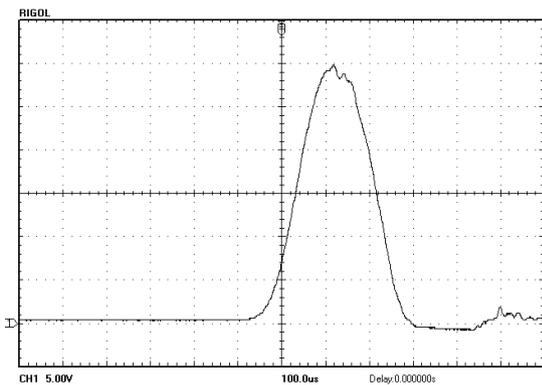


Рис. 4. Распределение индукции магнитного поля в индукторе 1 и якоре 2 ЭУЗИ

Были проведены экспериментальные исследования ЭУЗИ, при которых с помощью электронного осциллографа RIGOL измерялись ток в индукторе и динамическое давление на НЖМД. Для измерения динамического давления использовался датчик M101A06 фирмы PCB, который снабжен встроенным усилителем, имеет динамический диапазон 0,68-3450 кПа, чувствительность 1,45 мВ/кПа и выдерживает максимальное давление 34,5 МПа. На рис. 5,а показан измеренный ток в индукторе при отсутствии начального зазора между бойком и НЖМД, который удовлетворительно совпадает с рассчитанным током (см. рис. 3). На рис. 5,б показано измеренное значение динамического давления, которое удовлетворительно совпадает с рассчитанным.



а



б

Рис. 5. Измеренные ток в индукторе (а) и динамическое давление (б) ЭУЗИ индукционно-динамического типа

В процессе испытаний установлено, что пробой стандартного НЖМД происходит после 1 удара, на что необходимо 3 с после подачи запускающего импульса. В случае использования НЖМД с особо прочным корпусом ЭУЗИ возбуждает серию последовательных силовых импульсов для проникновения бойка на заданную глубину. Отметим, что после воздействия трех импульсов пробивался НЖМД с самым прочным корпусом.

На рис. 6 показан общий вид НЖМД со снятой крышкой после срабатывания ЭУЗИ.



Рис. 6. Общий вид НЖМД со снятой крышкой после срабатывания ЭУЗИ

Предлагаемая технология защиты информации защищена патентами [5, 10] и характеризуется высокой эффективностью. При этом отмечаются следующие повреждения НЖМД: сквозные отверстия во всех пластинах с магнитным слоем, деформация блока головок, нарушение геометрии пластин (видно по

отражению света на пластинах) и микротрещины магнитного слоя в районе удара. По заключению специалистов по восстановлению НЖМД компании Ontrack Data Recovery, которые гарантируют среднюю эффективность восстановления данных НЖМД на уровне 75 %, в том числе после воздействия внешнего магнитного поля, на данный момент не существует технологии, с помощью которой можно было бы восстановить информацию, когда в пластинах НЖМД есть дырка [13].

Как показывает анализ, прямоугольный якорь имеет ряд конструктивных преимуществ по сравнению с круглым при использовании в ЭУЗИ [14]. На рис. 7 показаны якоря круглой и прямоугольной формы. Медные якоря со стальными силовыми пластинами соединены при помощи четырех крепежных элементов, расположенных симметрично в круглом якоре и в углах прямоугольного якоря.



а

б

Рис. 7. Образцы якоря круглой (а) и прямоугольной (б) формы

Крепежные отверстия в якоре могут влиять на характер индуцированного тока. Было установлено месторасположение указанных отверстий, при которых происходит минимальное ухудшение СЭД в ЭУЗИ. На рис. 8 показано распределение плотности индуцированного тока в круглом ( $D_{ex2} = 100$  мм) и в прямоугольном ( $B = 100$  мм,  $A = 120$  мм) якорях.

В круглом якоре отверстия расположены вблизи центральной оси и они мало влияют на эффективность ЭУЗИ. Перераспределение плотности тока наблюдается непосредственно в области крепежных отверстий. В прямоугольном якоре распределение плотности тока практически симметрично относительно центральной оси, а основные отличия возникают на краях. На участках якоря, расположенных вне индуктора (в углах и концах длинной стороны) плотности индуцированного тока минимальны, что указывает целесообразность расположения здесь крепежных отверстий.

На рис. 9,а показан усовершенствованный ЭУЗИ многоблочного исполнения, включающий два силовых и один электронный блок со снятыми защитными крышками. Как видно, основной объем электронного блока составляет батарея электролитических конденсаторов. Сверху силового блока установлены оптические датчики положения концевой части бойка.

Силовые блоки выполняются или с фиксируемым или подвижным НЖМД, что обусловлено требованиями монтажа и диагностики (рис. 9,б,в). В этих силовых блоках якорь выполнен в форме прямоуголь-

ника, силовая пластина выполнена в элементах жесткости, а возвратные пружины соединены с тягами, которые установлены перекрестно друг с другом.

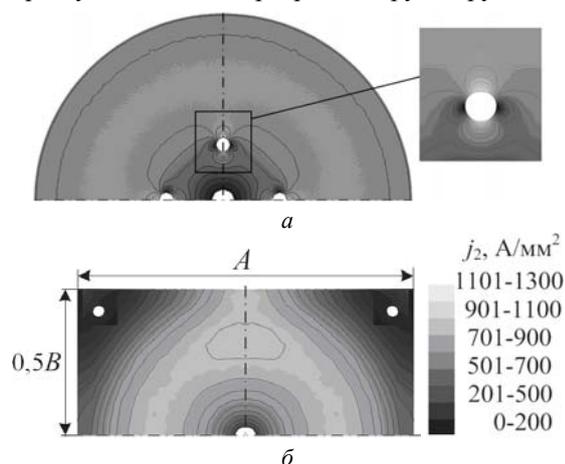


Рис. 8. Распределение плотности тока в круглом (а) и прямоугольном (б) якорях

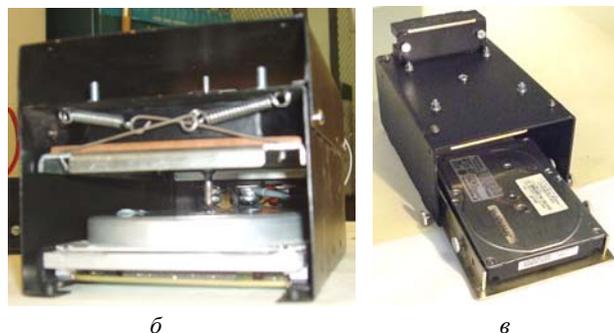
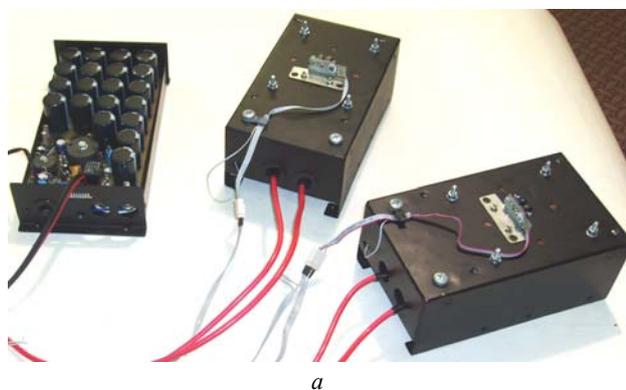


Рис. 9. Общий вид ЭУЗИ многоблочного исполнения (а), силовой блок с фиксируемым (б) и подвижным (в) НЖМД

В табл. 1 представлены основные массогабаритные и электромеханические параметры ЭУЗИ двухблочного исполнения.

**ЭУЗИ с аккумулярованием механической энергии.** Одним из недостатков ЭУЗИ индукционно-динамического типа является относительно невысокая эффективность, связанная с перемещением якоря до момента возникновения максимальной СЭД. Указанную проблему решает ЭУЗИ с аккумулярованием механической энергии, в котором якорь на начальном рабочем участке удерживается внешним электромагнитом [15]. Индуктор 1, охваченный ферромагнитным экраном, взаимодействует с электропроводящим якорем 3, который перемещает силовой диск 4 с бойком 5 (рис. 10). С силовым диском связан направляющий

ферромагнитный штырь 6, который взаимодействует с электромагнитом 7. Между якорем 3 и диском 4 установлена пружина 8.

Таблица 1

Параметры ЭУЗИ двухблочного исполнения	
Диаметр бойка	5 мм
Длина рабочего хода бойка	15 мм
Напряжение питания,	12 В
Потребляемая мощность при зарядке аккумулятора	200 Вт
Габаритные размеры:	
• силового блока	185×112×100 мм
• электронного блока	225×119×54 мм
Масса:	
• силового блока	2,2 кг
• электронного блока	1,4 кг
Режим работы	повторно-кратковременный
Мощность в импульсе	10 кВт
Энергия удара	30 Дж
Величина импульса тока индуктора	2,4 кА
Максимальная скорость якоря	13,6 м/с
Продолжительность включения	0,5 %

Работой ЭУЗИ управляет блок питания БУ. В исходном положении электромагнит 7 питается от преобразователя ПР, удерживая ферромагнитный штырь 6 вместе с силовым диском 4. Вследствие этого при возбуждении индуктора 1 от заряженного ЕНЭ С под действием СЭД происходит незначительное перемещение якоря 3, при котором пружина 8 сжимается. После чего электромагнит при помощи блока управления БУ отключают от источника питания. Силовой диск 4 вместе с бойком под действием СЭД и силы сжатия пружины приобретает дополнительную кинетическую энергию в направлении оси z.

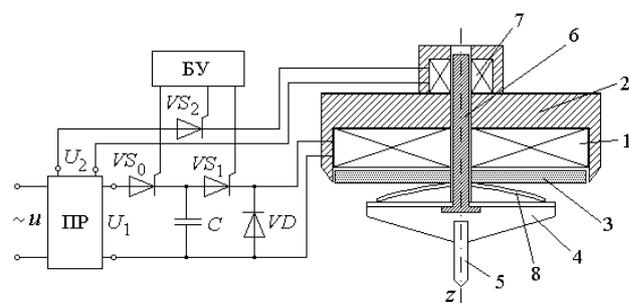


Рис. 10. ЭУЗИ с аккумулярованием механической энергии

**ЭУЗИ комбинированного действия.** Одним из направлений повышения эффективности ЭУЗИ является организация совместного действия СЭД отталкивания на электропроводящий якорь и электромагнитных сил притяжения на ферромагнитный якорь, которые направлены в сторону ЦНИ.

На рис. 11 представлен ЭУЗИ индукционно-электромагнитного типа, у которого оба якоря соединены между собой. Роль ферромагнитного якоря выполняет боек [16].

ЭУЗИ включает индуктор 1, электропроводящий якорь 2, выполненный в форме диска с внутренней обечайкой, и ферромагнитный боек 3 который соединен с якорем 2 (рис. 11). ЦНИ 4 размещается в ферромагнитном корпусе 5, который содержит стенки 6 и

выемку 7 для ЦНИ 4. При возбуждении индуктора 1 на расширенную часть бойка 3 действуют электромагнитные силы, а на якорь 2 – СЭД, которые направлены в одну сторону. Под действием этих сил боек 3 заостренным концом 8 пробивает ЦНИ 4.

На рис. 11,б,в показаны элементы и общий вид этого ЭУЗИ, который был испытан и подтвердил основные теоретические положения.

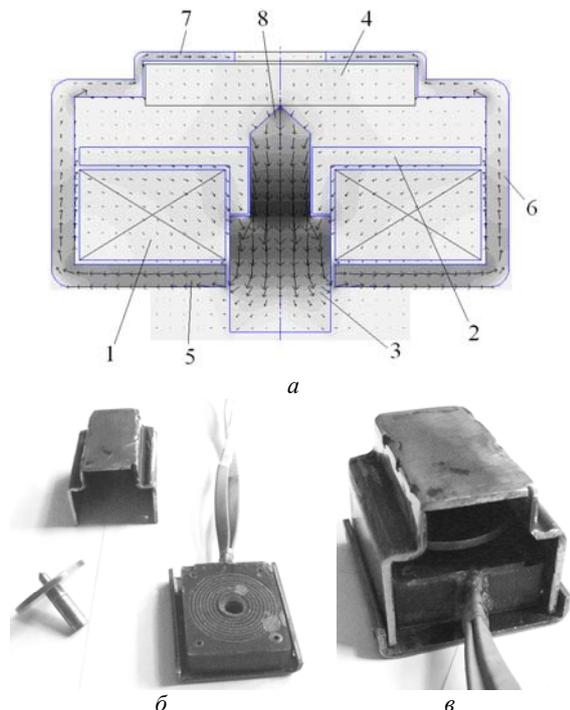


Рис. 11. Конструктивная схема с распределением магнитного поля (а), элементы (б) и общий вид (в) ЭУЗИ индукционно-электромагнитного типа

Поскольку скорость нарастания электромагнитных и электродинамических сил различна, то перспективным направлением совершенствования ЭУЗИ является разделение электропроводящего и ферромагнитного якорей при использовании механического аккумулирования энергии (рис. 12) [17]. В этом устройстве индуктор 1 взаимодействует с электропроводящим 2 и ферромагнитным 3 якорями. Якорь 2 соединен с силовым диском 4, который в исходном положении удерживается упругими фиксаторами 5. Между якорем 3 и диском 4 установлена силовая пружина 6, а между диском 4 и корпусом 7 установлена возвратная пружина 8, охватывающая боек 9. К якорю 3 присоединены направляющие штыри 10, которые воздействуют на фиксаторы 5.

При возбуждении индуктора 1 на электропроводящий якорь 2 действуют СЭД отталкивания. Однако этот якорь удерживается в состоянии максимальной магнитной связи с индуктором упругими фиксаторами 5. На ферромагнитный якорь 3, обладающий большей инерционностью, со стороны индуктора 1 действует электромагнитная сила притяжения. При перемещении якоря 3 силовая пружина 6 сжимается. После воздействия направляющих штырей 10 упругие фиксаторы 5 отпускают якорь 2 с силовым диском 4. При этом силовая пружина 6 обеспечивает увеличение кинетической энергии бойка 9.

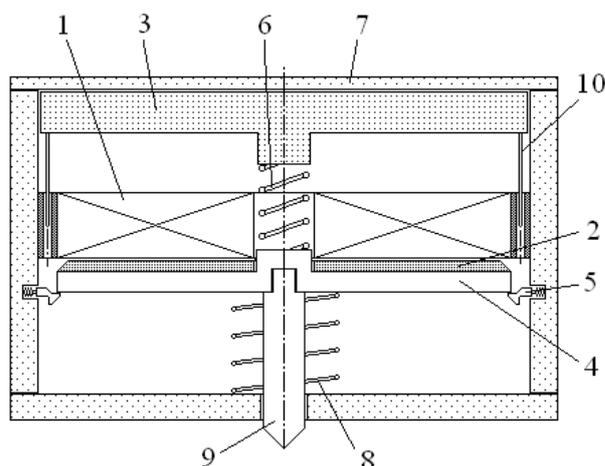


Рис. 12. ЭУЗИ индукционно-электромагнитного типа с ферромагнитным и электропроводящим якорями

Одним из путей увеличения механического импульса ЭУЗИ является совместное использование индукционно-динамических, электродинамических и электромагнитных сил, направленных в одну сторону [18]. ЭУЗИ комбинированного действия содержит индуктор, состоящий из неподвижной 1 и подвижной 2 секций, которые соединены между собой электрически последовательно и встречно по магнитному полю при помощи контактного токосъема (рис. 13).

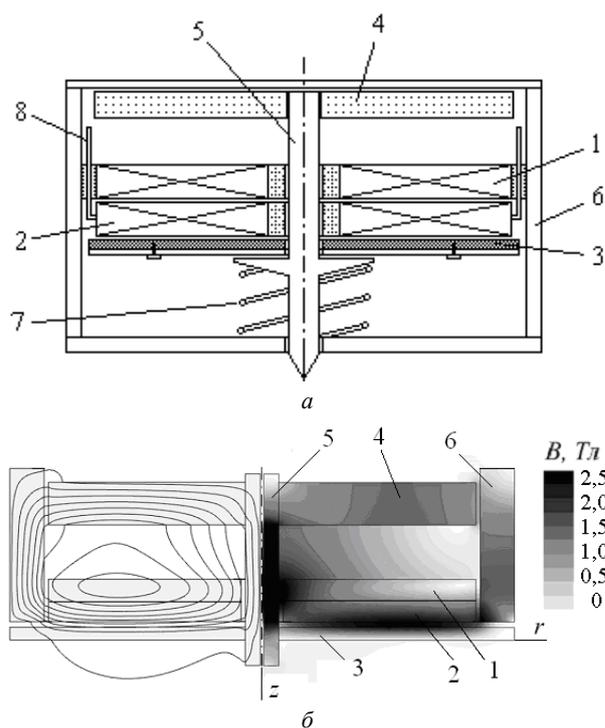


Рис. 13. Конструктивная схема (а) и распределение магнитного поля (б) ЭУЗИ комбинированного действия

Подвижная секция 2 индуктора установлена напротив электропроводящего якоря 3, а неподвижная секция 1 индуктора – напротив ферромагнитного якоря 4, с которым соединен боек 5. Боек выполнен с расширенным участком, контактирующим с якорем 3. Указанные элементы расположены в ферромагнитном корпусе 6. Между якорем 3 и корпусом установлена возвратная пружина 7. Один из направляющих стерж-

ней 8 для подвижной секции 2 индуктора выполнен в виде скользящего контакта.

При возбуждении индуктора между его секциями 1 и 2 возникает электродинамическая сила отталкивания, между подвижной секцией 2 индуктора и электропроводящим якорем 3 возникает индукционно-динамическая сила отталкивания, а между неподвижной секцией 1 индуктора и ферромагнитным якорем 4 возникает электромагнитная сила притяжения. Все указанные силы суммируются, вследствие чего боек 5 приобретает повышенную кинетическую энергию. На рис. 13,б показано распределение магнитных полей в момент максимума тока в индукторе, откуда следует, что наибольшее поле возникает в направляющей части бойка и в зазоре между подвижной секцией индуктора и электропроводящим якорем.

**ЭУЗИ для USB флеш-накопителя.** Поскольку USB флеш-накопители обладают малыми размерами и удлиненной формой, то это необходимо учитывать при разработке соответствующих ЭУЗИ. Рассмотрим ЭУЗИ с замкнутым магнитопроводом, который содержит индуктор 1 в виде соленоида и электропроводящий якорь 2, расположенные внутри ферромагнитного сердечника 3, выполненного в виде стакана с крышкой 4 (рис. 14,а) [19].

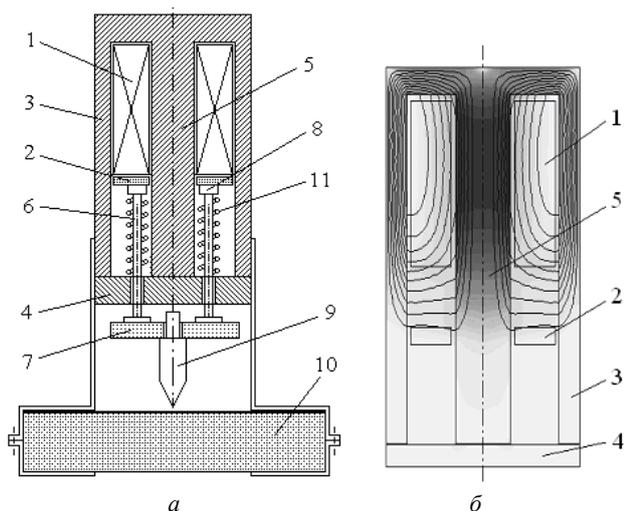


Рис. 14. Конструктивная схема (а) и распределение магнитных полей (б) ЭУЗИ с замкнутым магнитопроводом

Индуктор 1 и якорь 2 расположены на центральном стержне 5 сердечника. В крышке 4 сердечника выполнен ряд направляющих отверстий, внутри которых установлены направляющие стержни 6, соединенные одним концом с ударным диском 7, а другим концом – с плоскими выступами 8, которые контактируют с якорем 2. Боек 9 соединен с ударным диском 7, а его заостренная часть направлена в сторону USB флеш-накопителя 10.

При возбуждении индуктора 1 возникающее магнитное поле проходит по ферромагнитному сердечнику 3, индуцируя вихревой ток в якорю 2. При этом сердечник 3 вместе с крышкой 4 и центральным стержнем 5 образуют замкнутый магнитопровод. Это усиливает магнитную связь между индуктором 1 и якорем 2, а значит и СЭД даже при перемещении якоря (рис. 14,б).

Рассмотрим ЭУЗИ, предназначенное для уничтожения информации USB флеш-накопителя путем излома с мультииндуктором (рис. 15) [20]. Устройство состоит из прямоугольного ферромагнитного корпуса 1, внутри которого на верхней стороне закреплены два индуктора 2 и 3, а на нижней стороне закреплен индуктор 4 так, что его центральная ось расположена между центральными осями индукторов 2 и 3. Коаксиально с каждым индуктором 2, 3, 4 расположен подвижный якоря 5, 6, 7 и бойки 8, 9, 10. Каждый боек выполнен с направляющим цилиндрическим участком, расположенном в центральных отверстиях индуктора и якоря, с расширенной частью и с заостренным концом, направленным в сторону цифрового USB флеш-накопителя 11. Внутри корпуса 1, расположены плоские пружины 12, прижимающие якоря к индуктору и фиксирующие флеш-накопитель 11.

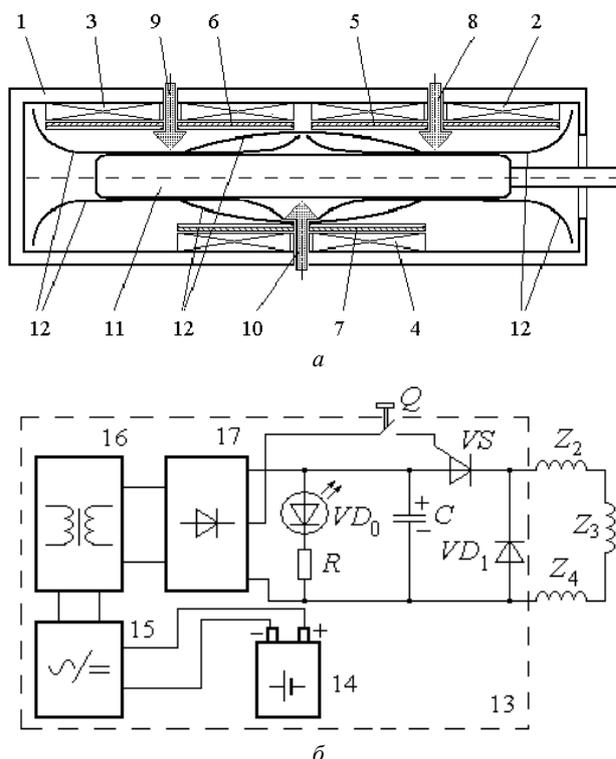


Рис. 15. Конструктивная (а) и электрическая (б) схемы ЭУЗИ для USB флеш-накопителя с мультииндуктором

В электронном блоке 13 ЭУЗИ расположены последовательно соединенные между собой автономный источник постоянного напряжения 14, преобразователь постоянного напряжения в переменное 15, повышающий трансформатор 16, выпрямитель 17 и ЕНЭ С, к которому посредством управляемого электронного ключа VS подключены последовательно соединенные индукторы 2, 3 и 4 с полными сопротивлениями, соответственно Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub> и Z<sub>4</sub> (рис. 13,б). В блоке размещены светодиод VD<sub>0</sub> с ограничивающим резистором R и обратный диод VD<sub>1</sub>.

При поступлении сигнала на уничтожение информации цифрового накопителя нажимают кнопку Q. При этом происходит разряд ЕНЭ С и в индукторах 2, 3, 4 возникает ток. После разряда ЕНЭ прекращается свечение светодиода 19. При этом на якоря 5, 6, 7 действуют СЭД силы, вследствие чего происходит пере-

мещение бойков 8, 9, 10 и осуществляется деформирование цифрового накопителя 11 путем пробивания отверстия и/или его механического излома.

**ЭУЗИ с мультякорем для SSD накопителя информации.** В твердотельном SSD накопителе информации механическое уничтожение информации на одном участке не приводит к уничтожению информации на смежных участках. Для данного ЦНИ предлагается конструкция ЭУЗИ, в котором с индуктором взаимодействуют ряд упорядочено расположенных якорей, которые формируют, так называемый, мультякорь [21].

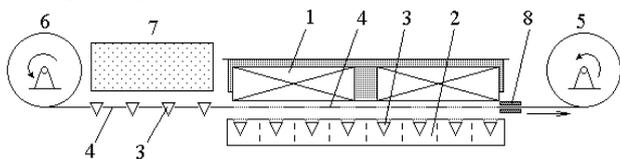


Рис. 16. Конструктивная схема ЭУЗИ с мультякорем после срабатывания

Индуктор 1 выполнен в форме прямоугольного параллелепипеда (рис. 16). В зазоре между индуктором 1 и ЦНИ 2 расположены ряд подвижных якорей 3, формирующих мультякорь. Каждый якорь выполнен конусообразным с электропроводящей плоской поверхностью и с заостренным стальным концом, обращенным к ЦНИ 2. Фиксирующая упругая лента 4 прижимает якоря 3 к индуктору 1. Концы ленты 4 намотаны на приемный приводной 5 и выдаваемый подторможенный 6 барабаны лентопротяжного механизма таким образом, что обеспечивается перемещение ленты в зазоре между индуктором 1 и ЦНИ 2. Между выдаваемым подторможенным барабаном 6 и индуктором 1 установлено устройство 7 фиксации мультякоря 3 в ячейке ленты 4. Между индуктором 1 и приемным приводным барабаном 5 установлено дозирующее устройство 8 со щелью для прохода ленты 4.

Для уничтожения информации ЦНИ осуществляют разряд ЕНЭ на индуктор. При этом в электропроводящей поверхности каждого якоря 3 индуцируется ток, на которые со стороны индуктора действуют СЭД. Мультякорь вылетает из ленты, заостренными концами пробивая ЦНИ 2 во многих участках, что важно для твердотельного SSD накопителя информации.

