

ISSN 2074-272X

**науково-практичний
журнал**

2015/2



ЕІЕ **Електротехніка і Електромеханіка**

Електротехніка. Визначні події. Славетні імена

Електричні машини та апарати

Електротехнічні комплекси та системи.

Силова електроніка

Теоретична електротехніка та електрофізика

Техніка сильних електричних та магнітних полів.

Кабельна техніка

Електричні станції, мережі і системи

**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")

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



ELEKTROTEKHNIKA I ELEKTROMECHANIKA – ELEKTROTEHNİKA İ ELEKTROMECHANİKA – ELECTRICAL ENGINEERING & ELECTROMECHANICS

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

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

НАЦІОНАЛЬНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ*

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

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

NATIONAL EDITORIAL BOARD*

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

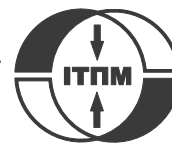
© Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", 2015
© ДУ "Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України", 2015

Підписано до друку 14.04.2015 р. Формат 60 x 90 1/8. Папір – офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,75.

Наклад 200 прим. Зам. № 66/172-02-2015. Ціна договірною.

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

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



ЗМІСТ

Електротехніка. Визначні події. Славені імена

Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 25:

Открытия в биологии и генетике живых организмов 3

Електричні машини та апарати

Маляр В.С., Мадай В.С., Добушовська І.А. Динаміка процесів в асинхронному двигуні з послідовно увімкненими конденсаторами 14

Слободенюк Д.В., Бялобржеський О.В. Ємнісний накопичувальний пристрій у контурі збудження синхронної машини для форсування та гасіння поля 16

Електротехнічні комплекси та системи. Силова електроніка

Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В., Котляров Д.А. Экспериментальные исследования системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты с различными алгоритмами управления с помощью одной обмотки 21

Петрушин В.С., Якимец А.М., Еноктаев Р.Н. Моделирование регулируемых асинхронных электроприводов с согласующими редукторами и трансформаторами 26

Теоретична електротехніка та електрофізика

Гринченко В.С., Чунихин К.В. Экранирование однородного переменного магнитного поля электропроводящим кольцом 31

Розов В.Ю., Завальный А.В., Золотов С.М., Грецих С.В. Методы нормализации статического геомагнитного поля в жилых домах 35

Техніка сильних електричних та магнітних полів. Кабельна техніка

Байда Е.И. Уточненная математическая модель мультифизических процессов магнитно-импульсной обработки материалов 41

Баранов М.И., Рудаков С.В., Цехмистро В.Л. Трехэлектродный воздушный коммутатор с графитовыми электродами КВТГ-50 на напряжение до ± 50 кВ и импульсный ток амплитудой до ± 220 кА 48

Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Шиндерук С.А. Анализ электромагнитных процессов в индукторной системе – инструменте рихтовки автомобильных кузовов 53

Бржезицький В.О., Десятов О.М., Козюра В.В. Про граничні рішення рівнянь високовольтного каскадного генератора напруги постійного струму 57

Гнатов А.В. Возбуждаемые усилия притяжения в симметричной индукционной индукторной системе – универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки 63

Петков А.А. Формирующие возможности генератора импульсов магнитного поля 68

Електричні станції, мережі і системи

Нижевский И.В., Нижевский В.И., Иноятв Б., Насриддини С. Исследование и расчет доли стекающего с заземлителя подстанции тока при однофазном коротком замыкании в электрической сети 72

TABLE OF CONTENTS

Electrical Engineering. Great Events. Famous Names

Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements is in a science and technique. Part 25: Openings in biology and genetics of living organisms 3

Electrical Machines and Apparatus

Malyar V.S., Maday V.S., Dobushovska I.A. Dynamic regimes of asynchronous motors with concatenated capacitors 14

Slobodeniuk D.V., Bialobrzieski O.V. The capacitive storage device in the circuit of synchronous motor excitation for the field forcing and discharge 16

Electrotechnical Complexes and Systems. Power Electronics

Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdyj I.V., Voloshko A.V., Vinichenko E.V., Kotliarov D.A. Experimental research of the power frequency technogenic magnetic field active screening in system with different control algorithms and with a single coil 21

Petrushin V.S., Yakimets A.M., Jenoktajev R.N. Modeling controlled asynchronous electric drives with matching reducers and transformers 26

Theoretical Electrical Engineering and Electrophysics

Grinchenko V.S., Chunikhin K.V. Shielding of a uniform alternating magnetic field using a circular passive loop	31
Rozov V.Yu., Zavalnyi A.V., Zolotov S.M., Gretsikh S.V. The normalization methods of the static geomagnetic field inside houses	35