**Магнитно-импульсные устройства защиты информации.** Как показывают исследования, при воздействии мощным импульсом магнитного поля, созданного индуктором, у близко расположенного НЖМД деформируется корпус, изгибаются жесткие магнитные диски и устройства позиционирования головок, отлетают записывающие/считывающие головки и повреждаются платы контроллера. Особенно разрушительное действие на защищаемый НЖМД это поле оказывает в процессе работы компьютера, поскольку жесткие магнитные диски вращаются с высокой скоростью и для них механические воздействия ударного типа наиболее опасны.

Для реализации указанных задач предлагается магнитно-импульсное устройство защиты информации (МУЗИ), которое содержит аккумулятор 1, полярный ЕНЭ 2 и индуктор 3, установленный смежно НЖМД 4 (рис. 17) [22]. Индуктор 3 электрически

соединен с ЕНЭ 2 посредством разрядника 5, управляемого контроллером 6, на который поступает пусковой сигнал 7 об опасности утечки информации. Аккумулятор 1 подключен к зарядному устройству 8 и к преобразователю 9, который преобразует постоянное напряжение в переменное высокочастотное. Преобразователь 9 соединен с повышающим трансформатором 10, к выходу которого подключен выпрямитель 11, соединенный с ЕНЭ 2. Контроллер 6 соединен с устройством 12, задающим число импульсов магнитного поля индуктора.

В цепях между зарядным устройством 8 и аккумулятором 1, выпрямителем 11 и ЕНЭ 2, контроллером 6 и преобразователем 9 установлены светодиодные индикаторы, соответственно, 13, 14 и 15, реагирующие на наличие сигнала в этих цепях.

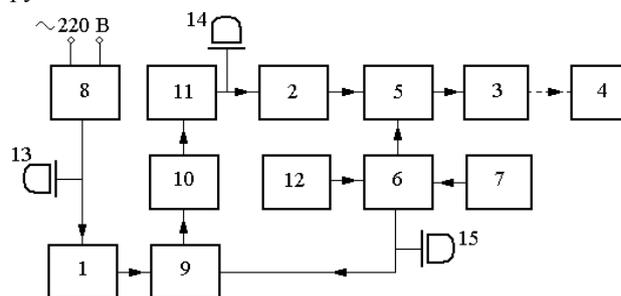


Рис. 17. Функциональная схема МУЗИ

На рис. 18 показаны изготовленные и испытанные образцы индукторов. Индуктор на рис. 18,а выполнен монолитным по форме и габаритам, соответствующим НЖМД 3,5 дюйма, так, что обмотка индуктора расположена напротив магнитных дисков. Указанный индуктор предназначен для возбуждения импульсного магнитного поля на два смежно расположенных НЖМД. Индуктор, показанный на рис. 18,б, выполнен толщиной 1,2 мм, что важно для размещения в корзине сервера между установленными НЖМД.

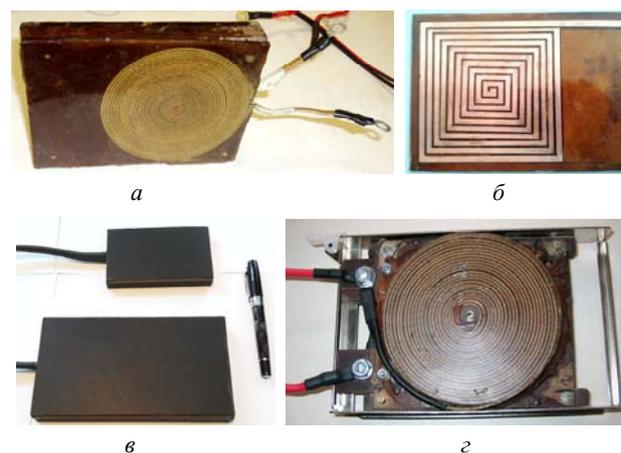


Рис. 18. Общий вид индукторов МУЗИ

На рис. 18,в показаны закрытые декоративной пленкой тонкие индуктора с размерами НЖМД 3,5 и 2,5 дюйма. Они предназначены для одностороннего воздействия магнитного поля на НЖМД. Для этого на одной стороне индуктора установлен ферромагнитный экран, уменьшающий поле с одной стороны и увеличивающий его с противоположной стороны.

На рис.18,з показан индуктор, встроенный в выдвижную панель корзины сервера, а на рис. 19 показана корзина сервера, в которой установлен данный индуктор.

Для испытания индуктора МУЗИ использовалась установка, показанная на рис. 20, которая включает пусковую кнопку 1, аккумулятор 2, источник питания 3, электронный преобразователь 4, блок ЕНЭ 5, соединительные провода 6, алюминиевый якорь 7 и тонкий индуктор 8.

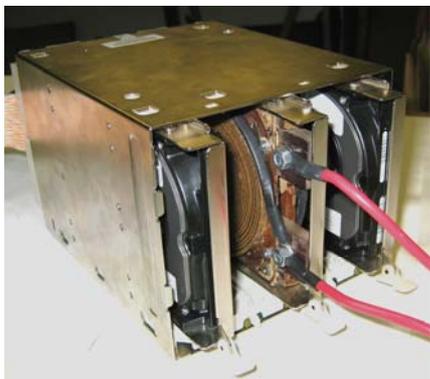


Рис. 19. Общий вид корзины сервера с индуктором МУЗИ

Результаты испытаний фиксировались путем измерения высоты подбрасывания якоря, установленного коаксиально с обмоткой индуктора, при его возбуждении.

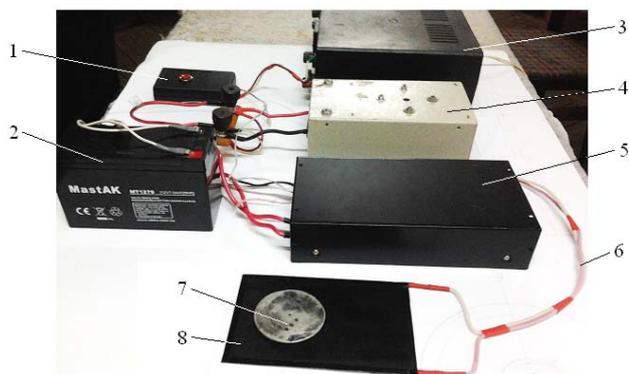


Рис. 20. Схема испытания МУЗИ с тонким индуктором, закрытым декоративной пленкой

**Импульсное магнитно-механическое устройство уничтожения информации.** Для гарантированного уничтожения информации перспективна идея совместного воздействия импульсного магнитного поля и механического удара на ЦНИ. Поскольку в ЭУЗИ электропроводящий якорь, установленный смежно с одной торцевой поверхности индуктора, экранирует импульсное магнитное поле, то для воздействия на ЦНИ необходимо использовать другую торцевую поверхность индуктора.

На рис. 21 показана конструктивная схема импульсного магнитно-механического устройства, в котором реализован данный принцип. Данное устройство состоит из ферромагнитного каркаса 1, внутри которого коаксиально расположены индуктор 2, электропроводящий якорь 3 и ферромагнитный боек 4. Боек выполнен с направляющим участком и заостренным концом, направленным в сторону ЦНИ 5.

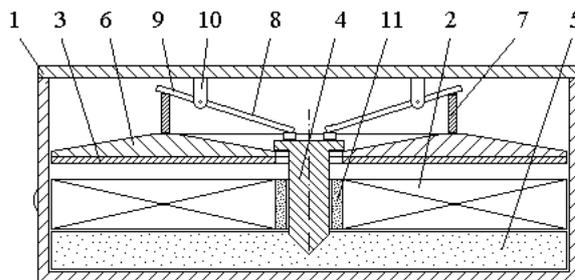


Рис. 21. Импульсное магнитно-механическое устройство во время работы

К якорю 3 присоединен силовой диск 6 с толкателем 7. Внутри каркаса 1 расположено несколько рычагов, каждый из которых состоит из двух противоположных плеч 8 и 9, разделенных опорой 10. Плоский конец бойка 4 взаимодействует с плечом 8 рычага, а силовой диск 6 через толкатель 7 взаимодействует с плечом 9 рычага. Опоры рычагов 10 зафиксированы относительно каркаса 1. Индуктор 2 содержит направляющую втулку 11, внутри которой расположен заостренный конец бойка 4.

Для уничтожения информации ЦНИ 5 осуществляют возбуждение индуктора 2 от ЕНЭ. Импульсный ток в индукторе 2 возбуждает магнитное поле, которое воздействует на ЦНИ 5, уничтожая находящуюся на нем информацию.

Магнитное поле индуктора 2 наводит вихревые токи в якорь 3. Возникающие при этом СЭД перемещают якорь вместе с силовым диском 6 в направлении от индуктора. При этом толкатель 7 воздействует на плечи 9 рычагов и происходит поворот рычагов относительно неподвижных опор 10. Плечи 8 рычагов перемещаются в направлении индуктора 2, осуществляя силовое воздействие на плоский конец бойка 4. Боек своим заостренным концом пробивает ЦНИ 5, окончательно уничтожая хранимую информацию.

Таким образом, на основании выполненных работ можно предложить следующую классификацию устройств уничтожения информации на ЦНИ:

*По принципу работы:* электромеханические, электромагнитные, комбинированные;

*По типу ЦНИ:* НЖМД, USB флеш-накопитель, SSD накопитель, блейд-сервер;

*По типу силового привода:* индукционно-динамический, электромагнитный, электродинамический, с упругим накопителем энергии, комбинированный.

*По типу индуктора:* однокатушечный, многокатушечный;

*По форме индуктора:* дисковый, соленоидальный;

*По типу якоря:* электропроводящий, ферромагнитный, индукторный, комбинированный;

*По форме якоря:* дисковая, цилиндрическая, комбинированная, многоэлементная;

*Конструктивная схема:* единый ударно-силовой блок, отдельные электронный и один или несколько силовых блоков;

*Силовой блок:* без магнитопровода, с магнитопроводом;

*Электронный блок:* однократного действия, циклического действия.

### Заключение.

Разработан комплекс высокоэффективных импульсных электромеханических и электромагнитных устройств уничтожения информации на цифровых накопителях. Указанные устройства характеризуются автономностью и при ограниченных массогабаритных показателях возбуждают мощные механические или магнитные импульсы.

Рассмотрены электромеханические устройства индукционно-динамического типа, с аккумулярованием механической энергии и устройства комбинированного действия, использующие индукционно-динамические, электродинамические и электромагнитные силы.

Предложены конструкции устройств, предназначенных для уничтожения информации на USB флеш-накопителях и твердотельных SSD накопителях.

Предложена конструкция импульсного магнитно-механического устройства, в котором уничтожение информации осуществляется механическим и магнитным импульсами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спесивцев А.В. Защита информации в персональных компьютерах. – М.: Радио и связь, 1992. – 192 с.
2. Кожневский С., Чеховский С., Прокопенко С. Разрушающие методы уничтожения информации на НЖМД [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.epos.ua/view.php/about\\_research\\_datakill](http://www.epos.ua/view.php/about_research_datakill).
3. Барсуков В.С. Чтобы сохранить информацию, ее необходимо уничтожить! // Специальная техника. – 2001. – №6.
4. Гордиенко И. Уничтожение данных. Практический подход [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ferra.ru/online/storage/s25303>.
5. Рохманюк В.М., Фокин Е.М. Аппаратура экстренного уничтожения записей на магнитных носителях // БДИ (Безопасность. Достоверность. Информация). – 2000. – №5.
6. Боборыкин С.Н., Рыжиков С.С. Оценка эффективности средств уничтожения информации, хранящейся в накопителях на жестких магнитных дисках // Специальная техника. – 2001. – №3.
7. Болух В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Устройство защиты компьютерной информации от несанкционированного доступа на основе индукционно-динамического двигателя // Электротехника і електромеханіка. – 2008. – №2. – С. 5-10.
8. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter // Russian electrical engineering. – 2011. – vol.82. – no.2. – pp. 104-110.
9. Пат. РФ № 2305329, МКИ G11B 5/024. Способ защиты информации и устройство для его осуществления / Болух В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. – З. № 2005120956. – Заявлено 04.07.2005. – Опубликовано 28.08.2007. Бюл. №24. – 9 с.
10. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. Linear induction-dynamic converters. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 496 p.
11. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode // Russian electrical engineering. – 2012. – vol.83. – no.10. – pp. 571-576.
12. Болух В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Эффективность линейных импульсных электромеханических преобразователей, предназначенных для создания ударных нагрузок и высоких скоростей // Электротехніка і електромеханіка. – 2015. – №3. – С. 31-40.

13. [http://www.unidisk.ru/work/article\\_11.html](http://www.unidisk.ru/work/article_11.html).

14. Болух В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Влияние формы и расположения якоря на эффективность индукционно-динамического двигателя с использованием 3D модели // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – №65. – С. 63-83.
15. Пат. України № 52270, МПК H02K 33/00, B06B 1/02. Електромеханічний ударний пристрій індукційного типу / Болух В.Ф., Рассоха М.О. – З. № 201000065. – Заявл. 11.01.2010. – Надрук. 25.08.2010. Бюл. №16, 2010.
16. Пат РФ № 2486583, МПК G06F12/14, G11C11/48. Электромеханическое устройство защиты информации, размещенной на цифровом USB флеш-накопителе, от несанкционированного доступа / Болух В.Ф., Лучук В.Ф., Щукин И.С. – Заявка № 2012115370/08 – Заявл. 17.04.2012. – Опубликовано 27.06.2013, Бюл. №18.
17. Патент РФ № 2531701, МПК H02K33/02, H02K41/025. Линейный электромеханический преобразователь ударного действия / Болух В.Ф., Лучук В.Ф., Щукин И.С. – Заявка № 2013128128/07. – Заявл. 19.06.2013. – Опубликовано 27.10.2014.
18. Пат РФ № 2538094, МКИ H02K41/025, H02K33/02. Ударный электромеханический преобразователь комбинированного типа // Болух В.Ф., Лучук В.Ф., Щукин И.С. – Заявка № 2013131248/07(046733). Заявл. 08.07.2013. Опубликовано 10.01.2015, Бюл. №1.
19. Пат. РФ № 2448360, МПК G06F12/16, G11C11/48. Электромеханическое устройство защиты информации, размещенной на цифровом накопителе, от несанкционированного доступа / Болух В.Ф., Лучук В.Ф., Щукин И.С. – Заявка № 2010133027/08. – Заявл. 05.08.2010. – Опубликовано 20.04.2012.
20. Пат РФ № 2459237, МПК G06F12/14, G11C11/48. Устройство защиты информации, размещенной на цифровом USB флеш-накопителе, от несанкционированного доступа / Болух В.Ф., Лучук В.Ф., Щукин И.С. – Заявка № 2010133026/08. – Заявл. 05.08.2010. – Опубликовано 20.08.2012.
21. Пат. РФ № 2446890, МПК B02C19/00. Устройство защиты информации, размещенной на цифровом носителе записи, от несанкционированного доступа и способ его осуществления / Болух В.Ф., Лучук В.Ф., Щукин И.С. – Заявка № 2010115772/28. – Заявл. 20.04.2010. – Опубликовано 10.04.2012.
22. Пат. РФ № 2427933, МПК G11C7/24, G06F12/14. Способ защиты информации на накопителе на жестких магнитных дисках и устройство для его осуществления / Болух В.Ф., Лучук В.Ф., Щукин И.С. – Заявка № 2010107939/08. – Заявл. 03.03.2010. – Опубликовано 27.08.2011.

### REFERENCES

1. Spesivtsev A.V. *Zashchita informatsii v personal'nykh komp'iuterakh* [Protection of information in personal computers]. Moscow, Radio i Svyaz Publ., 1992. 192 p. (Rus).
2. Kozhenevskii S., Chekhovskii S., Prokopenko S. *Razrushaiushchie metody unichtozheniia informatsii na NZhMD* (Destructive methods destruction of information to the HDD). Available at: [http://www.epos.ua/view.php/about\\_research\\_datakill](http://www.epos.ua/view.php/about_research_datakill) (accessed 13 May 2013). (Rus).
3. Barsukov V.S. To save the information, it must be destroyed! *Spetsial'naia tekhnika – Special equipment*, 2001, no.6. (Rus).
4. Gordienko I.V. *Unichtozhenie dannykh. Prakticheskii podkhod* (Destruction of data. Practical approach) Available at: <http://www.ferra.ru/online/storage/s25303> (accessed 14 August 2003). (Rus).
5. Rohmanyuk V.M., Fokin E.M. Emergency destruction equipment of records on magnetic media. *BDI (Bezopasnost'. Dostovernost'. Informatsiia) – SCI (Security. Credibility. Information)*, 2000, no.5. (Rus).
6. Boborykin S.N., Ryzhikov S.S. Evaluation of efficiency of means of the destruction of the information stored in the hard disk drive. *Spetsial'naia tekhnika – Special equipment*, 2001, no.3. (Rus).

7. Bolyukh V.F., Markov A.M., Luchuk V. F., Shchukin I.S. Device for computer information security from unauthorized access on the basis of an induction-dynamic motor. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2008, no.2, pp. 5-10. (Rus).
8. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter. *Russian electrical engineering*, 2011, vol.82, no.2, pp. 104-110. doi: 10.3103/s1068371211020027.
9. Bolyukh V.F., Markov A.M., Luchuk V.F., Shchukin I.S. *Sposob zashchity informatsii i ustroistvo dlia ego osushchestvleniia* [A method for protecting information and device for its realization]. Patent Russian Federation, no. 2305329, 2007. (Rus).
10. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. *Lineinye induktsionno-dinamicheskie preobrazovateli* [Linear induction-dynamic converters]. Saarbrücken, Germany, LAP Lambert Academic Publ., 2014. 496 p. (Rus).
11. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode. *Russian electrical engineering*, 2012, vol.83, no.10, pp. 571-576. doi: 10.3103/s1068371212100045.
12. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Efficiency of linear pulse electromechanical converters designed to create impact loads and high speeds. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.3, pp. 31-40. (Rus).
13. Available at: [http://www.unidisk.ru/work/article\\_11.html](http://www.unidisk.ru/work/article_11.html) (accessed 05 May 2012). (Rus).
14. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Influence of form and position of the armature on the efficiency of induction-dynamic the motor using 3D models. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2013, no.65, pp. 63-83. (Rus).
15. Bolyukh V.F., Rassokha M.O. *Elektromekhanichniy udarniy prystrii induktsiinoho typu* [Electromechanical impact devices induction type]. Patent UA, no. 52270, 2010. (Ukr).
16. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Shchukin I.S. *Elektromekhanicheskoe ustroistvo zashchity informatsii, razmeshchennoi na tsifrovom USB flesh-nakopitele, ot nesanktsionirovannogo dostupa* [Electromechanical protection device information contained in the digital USB flash drive from unauthorized access]. Patent Russian Federation, no. 2486583, 2007. (Rus).
17. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Shchukin I.S. *Lineinyi elektromekhanicheskii preobrazovatel' udarnogo deistviia* [A linear electromechanical impact converter]. Patent Russian Federation, no. 2531701, 2014. (Rus).
18. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Shchukin I.S. *Udarniy elektromekhanicheskii preobrazovatel' kombinirovannogo tipa* [An impact electromechanical converter combined type]. Patent Russian Federation, no. 2538094, 2015. (Rus).
19. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Shchukin I.S. *Elektromekhanicheskoe ustroistvo zashchity informatsii, razmeshchennoi na tsifrovom nakopitele, ot nesanktsionirovannogo dostupa* [Electromechanical protection device information contained in the digital storage device against unauthorized access]. Patent Russian Federation, no. 2448360, 2012. (Rus).
20. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Shchukin I.S. *Ustroistvo zashchity informatsii, razmeshchennoi na tsifrovom USB flesh-nakopitele, ot nesanktsionirovannogo dostupa* [Protection device information contained in the digital USB flash drive from unauthorized access]. Patent Russian Federation, no. 2459237, 2012. (Rus).
21. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Shchukin I.S. *Ustroistvo zashchity informatsii, razmeshchennoi na tsifrovom nositele zapisi, ot nesanktsionirovannogo dostupa i sposob ego osushchestvleniia* [Protection device information posted on the digital recording medium, against unauthorized access and the method of its implementation]. Patent Russian Federation, no. 2446890, 2012. (Rus).
22. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Shchukin I.S. *Sposob zashchity informatsii na nakopitele na zhestkikh magnitnykh diskakh i ustroistvo dlia ego osushchestvleniia* [A method of protecting information on the HDD and device for its realization]. Patent Russian Federation, no. 2427933, 2011. (Rus).

Поступила (received) 06.07.2015

Болух Владимир Федорович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,

Щукін Ігорь Сергеевич<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,

<sup>1</sup>Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»,

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,

тел/phone +38 057 7076427, e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua

<sup>2</sup>ООО Фирма «ТЭТРА, Ltd»,

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,

тел/phone +38 057 7076427, e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.ua

V.F. Bolyukh<sup>1</sup>, I.S. Schukin<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Firm Tetra, LTD,

21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

**High-performance electromechanical and electromagnetic pulse devices for destruction of information on digital drives.**

*It is shown that the most promising way to mechanical destruction of digital information storage is using a pulsed electromechanical and magnetic device and method. The highly efficient autonomous electromechanical and electromagnetic pulse devices destruction of information on digital storage devices are designed. The aim of the paper is the development of designs and advanced technical solutions for highly efficient pulsed electromechanical and magnetic systems of information protection. The excitation source of the inductor is using a capacitive energy storage. This may be implemented by running or the computer turned off for a very short period of time when the signal of unauthorized access. Implement the task can only be provided using mathematical modeling of electromagnetic and mechanical processes, experimental research and development of new technical solutions. These devices with limited weight and overall dimensions excite powerful mechanical or magnetic pulses. Considered electromechanical devices of induction-dynamic type, with accumulation of mechanical energy and the combined action of the device, using an induction-dynamic electrodynamic and electromagnetic forces. Proposed design of devices is intended to destroy information on USB flash drives and solid state drives SSD. The design of pulsed magnetic-mechanical device in which the destruction of information is carried out by mechanical and magnetic pulses simultaneously. Based on the performed works classification of destruction of information devices digital drives is proposed. References 22, table 1, figures 21.*

**Key words: electromechanical and electromagnetic pulse devices, destruction of information on digital drives, design of devices, mechanical and magnetic pulses.**

## СИНТЕЗ НЕЙРОРЕГУЛЯТОРА MODEL REFERENCE CONTROLLER ДЛЯ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ І СТАБІЛІЗАЦІЇ

*Виконано синтез нейрорегулятора на основі еталонної моделі для рішення задачі управління спеціальним устаткуванням рухомих об'єктів. Наведено порядок синтезу нейрорегулятора Model Reference Controller, реалізованого в пакеті прикладних програм Neural Network Toolbox системи MATLAB. Встановлено, які параметри нейрорегулятора суттєво впливають на якість регулювання і визначені значення параметрів, що забезпечують найкращі показники якості функціонування системи. Виконано моделювання системи на ЕОМ. Бібл. 7, рис. 16.*

*Ключові слова:* нейромережеве управління, система наведення і стабілізації, нелінійний динамічний об'єкт, нейрорегулятор на основі еталонної моделі, Model Reference Controller.

*Выполнен синтез нейрорегулятора на основе эталонной модели для решения задачи управления специальным оборудованием подвижных объектов. Приведен порядок синтеза нейрорегулятора Model Reference Controller, реализованного в пакете прикладных программ Neural Network Toolbox системы MATLAB. Установлено, какие параметры нейрорегулятора существенно влияют на качество регулирования и определены значения параметров, которые обеспечивают лучшие показатели качества функционирования системы. Выполнено моделирование системы на ЭВМ. Библ. 7, рис. 16.*

*Ключевые слова:* нейросетевое управление, система наведения и стабилизации, нелинейный динамический объект, нейрорегулятор на основе эталонной модели, Model Reference Controller.

**Вступ.** Практично всі вітчизняні і зарубіжні бойові машини оснащені системами наведення і стабілізації озброєння, що забезпечують можливість ведення прицільного вогню з ходу. Проте в процесі розробки таких систем не враховується ряд факторів, а саме: кінематична схема системи наведення і стабілізації містить пружні елементи, які ускладнюють розрахункову схему механічної частини системи, перетворюючи її на багатомасову; система управління є істотно нелінійною, що обумовлене наявністю моменту сухого тертя в підшипниках приводного двигуна і моменту тертя в кінематичному пристрої сполучення, а також наявністю люфта між зубами провідної і веденої шестерні; на озброєння діють зовнішні обурюючі моменти, обумовлені коливаннями корпусу і ін. Задача синтезу ефективних систем наведення і стабілізації з урахуванням всіх означених факторів, що забезпечує високу точність ведення вогню, є актуальною.

**Постановка проблеми.** В даний час існує велика кількість підходів до проблеми синтезу систем управління, при цьому універсального і ідеального регулятора поки не існує. Широке застосування отримали методи адаптивного і робастного регулювання, які забезпечують стійкість систем із змінною динамікою, базуються на відомій моделі об'єкту і не вимагають точного знання її параметрів. Методи адаптивного регулювання намагаються при цьому підстроїти регулятор на основі оцінки параметрів невідомого об'єкту, тоді як робастні регулятори залишаються незмінними і забезпечують стійкість системи тільки в діапазоні допустимих змін параметрів об'єкту. Проте проблема синтезу адаптивних систем регулювання для невідомих, нелінійних і змінних в часі об'єктів не вирішена повністю.

Застосування нейромережевої технології управління дозволяє значною мірою зняти математичні проблеми аналітичного синтезу і аналізу властивостей проектованої системи [1, 2]. Це пояснюється тим, що властивості, що досягаються, і якість процесів управління в нейромережевих системах більшою мірою залежать від фундаментальних властивостей багато-

шарових нелінійних нейронних мереж, а не від аналітично розрахованих оптимальних законів, що зазвичай реалізуються у вигляді комп'ютерної програми. Настроювані багатошарові нейронні мережі володіють рядом достоїнств, які обумовлюють їх застосування в завданнях управління нелійними динамічними об'єктами.

**Мета статті** – синтез нейрорегулятора на основі еталонної моделі Model Reference Controller, реалізованого з системи Matlab, для вирішення завдання управління системою наведення і стабілізації спеціального устаткування рухомих об'єктів.

**Виклад матеріалу дослідження, отриманих наукових результатів.** У пакеті прикладних програм Neural Network Toolbox системи MATLAB реалізовані три регулятора: регулятор з прогнозом NN Predictive Controller, регулятор на основі моделі авторегресії з ковзним середнім NARMA-L2 Controller і регулятор на основі еталонної моделі Model Reference Controller [3]. У роботах [4-6] виконаний синтез і дослідження системи з нейрорегулятором NN Predictive Controller, а в роботі [7] – системи з нейрорегулятором NARMA-L2 Controller. Як показали дослідження, нейрорегулятор NARMA-L2 Controller не забезпечує задані показники якості функціонування системи наведення і стабілізації спеціального устаткування рухомих об'єктів. Найбільш ефективним для побудови нейромережевої системи наведення і стабілізації є регулятор NN Predictive Controller, в основу побудови якого покладено принцип нелінійного предиктивного регулювання. Регулятор використовує модель нелінійного керованого об'єкту у вигляді нейронної мережі для того, щоб передбачати його майбутню поведінку. Крім того, регулятор обчислює сигнал управління, який оптимізує поведінку об'єкта на заданому інтервалі часу. Однак, зазначений регулятор вимагає великих обчислювальних витрат і складний для практичної реалізації. Тому видається доцільним дослідження питання про можливість використання більш простого регулятора Model Reference Controller. Далі наводиться

коротка характеристика прикладних програм Neural Network Toolbox і порядок синтезу нейрорегулятора на основі еталонної моделі Model Reference Controller, а також результати моделювання нейромережевої системи наведення і стабілізації спеціального устаткування рухомих об'єктів при різних видах вхідних дій.

При синтезі нейрорегулятора Model Reference Controller використовуються наступні файли, розміщені в каталозі toolbox/nnet/nncontrol. Навчальні функції нейронних мереж: Sgchbasxс – процедура одновимірного пошуку на основі перебору з поверненням; trainbfgs – модифікована процедура алгоритму BPGS для розрахунку системи управління з еталонною моделлю. Nnmodref.m – основна функція, використовувана при синтезі нейрорегулятора Model Reference Controller: забезпечує GUI користувача, генерацію навчальної вибірки, створення і тренування мережі регулятора. Sfunxy2 – функція для виведення графіків. Nncontrolutil – підтримка, що забезпечує можливість звернення до приватних функцій з системи SIMULINK. Nnident.m – основна функція, використо-

вувана при ідентифікації об'єкту, знаходиться в каталозі private. Забезпечує GUI користувача, генерацію навчальної вибірки, створення і тренування мережі.

На рис. 1 показана структурна схема нейромережевої системи наведення і стабілізації, розроблена в Simulink системи MATLAB. Схема включає блок нейрорегулятора Model Reference Controller, блоки генерації вхідної дії Sing Wave і Rendom Reference, блок побудови графіків і блоки, що відносяться до об'єкту управління (Subsystem і інтегруюча ланка). У контур положення включений П-регулятор з коефіцієнтом посилення  $K_p$ . Ланки Derivative і MATLAB Fcn2 включені в схему для реалізації передуправління за швидкістю. Для обмеження сигналу при стрибкоподібній зміні завдання на положення використана ланка обмеження Saturation. Блок Subsystem відповідає моделі двомасової системи з урахуванням моментів тертя на валу двигуна і механізму і наявності люфту в кінематичному пристрої сполучення. Схема підсистеми Subsystem наведена в [4].

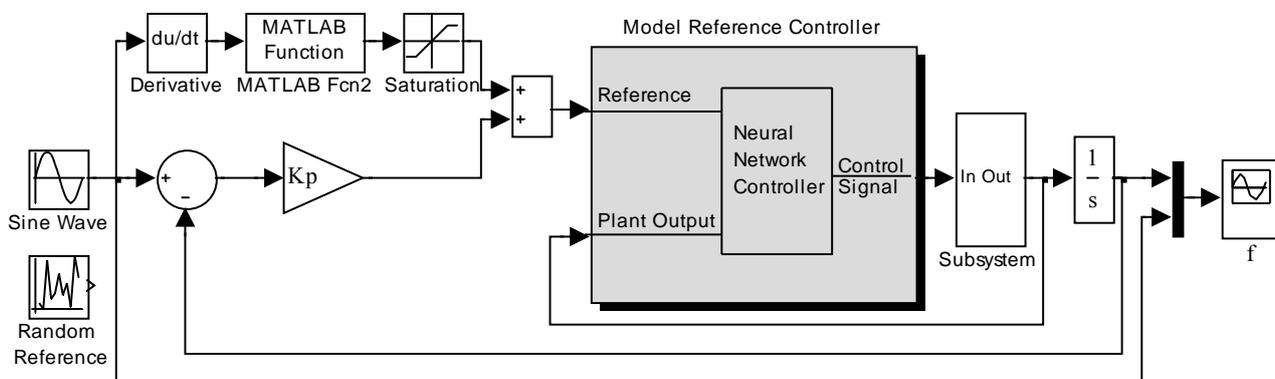


Рис. 1. Схема системи управління з нейрорегулятором Model Reference Controller з передуправлінням за швидкістю

Структурна схема нейрорегулятора Model Reference Controller показана на рис. 2. Дана схема з'являється в окремому вікні при виборі пункту меню Look Under Mask блоку Model Reference Controller.

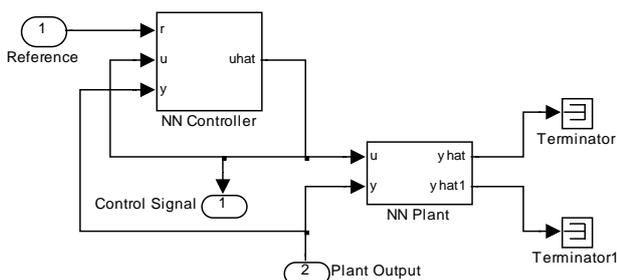


Рис. 2. Структурна схема нейрорегулятора Model Reference Controller

Процес синтезу нейрорегулятора починається шляхом активізації блоку Model Reference Controller. З'являється вікно, показане на рис. 3.

Особливість даної системи управління полягає в тому, що виконується побудова двох нейронних мереж: моделі об'єкту управління і самого регулятора. Спочатку виконується побудова моделі об'єкту управління, для чого у вікні, показаному на рис. 3 активізується кнопка Plant Identification. При цьому

відкривається вікно Plant Identification, і виконується побудова нейромережевої моделі об'єкту управління.

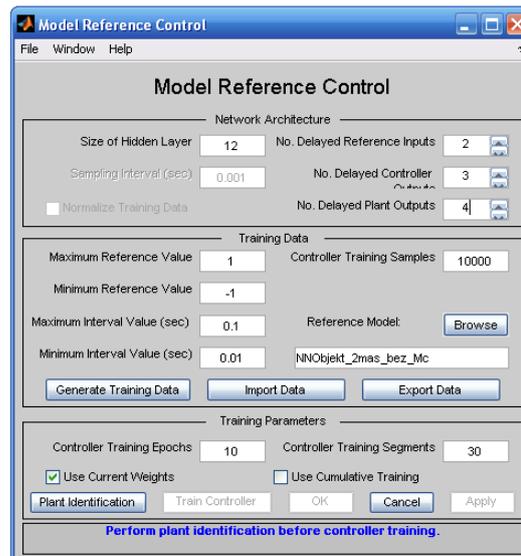


Рис. 3. Вікно завдання параметрів нейрорегулятора Model Reference Controller

Вид вікна Plant Identification проведений на рис. 4. Це вікно універсальне і може бити використано для

побудови нейромережових моделей для будь-якого динамічного об'єкту, який описаний моделлю SIMULINK. У розглянутому випадку такою моделлю є модель двомасової системи, що відповідає об'єкту управління. Процедура ідентифікації дозволяє побудувати нейронну мережу, яка моделюватиме динаміку керованого об'єкту. Оскільки модель повинна використовуватися при настройці регулятора, то її слід створити перш, ніж почеться розрахунок регулятора.

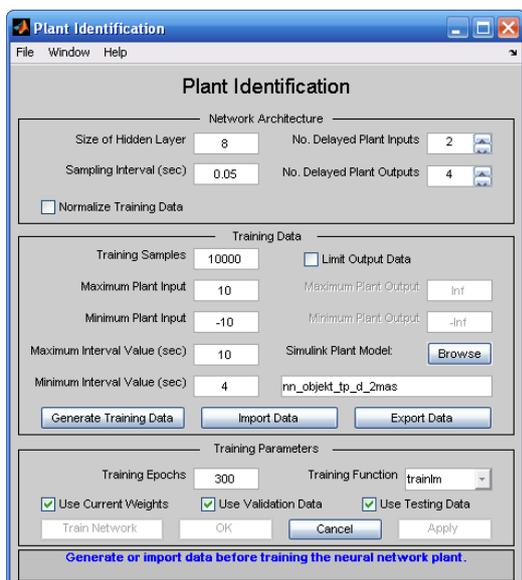


Рис.4. Вікно ідентифікації керованої системи

Процедура ідентифікації вимагає завдання наступних параметрів.

- Параметри архітектури. Size of Hidden Layer ( $S$ ) – розмір прихованого шару визначається кількістю використовуваних нейронів; Sampling Interval ( $\Delta t$ ) – такт дискретності в секундах визначає інтервал між двома послідовними моментами знімання даних; No. Delayed Plant Inputs ( $N_I$ ) – кількість елементів запізнювання на вході моделі; No. Delayed Plant Outputs ( $N_O$ ) – кількість елементів запізнювання на виході моделі; Normalize Training Data. Вікно контролю нормування навчальних даних до діапазону [0 1].

- Параметри навчальної послідовності. Training samples ( $N_B$ ) – довжина навчальної вибірки (кількість точок знімання інформації); Maximum Plant Input ( $\varphi_{\max}$ ) – максимальне значення вхідного сигналу; Minimum Plant Input ( $\varphi_{\min}$ ) – мінімальне значення вхідного сигналу; Maximum Interval Value (sec) ( $t_{\max}$ ) – максимальний інтервал ідентифікації в секундах; Minimum Interval Value (sec) ( $t_{\min}$ ) – мінімальний інтервал ідентифікації в секундах; Limit Output Data – вікно контролю, що дозволяє обмежити об'єм вихідних даних, тільки при включеному вікні будуть доступні 2 наступних вікна редагування тексту: Maximum Plant Output – максимальне значення вихідного сигналу і Minimum Plant Output – мінімальне значення вихідного сигналу; Simulink Plant Model – завдання моделі Simulink з вказівкою вхідних і вихідних портів, використовуваних при побудові нейромережової моделі керованої системи. За допомогою кнопки Browser вибирається необхідна модель з числа

доступних, наприклад схема моделі виконавчого пристрою стабілізатора озброєння, приведена в [4]; Generate Training Data – кнопка запуску процесу генерації навчальної послідовності; Import Data – імпорт навчальної послідовності з робочої області або файлу даних; Export Data – експорт даних, що згенерували, в робочу область або MAT-файл.

- Параметри навчання. Training Epochs – кількість циклів навчання; Training function – завдання навчальної функції; Use Current Weights – вікно контролю, що дозволяє підтвердити використання поточних вагів нейронної мережі; Use Validation/Testing Training – вибір цих вікон контролю означає, що по 25 % даних з навчальної послідовності буде використано для формування контрольної і текстової підмножин відповідно.

Отже, вибір процедури Generate Training Data приведе до того, що буде запущена програма генерації навчальної послідовності. Програма генерує навчальні дані шляхом дії ряду випадкових ступінчастих сигналів на модель SIMULINK керованого об'єкту. Графіки вхідного і вихідного сигналів об'єкту управління виводиться на екран (рис. 5).

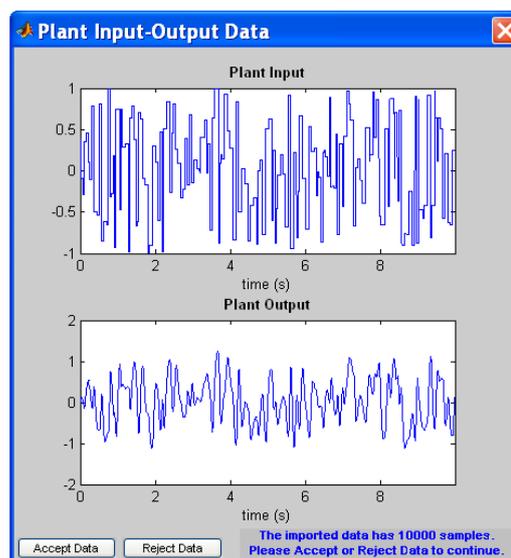


Рис. 5. Графіки вхідного і вихідного сигналів при генерації навчальній послідовності

Після закінчення генерації навчальної послідовності передбачається або прийняти дані (Accept Data), що згенерували, або відмовитися від них (Reject Data). Якщо приймаються дані, програма повертає до дещо зміненого вікна Plant Identification, в якому частина вікон недоступна, а кнопка Generate Training Data замінена на кнопку Erase Generate Data, що дозволяє видалити сгенеровані дані. Після натиснення на кнопку Train Network відбувається створення мережі з прямою передачею сигналу за допомогою М-функції newff. Дана функція не тільки створює мережу з ім'ям netn, але і ініціалізує її ваги і зсуви і готує нейронну мережу до навчання. Модель нейронної мережі може бути побудована в системі Simulink за допомогою оператора gensim(netn) (рис. 6).

Елементи нейронної мережі, відповідають наступним параметрам: розмір прихованого шару  $S = 12$ , кількість елементів запізнювання на вході моделі

$N_i = 2$  і кількість елементів запізнювання на виході моделі  $N_j = 5$ . Кожен подальший елемент з'являється в окремому вікні при активізації попереднього подвійним клацанням миші. З даних елементів в системі Simulink може бути побудована схема мережі, показана на рис. 7.

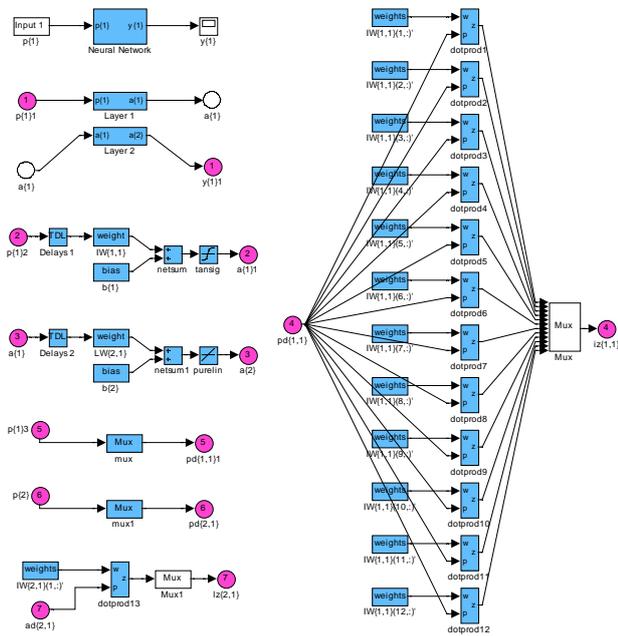


Рис. 6. Моделі елементів мережі з прямою передачею сигналу, реалізовані в Simulink

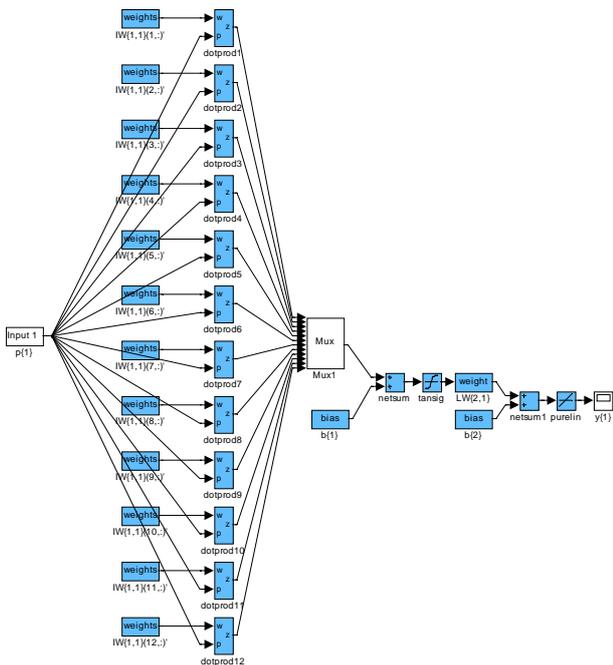


Рис. 7. Модель статичної мережі з прямою передачею сигналу, побудована в Simulink

Дана мережа є статичною (статична мережа характеризується тим, що в її складі немає елементів запізнювання і зворотних зв'язків). Мережу використовує 1 вектор входу з 6 елементами, має 2 шару з 12 нейронами в першому (прихованому) шарі і 1 нейроном в другому (вихідному) шарі. Використовувані функції активації: гіперболічного тангенса (tansig) - в першому шарі, лінійна (purelin) – в другому шарі.

Після створення мережі починається процес її навчання. Вектори входу представляється як числові масиви вибірок у форматі double, що відповідає груповому представленню даних. Навчання здійснюється з використанням функції trainlm, яка відповідає алгоритму Левенберга-Марквардта. Динаміка зміни помилки навчання, а також перевірки на контрольній і текстовій множині відбиваються у вікні, зображеному на рис. 8.

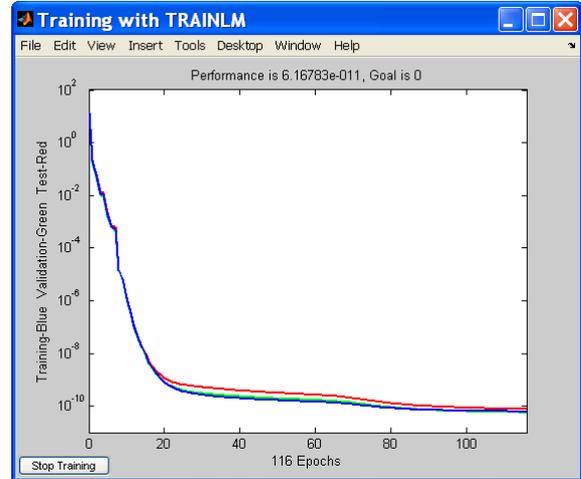


Рис. 8. Вікно контролю процесу навчання

Після завершення навчання його результати відображаються на графіках рис. 10. Результати тестування на контрольній і текстовій множині відображаються на графіках, аналогічних рис. 9.

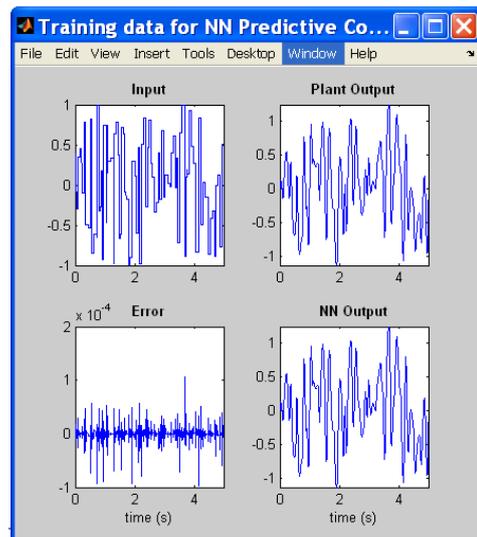


Рис. 9. Результати тренування мережі

Поточний стан відмічений у вікні Plant Identification повідомленням «Навчання завершено». Можна згенерувати або імпортувати нові дані, продовжити навчання або зберегти отримані результати, вибравши кнопки OK або Apply.

Числові значення елементів матриць вагів  $IW\{1,1\}$ ,  $LW\{2,1\}$  і зсувів  $b\{1\}$ ,  $b\{2\}$  нейронної мережі моделі об'єкту управління заносяться в пам'ять машини і використовуються потім при побудові нейронної мережі регулятора. Після завершення побудови нейромережевої моделі керованого об'єкту відбу-

вається повернення до вікна завдання параметрів Model Reference Control (рис. 3).

Для навчання нейронної мережі регулятора необхідно згенерувати навчальні дані. Як еталонна модель приймається одномасова система. Для генерації навчальної послідовності активізується кнопка Generate Training Data. Ці дані у вигляді графіків з'являться у вікні Input – Output Data NN Model Reference Control. Необхідно підтвердити або відкинути ці дані. Якщо дані прийнятні, то у вікні Model Reference Control вибирається кнопка Train Controller (Навчити регулятор). Після натиснення на кнопку Train Controller відбувається створення і ініціалізація мережі netn з прямою передачею сигналу за допомогою М-функції newff. На рис. 10 показані моделі елементів нейронної мережі, побудовані за допомогою оператора gensim(netn). Мережа має 4 шари. Параметри першого другого шару задаються у вікні Model Reference Control. У даному випадку розмір першого шару  $S_1 = 14$ , у другому шарі є 1 нейрон. Параметри третього і четвертого шарів відповідають параметрам нейромережевої моделі об'єкту управління, отримані в результаті виконання процедури ідентифікації (в даному випадку: розмір третього шару  $S_3 = 12$ , четвертого –  $S_4 = 1$ ). Використовувані функції активації: гіперболічного тангенса (tansig) – в першому і третьому шарі, лінійна (purelin) – в другому і четвертому шарах. З даних елементів в системі Simulink побудована схема мережі, показана на рис. 11.

Дана мережа не має елементів затримки, тобто є статичною. Мережа використовує 1 вектор входу з 9 елементами. Розмір вектора входу визначається як

$(N_{jc} + N_{ic} + N_{rc})$ , де  $N_{rc}$  – кількість елементів запізнювання на вході регулятора (у даному випадку  $N_{rc} = 2$ );  $N_{ic}$  – кількість елементів запізнювання на виході регулятора ( $N_{ic} = 3$ ),  $N_{jc}$  – кількість елементів запізнювання на виході моделі об'єкту ( $N_{jc} = 4$ ). Параметри  $N_{jc}$ ,  $N_{ic}$ ,  $N_{rc}$  задаються у вікні Model Reference Control (див. рис. 3).

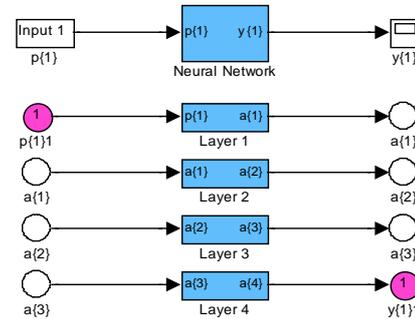


Рис. 10. Моделі елементів статичної мережі регулятора Model Reference Controller

Значення вагів і зсувів першого і другого шарів заносяться в пам'ять машини. Потім відбувається створення і ініціалізація мережі netn з прямою передачею сигналу за допомогою М-функції newff з одним елементом у векторі входу.

Після цього виконується побудова динамічної мережі із заданим числом затримок по входу і виходу моделі і регулятора. Моделі елементів динамічної мережі показані на рис. 12. На рис. 13 представлена схема динамічної мережі, побудована з вказаних елементів в режимі Simulink.

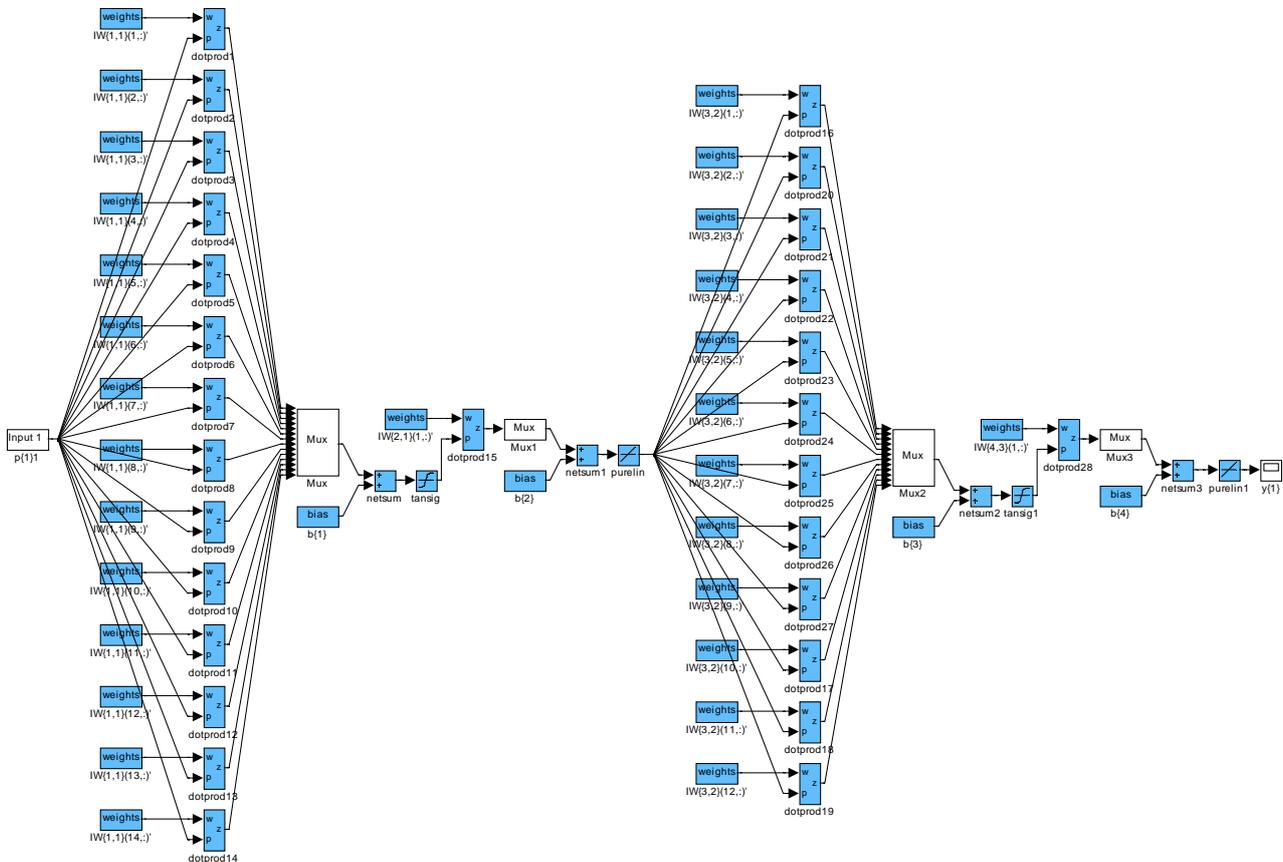


Рис. 11. Модель статичної мережі netn, що формується при синтезі регулятора Model Reference Controller

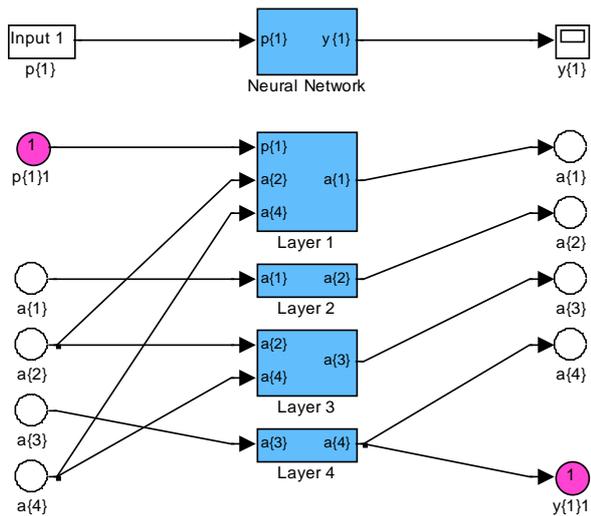


Рис. 12. Моделі елементів динамічної мережі нейрорегулятора Model Reference Controller

Елементом матриць вагів і зсувів першого і другого шару динамічної мережі присвоюються відповідні значення матриць вагів і зсувів першого і другого шарів спочатку створеної статичної мережі, а елементам матриць вагів і зсувів третього і четвертого шару динамічної мережі присвоюються відповідні значення матриць вагів і зсувів першого і другого шару мережі, відповідної нейромережевої моделі об'єкту управління, отриманої при виконанні процедури ідентифікації.