High Electric and Magnetic Field Engineering. Cable Engineering

Baida E.I. A refined mathematical model of multiphysics processes for magnetic pulse treatment of materials	41
Baranov M.I., Rudakov S.V., Cekhmistro V.L. Three-electrode air switchboard with the graphite electrodes of KATG-50 on voltage to ± 50 kV and impulse current by amplitude to ± 220 kA	48
Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A. An analysis of the electromagnetic processes in the inductor system – tool of the straightening of car bodies	53
Brzhezitsky V.O., Desjatov O.M., Kozyura V.V. Limit solutions of equations of a DC high-voltage cascade generator ...	57
Gnatov A.V. The excited loads of attraction in a symmetrical inductor system for the magnetic pulse removing of the body car	63
Petkov A.A. Forming capabilities of a pulse magnetic field generator	68

Power Stations, Grids and Systems

Nizhevskiy I.V., Nizhevskiy V.I., Ynoyatov B., Nasryddyny S. Investigation and calculation of valleys of outgoing from substation grounding conductors for short-circuit in single-phase short of electrical grid	72
---	----

ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!

Науково-практичний журнал "Електротехніка і Електромеханіка" – передплатне видання. Вартість передплати на 2015 рік – 173,10 грн., на два місяці – 28,85 грн., на чотири місяці – 57,70 грн., на шість місяців – 86,55 грн., на вісім місяців – 115,40 грн., на десять місяців – 144,25 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.com.ua) в розділі "Наукова періодика України", а також на офіційному сайті журналу (eie.khpi.edu.ua).

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



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

М.И. Баранов

АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 25: ОТКРЫТИЯ В БИОЛОГИИ И ГЕНЕТИКЕ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ

Наведено короткий нарис з всесвітньої історії основних досягнень людства в області біології і генетики різних живих організмів. Бібл. 14, рис. 17.

Ключові слова: історія, наукові відкриття, біологія, генетика.

Приведен краткий очерк из всемирной истории основных достижений человечества в области биологии и генетики различных живых организмов. Библ. 14, рис. 17.

Ключевые слова: история, научные открытия, биология, генетика.

Введение. *Биология* как совокупность многих наук изучает живую природу. Она в земных условиях познает сущность, происхождение и развитие жизни в ее разнообразных формах, а также изыскивает наиболее рациональные методы охраны и преобразования живой природы в соответствии с потребностями человека [1, 2]. Важной областью биологии является *генетика*, изучающая закономерности и материальные основы наследственности и изменчивости живых организмов и механизмы эволюции всего живого на Земле [2]. Как известно, *наследственностью* называется свойство одного поколения представителей растительного или животного миров передавать другому поколению основные признаки строения, физиологические свойства и специфический характер своего индивидуального развития [2]. *Изменчивость* – это появление различий между организмами (частями организма или группами организмов) по отдельным признакам. Отметим, что понятие «генетика», связанное с наследственностью и вариативностью живых организмов, происходит от греческого слова «*genētikos*» – «*порождать*» [1]. *Генетика* как название новой науки было предложено в 1906 году английским ученым В. Бэтсоном [2]. В период научно-технической революции генетика является одним из наиболее актуальных и бурно развивающихся разделов биологии, тесно связанным с практикой. Ведь успехи современной генетики способствуют увеличению продуктивности сельскохозяйственных культур (например, пшеницы, сахарной свеклы, кукурузы и др.), получению лучших пород скота и пушных зверей. Достижения генетики способствуют развитию микробиологии и соответственно микробиологической промышленности (например, производства антибиотиков и других лекарств). Они (эти достижения) позволяют подойти человеку к решению грандиозной научной задачи будущего – разработке мер защиты наследственного аппарата человека от вредного влияния факторов окружающей его среды, а также способов лекарственной коррекции (исправления) наследственных недугов у человека. В недалеком будущем возможно и прямое вмешательство в наследственный аппарат человека с целью замены в нем «больных» генов (источников наследственности), от которых зависит его то или иное заболевание. Постараемся ниже дать основные научно-исторические сведения, касающиеся рассматриваемой нами актуальной области биологической науки – *генетики* и уже уста-

новленных человечеством значимых достижений на пути ее эволюционного развития.