Після створення мережі виконується процес її навчання. Параметр навчання вагів і зсувів третього і четвертого шарів встановлюється рівним 0, унаслідок чого вони залишаються незмінними в процесі тренування, а змінюються ваги і зсуви першого і другого шарів, тобто параметри нейросетевий моделі нейрорегулятора. Навчання здійснюється з використанням функції `trainbfgc`. Навчання регулятора може займати значний час, оскільки навчання використовує динамічний варіант методу зворотного розповсюдження помилки.

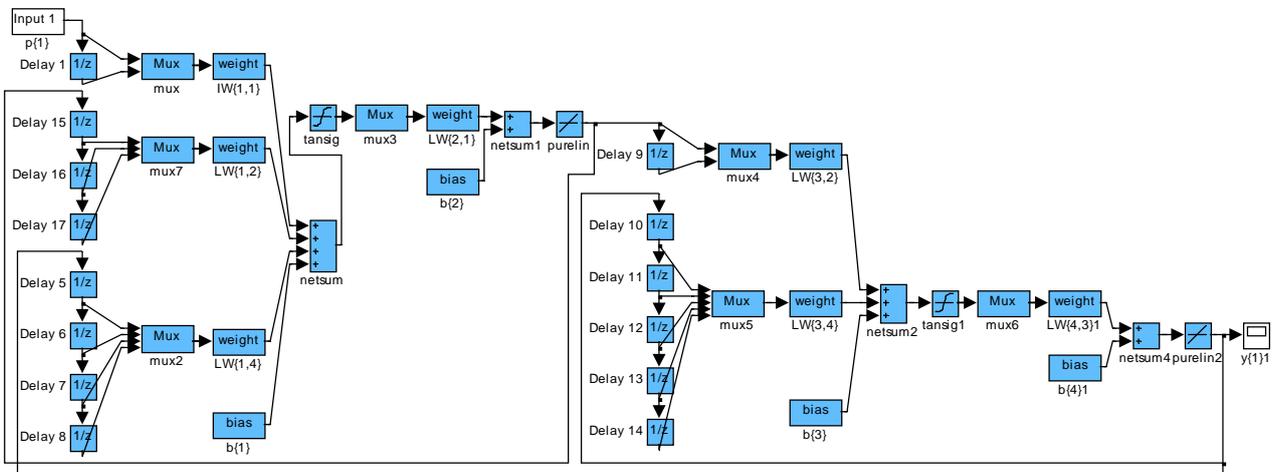


Рис. 13. Модель динамічної мережі, що формується при синтезі регулятора Model Reference Controller

Динаміка зміни помилки навчання відбивається у вікні, показаному на рис. 14. Після того, як навчання закінчене, графіки виходів еталонної моделі і об'єкту управління виводяться на екран у вікні, показаному на рис. 15.

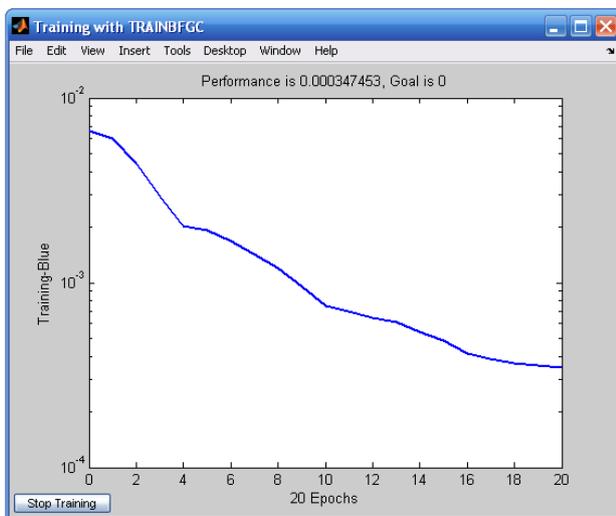


Рис. 14. Вікно контролю процесу навчання нейронної мережі регулятора Model Reference Controller

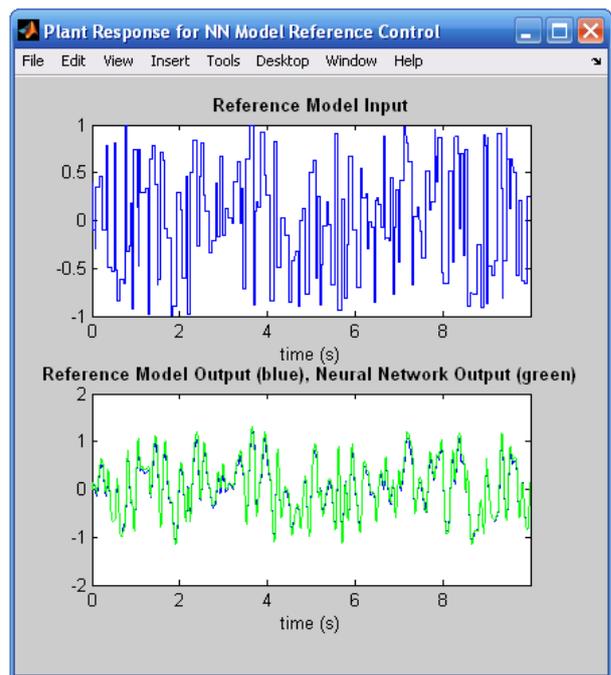


Рис. 15. Результати тренування мережі регулятора Model Reference Controller

Якщо точність стеження за еталонною моделлю незадовільна, то можна продовжити навчання регулятора з тим же набором даних, знову скориставшись кнопкою Train Controller. Якщо для продовження навчання необхідно використовувати новий набір даних, можна скористатися кнопками Generate Data або Import Data. Можна продовжити навчання з вибраними вагами, для чого слід зробити відмітку у вікні контролю Use Current Weight.

Після закінчення процесу навчання числові значення елементів матриць вагів і зсувів регулятора (тобто першого і другого шарів) вводяться в блок NN Controller, а числові значення елементів матриць вагів і зсувів об'єкту (тобто. третього і четвертого шарів) вводяться в блок NN Plant системи Simulink (див. рис. 2).

При побудові нейронної мережі об'єкту управління і нейронної мережі регулятора кількість нейронів прихованого шару  $S$  варіювались в широких межах. При малій кількості нейронів мережа не може виконувати поставлене завдання, а при великому спостерігається явище перенавчання і зростає об'єм обчислень. Значення  $S$ , при яких отримані кращі результати, знаходяться в межах  $S = 10 - 15$ .

Успіх тренування мережі в значній мірі залежить від довжини навчальної вибірки  $N_B$  і такту дискретності  $\Delta t$ , що визначає інтервал між двома послідовними моментами знімання даних. Оптимальними у вирішуваній задачі є:  $N_B = 10000$ ,  $\Delta t = 0,05$  с. При збільшенні  $\Delta t$  знижується точність обчислюється і різниця між помилкою навчання і помилкою, отриманою на контрольній і тестовій множині досягає  $10^2 - 10^3$ . Зменшення  $\Delta t$  викликає необхідність відповідного збільшення  $N_B$ , як наслідок, значно збільшується час тренування мережі, при цьому істотного зниження  $\varepsilon$  не спостерігається.

Для отримання представницької вибірки необхідно правильно задати максимальне і мінімальне значення інтервалу ідентифікації. Величина їх залежить від параметрів об'єкту Plant; у даному завданні прийнято  $t_{\min} = 4 - 5$  с,  $t_{\max} = 10 - 20$  с.

Кількість елементів запізнювання на вході  $N_i$  і виході  $N_j$  моделі об'єкту управління варіювалося в

межах  $N_i = 1 - 4$ ,  $N_j = 2 - 5$ . Кількість елементів запізнювання на вході регулятора  $N_{rc}$ , на виході регулятора  $N_{ic}$  і на виході моделі об'єкту  $N_{jc}$  (при синтезі нейронної мережі регулятора) варіювалося в межах:  $N_{rc} = 1 - 4$ ,  $N_{ic} = 1 - 5$ ,  $N_{jc} = 1 - 5$ .

Як навчальна функція нейронної мережі регулятора використана функція trainbfgs, а при навчанні нейронної мережі об'єкту управління – функція trainlm. При навчанні нейронної мережі регулятора всі навчальні дані розбиваються на  $n$  сегментів і з використанням кожного сегменту виконується  $N_{\text{ц}}$  циклів навчання. Кількість циклів навчання  $N_{\text{ц}}$ , після закінчення яких помилка навчання переставала зменшуватися, складало  $N_{\text{ц}} = 20 - 30$  при  $n = 30$ . Як еталонна модель приймалася одномасова система.

Для визначення показників якості функціонування синтезованої нейромережевої системи проведено моделювання системи при різних тестових входних сигналах: ступінчастому із змінною амплітудою, що знаходиться і діапазоні від  $\varphi_3 = 1$  рад до  $\varphi_3 = -1$  рад, лінійно-наростаючому з мінімальною швидкістю наростання  $\omega_{\text{фmin}} = 3,5 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup>, гармонійному з частотою 1 Гц і амплітудою 3°. Як показали дослідження, ні при яких параметрах нейрорегулятора Model Reference Controller не вдалося отримати задовільні динамічні характеристики системи. Ідентифікація об'єкту управління була виконана з високою точністю. Помилка навчання нейронної мережі об'єкту управління має порядок  $10^{-12}$ , а миттєві помилки не перевищували  $2 \cdot 10^{-5}$ . Мінімальна помилка навчання нейронної мережі регулятора має порядок  $10^{-4}$ . Проте навіть без урахування обурюючих дій перехідні процеси системи мають коливальний характер. В якості прикладу на рис. 18 і 19 приведені графіки перехідних процесів змінних стану системи при ступінчастій і гармонійній входній дії. Таким чином, для системи наведення і стабілізації спеціального устаткування рухомих об'єктів слід використовувати нейрорегулятор NN Predictive Controller, який забезпечує високі показники якості функціонування системи.

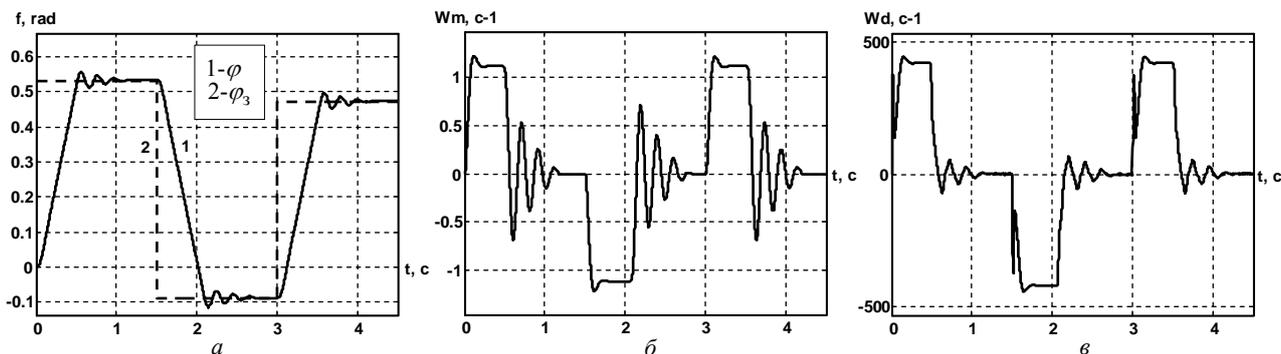


Рис. 16. Графіки перехідні процеси змінних стану нейромережевої системи при ступінчастій входній дії: а – задаюча дія  $\varphi_3$  і кут  $\varphi$ ; б – швидкість механізму  $\omega_m$ ; в – швидкість двигуна  $\omega_d$

**Висновки.** У статті виконаний синтез нейрорегулятора на основі еталонної моделі Model Reference Controller для забезпечення заданих показників якості функціонування системи наведення і стабілізації спеціального устаткування рухомих об'єктів. У Simulink

системи MATLAB розроблено структурну схему двоконтурної нейромережевої системи наведення і стабілізації з нейрорегулятором Model Reference Controller в контурі швидкості і з П-регулятором в контурі положення і з передуправлінням за швидкістю. Наведено

методику синтезу нейрорегулятора Model Reference Controller, реалізованого в пакеті прикладних програм Neural Network Toolbox системи MATLAB. Шляхом варіювання параметрів нейрорегулятора в широких межах, встановлено, які параметри істотно впливають на якість регулювання та визначено значення параметрів, які забезпечують найкращі результати. Виконано моделювання системи та проведено аналіз отриманих результатів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю. Нейросетевые системы управления. – М.: ИПРЖР, 2003. – 480 с.
2. Руденко О.Г., Бодянский Е.В. Штучні нейронні мережі: Навчальний посібник. – Х.: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404 с.
3. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB 6. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с.
4. Кузнецов Б.И., Василец Т.Е., Варфоломеев А.А. Разработка нейросетевой системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин // *Электротехника і електромеханіка*. – 2008. – №2. – С. 31-34.
5. Кузнецов Б.И., Василец Т.Е., Варфоломеев А.А. Синтез нейроконтроллера с предсказанием для двухмассовой электромеханической системы // *Электротехника і електромеханіка*. – 2008. – №3. – С. 27-32.
6. Кузнецов Б.И., Василец Т.Е., Варфоломеев А.А. Нейроуправление нелинейным динамическим объектом с использованием метода обобщенного управления с предсказанием // *Электротехника і електромеханіка*. – 2008. – №4. – С. 34-41.
7. Кузнецов Б.И., Василец Т.Ю., Варфоломеев О.О. Синтез і дослідження системи наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин з нейрорегулятором на основі моделі авторегресії з ковзаючим середнім // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2010. – №4(24). – С. 118-121.

#### REFERENCES

1. Terekhov V.A., Yefimov D.V., Tyukin I.Yu. *Nejrosetevye sistemy upravleniya* [Neural network control system]. Moscow, IPRZhR Publ., 2002. 480 p. (Rus).
2. Rudenko O.G., Bodyansky E.V. *Shtuchni nejronni merezhi: Navchal'nyj posibnyk* [Artificial Neural Networks: Tutorial]. Kharkov, TOV «Kompanija SMIT» Publ., 2006. 404 p. (Ukr).
3. Medvedev V.S., Potemkin V.G. *Neironnye seti. MATLAB 6* [Neural networks. MATLAB 6]. Moscow, DIALOG-MIFI Publ., 2002. 496 p. (Rus).
4. Kuznetsov B.I., Vasilets T.E., Varfolomiyev O.O. Development of a neuro-system of guidance and stabilizing for light-armored machines armament. *Elektrotekhnikha i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2008, no.2, pp. 31-34. (Rus).
5. Kuznetsov B.I., Vasilets T.E., Varfolomiyev O.O. Synthesis of a predictive neuro-controller for a two-mass electromechanical system. *Elektrotekhnikha i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2008, no.3, pp. 27-32. (Rus).
6. Kuznetsov B.I., Vasilets T.E., Varfolomiyev O.O. Nonlinear dynamic object neuro-control using a generalized predictive control method. *Elektrotekhnikha i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2008, no.4, pp. 34-41. (Rus).

7. Kuznetsov B.I., Vasilets T.E., Varfolomiyev O.O. Synthesis and study of the light armored vehicle aiming and stabilization system with neural network control based on the autoregressive-moving-average model. *Sistemi ozbroennyya i viyskova tehnika – Systems of arms and military equipment*, 2010, no.4(24), pp. 118-121. (Ukr).

Надійшла (received) 19.05.2015

Кузнецов Борис Иванович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Василец Тетяна Юхимівна<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,  
Варфоломеев Олексій Олексійович<sup>3</sup>, к.т.н.,

<sup>1</sup> Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України», 61106, Харків, вул. Індустріальна, 19,  
e-mail: bikuznetsov@mail.ru

<sup>2</sup> Українська інженерно-педагогічна академія, 61003, Харків, вул. Університетська, 16,  
тел/phone +38 057 7337959,  
e-mail: tatyana.vasilets@gmail.com

<sup>3</sup> Технологічний інститут Нью Джерсі (США), University Heights, Newark, NJ, USA, 07102-1982,  
тел/phone +1609 7874172,  
e-mail: alexey.varfolomeyev@gmail.com

B.I. Kuznetsov<sup>1</sup>, T.E. Vasilets<sup>2</sup>, O.O. Varfolomiyev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine», 19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine.

<sup>2</sup> Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, 16, Universitetskaya Str., Kharkiv, 61003, Ukraine.

<sup>3</sup> New Jersey Institute of Technology, University Heights Newark, New Jersey, USA, 07102.

#### Synthesis of neural network Model Reference Controller for aiming and stabilizing system.

The aim of this work is the synthesis of neural network reference model controller. The synthesis is performed in MATLAB for the problem of control of the aiming and stabilization system for the special equipment of moving objects. This paper presents the synthesis of the neural network reference model controller to meet the given performance characteristics of operation for the aiming and stabilization system for the special equipment of moving objects. Simulink tool in MATLAB is used to build the block diagram of double-loop neural network system of aiming and stabilization, where the reference model controller is put in the velocity loop and P-regulator is put in the position loop, with feedforward velocity control. Presented the method of synthesis of the neural network reference model controller that is implemented in the Neural Network Toolbox in MATLAB. System tests with the broad range of parameter values determined the key parameters defining the control quality. Optimal values of the key parameters were found to provide the highest control performance. System simulation and analysis of the obtained results is given. References 7, figures 16.

Key words: **neural network control, aiming and stabilization system, nonlinear dynamic object, neuro-controller on the basis of standard model, Model Reference Controller.**

## СИСТЕМА КЕРУВАННЯ БАГАТОРІВНЕВИМ ІНВЕРТОРОМ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

*Розроблено закон керування та структуру мережевого багаторівневого інвертора сонячної електростанції, який дозволяє утримувати режим роботи сонячного модуля в області точки відбору максимальної потужності і збільшити продуктивність сонячного модуля. Запропоновано вдосконалену модель регулятора подовжньої складової струму інвертора, яка враховує рівень споживання реактивної потужності з вузла мережі, поточну напругу мережі та напругу сонячного модуля і дозволяє оптимізувати роботу інвертора як зі сторони сонячного модуля, так і з боку мережі за напругою. Запропоновано вдосконалену модель регулятора поперечної складової струму інвертора, яка враховує відношення спожитої активної потужності з вузла мережі до поточної потужності сонячного модуля і дозволяє оптимізувати роботу інвертора за навантаженням та частотою. Розглянуто приклад реалізації системи керування інвертором із запропонованими моделями на базі високопродуктивного мікроконтролера. Бібл. 8, рис. 3.*

*Ключові слова:* інвертор, керування, сонячний модуль.

*Разработан закон управления и структура сетевого многоуровневого инвертора солнечной электростанции, который позволяет удерживать режим работы солнечного модуля в области точки отбора максимальной мощности и увеличить производительность солнечного модуля. Предложена усовершенствованная модель регулятора продольной составляющей тока инвертора, которая учитывает уровень потребления реактивной мощности из узла сети, текущее напряжение сети и напряжение солнечного модуля и позволяет оптимизировать работу инвертора как со стороны солнечного модуля, так и со стороны сети по напряжению. Предложена усовершенствованная модель регулятора поперечной составляющей тока инвертора, которая учитывает отношение потребляемой активной мощности из узла сети к текущей мощности солнечного модуля и позволяет оптимизировать работу инвертора по нагрузке и частоте. Рассмотрен пример реализации системы управления инвертором с предложенными моделями на базе высокопроизводительного микроконтроллера. Библ. 8, рис. 3.*

*Ключевые слова:* инвертор, управление, солнечный модуль.

**Вступ.** Обсяг виробництва тонкоплівкових сонячних модулів значно зріс за останні роки, що в свою чергу обумовлює зростання пропозиції на ринку електроенергії з боку сонячних електростанцій [1]. Для формування вихідної змінної напруги в якості узгоджувальних пристроїв значну популярність здобули багаторівневі мережеві інвертори напруги, що виготовляються серійно [2]. Основною перевагою багаторівневих інверторів перед традиційними однорівневими є покращена форма вихідної напруги, менші втрати в силовій частині, покращена електромагнітна сумісність [3]. Разом з тим недоліками вказаних пристроїв є збільшення кількості силових ключів та відповідного ускладнення системи керування комутацією, а при використанні їх в межах сонячних електростанцій вимагає ще й додаткової адаптації до вимог існуючої електроенергетичної системи.

**Постановка задачі.** В роботах [3, 4] розглядаються моделі перспективних багаторівневих каскадних інверторів, які застосовуються в якості перетворювальних агрегатів регульованих асинхронних електроприводів. Вказані моделі досліджені для двигунного режиму електроприводу з традиційною для багаторівневих інверторів векторною системою керування, однак в них відсутній аналіз роботи інверторів в генераторному режимі роботи електроприводу, аналіз паралельної роботи на електричну мережу, що підтверджує необхідність проведення досліджень в напрямку синтезу систем керування багаторівневими інверторами, орієнтованими на застосування в сонячних електростанціях.

Запропонований варіант системи керування інвертором в роботі [5] передбачає застосування контролера з високопродуктивним DSP ядром, який ком-

бінує керування вузлом комутації ключів з задачею відслідковування точки максимальної потужності сонячного модуля та струму заряду акумулятора автономної СЕС, однак ефективно керування інвертором сонячної батареї в реальному часі вимагає узгодження ряду незалежних параметрів як з боку сонячного модуля так і з боку електричної мережі (напруга, частота електричної мережі, активна та реактивна потужність). Врахування останніх параметрів в контролері інвертора зручно розв'язує задачу ефективного керування енергетичною системою з точки зору концепції Smart Grid.

Отже, метою роботи є розробка закону керування мережевим багаторівневим інвертором сонячної електростанції та пристрою для реалізації розробленого закону, який враховує параметри інвертора, мережі та дозволяє оптимізувати роботу силового модуля сонячної електростанції.

**Результати досліджень.** Значення напруги на виході фотогальванічних панелей постійно змінюється внаслідок таких факторів як погодні умови, час доби та температура панелей [6]. Стан конденсатора батареї сонячних елементів також змінюється в залежності від того, заряджений він чи розряджений. Важливим фактором з точки зору розробки системи керування інвертором є забезпечення роботи сонячного батареї в районі точки відбору максимальної потужності. Алгоритм пошуку такого режиму роботи повинен передбачати пошук цієї точки в широкому діапазоні напруги для того, щоб уникнути попадання на локальні максимуми, що виникають внаслідок короткочасних змін зовнішнього середовища (наприклад, попадання панелі в тінь невеликої хмари). Особливістю

© С.М. Левицький

такого інкрементного індукційного алгоритму є те, що пристрій не працюватиме постійно з максимальною продуктивністю, а знаходиться постійно в пошуку такого стану. Зазначений алгоритм в серійних сонячних однорівневих інверторах комбінується з обчисленням похідної потужності сонячного модуля від напруги на вході інвертора, яка прирівнюється до нуля, надаючи в такий спосіб системі керування значення шуканого квазіекстремуму або екстремумів в межах визначеного робочого діапазону напруг.

В сучасних системах векторного керування інверторами, які набули застосування в частотних електроприводах, використовується приведення трифазної системи струмів інвертора до ортогональної d-q системи координат. При цьому вихідна напруга на

виході інвертора відповідно встановлюється пропорційною до поздовжньої складової струму  $I_d$ , а вихідна потужність забезпечується відповідним значенням поперечної складової  $I_q$ . У випадку узгодження роботи багаторівневого інвертора з мережею для відслідковування точки квазіекстремуму вольт-амперної характеристики (ВАХ) сонячного модуля поздовжня та поперечна складові струму багаторівневого інвертора аналогічно забезпечуватимуть напругу та потужність, яка зі сторони входу інвертора знімається з сонячного модуля, а зі сторони виходу – віддаватиметься в мережу. Таким чином, структура внутрішнього контуру системи керування багаторівневим інвертором та його силова частина матиме вигляд, наведений на рис. 1 (на прикладі тривіневого інвертора).

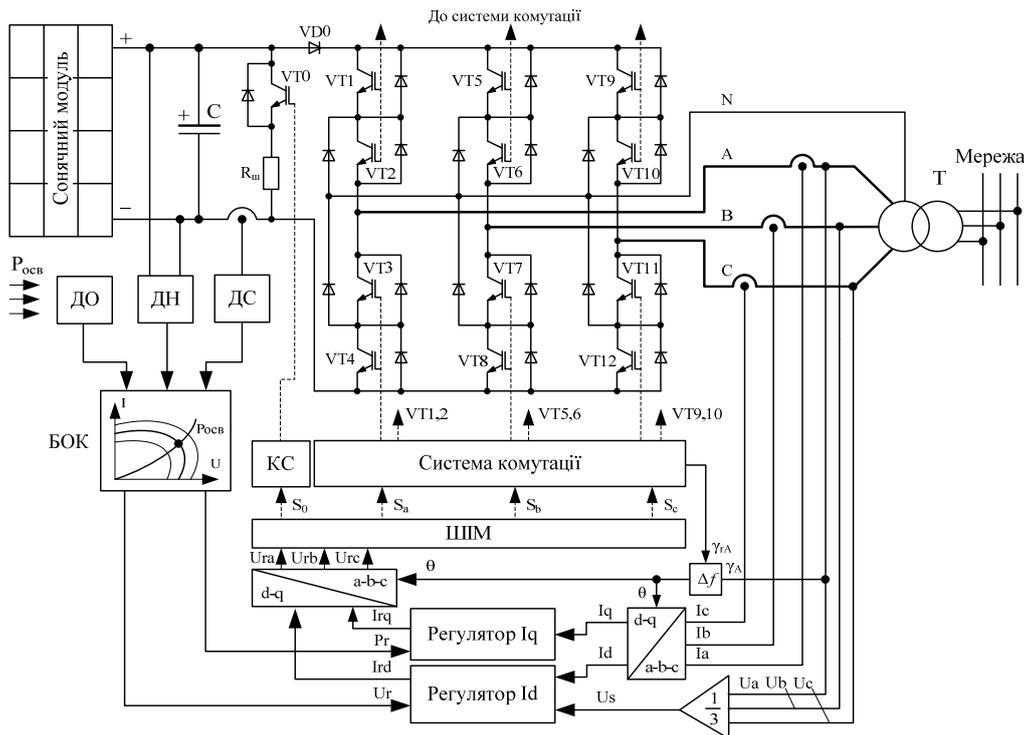


Рис. 1. Функціональна схема тривіневого мережевого інвертора з внутрішніми контурами регулювання струмів  $I_d$  та  $I_q$

Блок обчислення квазіекстремуму БОК в такій системі обчислює координати області точки відбору максимальної потужності та формує сигнали завдання за напругою  $U_r$  та за потужністю  $P_r$  для регуляторів поздовжньої  $I_d$  та відповідно поперечної складової  $I_q$  струму інвертора. Зворотні зв'язки вказаних регуляторів реалізуються шляхом переводу трифазної системи струмів  $I_a$ ,  $I_b$  та  $I_c$  до ортогональної  $I_d$  та  $I_q$ . Перетворення здійснюється відповідно кута електромагнітного навантаження інвертора  $\theta$ , що відповідає куту навантаження електричної машини, яка працює паралельно з мережею.

Кут електромагнітного навантаження інвертора  $\theta$  обчислюється системою в часовому інтервалі як різниця частот напруги мережі та інвертора відповідно

$$\theta = \int_0^{\pi} \Delta f dt. \quad (1)$$

Різниця частот в структурі запропонованої системи визначається в часовому інтервалі на відповід-

ному проміжку як час від моменту видачі команди системою комутації на вмикання ключа VT1 до моменту переходження через 0 кривої напруги мережі (по фазі A) в додатному напрямку (сигнал  $\gamma$ ).

Блок перетворення трифазної системи струмів «a-b-c» до ортогональної «d-q», який забезпечує зворотними зв'язками регулятори струмів реалізовує систему рівнянь (2)

$$\begin{cases} I_d = \frac{2}{3} \left( i_a \cdot \cos \theta + i_b \cdot \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cdot \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right); \\ I_q = \frac{2}{3} \left( i_a \cdot \sin \theta + i_b \cdot \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cdot \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right). \end{cases} \quad (2)$$

Для забезпечення режиму утримання сонячного модуля в точці максимальної потужності автоматичні

регулятори напруги (поздовжньої складової струму інвертора  $I_d$ ) та потужності (поздовжньої складової струму інвертора  $I_q$ ) функціонують відповідно до ПІ-закону регулювання та описуються системою рівнянь.

$$\begin{cases} I_{rd} = k_{pd} \left( (k_u \cdot (U_r - k_{cu} \cdot U_s) - I_d) + \frac{1}{T_{id}} \int_0^t (k_u \cdot (U_r - k_{cu} \cdot U_s) - I_d) dt \right); \\ I_{rq} = k_{pq} \left( (k_p \cdot Pr - I_q) + \frac{1}{T_{iq}} \int_0^t (k_p \cdot Pr - I_q) dt \right), \end{cases} \quad (3)$$

де  $k_{pd}$  та  $k_{pq}$  – коефіцієнти підсилення регуляторів поздовжньої та поперечної складових струму інвертора відповідно;  $T_{id}$  та  $T_{iq}$  – постійні часу інтегрування регуляторів;  $k_u$  – коефіцієнт з розмірністю провідності для приведення напруги в каналі завдання регулятора до відповідного значення струму на вході вимірювального органу регулятора;  $k_{cu}$  – коефіцієнт корекції завдання за напругою на виході інвертора (забезпечує компенсацію відхилення вихідної напруги за рахунок спаду напруги в силовому колі інвертора при зміні навантаження);  $U_r$  та  $Pr$  – задані значення напруги та потужності інвертора відповідно, що визначаються, виходячи з утримання режиму сонячного модуля в області квазіекстремуму;  $I_{rd}$  та  $I_{rq}$  – вихідні сигнали регуляторів поздовжньої та поперечної складових струму інвертора.

Блок зворотного перетворення ортогональної системи обчислених оптимальних значень струмів  $I_{rd}$  та  $I_{rq}$  до трифазної системи напруг керування плечами моста інвертора  $U_{ra}$ - $U_{rb}$ - $U_{rc}$  працює відповідно до системи

$$\begin{cases} U_{ra} = I_{rd} \cdot \sin \theta + I_{rq} \cdot \cos \theta; \\ U_{rb} = \frac{1}{2} \cdot \left( (\sqrt{3} \cdot \sin \theta - \cos \theta) I_{rq} - (-\sin \theta + \sqrt{3} \cdot \cos \theta) I_{rd} \right); \\ U_{rc} = -U_{ra} - U_{rb}. \end{cases} \quad (4)$$

Контролер скиду КС (рис. 1) активується вихідним сигналом  $S_0$  модуля ШІМ з відповідною шпаруватістю у тому випадку, коли сонячний модуль генерує надлишкову потужність, а його слід утримувати в точці відбору максимуму потужності без відхилення вхідної напруги від області допустимих значень. Надлишкова потужність скидається через шунт  $R_{ш}$ , або може використовуватись для підзарядки акумуляторної батареї (за наявності).

Запропонована структура системи керування мережевим інвертором вирішує локальну задачу утримання режиму роботи пари «сонячний модуль – інвертор» в точці квазіекстремуму ВАХ за умови стабілізації вихідних параметрів енергії, яка віддається в мережу – напруги та частоти. На вказані параметри впливає не лише робота сонячного модуля, але й баланс активної та реактивної потужності, яка віддається в мережу та споживається з неї. Тому охоплення запропонованої системи керування відповідними зворотними зв'язками за відхиленням  $P$  та  $Q$  дозволить збільшити стійкість системи та покращити якість регулювання напруги та частоти електроенергії з СЕС.

Автоматичний регулятор частоти на електричних станціях часто реалізується у вигляді астатичного

ПІ-регулятора, який свій регулюючий вплив направляє на компенсацію відхилення поточної активної потужності  $P$  від заданої при досягненні рівності частот мережі і генеруючого блоку [7]. У випадку мережевого інвертора вказану задачу можна вирішити в наступний спосіб. Керування потужністю (та вихідною частотою) інвертора здійснюється зміною поперечної складової струму інвертора  $I_q$  відповідним регулятором. На вимірювальний вхід даного регулятора замість незалежної змінної потужності освітлення сонячного модуля  $P_{осв}$  подається відношення потужностей освітлення та спожитої з мережі  $P_{осв}/P_{сн}$ . Регулювання величини поперечної складової струму інвертора та керування ланкою скиду потужності здійснюється в залежності від величини співвідношення потужностей.

Автоматичні регулятори напруги вимагають більшої швидкодії та розробляються за комбінованим принципом, основу якого складає ПД-регулятор з відповідною передавальною функцією [7]. Для системи керування мережевим інвертором можна використати подібний підхід, тобто регулююча дія  $U_r$  має обчислюватись як різниця між напругою у вузлі мережі (виходячи з балансу реактивної потужності) та напругою, що відповідає заданій потужності освітлення в точці квазіекстремуму. З врахуванням зазначеного система рівнянь регуляторів (3) матиме вигляд:

$$\begin{cases} I_{rd} = k_{pd} \left( \left( k_u \cdot \left( \left( \sqrt{\frac{Q_{сн}}{X_{мер}}} - U_{\kappa} \right) - k_{cu} \cdot U_s \right) - I_d \right) + \frac{1}{T_{id}} \int_0^t \left( k_u \cdot \left( \left( \sqrt{\frac{Q_{сн}}{X_{мер}}} - U_{\kappa} \right) - k_{cu} \cdot U_s \right) - I_d \right) dt + T_{dd} \cdot d \left( k_u \cdot \left( \left( \sqrt{\frac{Q_{сн}}{X_{мер}}} - U_{\kappa} \right) - k_{cu} \cdot U_s \right) - I_d \right) / dt \right); \\ I_{rq} = k_{pq} \left( \left( k_{pi} \cdot \frac{P_{осв}}{P_{сн}} - I_q \right) + \frac{1}{T_{iq}} \int_0^t \left( k_{pi} \cdot \frac{P_{осв}}{P_{сн}} - I_q \right) dt \right), \end{cases} \quad (5)$$

де  $T_{dd}$  – стала часу диференціювання каналу регулювання  $I_d$ ,  $U_{\kappa}$  – напруга, що відповідає заданій потужності освітлення в точці квазіекстремуму.

Функціональна схема вимірювальних каналів регуляторів матиме вигляд (рис. 2)

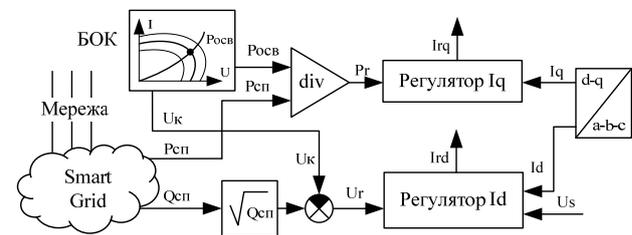


Рис. 2. Функціональна схема вимірювальних каналів регуляторів складових струму  $I_d$  та  $I_q$

Як було зазначено, для реалізації системи керування інвертором, що включає в себе задачі комутації силових ключів, проведення обчислень пошуку точки квазіекстремуму, проведення прямих та зворотних перетворень «abc-dq», формування вихідних сигналів керування регуляторів струмів в реальному часі конт-

ролеру системи керування потрібно мати високопродуктивне DSP ядро та широкий арсенал обробки сигналів. На сучасному етапі таким вимогам відповідають 32-розрядні мікроконтролери MSP432 фірми Texas Instruments з 14-розрядним АЦП (до 1 млн перетворень за секунду) [8] та подібні. Отримання контролером системи керування інвертором миттєвих значень струмів та напруг по фазах інвертора реалізується в запропонованій системі керування за допомогою сенсорів Холла, що підключаються до аналогових входів МК через схему з повторювачем (рис. 3), а фільтрація завад провадиться на апаратному рівні аналоговим фільтром та програмно за рахунок вбудованої бібліотеки нерекурсивних цифрових фільтрів.

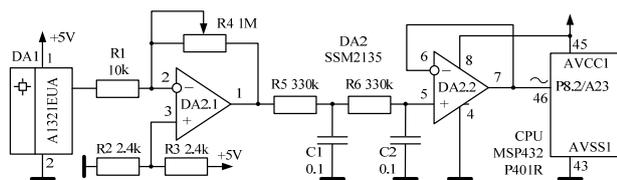


Рис. 3. Принципова схема підключення сенсора струму Іа до аналогового входу мікроконтролера

**Висновки.** Запропоновано закон керування багаторівневим мережним інвертором сонячної електростанції та розроблено структуру для його реалізації, що поєднує задачі утримання режиму роботи сонячного модуля в точці відбору максимальної потужності та стабілізації напруги і частоти на виході інвертора, що дозволяє збільшити продуктивність сонячного модуля, привести у відповідність баланс згенерованої сонячним модулем та спожитої електричної потужності в режимі реального часу.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gaëtan Masson, Sinead Orlandi, Manoël Reking. *Global market outlook for photovoltaics 2014-2018*. – European Photovoltaic Industry Association. Brussels, Belgium, 2014. – 57 p.
2. Corzine K.A. *Operation and design of multilevel inverters*. – University of Missouri: Rolla, 2005. – 79 p.
3. Волков А.В., Скалько Ю.С. Высоковольтный асинхронный электропривод с трехуровневым автономным инвертором напряжения // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2008. – №4(51). – Ч.1. – С. 14-17.
4. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В., Титаренко И.Г. Моделирование электропривода переменного тока с каскадным многоуровневым инвертором напряжения // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2013. – №2. – С. 40-47.
5. Охоткин Г.П., Серебренников А.Г. Основные принципы построения автономных солнечных электростанций // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – №6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/106-7345>.
6. Лежнюк П.Д., Комар В.О., Собчук Д.С. Оцінювання впливу джерел відновлювальної енергії на забезпечення балансової надійності в електричній мережі // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – №6. – С. 45-47.
7. Овчаренко Н.И. *Автоматика энергосистем*. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009. – 476 с.
8. *MSP432 Hardware Tools. User's Guide*. – Texas Instruments, March 2015. – 21 p.

#### REFERENCES

1. Gaëtan Masson, Sinead Orlandi, Manoël Reking. *Global market outlook for photovoltaics 2014-2018*. European Photovoltaic Industry Association. Brussels, Belgium, 2014. 57 p.
2. Corzine K.A. *Operation and design of multilevel inverters*. University of Missouri: Rolla, 2005. 79 p.
3. Volkov A.V., Skalko Y.S. High voltage asynchronous electric drive with stand alone voltage inverter. *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Transactions of Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State University*, 2008, no.4(51), part 1, pp. 14-17. (Rus).
4. Zhemerov G.G., Tugay D.V., Titarenko I.G. Simulation of an AC drive system comprising a cascade multilevel voltage inverter. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.2, pp. 40-47. (Rus).
5. Ohotkin G.P., Serebrennikov A.G. Osnovnyie principy postroyeniya avtonomnyh solnechnyh electrostantsiy [The basic principles of construction of stand alone solar power station]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2012, no.6. Available at: <http://www.science-education.ru/106-7345> (Accessed 09 October 2012). (Rus).
6. Lezhniuk P.D., Komar V.O., Sobchuk D.S. The evaluating of influence of renewable energy source on balance reliability providing in power network. *Visnyk Vinnytskogo politehnichnogo instytutu – Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 2013, no.6, pp. 45-47. (Ukr).
7. Ovcharenko N.I. *Avtomatika energosistem* [The power system's automatic]. Moscow, Edit. house of MEI, 2009. 476 p. (Rus).
8. *MSP432 Hardware Tools. User's Guide*. Texas Instruments, March 2015. 21 p.

Поступила (received) 21.01.2015

Левіцький Сергій Михайлович, к.т.н., доц.,  
Вінницький національний технічний університет,  
21000, Вінниця, вул. Воїнів-Інтернаціоналістів, 9,  
тел./phone +38 043 2598167, e-mail: levitskiy@vntu.edu.ua

S.M. Levitskiy  
Vinnytsia National Technical University,  
9, Voinov-Internatsionalistov Str., Vinnytsia, 21000, Ukraine.

#### Control system for multilevel inverter of solar power station.

**Purpose.** The development of control law for network multilevel inverter of solar power station and design device for control law realization. **Methodology.** At synthesis of control law theory of automatic control, power network engineering and circuit technique are considered. The control law for distributive control over the direct-axis and quadrature-axis currents of inverter after abc-dq transform of three phase current's momentary value is used. **Results.** The improved model of regulator of direct-axis inverter's current is developed and provides the voltage optimization of inverter's operating both from solar module and from network by means of calculation the reactive power consumption from network, voltage on network and voltage on solar module. The improved model of regulator of quadrature-axis inverter's current is developed and provides the power and frequency optimization of inverter's operating by means of calculation ratio of active power consumption and power from solar module. **Originality.** The offered control law and device, which realize it, is working out on secondary loop from power network smart grid with active and reactive power consumption monitoring. That provides the optimal operation of solar station both from solar module and from power network. **Practical value.** The proposed control law and structure of the network multilevel inverter for solar power station provide the operate mode of solar module in maximum power point and increasing the solar module's productivity. References 8, figures 3.

Key words: inverter, control, solar module.

## УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ «ДИНАМІЧНИХ КОНДЕНСАТОРІВ» ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Досліджено роботу «динамічних конденсаторів» для компенсації реактивної потужності. Запропоновано оригінальну систему управління «динамічним конденсатором», яка забезпечує споживання ним близького до синусоїдального вхідного струму. Це дозволяє зменшити вплив «динамічного конденсатора» на амплітудно-частотну характеристику мережі, підвищити надійність його роботи та покращити точність компенсації реактивної потужності. Бібл. 4, рис. 6.

Ключові слова: компенсація реактивної потужності, «динамічний конденсатор», система управління, безпосередній знижувальний АС/АС перетворювач, двонаправлений ключ.

Исследована работа «динамических конденсаторов» для компенсации реактивной мощности. Предложена оригинальная система управления «динамическим конденсатором», которая обеспечивает потребление им близкого к синусоидальному входного тока. Это позволяет уменьшить влияние «динамического конденсатора» на амплитудно-частотную характеристику сети, повысить надежность его работы и улучшить точность компенсации реактивной мощности. Библ. 4, рис. 6.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, «динамический конденсатор», система управления, непосредственный понижающий АС / АС преобразователь, двунаправленный ключ.

**Вступ.** Пристрої компенсації реактивної потужності (ПКРП) мають відповідати наступним критеріям: забезпечувати плавне регулювання реактивної потужності та при цьому мати відносно невелику вартість. Сучасним рішенням для компенсації реактивної потужності (РП) є використання ПКРП зі ступеневим перемиканням, СТАТКОМів, активних фільтрів [1]. Останнім часом все більше уваги приділяється проектуванню ПКРП на базі безпосередніх АС/АС перетворювачів, які отримали назву «динамічний конденсатор» (ДК) [2 – 4].

**Постановка задачі.** ДК представляє собою батарею конденсаторів, що підключається до мережі через напівпровідниковий безпосередній перетворювач змінної напруги із двома двонаправленими ключами. Спрощена схема підключення ДК до мережі наведена на рис. 1.

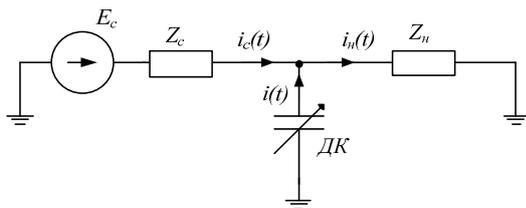


Рис. 1. Спрощена схема підключення ДК до мережі

Найчастіше в ДК використовується понижуючий перетворювач – buck-converter (рис. 2), проте можуть бути використані і підвищувальний (boost), і понижуючи-підвищувальний (buck-boost) [2 – 4].

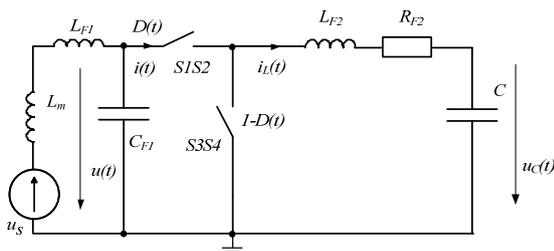


Рис. 2. Схема однофазного «динамічного конденсатора» на основі buck-перетворювача

Використання останніх передбачує підтримання підвищеної напруги на конденсаторі ДК, що накладає певні вимоги до пробивної напруги силових ключів та є економічно необґрунтованим.

В якості двонаправлених ключів можуть виступати з'єднані по схемі з загальним емітером IGBT транзистори (рис. 3).

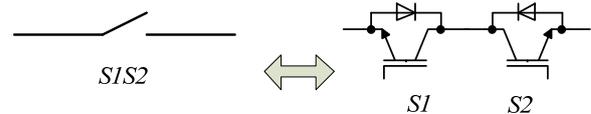


Рис. 3. Схема двонаправлених ключів

Регулювання реактивної потужності забезпечується зміною скважності перемикання двонаправлених ключів (S1S2 та S3S4).

Якщо скважність керуючих імпульсів двонаправленого ключа S1S2  $D(t) = D = \text{const}$  при достатньо високій частоті перемикання, то можна записати вирази для напруги на конденсаторі  $U_C$  та локального середнього (середнього за період ШІМ) струму через ключі S1S2  $I_X$ :

$$u_C(t) = D \cdot u_s(t) = D \cdot U_m \sin(\omega t), \quad (1)$$

де  $u_s(t) = U_m \sin(\omega t)$  – миттєва фазна напруга мережі, В.

$$i_X(t) = D \cdot i_C(t) = D \cdot C \frac{du_C(t)}{dt} = D^2 \cdot \omega \cdot C \cdot U_m \cos(\omega t). \quad (2)$$

Реактивна потужність такого ПКРП дорівнює номінальній потужності батареї конденсаторів  $Q_C$ , помноженій на квадрат скважності керуючих імпульсів двонаправленого ключа S1S2:

$$S_{D-CAP} = U_{Srms} \cdot I_{Srms} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{D^2 \cdot U_m}{\sqrt{2} \cdot X_C} = D^2 \cdot \frac{U_m^2}{2 \cdot X_C} = D^2 \cdot Q_C \quad (3)$$

Якщо ДК підключається до мережі з несинусоїдальною напругою, вхідний струм ДК також буде несинусоїдальним. Крім того, послідовно з'єднані індуктивність  $L_{F2}$  та конденсатор  $C$  утворюють резонансний контур, в якому виникає коливальний перехідний процес.

Перевагою такого способу управління ДК є його простота реалізації. До недоліків слід віднести те, що при підключенні такого ДК до мережі з несинусоїдальною напругою, батарея конденсаторів ДК буде зазнавати впливу вищих гармонік струму, що може призвести до перевантаження конденсаторів або до виникнення резонансів між ДК та еквівалентною індуктивністю мережі. Крім того, ДК в режимі роботи з постійною скважністю впливає на амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) мережі. Все це призводить до зниження надійності ДК та може підвищити ймовірність виходу його з ладу.

Описані недоліки позначають **мету** досліджень, яка полягає в удосконаленні системи управління ДК.

**Результати досліджень.** Струм завдання ДК знаходиться в залежності від необхідної реактивної потужності, яку має згенерувати ДК, наприклад, в результаті виділення реактивної компоненти першої гармоніки споживаного навантаженням струму (рис. 1). Для того, щоб ДК не впливав на АЧХ мережі, треба, щоб форма споживаного ним струму була синусоїдальною.

Позначимо скважність перемикання двонаправленого ключа  $SIS2$  як  $D(t)$ . Локальна середня напруга на конденсаторі  $C$  буде визначатися за наступним виразом:

$$u_C(t) = D(t) \cdot u(t), \quad (4)$$

а струм, що протікає через конденсатор  $C$ :

$$i_C(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} = C \cdot \frac{d(D(t) \cdot u(t))}{dt}. \quad (5)$$

Тоді струм, що споживається ДК, можна визначити як:

$$\begin{aligned} i(t) &= i_C(t) \cdot D(t) = C \cdot D(t) \cdot \frac{d(D(t) \cdot u(t))}{dt} = \\ &= C \cdot (D(t))^2 \cdot \frac{d(u(t))}{dt} + C \cdot D(t) \cdot u(t) \cdot \frac{d(D(t))}{dt}. \end{aligned} \quad (6)$$

Знайдемо миттєву потужність ДК:

$$\begin{aligned} p(t) &= u(t) \cdot i(t) = C \cdot u(t) \cdot (D(t))^2 \cdot \frac{d(u(t))}{dt} + \\ &+ C \cdot D(t) \cdot (u(t))^2 \cdot \frac{d(D(t))}{dt}. \end{aligned} \quad (7)$$

В першому доданку отриманої суми внесемо під знак похідної  $u(t)$ , а у другому –  $D(t)$ :

$$p(t) = \frac{C}{2} \cdot (D(t))^2 \cdot \frac{d(u(t)^2)}{dt} + \frac{C}{2} \cdot (u(t))^2 \cdot \frac{d(D(t)^2)}{dt}. \quad (8)$$

В результаті отримали вираз похідної добутку, після згоргання якої та внесення постійного множника отримали остаточний вираз для миттєвої потужності ДК:

$$p(t) = \frac{d}{dt} \left( \frac{C \cdot u(t)^2}{2} \cdot D(t)^2 \right). \quad (9)$$

Проінтегруємо останній вираз та знайдемо залежність для скважності двонаправлених ключів:

$$D(t) = \sqrt{\frac{2 \int_0^t u(\tau) \cdot i_{ref}(\tau) d\tau}{C \cdot (u(t)^2)}}, \quad (10)$$

де  $i_{ref}(t)$  – заданий струм ДК, А.

Останній вираз дозволяє обчислити скважність керуючих імпульсів силових ключів ДК в залежності від потрібної форми струму ДК.

На рис. 4 наведена система управління ДК, яка реалізує керування скважністю перемикання двонаправлених ключів згідно з останнім виразом.

Блок PLL (Phase Locked Loop) – фазового автопідростроювання частоти – формує сигнал одиничної амплітуди, зсунутий по фазі на 90 електричних градусів по відношенню до першої гармоніки напруги мережі  $u(t)$ . В результаті множення його на задану амплітуду реактивного струму  $I_{ref m}$ , отримуємо струм завдання  $i_{ref}(t)$ . Отримані сигнали використовуються для обчислення скважності  $D(t)$ .