1. Краткая история зарождения и становления классической генетики. Еще в далекие доисторические времена для улучшения урожайности злаковых культур и потомства домашних животных путем их селективного разведения людьми был использован тот факт, что живые существа наследуют основные черты своих родителей. Первые попытки исследования человеком наследственности относятся к концу 17-го века. Так, в 1694 году немецкий ботаник Р. Камерариус доказал существование половых различий у растений [3]. Далее в 1760 году член Петербургской академии наук И. Кельрейтер установил наследование растительными гибридами признаков своих родителей и доказал «равноправие» мужских и женских клеток в формировании завязи, а также предложил методы искусственного скрещивания, которые используются до настоящего времени [3]. Выяснить основные законы наследования в растительном мире потомками признаков своих родителей удалось только во второй половине 19-го века австрийско-чешскому монаху-августину и ученому Грегору Менделю (рис. 1) [2]. Классическая генетика, которая стремится исследовать и понять процесс наследования у всех живых организмов, реально именно и началась с научных работ ученого-натуралиста Г. Менделя, относящихся к 1865 году [3].



Рис. 1. Основоположник учения о наследственности в мире растений и животных – известный австрийско-чешский естествоиспытатель Грегор Мендель (1822-1884 гг.) [3]

© М.И. Баранов

Г. Мендель в течение ряда лет (с 1854 по 1863 годы) изучал природу наследования признаков у растений на примере 22-х разновидностей декоративного гороха рода *Pisum*. В своих классических опытах по скрещиванию гороха Г. Мендель для четырёх поколений гороха обследовал около 20 тысяч потомков [2]. Он проследил порядок наследования определенных признаков для гороха и правильно описал их математически [2]. В работах Г. Менделя на основании проведенных им опытов по сегрегации наследственных признаков было выдвинуто мнение, что наследственность является дискретной и постоянной, а не приобретенной в процессе существования растительного организма. Им было показано, что характер наследования у растений многих признаков может быть объяснен и описан с помощью простых математических правил и пропорций. На основе селекционирования гороха Г. Менделем были открыты три основных закона наследуемости признаков у растительного организма: закон единообразия гибридов первого поколения (*первый закон Менделя*), закон расщепления (*второй закон Менделя*) и закон независимого комбинирования признаков (*третий закон Менделя*) [3]. Напомним, что первый закон Менделя утверждает, что скрещивание особей, различающихся по данному признаку (гомозиготных по разным аллелям), дает генетически однородное потомство (поколение F1), все особи которого гетерозиготны. В *генетике аллелем* принято называть отличие, связанное с наличием различных вариантов одного и того же *гена* (понятие «гена» происходит от греческого слова «*genēs*» – «рожденный» [1]). Кстати, набор всех *аллелей* (*генов*) для данного организма называется его *генотипом*, а наблюдаемая характеристика или признак организма называется его *фенотипом*. Следует заметить, что такие принципиально важные в биологической науке понятия как ген, генотип и фенотип предложил в 1909 году датский ученый В. Иогансен [4]. Суть второго закона Менделя состоит в том, что когда у организма, гетерозиготного по исследуемому признаку, формируются половые клетки-гаметы, то одна их половина несет один аллель данного гена, а вторая – другой. Поэтому при скрещивании гибридов поколения F1 между собой среди гибридов второго поколения F2 в определенных соотношениях появляются особи с фенотипами как исходных родительских форм, так и поколения F1 [2]. Третий закон Менделя говорит о том, что каждая пара альтернативных признаков ведет себя в ряду поколений организма независимо друг от друга, в результате чего среди потомков второго поколения F2 в определенном соотношении появляются особи с новыми (по сравнению с родительскими) комбинациями признаков. В 1865 году Г. Мендель в неявной форме высказал идею дискретности и бинарности наследственных «задатков» (эти «задатки» потом биологи стали называть *генами*): каждый признак организма контролируется материнской и отцовской парой «задатков», которые через родительские половые клетки передаются гибридам и нигде не исчезают. «Задатки» признаков не влияют друг на друга, но расходятся при образовании половых клеток и затем свободно комбинируются у потомков в соответствии