Для запобігання накопиченню похибки при роботі інтегратора його вихід скидається в нуль при кожному переході миттєвої напруги мережі через нуль за допомогою сигналу RESET, який формується на виході ZC (Zero Crossing) блоку PLL.

Якщо квадрат напруги мережі менше заданого значення  $U_{min}^2$ , то спрацьовує перекидний ключ, який встановлює скважність двонаправлених ключів, що дорівнює середній за попередній період мережі. Це викликано великою похибкою розрахунку скважності при малих абсолютних значеннях миттєвої напруги мережі.

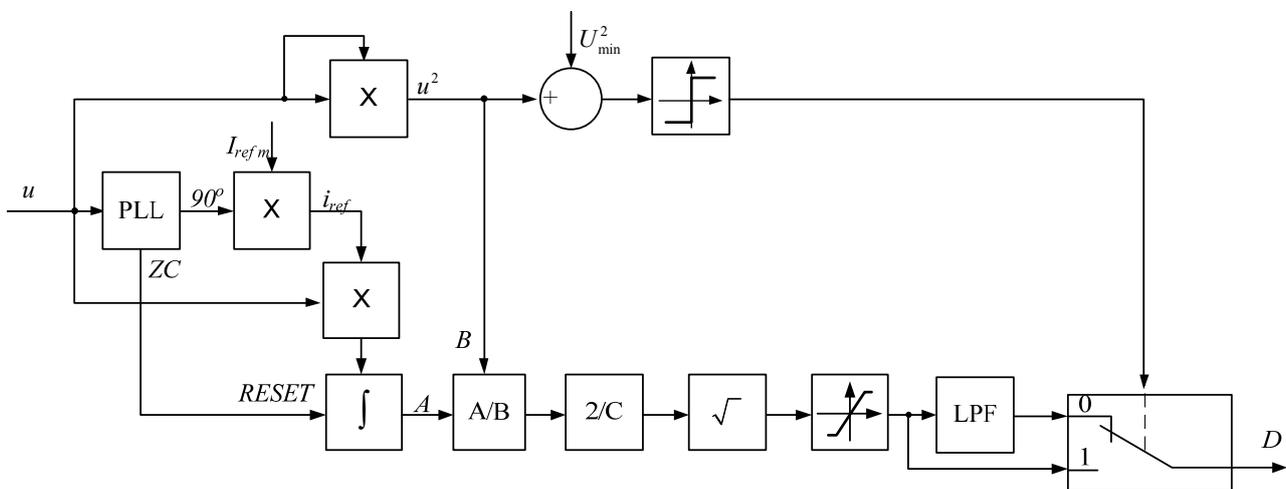


Рис. 4. Розроблена система управління ДК

До складу досліджуваного однофазного ДК входять:

- батарея конденсаторів ( $C$ , рис. 2) EPCOS MKD230-I-2.5 – 5 шт., напруга 230 В, ємність кожного конденсатора 151 мкФ, сукупна реактивна потужність батареї конденсаторів 12,5 кВАр;
- захисний реактор ( $R_{F2}$ ,  $L_{F2}$ , рис. 2) індуктивністю 400 мкГн при струмі 100 А;
- мережевий фільтр ( $L_{F1}$ ,  $C_{F1}$ , рис. 2) з індуктивністю  $L_{F1} = 100$  мкГн і ємністю  $C_{F1} = 94$  мкФ;
- 4 силових ключі IGBT APT100GF60JR (600 В, 100 А).

Схема управління транзисторами виконана з використанням спеціалізованих драйверів FOD3184. Частота перемикання ключів ДК складає 10 кГц. Формування керуючих сигналів здійснюється однокристальним 32-бітним мікроконтролером STM32F100C6T6В фірми ST Microelectronics, працюючим з тактовою частотою 24 МГц.

В результаті дослідження роботи ДК отримано діаграми напруги мережі та локального середнього вхідного струму ДК при роботі із постійною скважністю (рис. 5) та із удосконаленою системою управлін-

ня (рис. 6) зі спотвореною напругою мережі (вторинна напруга підстанції МТП-514 м. Маріуполя).

Видно, що при застосуванні запропонованого способу управління коефіцієнт гармонік вхідного струму ДК значно нижчий, ніж при управлінні з постійною скважністю. Таким чином, використання запропонованого способу управління ДК дозволяє забезпечити близький до синусоїдального споживаний ДК струм.

#### Висновки.

1. Використання системи управління ДК, яка реалізує постійну скважність перемикання двонаправлених ключів дозволяє досягти плавного регулювання реактивної потужності, проте такий ДК впливає на АЧХ мережі, що призводить до резонансів з реактивним опором мережі.

2. Використання удосконаленої системи управління ДК дозволяє досягти форми споживаного ДК струму близької до синусоїдальної, що значно зменшує вплив на АЧХ мережі, підвищує надійність ПКРП та якість електроенергії.

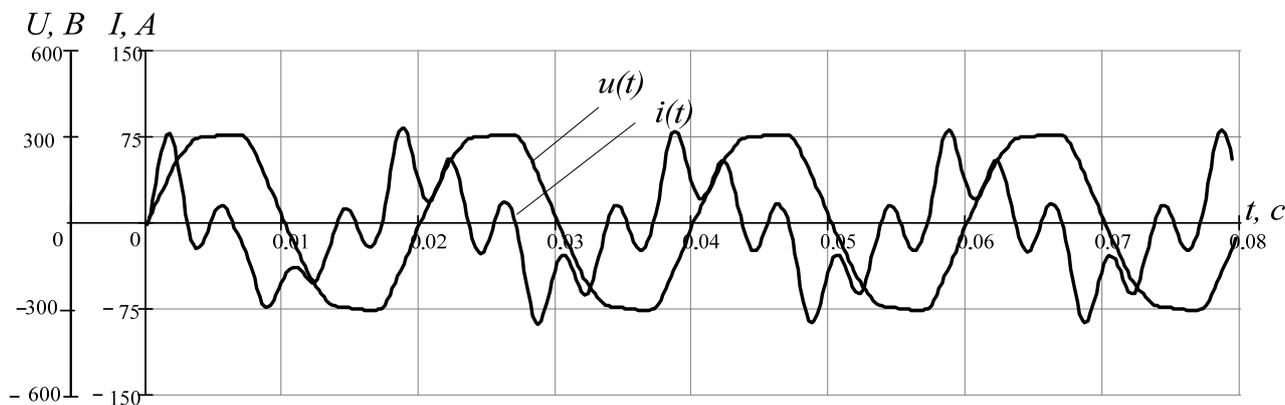


Рис. 5. Діаграми напруги мережі та локального середнього (середнього за період перемикання ключів) вхідного струму ДК при постійній скважності керуючих імпульсів силових ключів

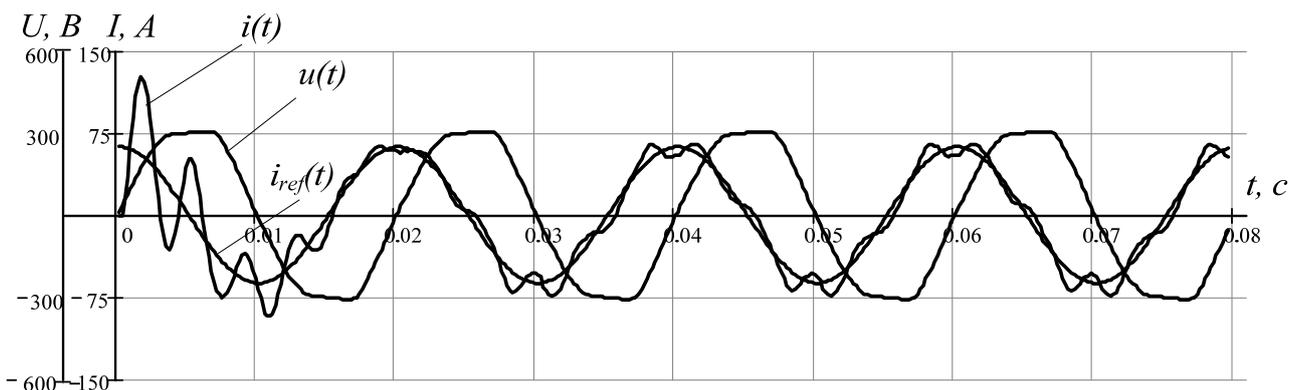


Рис. 6. Діаграми напруги мережі та локального середнього вхідного струму ДК при роботі удосконаленої системи управління

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Burlaka V.V., Gulakov S.V., Podnebennaya S.K., Savenko O.S. Hybrid VAR compensator with improved efficiency // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2014. – № 29. – С. 174-180.  
2. Anish Prasai, Deepak M. Divan. Control of dynamic capacitor // IEEE Transactions On Industry Applications. – 2011. – vol.47. – no.1. – pp. 161-168.

3. Anish Prasai, Jyoti Sastry, Deepak M. Divan. Dynamic capacitor (D-CAP): An integrated approach to reactive and harmonic compensation // IEEE Transactions On Industry Applications. – 2010. – vol.46. – no.6. – pp. 2518-2525.  
4. Mudit Gupta, Singh N.K. Modelling of four switch buck boost dynamic capacitor // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2014. – vol.3. – iss.10. – pp. 964-970.

## REFERENCES

1. Burlaka V.V., Gulakov S.V., Podnebennaya S.K., Savenko O.S. Hybrid VAR compensator with improved efficiency. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu – Visnyk of Pryazovskyi State Technical University*, 2014, vol.29, pp. 174-180.
2. Anish Prasai, Deepak M. Divan. Control of dynamic capacitor. *IEEE Transactions On Industry Applications*, 2011, vol.47, no.1, pp. 161-168. doi: 10.1109/ECCE.2009.5316203.
3. Anish Prasai, Jyoti Sastry, Deepak M. Divan. Dynamic capacitor (D-CAP): An integrated approach to reactive and harmonic compensation. *IEEE Transactions On Industry Applications*, 2010, vol.46, no.6, pp. 2518-2525. doi: 10.1109/tia.2010.2072974.
4. Mudit Gupta, Singh N.K. Modelling of four switch buck boost dynamic capacitor. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2014, vol.3, iss.10, pp. 964-970.

Надійшла (received) 21.07.2015

Поднебенна Світлана Костянтинівна, к.т.н., доц.,  
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»,  
87500, Маріуполь, вул. Університетська, 7,  
тел/phone +38 098 4831073, e-mail: podsvet@gmail.com

S.K. Podnebennaya  
Pryazovskyi State Technical University,  
7, Universitetska Str, Mariupol, 87500, Ukraine.

### **An improved control algorithm for «Dynamic Capacitor» VAR compensator.**

**Purpose.** Modern approaches of VAR compensation are: using compensators with stepped regulation, STATCOMs, active power filters. Recently, more attention is paid to VAR compensator's

design based on the direct AC / AC converters, which are called dynamic capacitors. **Methodology.** The dynamic capacitor (D-CAP) is the capacitor bank, which is connected to the mains through direct AC / AC buck converter. By varying the duty cycle of bidirectional switches, smooth control of reactive power can be achieved. However, in case of distorted mains voltage, D-CAP mains current will have a high THD. This is due to the fact that the D-CAP affects the frequency response of electric grid thus leading to the appearance of resonances. With non-sinusoidal mains voltage, capacitors are affected by harmonics. This reduces the reliability of the D-CAP, increasing the probability of their failure. To eliminate these drawbacks it is suggested to improve the D-CAP control system so that the input current of the dynamic capacitor is forced to be close to sinusoidal. This can be achieved if the duty cycle of the switching bidirectional switches is changed according to the proposed expression. **Results.** The research is done on a single-phase D-CAP with the proposed control system, its input current diagrams are shown. In contrast to the D-CAP with a constant duty cycle control, the resulting THD of its input current is much lower. Thus, the control system provides a form of the input current that is close to a sine wave. This reduces the influence of mains voltage harmonics on the D-CAP operation, increases its reliability and improves power quality. **Originality.** The proposed D-CAP control system ensures reliable operation with non-sinusoidal mains voltage. **Practical value.** Application of D-CAPs with the proposed control system allows for improved energy efficiency of electrical mains by providing VAR compensation and improving power quality. References 4, figures 6.

**Key words:** VAR compensation, dynamic capacitor, control system, thin AC/AC converter, bidirectional switch.

## АБСОРБЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФАЗНОЙ И ПОЯСНОЙ БУМАЖНО-ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ НА ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ

*Представлено методику визначення індивідуальних характеристик фазної та поясної паперово-просоченої ізоляції силових кабелів середньої напруги. Методика реалізована на застосуванні схеми заміщення трьохжильного кабелю в загальній металевій оболонці та аналізі результатів сукупних вимірювань абсорбційних характеристик. Система лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення характеристик фазної та поясної ізоляції є добре обумовленою. Рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь зводиться до сумування результатів сукупних вимірювань з ваговими коефіцієнтами  $6/14$  та  $-1/14$ . Наведено результати визначення абсорбційних характеристик фазної та поясної ізоляції силового кабелю на напругу 6 кВ. Бібл. 8, табл. 4, рис. 5.*

**Ключові слова:** фазова та поясна паперово-просочена ізоляція, абсорбційні характеристики, індекс поляризації, опір ізоляції, сукупні вимірювання, схема заміщення, система лінійних алгебраїчних рівнянь, стійкість рішення.

*Представлена методика определения индивидуальных характеристик фазной и поясной бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей среднего напряжения. Методика реализована на применении схемы замещения трехжильного кабеля в общей металлической оболочке и анализе результатов совокупных измерений абсорбционных характеристик. Система линейных алгебраических уравнений для определения характеристик фазной и поясной изоляции является хорошо обусловленной. Решение системы линейных алгебраических уравнений сводится к суммированию результатов совокупных измерений с весовыми коэффициентами  $6/14$  и  $-1/14$ . Приведены результаты определения абсорбционных характеристик фазной и поясной изоляции силового кабеля на напряжение 6 кВ. Библ. 8, табл. 4, рис. 5.*

**Ключевые слова:** фазная и поясная бумажно-пропитанная изоляция, абсорбционные характеристики, индекс поляризации, сопротивление изоляции, схема замещения, система линейных алгебраических уравнений, устойчивость решения.

**Введение.** Особое внимание к кабелям и кабельным линиям среднего напряжения (3-20 кВ) объясняется тем, что они составляют абсолютное большинство силовых кабелей промышленных предприятий и городов. В частности, более 90 % кабельных линий среднего напряжения выполнены кабелями с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ). Моральный и физический износ кабельных линий (КЛ) напряжением 6-10 кВ в системах электроснабжения составляет от 40 до 90 %. При этом до 70 % всех нарушений электроснабжения возникает при отказах КЛ напряжением 6-10 кВ [1, 2].

На первый взгляд решение этой проблемы заключается в замене кабелей, выработавших свой ресурс, новыми и современными кабелями, например с вулканизированным полиэтиленом. Однако, замена всех кабелей в течение нескольких лет потребует больших затрат, превышающих стоимость первоначальной прокладки. Поэтому речь идет о продлении времени эксплуатации проложенных кабелей. В этом случае возникает вопрос о надежности существующих КЛ, их остаточном ресурсе для дальнейшей работы [3-5].

Актуальным является решение проблем, связанных с переходом на систему неразрушающей диагностики. Система дает возможность классифицировать КЛ по их остаточному ресурсу, снизить аварийность. Диагностика позволяет увеличить срок службы КЛ сверх нормативного срока и с большой экономией обеспечить их техническое обслуживание и ремонт. Выявление наиболее ответственных кабелей, установление очередности диагностики, кратко- и долгосрочное планирование замены КЛ делает, с одной стороны, актуальной разработку стратегии, обеспечивающую постепенную, в течение 10-15 лет, замену КЛ новыми кабелями, а с другой, – организацию эффективной эксплуатации всего множества существ-

ующих и прокладываемых кабелей промышленных предприятий и города в целом.

**Регламентированные методы испытаний и контроля состояния силовых кабелей и кабельных линий в условиях эксплуатации.** Для повышения надежности работы силовых кабелей и кабельных линий применяется система планово-профилактических испытаний [5-7]. Нормы электрических испытаний силовых КЛ на номинальное напряжение до 35 кВ включительно в условиях эксплуатации приведены в табл. 1, где обозначено: П – испытание при вводе в эксплуатацию КЛ; К – испытание при капитальном ремонте КЛ; М – испытание в процессе эксплуатации между ремонтами КЛ.

Измерение сопротивления изоляции производится при вводе КЛ в эксплуатацию, после ремонта и в процессе эксплуатации до и после испытания повышенным напряжением.

Измерения сопротивления изоляции кабелей производится между жилой и металлическим экраном (оболочкой) или между жилами (для трехжильных кабелей в общей оболочке) мегомметром на напряжение 2500 В. Отсчеты величины сопротивления изоляции по шкале мегомметра производятся через 1 мин с момента приложения напряжения для исключения влияния тока абсорбции.

Испытание изоляции кабелей повышенным напряжением производится при вводе КЛ в эксплуатацию, после ремонта КЛ, а также в процессе эксплуатации между ремонтами. В ряде случаев испытания выполняются переменным напряжением промышленной частоты и повышенным напряжением с частотой 0,1 Гц. Величина испытательного напряжения для кабелей напряжением 6 и 10 кВ составляет  $6U_{ном}$ , а для кабелей напряжением 20 и 35 кВ –  $5U_{ном}$ .

Таблица 1  
Нормы электрических испытаний силовых КЛ  
на номинальное напряжение до 35 кВ

Наименование испытания	Вид испытания	Нормы испытания
1. Измерение сопротивления изоляции	П, К, М	Производится мегаомметром на напряжение 2500 В. Сопротивление изоляции для силовых кабелей напряжением до 1 кВ – не ниже 0,5 МОм. <i>Сопротивление изоляции для силовых кабелей напряжением выше 1 кВ не нормируется.</i>
2. Испытание изоляции повышенным выпрямленным напряжением	П, К, М	В течение 10 мин при приемосдаточных испытаниях, в течение 5 мин в эксплуатации. Величина испытательного напряжения, допустимые токи утечки и коэффициенты асимметрии в соответствии с нормами.
3. Определение электрической емкости кабелей	П	Измеренная емкость, приведенная к удельному значению, должна отличаться от заводских измерений не более чем на 5 %.
4. Испытание пластмассовой оболочки (шланга) повышенным выпрямленным напряжением	П, К, М	Испытательное напряжение 10 кВ прикладывается между металлической оболочкой (экраном) и землей, длительность приложения испытательного напряжения – 1 мин.

В процессе испытаний повышенным выпрямленным напряжением контролируются ток утечки и коэффициент асимметрии. Величины допустимых значений тока утечки и коэффициента асимметрии для силовых кабелей на номинальное напряжение 6-35 кВ приведены в табл. 2. КЛ считается выдержавшей испытания, если во время испытаний не произошло пробоя изоляции или перекрытия по поверхности концевых муфт.

Таблица 2  
Допустимые значения тока утечки и коэффициента асимметрии для силовых кабелей напряжением 6-35 кВ

Номинальное напряжение, кВ	Испытательное напряжение, кВ	Допустимые значения тока утечки, мА	Допустимые значения коэффициента асимметрии ( $I_{max}/I_{min}$ )
6	36	0,2	8
	45	0,3	8
10	50	0,5	8
	60	0,5	8
20	100	1,5	10
35	140	1,8	10
	150	2,0	10
	175	2,5	10

Абсолютное значение тока утечки не является браковочным показателем. КЛ с удовлетворительной изоляцией должны иметь стабильные значения токов утечки. Контроль токов утечки позволяет выявить локальные дефекты, связанные с нарушением герметичности (утечка пропиточного состава). Признаком

наличия дефекта в изоляции считается медленное спадание тока утечки или даже его нарастание, особенно при полном испытательном напряжении. При проведении испытания ток утечки должен уменьшаться. Если не происходит уменьшения значения тока утечки, а также при его увеличении или нестабильности тока, испытание следует производить до выявления дефекта, но не более чем через 15 мин.

Признаком дефекта является также асимметрия  $\Delta I_y$  токов утечек соседних фаз:  $\Delta I_y > 10$  мкА.

КЛ считается выдержавшей испытание, если во время испытаний:

а) не произошло пробоя или перекрытий по поверхности концевых муфт, а также роста тока утечки в период выдержки под напряжением;

б) не наблюдалось резких толчков тока.

При заметном нарастании тока утечки или появлении толчков тока продолжительность испытания следует увеличить (до 10-20 мин). При дальнейшем нарастании тока утечки или увеличении количества толчков тока испытания следует вести до пробоя кабельной линии.

Обследования кабелей повышенным напряжением часто приводят к неоправданным пробоям составленных кабелей, т.е. такие испытания не столько выявляют дефекты изоляции, сколько приводят к необратимым ее повреждениям.

#### Информативные диагностические параметры состояния изоляции на постоянном напряжении.

Для наблюдения дрейфа сопротивления изоляции в процессе эксплуатации кабелей необходимо выделить представительные трассы кабелей, так как измерения сопротивления всех трасс будет технически трудно осуществимо. Вместо аналоговых мегомметров (Ф4100/5, ЭС 0202/2-Г и др.) необходимо использовать более чувствительные цифровые тераомметры (например, типа М1500-Р). При этом следует иметь в виду, что измерение больших сопротивлений (свыше 1000 МОм) корректно только в том случае, если исключено влияние токов утечки  $i_s$  по поверхности изоляции. Для этого тераомметры выполняют с тремя выводами, два из которых включаются в цепь измеряемого тока  $i_v$ , протекающего сквозь объем контролируемой изоляции, а третий (экранирующий) – служит для отвода токов  $i_s$  на землю. Если этого не сделать, то будет измеряться сумма токов ( $i_s + i_v$ ), в которой первая составляющая, не связанная со старением изоляции, может многократно превышать вторую, по которой собственно и выполняется оценка состояния изоляции.

Значительно более информативным показателем состояния изоляции, чем ее сопротивление, является кривая спада во времени зарядного тока  $i_v(t)$ . Она отражает процессы накопления объемных зарядов (абсорбции). Малая величина тока  $i_v$  и длительное время его установления служат признаком качественной изоляции. Наоборот – большая величина  $i_v$  и ее быстрое достижение установившегося значения – признак старенной или увлажненной изоляции (рис. 1).

На указанном качественном различии новой и старенной изоляции основаны *диагностические параметры, связанные с измерениями во времени.*

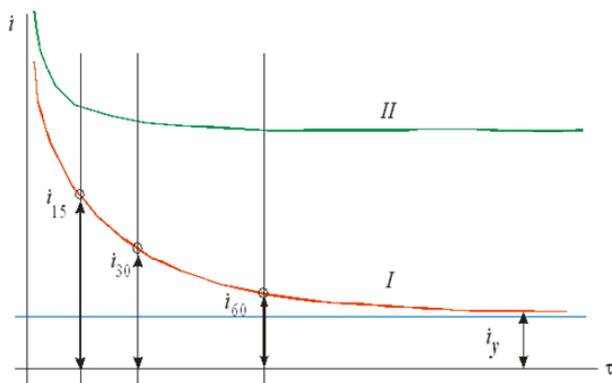


Рис. 1. Зависимости тока от времени в новой (I) и состаренной (II) изоляции

Измерения выполняются, например, на 15-й секунде с момента подачи напряжения, далее – на 30-й секунде и на 60-й секунде. Отношение сопротивлений изоляции, измеренных в эти моменты времени, дает безразмерные критерии – коэффициенты абсорбции.

Первый из них определяется как  $R_{30}/R_{15}$  (DAR – Dielectric Absorption Ratio) – *отношение диэлектрической абсорбции*. Второй – как  $R_{60}/R_{30}$  (PI – Polarization Index) – *индекс поляризации*.

Моменты измерений могут выбираться разными (вплоть до 10 мин и более).

Три измерения, выполненные в разные моменты времени, дают более полное представление о состоянии изоляции, чем измерение одного значения установившегося тока утечки (сквозной проводимости), принятое в обычных профилактических испытаниях.

**Цель статьи** – обоснование и тестирование методики диагностики силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией по абсорбционным характеристикам фазной и поясной изоляции на основании совокупных измерений.

**Индивидуальные параметры изоляционных промежутков силовых кабелей по результатам совокупных измерений.** На рис. 2 приведена схема изоляции силового кабеля с бумажно-пропитанной изоляцией (например, ААШВ): фазная изоляция (толщиной  $\Delta 1$ , с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon 2$ ), поясная изоляция (толщиной  $\Delta 2$ , с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon 3$ ), межфазное заполнение (из кабельной бумаги и пропитки на основе мало-канифольного компаунда с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon 1$ ).

В исходном состоянии свойства этих видов изоляции идентичны. В процессе длительной эксплуатации появляются *различия* свойств фазной и поясной изоляции, причем как электрических, так и механических характеристик [3-6]. Их следует рассматривать как предвестники завершения периода нормальной эксплуатации кабеля. Они могут быть вызваны неравномерным старением указанных компонентов изоляции, накоплением продуктов разложения целлюлозы, наконец, неравномерным увлажнением из-за потери герметичности соединительных и концевых муфт, защитной оболочки.

Кабель содержит ряд электродов, жилы, защитную оболочку, к которым подключаются диагностические приборы: Между электродами образуются

изоляционные промежутки, свойства которых требуется определить в ходе обследования. Вне зависимости от схемы подключения зондирующее электрическое поле захватывает как фазную, так и поясную изоляцию (рис. 3) [6]. Поэтому результаты измерений, как на постоянном, так и на переменном [6] напряжении представляют собой *совокупные* характеристики фазной и поясной изоляции.

Методика основана на построении схемы замещения [7] и анализе результатов совокупных измерений. Представим изоляционные промежутки кабеля схемой замещения (рис. 4). Каждый промежуток представлен емкостью и эквивалентным сопротивлением, отражающем ток утечки на постоянном напряжении или диэлектрические потери в изоляции на переменном напряжении [6]. Комплексные проводимости участков обозначены буквами  $Y$ . Например,  $Y_{AB} = j\omega C_{AB} + \frac{1}{R_{AB}}$ . Между фазами  $A, B, C$  и оболочкой  $O$  (см. рис. 2 и рис. 4) образуется 6 изоляционных промежутков. Их свойства измеряются не индивидуально, а в совокупности (рис. 3).

Так, при измерениях по схеме «фаза  $A$  – против двух других и оболочки» ( $A-S$ ) получаем суммарную проводимость  $Y_{A-S}$ :

$$Y_{A-S} = Y_{A-B} + Y_{A-C} + Y_{A-O} \quad (1)$$

Свойства каждой из составляющих ( $Y_{A-B}, Y_{A-C}, Y_{A-O}$ ) остаются неизвестными. Между тем, выявление именно различий в свойствах компонентов изоляции кабеля, появляющихся в процессе старения, необходимо для наблюдения за старением.

Из одного уравнения (1) нельзя найти 3 неизвестных. Всего же требуется определить характеристики 6-и промежутков: трех межфазных ( $A-B, A-C, B-C$ ) и трех вида «фаза – оболочка» ( $A-O, B-O, C-O$ ).

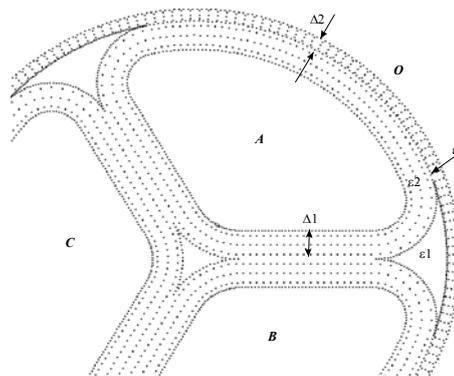


Рис. 2

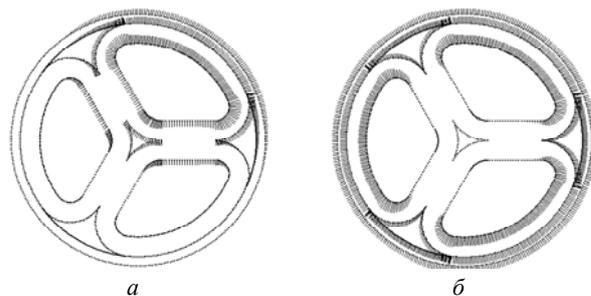


Рис. 3. Силовые линии электрического поля при обследовании кабеля по схемам: «жила – против всех остальных и оболочки» (а); «все жилы вместе – против оболочки» (б)

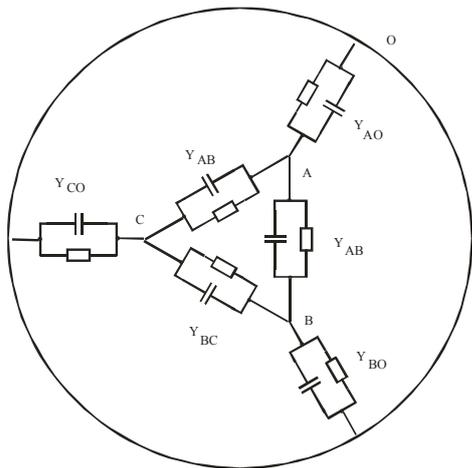


Рис. 4. Схема замещения изоляционных промежутков трехфазного кабеля ААШВ в общей металлической оболочке

Предлагаемая методика состоит в следующем.

Выполняется минимум 6 опытов по измерению совокупных характеристик кабеля, например, по следующим из 7-и возможным схемам: *A-S*; *B-S*; *C-S*; *A,B,C-O*; *A,B-C,O*; *A,C-B,O*; *B,C-A,O*.

Искомые *индивидуальные* характеристики промежутков определяются на основании решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

При выполнении всех 7-и опытов имеет место *переопределенная* СЛАУ (система, число уравнений в которой превышает число неизвестных)

$$\begin{cases} Y_{A-S} = Y_{A-B} + Y_{A-C} + Y_{A-O} \\ Y_{B-S} = Y_{A-B} + Y_{B-C} + Y_{B-O} \\ Y_{C-S} = Y_{B-C} + Y_{A-C} + Y_{C-O} \\ Y_{A,B,C-O} = Y_{A-O} + Y_{B-O} + Y_{C-O} \\ Y_{A,B-C,O} = Y_{A-C} + Y_{B-C} + Y_{A-O} + Y_{B-O} \\ Y_{A,C-B,O} = Y_{A-B} + Y_{B-C} + Y_{A-O} + Y_{C-O} \\ Y_{B,C-A,O} = Y_{A-B} + Y_{A-C} + Y_{B-O} + Y_{C-O} \end{cases} \quad (2)$$

Переопределенная СЛАУ (2) решается методом наименьших квадратов [8]. Для этого (2) представляется в матричной форме (3)

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y_{A-B} \\ Y_{B-C} \\ Y_{A-C} \\ Y_{A-O} \\ Y_{B-O} \\ Y_{C-O} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{A-S} \\ Y_{B-S} \\ Y_{C-S} \\ Y_{A,B,C-O} \\ Y_{A,B-C,O} \\ Y_{A,C-B,O} \\ Y_{B,C-A,O} \end{pmatrix} \quad (3)$$

После умножения (3) на транспонированную матрицу

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y_{A-B} \\ Y_{B-C} \\ Y_{A-C} \\ Y_{A-O} \\ Y_{B-O} \\ Y_{C-O} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y_{A-S} \\ Y_{B-S} \\ Y_{C-S} \\ Y_{A,B,C-O} \\ Y_{A,B-C,O} \\ Y_{A,C-B,O} \\ Y_{B,C-A,O} \end{pmatrix}$$

получается СЛАУ с *симметричной* матрицей коэффициентов

$$\begin{pmatrix} 4 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 4 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 4 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 4 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 4 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y_{A-B} \\ Y_{B-C} \\ Y_{A-C} \\ Y_{A-O} \\ Y_{B-O} \\ Y_{C-O} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y_{A-S} \\ Y_{B-S} \\ Y_{C-S} \\ Y_{A,B,C-O} \\ Y_{A,B-C,O} \\ Y_{A,C-B,O} \\ Y_{B,C-A,O} \end{pmatrix} \quad (4)$$

СЛАУ (4) является хорошо обусловленной, т.е. устойчивой. Числовые характеристики матрицы коэффициентов СЛАУ (4): детерминант равен 448, а наименьшее из собственных чисел – 2. Таким образом, в СЛАУ (4) погрешности правой части (результаты совокупных измерений) не повлияют сильно на результаты решения.

После умножения (4) на обратную матрицу искомые параметры изоляционных промежутков определяются как

$$\begin{pmatrix} Y_{A-B} \\ Y_{B-C} \\ Y_{A-C} \\ Y_{A-O} \\ Y_{B-O} \\ Y_{C-O} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 4 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 4 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 4 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 4 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 4 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y_{A-S} \\ Y_{B-S} \\ Y_{C-S} \\ Y_{A,B,C-O} \\ Y_{A,B-C,O} \\ Y_{A,C-B,O} \\ Y_{B,C-A,O} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} Y_{A-B} \\ Y_{B-C} \\ Y_{A-C} \\ Y_{A-O} \\ Y_{B-O} \\ Y_{C-O} \end{pmatrix} = \frac{1}{14} \cdot \begin{pmatrix} 6 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 6 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 6 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 6 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 6 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y_{A-S} \\ Y_{B-S} \\ Y_{C-S} \\ Y_{A,B,C-O} \\ Y_{A,B-C,O} \\ Y_{A,C-B,O} \\ Y_{B,C-A,O} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Таким образом, решение СЛАУ (2) свелось к преобразованию результатов совокупных измерений абсорбционных характеристик на постоянном напряжении по (5), т.е. суммированию результатов совокупных измерений с весовыми коэффициентами 6/14 и –1/14.

**Реализация методики для определения характеристик изоляции.** Для примера рассмотрим результаты *совокупных* обследований кабеля ААШВ-3×150-6 кВ (табл. 3). В табл. 3 представлены результаты измерений абсорбционных характеристик – сопротивления изоляции на 15-й, 30-й и 60-й секундах (собственно сопротивления изоляции) с момента подачи испытательного напряжения: R<sub>15</sub>, R<sub>30</sub>, R<sub>60</sub> соответственно. *Индивидуальные* характеристики 6-и изоляционных промежутков приведены в табл. 4.

Таблица 3  
Абсорбционные характеристики кабеля ААШВ-3×150-6 кВ (результаты совокупных измерений при постоянном напряжении 2652 В)

Схема измерений	R <sub>15</sub> , ГОм	R <sub>30</sub> , ГОм	R <sub>60</sub> , ГОм
A-S	83,6	85,0	101,0
B-S	84,3	86,4	105,0
C-S	75,7	89,5	105,0
A,B,C-O	21,2	62,7	74,0
A,B-C,O	18,4	64,0	74,9
A,C-B,O	18,2	61,4	73,6
B,C-A,O	17,7	57,1	67,6

Таблица 4

Параметры изоляционных промежутков кабеля ААШВ-3×150-6 кВ (индивидуальные характеристики, полученные по результатам совокупных измерений)

Изоляционный промежуток	R15, ГОм	R30, ГОм	R60, ГОм
А-В	450,27	275,11	347,20
В-С	564,86	417,53	507,44
С-А	385,20	322,21	362,02
А-О	53,19	204,99	240,72
В-О	51,21	185,32	218,89
С-О	48,78	180,95	213,38

На рис. 5 приведены абсорбционные кривые – сопротивления изоляционных промежутков образца кабеля в зависимости от времени приложения напряжения.

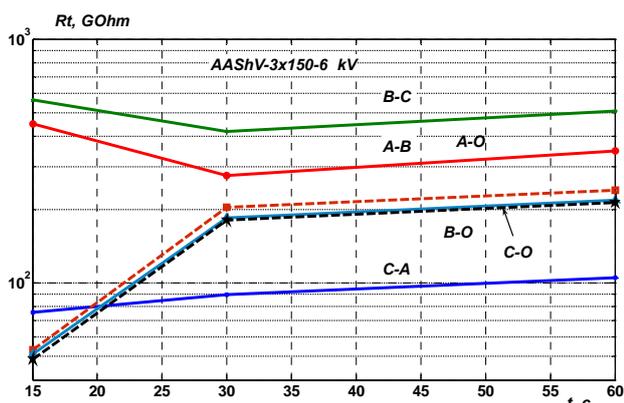


Рис. 5

Фазная и поясная изоляция практически одинакового качества: индекс поляризации  $R_{60}/R_{30}$  почти один и тот же. В данном примере максимальные различия в сопротивлениях изоляции промежутков «фаза-фаза» составляют 46 %. Наименьшее сопротивление изоляции имеет изоляционный промежуток фаз А-В. Для сопротивлений промежутков «фаза-оболочка» максимальные различия и того меньше – всего 13 %:  $240,72 / 213,38 = 1,13$ .

Такие различия вполне удовлетворительные для силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией, которые длительно находятся в эксплуатации.

#### Выводы.

Таким образом, предложенная методика позволяет определить индивидуальные абсорбционные характеристики фазной и поясной изоляции силовых кабелей среднего напряжения в общей металлической оболочке на постоянном напряжении. Индивидуальные характеристики отражают особенности эксплуатации кабелей и позволяют в большей степени оценить степень старения каждого из компонентов бумажно-пропитанной изоляции.

Оказывается, что совокупные сопротивления ряда изоляционных промежутков, включенных параллельно, *меньше*, чем в индивидуальности. Меньшие величины сопротивлений изоляции измерять легче, особенно на коротких образцах кабелей. Вместе с тем совокупный характер измерений приводит к тому, что различия свойств компонентов изоляции *сглаживаются*: результаты совокупных измерений мало отличаются для разных однотипных схем.

В то же время индивидуальные характеристики изоляции имеют *большие* различия, чем совокупные, что свидетельствует о несимметричных режимах работы кабеля. Величины сопротивлений оказываются в 3 раза больше совокупных, из-за чего их непосредственное измерение может представлять определенную проблему.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канискин В.А., Коцур С.А., Привалов И.Н. Кабели 10 кВ с бумажно-пропитанной изоляцией. Неразрушающий метод диагностики // Новости электротехники. – 2005. – №5(35). – С. 25-34.
2. Привалов И.Н. Неразрушающая диагностика силовых кабельных линий номинальным напряжением 6-35 кВ // Электротехнический рынок. – 2008. – №2. – С. 17-25.
3. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Москвитин Е.С. [и др.] Техническое состояние кабелей энергоблоков АЭС: силовые кабели с бумажно-масляной изоляцией // Проблемы обеспечения безопасности информационных и управляющих систем АЭС: сборник научных трудов / под ред. М.А. Ястребенецкого. – Одесса: Астропринт, 2010. – С. 262-271.
4. Беспрозванных А.В., Москвитин Е.С. Критерии оценки степени старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией // Электротехника и электромеханика. – 2013. – №4. – С. 32-36.
5. Беспрозванных А.В., Москвитин Е.С. Современные электрические методы контроля и диагностики силовых кабелей со сшитой полиэтиленовой изоляцией // Электрические сети и системы. – 2013. – №5. – С. 35-40.
6. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г., Москвитин Е.С. Обследование изоляции трехфазных кабелей в металлической оболочке // Электричество. – №1. – 2010. – С. 48-54.
7. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций. – Х.: НТУ «ХПИ», 2011. – 92 с.
8. Беспрозванных А.В. Анализ матрицы коммутации при восстановлении частичных емкостей и тангенса угла диэлектрических потерь многожильных кабелей методом совокупных измерений // Электротехника и электромеханика. – 2007. – №1. – С. 62-66.

#### REFERENCES

1. Kaniskin V.A., Kocur S.A., Privalov I.N. Cables of 10 kV with paper-impregnated insulation. Non-destructive electrical diagnostics. *Novosti elektrotehniki – Electrical engineering news*, 2005, no.5(35), pp.25-34. (Rus).
2. Privalov I.N. Nondestructive diagnosis of power cable lines rated voltage 6-35 kV. *Elektrotekhnicheskii rynek – Electrotechnical market*, 2008, no.2, pp. 17-25. (Rus).
3. Naboka B.G., Bezprozvannykh A.V., Moskvitin E.S. Tekhnicheskoe sostoianie kabelei energoblokov AES: silovye kabeli s bumazhno-maslianoi izoliatsiei [Technical condition of the cables NPP: power cables with paper-oil insulation]. *Problemy obespecheniia bezopasnosti informatsionnykh i upravliaiushchikh sistem AES: sbornik nauchnykh trudov* [Problems of safety and control systems NPP: Collection of scientific papers], 2010, pp. 262-271. (Rus).
4. Bezprozvannykh A.V., Moskvitin E.S. Estimation criteria for degree of paper-impregnated insulated power cable ageing. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.4, pp. 32-36. (Rus).
5. Bezprozvannykh A.V., Moskvitin E.S. Modern methods of power control and diagnostics of power cables with cross-linked polyethylene insulation. *Elektricheskie seti i sistemy – Electrical networks and systems*, 2013, no.5, pp. 35-40. (Rus).

6. Bezprozvannykh A.V., Naboka B.G., Moskvitin E.S. Examination of the three-phase insulation of cables in a metal shell. *Elektrichestvo – Electricity*, 2010, no.1, pp. 48-54. (Rus).
7. Bezprozvannykh A.V., Naboka B.G. *Matematicheskie modeli i metody rascheta elektroizoljacionnyh konstrukcij* [Mathematical models and methods of calculation electrical insulation constructions]. Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2011. 92 p. (Rus).
8. Bezprozvannykh A.V. Analysis of a switching matrix under recovery of partial capacitance and dielectric loss tangent of multicore cables via cumulative measurements. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2007, no.1, pp. 62-66. (Rus).

Поступила (received) 10.07.2015

Беспрозванных Анна Викторовна<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
 Москвитин Евгений Сергеевич<sup>1</sup>, к.т.н.,  
 Кессаев Александр Геннадиевич<sup>1</sup>, аспирант,  
<sup>1</sup>Национальный технический университет  
 «Харьковский политехнический институт»,  
 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,  
 тел/phone +38 057 7076010,  
 e-mail: bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua

G.V. Bezprozvannykh<sup>1</sup>, E.S. Moskvitin<sup>1</sup>, A.G. Kyessaeyv<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»  
 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

**The absorption characteristics of the phase and zone paper-impregnated insulation of power cable at direct voltage.**

**Introduction.** The moral and physical deterioration of medium voltage power cables with phase and zone paper-impregnated insulation requires implementation of quality systems and reliable nondestructive electric diagnostic. Informative indicator of the insulation is the time decay curve of the charging current. It reflects the processes of accumulation of space charges (absorption). The measurements are carried out the 15th since the second direct voltage supply, then – on the 30th and the second on the 60th second. The ratio of the parameters measured in these

times gives the dimensionless criteria – absorption coefficients. Three measurements are made at different times, provide a more complete picture of the state of insulation than the measurement of the value of steady leakage (conduction-through), adopted in conventional prevention trials. **Purpose.** Research and testing methods of diagnostics of power cables with paper-impregnated insulation by absorption and phase characteristics of the belt insulation based on the total measurements. **Methodology.** A procedure for determining the individual characteristics of phase and zone paper-impregnated insulation based realized on the use of the equivalent circuit of a three-core cable in the metal shell and solved of an over determined system of linear algebraic equations by least squares. **Results.** The proposed method allows determining the absorption characteristics of the individual phase and zone insulation medium voltage power cables in the overall metal shell at a direct voltage. Individual characteristics reflect the characteristics of cables and allow a greater degree to assess the degree of aging of each of the components of paper-impregnated insulation. **Originality.** Regardless of the cable connection diagrams probing electric field grabs as the phase, and zone insulation. The cumulative nature of the measurement leads to the fact that the differences in the properties of insulation components are smoothed: the aggregate results of the measurements do not differ for the different schemes of the same type. The individual characteristics of isolation, defined on the basis of the proposed method are more differences than total, indicating that non-symmetrical modes of operation of the cable. **Practical value.** The values of individual characteristics power cables 6 kV are 3 times more total, because of what their direct measurement may be a problem. The total resistance of several insulation spaces connected in parallel, behind the individual. Smaller values of insulation resistance are measured more easily, especially on short samples cables. References 8, tables 4, figures 5.

**Key words:** phase and zone paper-impregnated insulation, absorption characteristics, polarization index, insulation resistance, equivalent circuit, the system of linear algebraic equations, stability of the solution.

## MILITARY AND POLITICAL ASPECTS OF ONE OF THE PROBLEMS OF THE MODERN POWER INDUSTRY

*The problem of Intentional Destructive Electromagnetic Impacts (IDEI) on power systems has become recently more and more actual in connection with two modern trends: the extension of using microelectronics and microprocessor-based devices and systems in electric power industry – on the one hand, and the intensive design of special equipment for distance destruction of electronic devices and systems – with another. The most powerful method for such destruction is the High-altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) as a result of a high-altitude nuclear explosion. The history of experimental high-altitude nuclear explosions has been known now for over half a century. During this time quite a few scientific articles and books presenting details of this phenomenon and measures of protection from it have been published. In view of this fact, it would be possible to assume that the problem of protection against HEMP has been solved for a long time and modern power systems are well protected from this phenomenon. However the research performed by the author displays that actually it has not and for the past decades in one country of the world, at least, no practical measures have been taken for the protection of the national infrastructures against HEMP and all action has been restricted only to writing reports, recommendations and guidelines. In the paper the reasons for such situation (in particular, political and military aspects of the problem) are analyzed. References 50, figures 5.*

*Key words:* High-altitude Electromagnetic Pulse, Intentional Destructive Electromagnetic Impacts, power system, national infrastructure.

*Проблема преднамеренных дистанционных деструктивных воздействий (ПДДВ) на энергетические системы становится в последнее время все более и более актуальной в связи с двумя современными тенденциями: расширением использования микроэлектроники и устройств на основе микропроцессоров в электроэнергетике – с одной стороны, и успехами, достигнутыми в разработке специальных видов оружия, предназначенных для дистанционного поражения электронных устройств – с другой. Самый мощный метод дистанционного поражения электроники – электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ). История экспериментальных высотных ядерных взрывов насчитывает половину столетия. За это время было опубликовано множество научных статей, книг, отчетов, подробно описывающих все детали этого процесса и меры защиты от него. В связи с этим, можно было бы предположить, что проблема защиты от ЭМИ ЯВ была за эти десятилетия успешно решена и современные электроэнергетические системы хорошо защищены от этого явления. Однако, исследование, выполненное автором, показывает, что ни в одной стране мира до сих пор не были предприняты никакие практические меры защиты национальных инфраструктур от ЭМИ ЯВ и все действия были ограничены только докладами, отчетами, рекомендациями. В данной статье проанализированы причины такой ситуации (в частности, политические и военные аспекты проблемы). Библ. 50, рис. 5.*

*Ключевые слова:* электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва, преднамеренные деструктивные электромагнитные воздействия, энергосистема, национальная инфраструктура.

*«...our vulnerability is increasing daily as our use of and dependence on electronics continues to grow in both our civil and military sectors»*

Dr. William R. Graham,  
EMP Commission's Chairman

**Introduction.** The possibility using special weapons that can destroy an electric power system and other important elements of national infrastructure without a direct impact on a person is very alluring as it can result in a collapse of the whole country. Moreover, people responsible for decision-making about weapon employment cannot be charged for the indiscriminate killing of civilians, since this type of weapon does not impact on people directly. This type of weapon is represented by systems, which generate extra-powerful electromagnetic fields knocking electronic and electrically powered equipment out of service.

The problem of Intentional Destructive Electromagnetic Impacts (IDEI) impact on electric power systems has only recently become extremely relevant due to two modern trends: expanded use of micro-electronics and micro-processor equipment in the electric power industry on the one hand, and the intensive development of means for remote destruction of electronic instruments on the other hand [1]. Furthermore, the problem is relevant not

only to such solely civilian fields as the electric power industry, but also to military personnel as military facilities and ranges receive electric energy and water from the civilian systems, serious malfunctioning of which would inevitably affect the defense condition of an army with all its armament systems protected from IDEI.

**Brief Historical Background.** The devastating impact of a remote nuclear explosion on electronic equipment was discovered during the initial trials of this new (for that time) type of weapon. Later on, theoretic substantiation of a High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) of a nuclear explosion was found in the academic works of Nobel Prizewinner for physics Arthur Compton, dating back to 1922. Military men have quickly appreciated the advantage of using this phenomenon as a weapon that can destroy the infrastructure and electric power systems of a rival at one go. The first attempts to study HEMP were conducted by the Atomic Energy Commission and the Nuclear Safety Agency of the US Department of Defense on July 9, 1962 (the project encoded «Starfish Prime»). A thermo-nuclear warhead missile with a capacity of 1.44 Mega-tons was launched from a US military range located on Johnston Atoll between Marshall and Hawaii Islands in Pacific Ocean. It reached

the height of 450 km and was deliberately exploded. This trial was one out of five high altitude nuclear explosions aimed at studying HEMP in the USA in 1962 within the framework of a more extensive project encoded «Operation Fishbowl». During these trials powerful electro-magnetic pulses were registered, which could vastly affect electronic equipment, communication and overhead transmission lines, radio transmission station and radars. They even knocked out street lighting in Hawaii, which is located about 1,500 km from the center of explosion [2].

In 1962 (on October 22, October 28 and November 1) the Soviet Union also conducted a series of high altitude nuclear explosions (each with a capacity of 300 kt) under the project called «Project-K» – K3-184; K4-187 and K5-195 – the aim of which was to study the HEMP phenomenon. The warhead missiles were launched from the Kapustin Yar missile launchpad in the Astrakhan region and were deliberately exploded at the heights of 60 – 290 km above the territory of the military range in the Sary-Shagan, Karaganda region, Kazakhstan (a restricted access territorial subdivision Priozyorsk). In the USSR, the research of HEMP and preparation of those nuclear test explosions were conducted by Central Institute of Physics and Technology of Federal Ministry of Defense - CIPT (military unit 51105 or Central R&D Institute-12) in Sergiyev Posad, Moscow (now – Federal State Institution «12 Central R&D Institute of MoD of Russian Federation»). During one of these trials (K3-184) impulse current of up to 3400 A was registered in aerial telephone line cables, which resulted in an emerging of pulse voltage with an amplitude of up to 28 kV; actuation of all the arresters installed in the equipment and blowing of all the fuses accompanied by shutdown of communication system; damage of radio communication systems located 600 km away from the center of explosion; outage of a radio stations located 1000 km away; damage of transformers and power generators at power plants; insulator punctures of overhead transmission lines (fig. 1). Serious damage of equipment was also reported at Baikonur Cosmodrome. It should be noted that this refers to equipment manufactured in 1960s, i.e., the one using electromechanical elements and vacuum tubes, which is much more resistant to IDEI than modern digital and micro-processor based equipment.

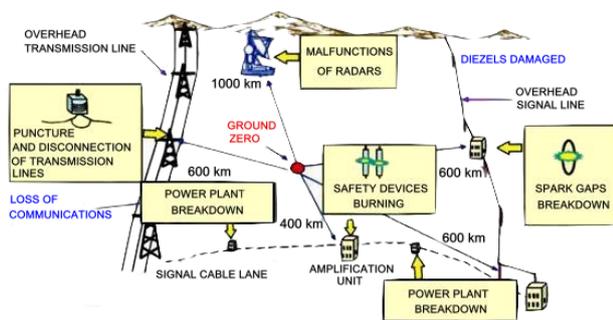


Fig. 1. Illustration of equipment damages caused by high-altitude HEMP impact above Kazakhstan in 1962. For the first time the picture was presented in English during the EUROEM conference by the Head of Central R&D Institute-12, Major General, Prof. Dr. Mr. V.M. Loborev in France in 1994 [3]

Moreover, both American and Soviet researchers used thermo-nuclear explosives the electromagnetic pulse of which appeared to be 3-5 fold weaker than that emerg-

ing upon detonation of a ordinary nuclear explosive of the same capacity.