с менделевскими законами расщепления и комбинирования признаков. Поэтому считается, что Г. Мендель высказал смелое предположение о существовании в растительных клетках отдельных (дискретных) частиц, являющихся «задатком» (*геном*) наследственных признаков. Он интуитивно считал, что каждая соматическая клетка несет пару наследственных «задатков» (*генов*), а в половых клетках-гаметах содержится по одному «задатку» (*гену*) из пары. При оплодотворении, когда происходит слияние половых клеток, эти «задатки» (*гены*) объединяются в различных комбинациях. Именно их проявление в процессе формирования нового организма и лежит в основе воспроизведения наследственных признаков родителей. Гениальная догадка Г. Менделя, основанная лишь на его безупречно точных опытах, их математической обработке и глубоком логическом анализе причин наблюдаемых явлений при гибридизации гороха, значительно опережала свое время и поэтому она не могла быть понята и по достоинству оценена его современниками. Английская ученая-биолог Ш. Ауэрбах в свое время образно написала, что [3]: «...успех работы Менделя, по сравнению с исследованиями его предшественников, объясняется тем, что он обладал двумя существенными качествами, необходимыми для ученого: способностью задавать природе нужный вопрос и способностью правильно истолковывать ответ природы». Упорный восьмилетний труд Г. Менделя по гибридизации гороха увенчался его статьей «Опыты над гибридизацией растений» в научном сборнике Брюннского (ныне г. Брно, Чехия) Общества по исследованию природы (1866 год) [3]. Данная работа и стала краеугольным камнем *генетики*. Это редкий в истории научных знаний случай, когда одна статья знаменовала собой рождение новой научной дисциплины. Всемирная история науки и техники свидетельствует о том, что великие научные открытия часто признаются не сразу. Так произошло и с законами Менделя, открытыми на растительной культуре горохе, но, как оказалось в дальнейшем, имеющими всеобщий характер для всех живых организмов. Народная мудрость гласит, что «*знание фактов еще не означает их понимание*». Поэтому Г. Менделю необходимо было убедить научное сообщество в важности и всеобщности открытых им законов, определяющих *наследственность* в природе. Но, как известно, подобная задача столь же трудна, как и совершение самого научного открытия. Только начиная с 1900 года, после практически одновременной публикации статей трех известных ботаников (Х. де Фриза, К.Э. Корренса и Э. фон Чермака), независимо подтвердивших опытные данные Г. Менделя по наследственности в мире растений собственными опытными наблюдениями, произошло признание пионерских результатов его работ в области *генетики* [4].

Менделевская *теория наследственности*, включающая совокупность представлений о наследственных детерминантах (*генах*) и характере их передачи от родителей к потомкам, по своему смыслу оказалась прямо противоположной доменделевским теориям. В частности, теории пангенезиса, предложенной известным английским ученым-натуралистом Ч. Дарвином.

В соответствии с теорией пангенезиса признаки родителей прямо от всех частей организма передаются потомству [4, 5]. Поэтому по Дарвину характер признаков потомка должен прямо зависеть от свойств его родителя. Г. Мендель же в своем подходе к передаче организмом наследственных признаков сделал совершенно противоположные выводы [2, 4]: детерминанты наследственности (*гены*) присутствуют в организме относительно независимо от него самого. Характер признаков (фенотип) определяется их (*генов*) случайным сочетанием. Они (признаки) не модифицируются какими-либо частями организма и находятся в отношениях доминантности-рецессивности. Таким образом, менделевская *теория наследственности* противостоит идее наследования приобретенных в течение индивидуального развития организма признаков [4].

2. Последующие достижения в области биологии и классической генетики. В период 1899-1901 гг. нидерландский ученый Х. де Фриз и российский ученый С.И. Коржинский обнаружили биологические организмы, резко отличающиеся от своих сородичей по какому-либо признаку, и сформулировали теорию, согласно которой наследственные свойства и признаки организма могут внезапно и резко изменяться. Эта теория получила название *теории мутаций*. Начало 20-го века ознаменовалось бурным развитием генетических исследований во всем мире. К этому времени благодаря успехам микроскопической техники [6] стали известны детали строения клеток растений и животных и были открыты закономерности образования половых клеток [3]. Тогда же были обнаружены и *хромосомы* – особые структуры в ядре клетки, число и набор которых оказались весьма стабильными в клетках организмов одного вида и различны в клетках организмов разных видов [3]. Далее биологами было открыто деление клеток – *митоз*, во время которого происходит точное распределение удвоившихся *хромосом* родительских клеток по вновь образовавшимся дочерним клеткам [2, 3]. Поэтому именно *хромосомы* ученые-генетики стали считать носителями наследственных «задатков» – *генов*. В период 1910-1913 гг. американский биолог Т.Х. Морган (рис. 2) и его ученики в опытах на плодовой мушке дрозофиле доказали, что *гены* действительно сосредоточены в *хромосомах* в линейном порядке. Ими был экспериментально установлен процесс обмена участками *хромосом* (*генами*) во время сближения парных *хромосом* и перекреста между ними (*кроссинговера*) [3]. Вслед за этим Т.Х. Морганом были построены первые карты *хромосом* для насекомого дрозофилы, а затем и для полезных растений. На этих картах указывалось взаимное расположение *генов* в *хромосомах* указанных живых организмов и относительное расстояние между ними. С учетом полученных результатов Т.Х. Морганом в 1913 году была предложена *хромосомная теория наследственности*, согласно которой передача признаков и свойств живого организма от поколения к поколению (*наследственность*) осуществляется через *хромосомы*, в которых расположены *гены* [1, 2]. Данная теория стало одним из наиболее крупных материалистических научных обобщений молодой *генетики* в начале 20-го века [3]. За выдающиеся работы в области *генетики* Т.Х. Морган в 1933 году был

удостоен Нобелевской премии по физиологии и медицине [2]. К началу 1930-х годов была экспериментально доказана возможность изменчивости *генов* (мутация) под влиянием факторов окружающей среды [2, 3]. В 1925 году советские ученые Г.А. Надсон и его ученик Г.С. Филиппов на низших дрожжах, а в 1927 году американский ученый Г. Мёллер на мушке дрозофиле получили наследственные изменения (мутации) под действием рентгеновских лучей [3, 4]. В 1928 году другой ученик Г.А. Надсона – генетик М.Н. Мейсель показал способность химических реагентов вызывать мутации у дрожжей. В 1932 году явление химического мутагенеза у плодовой мушки дрозофилы наблюдал советский биолог В.В. Сахаров, а, начиная с 1939 года, советский генетик И.А. Рапопорт начал весьма широкое изучение мутагенной (вызывающей мутации) активности многих химических соединений [3].



Рис. 2. Выдающийся американский ученый-биолог Томас Хант Морган (1886-1945 гг.), разработавший хромосомную теорию наследственности для живых организмов [2, 7]

В результате указанных выше исследований в конце 1920-х годов перед генетиками многих стран мира особенно остро встали такие вопросы: что же представляет собой *ген* как структурная единица наследственности и какова его химическая природа? На *первый вопрос* попытки найти ответ были предприняты еще известным американским биологом Т.Х. Морганом, а также рядом других исследователей, включая и советских ученых А.С. Серебровского, Н.В. Тимофеева-Ресовского, А.А. Прокофьеву-Бельговскую в соавторстве с Г. Мёллером, приехавшим на несколько лет поработать в лучших микробиологических лабораториях СССР [3]. Тогда и было установлено, что каждый *ген* определяет в организме развитие определенного признака и является минимальной частью *хромосомы*, которая может быть передана в другую *хромосому* в процессе их перекреста (*кроссинговера*) [2, 4]. В это время считалось также установленным, что в результате такого перехода *ген* изменяется целиком, не дробясь. Однако, в период 1928-1929 гг. в известной советской лаборатории А.С. Серебровского было доказано, что в определенных условиях *ген* удается разделить на различные участки (центры), мутирующие раздельно. В дальнейшем им и его учениками (прежде всего, будущим академиком АН СССР Н.П. Дубининым) была сформулирована так называемая

центровая теория гена [3]. Сущность этой теории заключалась в том, что *ген* состоит из отдельных расположенных в линейном порядке частей и что отдельные части *гена* могут независимо друг от друга изменяться (мутировать), обмениваться при перекресте *хромосом* (*кроссинговере*) и что действие *гена* в целом обусловлено объединением и согласованием функций его частей [2, 3]. Заметим, что позднее в период 1957-1961 гг. американский ученый-генетик С. Бензер экспериментально доказал, что по длине *гена* может возникать множество мутаций и что при *кроссинговере* в обмене участвуют не целые *гены*, а лишь их отдельные участки [4]. Сложнее обстояло дело со *вторым вопросом*, касающимся изучения химической природы *генов*. Уже в начале 20-го столетия учеными-биологами было выяснено, что в *хромосомах* содержатся белки и нуклеиновые кислоты [2]. Причем, *хромосомы*, являющиеся структурными элементами клеточного ядра, содержат главным образом **дезоксирибонуклеиновую кислоту** (ДНК) [3]. Однако ученые-биологи вплоть до 1950-х годов полагали, что *гены* должны содержаться в молекулах белков. Только после зарождения нового направления в генетике – *молекулярной генетики* удалось экспериментально доказать, что именно ДНК несет генетическую функцию в живом организме [3, 4]. В 1944 году опытным путем было установлено то, что введение ДНК, взятой от одних бактерий, в клетки других бактерий вызывает у последних микроорганизмов изменения их наследственных свойств. В 1953 году американский ученый-биолог Дж. Уотсон (рис. 3) и английский ученый-биолог Ф. Крик (рис. 4) предложили гипотезу о строении ДНК, согласно которой биополимерная молекула ДНК имеет форму двойной спирали (рис. 5).