**The first valid information about HEMP and methods of protection in electric power industry.** It is obvious that due to complexity, importance and high costs of test nuclear explosions the information about them was strictly confidential, so the first users of this information were military specialists. It is speculated that the first disclosure of such information dates back to the «Perestroyka» era, when it was presented by the Head of Central Physical and Technical Institution of the Ministry of Defense Major General Mr. V.M. Loborev during his reknowned speech at the EUROEM Conference in France in 1994. However, this is not true. It appears that the first publications of detailed and authentic evidence of HEMP parameters and its impact on the country's infrastructure, in particular the power supply systems, date back to late 60s – early 70s of the last century. In other words this information has already been in public domain for 40-50 years [4-23]. Moreover, some of these publications, (for instance [16, 18]) also contain description of protection measures against HEMP impact. The majority of these sources were published in the USA, so a conclusion can be made that the USA achieved unbeatable results in the field of protection of the most important components of their national infrastructure from HEMP over the last half of the century. Furthermore, the army should also be interested in this.

**The actual state of the art in the field of protection of power systems from HEMP and other types of IDEI.**

*«You can fool all the people some of the time;  
and some of the people all the time;  
but you cannot fool all the people all the time».*

Abraham Lincoln

So, what is really happening in the USA and in the world in terms of protection of electric power industry and other extremely important systems constituting the country's infrastructure from IDEI impact? Perhaps, many things are happening based on the quantity of both governmental and private entities dealing with this problem, which are financed from the country's budget at least in the USA. Here is the list of some of them:

- Metatech Corp.;
- Department of Homeland Security (DHS);
- EMP Commission of Congress;
- North American Electric Reliability Corp. (NERC);
- Department of Energy;
- Department of Defense (DoD);
- Critical Infrastructure Partnership Advisory Council (CIPAC);
- Electric Infrastructure Security Council (EICS);
- Defense Science Board (DSB);
- US Strategic Command (USSTRATCOM);
- Defense Threat Reduction Agency (DTRA);
- Defense Logistics Agency (DLA);
- Air Force Weapons Laboratory;
- FBI;
- Sandia National Laboratories;
- Lawrence Livermore National Laboratory (LINL);

- Oak Ridge National Laboratory;
  - Idaho National Laboratories;
  - Los Alamos National Laboratories;
  - Martin Marietta Energy Systems, Inc.;
  - National Security Telecommunications Advisory Committee;
  - Federal Emergency Management Agency (FEMA);
  - National Academy of Science;
  - Task Force on National and Homeland Security;
  - EMPrimus;
  - Neighborhood of Alternative Homes (NOAH);
  - EMPact America;
  - Federal Energy Regulatory Commission (FERC);
  - Electric Power Research Institute (EPRI);
  - NASA;
  - U.S. Northern Command (NORTHCOM);
  - SHIELD Act;
  - EMP Grid;
  - EMP Technology Holding;
  - Strategic National Risk Assessment (SNRA);
  - Walpole Fire Department.
- International organizations with USA participation:
- International Electrotechnical Commission (IEC), Technical Subcommittee 77C
  - CIGRE, Working Group WG C4.206

Doesn't it seem suspicious that so many organizations from only one country are taking an active part in the subject supported by a huge number of published articles during the last decades and having no «white spots», which need to be further investigated? It appeared that the IDEI topic and particularly HEMP is nothing else than a wonderful «long-playing» tool of «bugging» the State budget. And it looks like nobody wants the «bugging» process to be finished by some certain actions aimed at the protection of electric power systems. To support this let me cite one of the former authorities of the US Ministry of Defense Dr. Ashton Carter: «*The Army, Navy and Strategic Command continue to think about thinking about the problem*». Dr. Peter Vincent Pry, director of the Task Force on National and Homeland Security said more specifically on this topic: «*The problem is not the technology. We know how to protect against it. It's not the money, it doesn't cost that much. The problem is the politics. It always seems to be the politics that gets in the way*». In his book called «Apocalypse Unknown» (fig. 2), Dr. Pry complains at the fact that the situation is much better in some other countries (Israel, UK and Russia) compared to the USA, because they've already started the realization of some practical steps towards protection of electric systems.

Let us calm Dr. Pry down. He doesn't need to be worried about the lagging of the USA. In actuality the situation in this area in, say, Russia is much worse than that in the USA, since the electric engineers there either didn't hear about the problem at all, or treat it as «Gurevich's horror stories» (as the only author writing on this topic in the Russian language literature is the author of this article). The situation is not better in other countries. So, it becomes clear why nothing specific has been done anywhere in the world regarding protection of electric

power industry from IDEI and why all the efforts are limited by multi-page reports about investigations, presentations, workshops, conferences and other types of pleasant leisure in a circle of colleagues. The fact is that those multiple «participants of the process» are not interested in finishing the long-term investigation process, but prefer to keep the topic «afloat» in order to receive governmental financial proceeds.

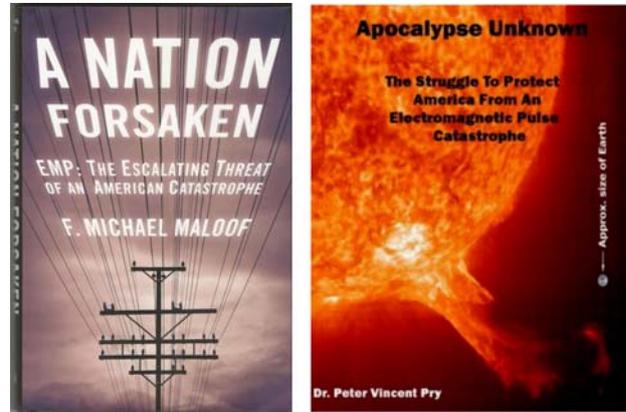


Fig. 2. The book by F. Michael Maloof «A Nation Forsaken», devoted to description of bureaucratic and political games regarding the IDEI problem in the USA (left) and the book by Peter Vincent Pry «Apocalypse Unknown» (right)

This problem is discussed in the book of former Pentagon analyst Michael Maloof. «A Nation Forsaken» (fig. 2). The above mentioned Peter Vincent Pry also writes about serious bureaucratic hurdles related to this topic in his book called «Apocalypse Unknown».

Representatives of the powerful Military-Industrial Complex (as president Eisenhower referred to it) also contribute to delaying the realization of well-known specific measures aimed at protection of electric power systems from IDEI. They insist that the only efficient protection from electro-magnetic pulses of a nuclear explosion is represented by the national Missile Defense System (MDS) where much more budgetary funds need to be invested. This attitude of these representatives becomes clear when comparing a relatively low cost of HEMP protection means for the most important elements and systems of the national infrastructure with the costs for development and production of an efficient multi-level missile shield, which protects the whole country. As for other non-nuclear means of IDEI [1], since the MDS does not protect from them, it is easier to pretend that they do not exist and the information about them in the mass media is nothing more than a bluff aimed at scaring housewives. However, everything is not that easy. There are missile systems from which the MDS does not protect, i.e., they are not capable of protecting the national infrastructure from the impact of electro-magnetic pulses of a nuclear explosion. What kind of systems are they?

**Short- and intermediate-range missiles are potential sources of HEMP, against which the MDS are back-strapped.** Today the tendency is to reduce the capacity of missile nuclear warheads due to improvements of their accuracy. For example, when a relatively accurate «Scarab B» with a circular error probable (CEP) of 250 m was equipped with a nuclear warhead with a capacity of

up to 200 kt (charge type AA-92) a more accurate and new «Stone» missile (fig. 4), with a CEP of 30 m can be equipped with a nuclear warhead with a capacity of only 50 kt (fig. 3). However, 50 kt is not enough to generate powerful and efficient HEMP.

A well-publicized missile «Stone» which is claimed to be unique appears to be not that unique in reality. Israeli missiles LORA (LONg Range Attack) possess very similar tactical and technical specifications, features of trajectory and control system. Moreover, compared to «Stone» their CEP is smaller (CEP = 10 m), the mass of their missile is two times less, their warhead mass is larger, they can carry a more powerful nuclear charge and they have a universal launching unit, which can be assembled on different vehicles, including ships. The launching unit of LORA system manufactured as a container with four missiles, which resembles the Russian containers Club-K with the same number of missiles 3M-14KE, X-35UE (fig. 4).



Fig. 3. Missile launchers of a battle-field support rocket SS-21 «Scarab B» (Tochka-U) – above and tactical ballistic missile system SS-26 «Stone» (Iskander-E) – below

The Club-K – Russian container-based missile unit, which can fit a standard 20- or 40-foot sea container, is intended for targeting above-water and ground targets. The unit can be installed on the coast lines, different classes of vessels, railway and truck platforms. The complex can be used with ground launching units as well as sea, railway and truck platforms. It can use the following anti-ship missiles: 3M-54KE, 3M-54KE1, X-35UE and missiles for hitting ground targets, such as 3M-14KE, X-35UE. All the missiles included in the complex are cruise missiles, flying at a relatively low altitude of 10-150 m and are not intended to be equipped with nuclear warheads, while LORA is equipped with tactical ballistic missile, which can fly as high as 45 km and can carry high capacity nuclear charges at a distance of up to 300 km.

Why do I pay so much attention to these missile systems? Because this type of relatively small missiles fitted

into standard sea containers on ships near the coast line or even in ports (fig. 5) and capable of carrying nuclear charges over hundreds of kilometers while ascending to altitudes of several tens kilometers are the sources of HEMP invulnerable to any MDS both existing and potentially developed due to their capability of concealed approach to a target, ultra-low approach time and changing trajectory during flight.



Fig. 4. Container-based launching units of missile complexes Club-K (above) and LORA (below)

The possibility of concealed approach of tactical warhead missiles of a small action radius to a target in order to avoid its interception by MDS on the one hand and to take it out of regulation of international treaties on the other hand, has long been known to specialists and the attempts to develop these systems started immediately upon creation of relatively small nuclear warhead missiles. For example, in 1961 the US airborne units received «Little John» (MGR-3) missiles, which were equipped with free-flight rockets capable of carrying nuclear warheads. Light-weight launch units of this system could be delivered by CH-47 «Chinook» helicopters both in the pit and on external lift.

The Soviet Union quickly appreciated the advantages of these systems and based on the Decree of the Council of Ministers of USSR No. 135-66 dated February 5, 1962, the development of tactical missile complex «FROG-7» (9K53) with 9M21B rockets (nuclear warhead) and 9M21B1 (thermonuclear warhead) and the launch unit 9P114 represented by a light-weight self-propelled platform with a carburettor engine M-407 with a capacity of 45 h.p. from «Mosckvich-407» car. Later on several modifications of such systems were introduced, which allowed for transporting by MI-6 and MI-10 cargo copters. The helicopter was expected to deliver the rocket with its launch unit behind enemy lines. The rest of the way where necessary could be covered on wheels and

then it could suddenly strike a rocket from a position which the enemy did not consider, which translates it from a tactical complex into strategic one.



Fig. 5. Containers resting on ships and in ports where tactical ballistic nuclear warhead missiles can fit are invulnerable to MDS

The efforts of «FROG-7» development reached the stage of experimental samples testing. However, this resulted in many obstacles including high «windage» of a helicopter carrying a launch unit and consequently high drifting rate as well as inappropriate flying range of fully loaded helicopters. As a result the efforts on development of this complex were discontinued in 1965.

Modern technological level has made it possible to return to this idea and realize it successfully. Today, there are over a hundred million standard containers circulating all over the world (fig. 5). Who knows which of them are just containers and which of them carry rockets... While Israeli LORA is actually the only fully-featured container system, which can secretly approach to the coast line of a country on a container ship and hit its territory with an electro-magnetic pulse, the fact of existence of this system allows us to conclude that the statements of MIS representatives about efficient protection of advanced MDS against HEMP and that they should continue to receive additional investments are not true and in fact are a way of deceiving public opinion. In practice an army will not be able to ensure efficient protection of energy supply systems of cities and settlements from IDEI and thus, electric engineers should take the leading role and take care of such protection.

**What needs to be done in order to protect a country from an «electro-magnetic Armageddon»?** Since all the necessary research efforts have already been conducted and their results and practical recommendations are published in open sources [24-34] as well as covered in multiple standards of International Electrotechnical Commission (IEC) [34-41], Institute of Electrical and

Electronics Engineers (IEEE) [42], military standards of US MoD [44-49], it is necessary to stop financing a large number of organizations speculating on this problem and using it as a source of their welfare and stream the free funds into performance of certain actions aimed at protection of electric energy systems from IDEI [50]. Those countries that do not have such branched network of organizations dealing with the problem like that of the USA should not follow the USA rather they should start creating similar entities, not doing so leads to a dead-end. The only organization that must be kept to manage the process should, in my opinion, be the National Coordination Center on IDEI problem the purpose of which would be to analyze the published literature, develop a plan of certain actions within specific time frames, assign responsible people to observe performance of these time frames, issue specific technical requirements for the organizations with regard to protection of electric power supply systems from IDEI and then organize and coordinate their efforts. The results of these efforts should not be reports and conferences (which must be simply prohibited!), but real substations and power plants protected from IDEI.

#### REFERENCES

1. Gurevich V. *Cyber and Electromagnetic Threats in Modern Relay Protection*. CRC Press, Boca Raton, London, New York, 2015. 205 p.
2. Operation Dominic, Fish Bowl Series, Debris Expansion Experiment. Air Force Weapons Laboratory. Project Officer's Report, Project 6.7, Report AD-A995 428, POR-2026 (WT-2026), 10 December 1965.
3. Loborev V.M. Up to date state of the NEMP problems and topical research directions. *Euro Electromagnetic Conf. (EUROEM)*, Bordeaux, France, June 1994, pp. 15-21.
4. Kompaneets A.S. Radio emission from an atomic explosion. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1958, vol. 35. (Rus).
5. Karzas W.J., Latter R. Electromagnetic radiation from a nuclear explosion in space. *Physical Review*, 1962, vol.126, no.6, pp. 1919-1926. doi: 10.1103/physrev.126.1919.
6. Karzas W.J., Latter R. EMP from high-altitude nuclear explosions. Report No. RM-4194, Rand Corporation, March 1965.
7. Karzas W.J., Latter R. Detection of electromagnetic radiation from nuclear explosions in space. *Physical Review*, 1965, vol.137, no.5B, pp. B1369-B1378. doi: 10.1103/physrev.137.b1369.
8. Inston H.H., Diddons R.A. Electromagnetic pulse research. *ITT Research Institute Project T1029*, Chicago, Illinois 60616, Final Report, September 1965.
9. *DASA EMP (electronic pulse)*. Handbook, by United States Defense Atomic Support Agency. Information and Analysis Center, National government publication, Santa Barbara, Calif., 1968.
10. *Electromagnetic Pulse Problems in Civilian Power and Communications*. Summary of a seminar held at Oak Ridge National Laboratory, August 1969, sponsored by the U.S. Atomic Energy Commission and the Department of Defense, Office of Civil Defense.
11. *EMP Threat and Protective Measures*. Office of Civil Defense, TR-61, August 1970.
12. Parks G.S., Dayaharsh T.I., Whitson A.L. *A Survey of EMP Effects During Operation Fishbowl*. Defense Atomic Support Agency (DASA), Report DASA-2415, 1970.
13. Nelson D.B. *A Program to Counter the Effects of Nuclear Electromagnetic Pulse in Commercial Power Systems*. Oak Ridge National Laboratory, Report ORNL-TM-3552, Part 1.8, October 1972.

14. Marable J.H., Baird J.K., Nelson D.B. *Effects of Electromagnetic Pulse of a Power System*. Oak Ridge National Laboratory, Report ORNL-4836, December 1972. doi: 10.2172/4477360.
15. Sandia Laboratories «*Electromagnetic Pulse Handbook for Missiles and Aircraft in Flight*», SC-M-71 0346, AFWL TR 73-68, EMP Interaction Note 1-1, September 1972.
16. Ricketts L.W. *Fundamentals of Nuclear Hardening of Electronic Equipment*. Wiley & Sons Inc., 1972.
17. James K. Baird, Nicholas J. Frigo. *Effects of Electromagnetic Pulse (EMP) on the Supervisory Control Equipment of a Power System*. Oak Ridge National Laboratory, Report ORNL-4899, October 1973. doi: 10.2172/4281389.
18. Ricketts L.W., Bridges J.E., Mileta J. *EMP Radiation and Protective Techniques*. John Wiley and Sons, New York, 1976.
19. *United States High-Altitude Test Experiences: A Review Emphasizing the Impact on the Environment*. Report LA-6405, Los Alamos Scientific Laboratory. October, 1976.
20. Glasstone S., Dolan P.J. *The Effects of Nuclear Weapons*. U.S. Department of Defense, Washington, DC, 1977.
21. Longmire C.L. On the Electromagnetic Pulse Produced by Nuclear Explosions. *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, February 1978, vol. EMC-20, no.1, pp. 3-13. doi: 10.1109/temc.1978.303688.
22. Sollfrey W. *Analytic Theory of the Effects of Atmospheric Scattering on the Current and Ionization Produced by the Compton Electrons from High Altitude Nuclear Explosions*. Rand Corp., R-1973-AF, 1977.
23. Butler C. *EMP Penetration Handbook for Apertures, Cable Shields, Connectors, Skin Panels*. AFWL-TR-77-149, Air Force Weapons Laboratory (The Dikewood Corporation), December, 1977.
24. *HEMP Emergency Planning and Operating Procedures for Electric Power Systems*. Oak Ridge National Laboratory, Report ORNL/Sub/91-SG105/1, 1991.
25. *Impacts of a Nominal Nuclear Electromagnetic Pulse on Electric Power Systems*. Oak Ridge National Laboratory, Report ORNL/Sub/83-43374, 1991.
26. *HEMP-Induced Transients in Electric Power Substations*. Oak Ridge National Laboratory, Report ORNL/Sub-88-SC863, February 1992.
27. *Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse (EMP) Attack*. Critical National Infrastructures, April 2008.
28. *High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and High Power Microwave (HPM) Devices: Threat Assessments*. CRS Report for Congress, July 2008.
29. *The Early-Time (E1) High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and Its Impact on the U.S. Power Grid*. Report Meta-R-320, Metatech Corp., January 2010.
30. *The Late-Time (E3) High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and Its Impact on the U.S. Power Grid*. Report Meta-R-321, Metatech Corp., January 2010.
31. *Intentional Electromagnetic Interference (IEMI) and Its Impact on the U.S. Power Grid*. Report Meta-R-323, Metatech Corp., January 2010.
32. *High-Frequency Protection Concepts for the Electric Power Grid*. Report Meta-R-324, Metatech Corp., January 2010.
33. *Protection of High Voltage Power Network Control Electronics Against Intentional Electromagnetic Interference (IEMI)*. Report CIGRE Working Group C4.206, November 2014.
34. IEC TR 61000-1-3 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 1-3: General – The effects of high-altitude EMP (HEMP) on civil equipment and systems.
35. IEC 61000-2-9 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 9: Description of HEMP environment – Radiated disturbance. Basic EMC publication.
36. IEC 61000-2-10 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-10: Environment – Description of HEMP environment – Conducted disturbance.
37. IEC 61000-2-11 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-11: Environment – Classification of HEMP environments.
38. IEC 61000-2-13 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-13: Environment – High-power electromagnetic (HPEM) environments – Radiated and conducted.
39. IEC/TR 61000-5-3 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-3: Installation and mitigation guidelines – HEMP protection concepts.
40. IEC/TS 61000-5-4 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 4: Immunity to HEMP – Specifications for protective devices against HEMP radiated disturbance. Basic EMC Publication.
41. IEC 61000-5-5 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 5: Specification of protective devices for HEMP conducted disturbance. Basic EMC Publication.
42. IEEE P1642 Recommended Practice for Protecting Public Accessible Computer Systems from Intentional EMI.
43. Topic SEC-2011.2.2-2 Protection of Critical Infrastructure (structures, platforms and networks) against Electromagnetic (High Power Microwave (HPM)) Attacks, European Commission Security Research Program, 2010.
44. MIL-STD-188-125-1. High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Protection for Ground-Based C4I Facilities Performing Critical Time-Urgent Missions, Department of Defense, 1994.
45. MIL-STD-461E. Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, Department of Defense, 1993.
46. MIL-STD-464C. Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems, Department of Defense, 1997.
47. MIL-STD-2169B. High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Environment, Department of Defense, 1993.
48. MIL-Hdbk-423. Military Handbook: High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Protection for Fixed and Transportable Ground-Based C4I Facilities, vol. 1: Fixed Facilities Department of Defense, 1993.
49. High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Testing, Test Operations Procedure 01-2-620, U. S. Army Test and Evaluation Command, 2011.
50. Gurevich V. Protecting Power Systems from Destructive Electromagnetic Fields. *Energize*, 2015, April, pp. 36-37.

Received 03.07.2015

Vladimir I. Gurevich, Ph.D, Senior specialist,  
Central Electric Laboratory of Israel Electric Corp.  
31000, Israel, Haifa, POB 10,  
e-mail: vladimir.gurevich@gmx.net

## БОЛЮХ ВОЛОДИМИР ФЕДОРОВИЧ

(до 60-річчя з дня народження)

Володимир Федорович Болюх народився 1 вересня 1955 р. у м. Полтава. У 1979 р. закінчив Харківський політехнічний інститут. Навчався на фізико-технічному факультеті за спеціальністю «Кріогенна техніка». Інженер-фізик.

З 1979 по 1982 р. працював інженером-фізиком в Харківському фізико-технічному інституті АН УРСР, де займався розробкою надпровідникового лінійного прискорювача електронів та надпровідникових резонаторів НВЧ-діапазону.

З 1982 р. працює в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» на кафедрі загальної електротехніки. Займав посади старшого інженера, аспіранта, молодшого наукового співробітника, асистента, доцента, докторанта, провідного наукового співробітника, професора.

В 1987 р. захистив кандидатську дисертацію, пов'язану з розробкою надпровідникових магнітів спеціальної форми та кріогенних модулів для електродинамічного підвісу і лінійного електроприводу з обмеженими малогабаритними параметрами.

В 2004 р. захистив докторську дисертацію за спеціальністю «Електричні машини і апарати» на тему «Науково-технічні основи створення електромеханічних імпульсних перетворювачів індукційного типу з кріорезистивними обмотками», у 2005 р. йому присвоєно звання професора.

Наукові дослідження Болюха В.Ф. пов'язані з використанням кріогенного охолодження в електромагнітних і електромеханічних системах різного призначення, в тому числі з використанням надпровідникових і кріорезистивних обмоток в таких системах і пристроях.

Вперше запропонував і обґрунтував необхідність використання кріорезистивних обмоток з високими електромагнітними навантаженнями для електромагнітних і механічних пристроїв короткочасної дії. Розробив математичні моделі кріогенних нелінійних систем із взаємопов'язаними електричними, тепловими, магнітними, механічними процесами.

Розробив новий напрямок в електромашинобудуванні, пов'язаний зі створенням кріогенних електромеханічних індукційних перетворювачів імпульсної дії високої ефективності, які забезпечують значну швидкість якоря з виконавчим елементом на короткій ділянці за малий час. Рідкий азот в таких перетворювачах використовується як охолоджувальна та ізоляційна речовина.

Розробив клас високоефективних імпульсних електромеханічних та магнітних пристроїв, що забезпечують збереження інформації на цифрових накопичувачах при несанкціонованому доступі.

Вперше запропонував метод надшвидкого охолодження біологічних об'єктів з використанням кріогенного охолодження, при якому вони переходять у вітрифікований стан.

Болюх В.Ф. учасник багатьох міжнародних конференцій, в тому числі в Чехії, Німеччині, США, Франції, РФ. Основні напрямки його досліджень:

- надпровідниковий лінійний прискорювач електронів і надпровідникові резонатори НВЧ-діапазону;
- високошвидкісний наземний транспорт з електродинамічним підвісом і лінійним електроприводом;
- високоефективні надпровідникові електромагніти спеціальної форми і кріогенні модулі для електродинамічного підвісу і лінійного електроприводу з обмеженими малогабаритними параметрами;
- експериментальні і теоретичні дослідження повністю надпровідникового турбогенератора із зовнішнім електромагнітним екраном;



кового турбогенератора із зовнішнім електромагнітним екраном;

- електромагнітні і електромеханічні пристрої імпульсної дії з кріорезистивними обмотками збудження;
- електромеханічні імпульсні перетворювачі індукційного типу з кріорезистивними обмотками, що охолоджуються рідким азотом;
- лінійні імпульсні електродвигуни, приводи та пристрої ударної дії;
- пристрої швидкого охолодження біологічних об'єктів з використанням кріогенного охолодження.

Професор Болюх В.Ф. є членом двох спеціалізованих вчених рад при НТУ «ХПІ» по захисту кандидатських та докторських дисертацій. Експерт Українського державного центру прогнозування науково-технологічного та інноваційного розвитку з тематичного напрямку: «Космічні технології в народному господарстві та технології подвійного призначення».

Болюх В.Ф. є автором 353 наукових праць, серед яких 4 монографії, 3 навчальних посібника, 30 статей в базі SCOPUS. Монографії видані в Україні, Словенії та Німеччині. Він також є автором 106 винаходів, що включають авторські свідоцтва СРСР, патенти України, РФ та США.

В 2014 р. підготував 1 доктора технічних наук за спеціальністю «Техніка сильних електричних та магнітних полів».

Болюх В.Ф. захоплюється подорожами в горах та на байдарках. Він з рюкзаком побував в Альпах (Франція), в горах Каліфорнії (США), в Андах (Перу), на Кавказі, Алтаї та Хібінах (РФ), в Криму та Карпатах (Україна), в горах Вірменії та Киргизстану.

Має брата Миколу, який є відомим митцем, членом спілки художників України, учасником багатьох художніх виставок як в Україні, так і за кордоном.

Друзі, колеги, учні Володимира Федоровича щиро вітають його з ювілеєм, бажають йому доброго здоров'я та подальших успіхів у науковій роботі.

Редакційна колегія журналу «Електротехніка і Електромеханіка» приєднується до цих побажань.

**Матеріали приймаються за адресою:**

**Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПІ", вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна**

**Електронні варіанти матеріалів по e-mail: a.m.grechko@mail.ru**

**Довідки за телефонами: +38 050 863 49 82 Клименко Борис Володимирович**

**+38 087 359 48 98 Гречко Олександр Михайлович**

**Передплатний індекс: 01216**