Рис. 3. Соавтор гипотезы о строении и один из первооткрывателей структуры молекулы ДНК – выдающийся американский ученый-биолог Джеймс Уотсон (1928 г.р.) [7]

Большой вклад в экспериментальные исследования молекулярной структуры ДНК и **рибонуклеиновой кислоты** (РНК) в 1950-х годах внес известный английский ученый-биолог М. Уилкинс (рис. 6) [4]. В 1962 году ученым-биологам Ф. Крику, Дж. Уотсону и М. Уилкинсу за открытие молекулярной структуры нуклеиновых кислот ДНК, РНК и их роли в наследственной передаче потомкам биологических признаков и свойств живых организмов была присуждена Нобелевская премия по физиологии и медицине [8].

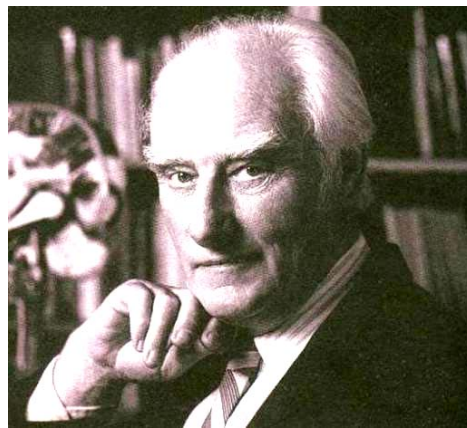


Рис. 4. Соавтор гипотезы о строении и один из первооткрывателей структуры молекулы ДНК – выдающийся английский ученый-биолог Фрэнсис Крик (1916-2004 гг.) [7]

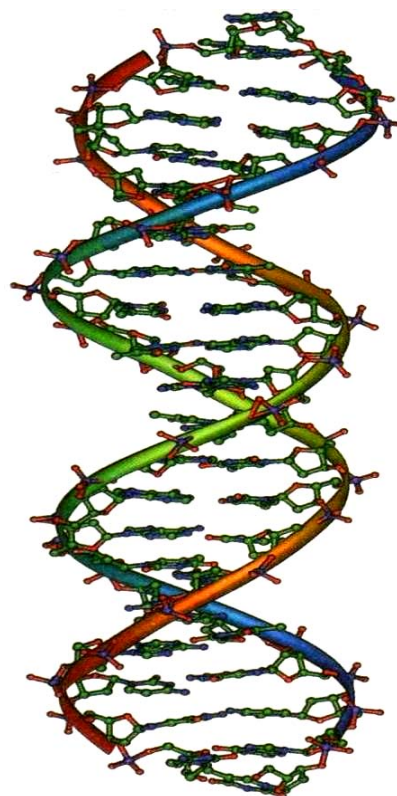


Рис. 5. Двойная спираль макромолекулы ДНК, ставшая в биологическом мире знаменитой «лестницей жизни» [2, 7]

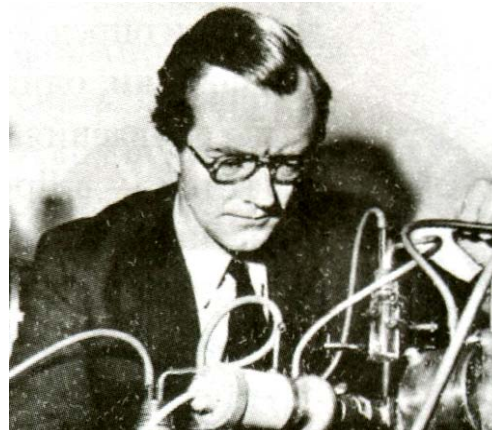


Рис. 6. Один из первооткрывателей структуры молекул ДНК и РНК – выдающийся английский ученый-биолог Морис Уилкинс (1916-2004 гг.) [7]

Следует отметить, что указанная гипотеза Дж. Уотсона и Ф. Крика о строении ДНК, быстро получившая опытное подтверждение, мировое признание и развитие, находится в основе современных представлений о строении и свойствах нуклеиновых кислот [4, 5]. В ходе исследований было установлено, что именно ДНК и РНК, а не белки, являются теми молекулярными структурами, которые обеспечивают хранение и передачу генетической информации – *наследование* признаков от клетки к клетке и через половые клетки от организма родителей к потомкам [3].

На рис. 7 приведена первая рентгенограмма молекулы ДНК [3, 7]. Укажем и то, что в ДНК с помощью ее молекулярных линейных частей-генов закодированы основные признаки живого организма и заключена его наследственная информация в виде *генетического кода* [1, 4]. Необходимо отметить здесь, что *генетический код* – это своеобразная система «записи» наследственной информации организма в молекулах нуклеиновых кислот (ДНК и РНК), представленная у животных, растений, микроорганизмов и вирусов в виде последовательности нуклеотидов, предписывающей соответствующую последовательность аминокислот в синтезируемом им белке [1, 5].

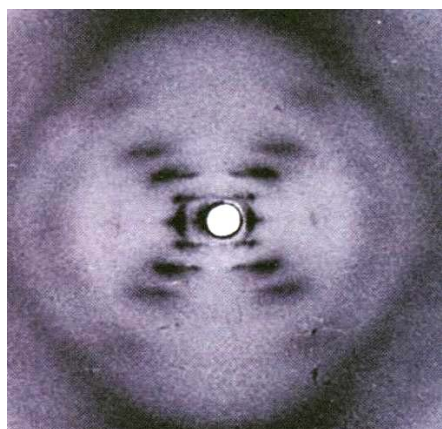


Рис. 7. Первая рентгенограмма молекулы ДНК, полученная американским исследователем Розалинд Франклин [7]

Для лучшего понимания читателем данного весьма сложного научного материала биологической направленности укажем, что ДНК является одной из нуклеиновых кислот или биополимером, состоящим из множества нуклеотидов с огромной молекулярной массой, содержащих углевод *дезоксирибозу* [1, 2]. Молекула ДНК содержит два пурина – *аденин* и *гуанин*, два пиримидина – *цитозин* и *тимин* (рис. 8), остатки дезоксирибозы и фосфорной кислоты [5, 9]. ДНК – характерная составная часть вещества клеточного ядра животных и растений. В свободном виде в живых организмах она никогда (за исключением *фагов*) не встречается. ДНК обычно содержится в виде нуклеопротеидов, входящих в состав хромосом [3]. ДНК играет важнейшую биологическую роль, сохраняя и передавая по наследству индивидуальные признаки и свойства живого организма [1, 2]. Кроме того, укажем, что РНК – это один из видов нуклеиновой кислоты или биополимер, состоящий из нуклеотидов, содержащих углевод *рибозу* [1, 5]. Молекула РНК (рис. 9) содержит два пурина – *аденин* и *гуанин*, два

пиримидина – *цитозин* и *урацил*, остатки пентозы и фосфорной кислоты [5, 9]. РНК является характерной составной частью *цитоплазмы* животных и растительных клеток. РНК сосредоточена преимущественно в *рибосомах* (внутриклеточных частицах, состоящих из белка и РНК и свободно размещенных в *цитоплазме* клетки или прикрепленных к внутриклеточным мембранам) и в меньшем количестве присутствует в *ядре* клеток. РНК входит в состав *нуклеопротеидов* и играет важную роль в биосинтезе белка в живом организме. Отметим, что в настоящее время микробиологами наиболее изучены три вида РНК [1, 2]: *рибосомная*, непосредственно участвующая в биосинтезе белка в организме; *информационная*, обеспечивающая передачу наследственных свойств организма; *транспортная*, переносящая остатки аминокислот на *рибосомы*, служащие местом внутриклеточного биосинтеза белка. Матрицей для синтеза РНК служит ДНК, определяющая тем самым их первичную структуру (транскрипцию) [9]. Через посредство *информационной* РНК осуществляется трансляция или синтез специфических белков, структура которых задана ДНК в виде определённой нуклеотидной последовательности [9]. Оказалось, что молекулы РНК переносят биологическую информацию, «записанную» в молекулах ДНК (*генах*), на вновь синтезируемые в клетках живых организмов молекулы белков, а молекулы ДНК в *генах* сохраняют эту информацию и строго передаёт её по наследству своим потомкам [9].

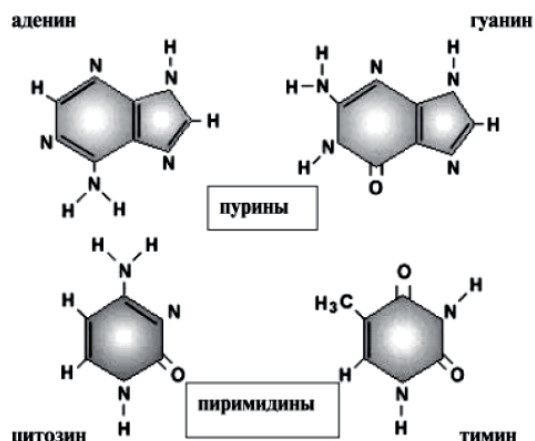


Рис. 8. Химическая структура важных для биологической жизни азотистых соединений (пуринов и пиримидинов), находящихся в основе построения макромолекулы ДНК [9]

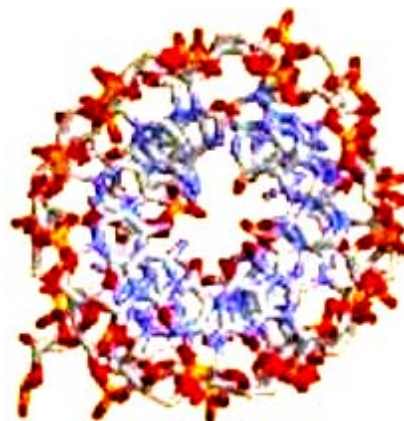


Рис. 9. Общий вид биополимерной макромолекулы РНК [9]

На рис. 10 приведен фрагмент макромолекулы ДНК, полученный на электронном микроскопе [6, 9].

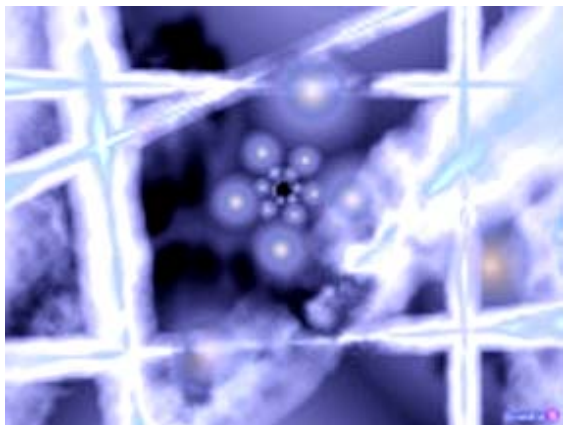


Рис. 10. Фрагмент спиралей макромолекулы ДНК, полученный с помощью современного электронного микроскопа [9]

В период 1959-1961 гг. П. Доти, А.С. Спириным и их сотрудниками было установлено, что все клеточные РНК представляют собой однотяжевые *полинуклеотиды* с характерной вторичной структурой, построенной из коротких двуспиральных участков, соединенных однотяжевыми участками [2]. В 1960 году сразу в нескольких лабораториях мира был открыт фермент РНК-полимераза, осуществляющий синтез РНК на ДНК-матрицах. Так идея выдающегося английского ученого-биолога Ф. Крика о передаче генетической информации от ДНК к белку через РНК (цепочка ДНК-РНК-белок), высказанная им еще в середине 1950-х годов, приобрела конкретное содержание.

Молекула ДНК состоит из многих мономеров – *дезоксирибонуклеотидов*, соединенных через остатки фосфорной кислоты в определенной последовательности, специфичной для каждой индивидуальной ДНК. Уникальная последовательность *дезоксирибонуклеотидов* в молекуле ДНК представляет собой кодовую запись биологической информации. Две такие полинуклеотидные цепочки (см. рис. 5) образуют в молекуле ДНК двойную спираль, в которой комплементарные основания (поперечные «перемычки» или «ступеньки» этой «лестницы жизни») – *аденина* (А) с *тимин*ом (Т) и *гуанин*а (Г) с *цитозин*ом (Ц) прочно связаны друг с другом при помощи водородных связей и так называемых гидрофобных взаимодействий [9]. Такая характерная структура *дезоксирибонуклеотидов* в молекуле ДНК обуславливает не только биологические свойства ДНК, но и её физико-химические особенности. Наличие в ДНК пуриновых и пиримидиновых оснований (см. рис. 8) обуславливает интенсивное поглощение молекулами ДНК ультрафиолетовых лучей с максимумом при длине волны около 260 нм [9]. При нагревании растворов с молекулами ДНК связь между указанными выше парами их оснований-*нуклеотидов* (поперечными «перемычками» или «ступеньками») ослабевает и при некоторой температуре, характерной для данной ДНК (обычно 80-90 °С), две длинные полинуклеотидные цепочки отделяются друг от друга (происходит плавление или так называемая денатурация ДНК) [9]. Было установлено, что биополимерные макромолекулы ДНК обла-

дают очень высокой молярной массой – до сотен миллионов [2, 9]. Отметим, что в клеточном ядре молекулы ДНК находятся преимущественно в виде ДНК-протеидов в комплексах с белками (главным образом гистонами), образующих характерные ядерные структуры – *хромосомы* и *хроматин* [9]. Внутриклеточный процесс удвоения ДНК (репликация) заключается в развёртывании двойной спирали молекулы ДНК и синтезе на каждой её длинной полинуклеотидной цепи новой и комплементарной ей цепочки. Каждая из двух новых молекул ДНК, идентичных старой молекуле ДНК, содержит по одной старой и одной вновь синтезированной полинуклеотидной цепочке. Биосинтез в клетках молекул ДНК происходит из богатых свободной энергией нуклеозидтрифосфатов под действием фермента ДНК-полимеразы [2, 9].

В молекулах РНК комплементарными основаниями служат пурино-пиримидиновые соединения – *аденина* (А) с *урацил*ом (У) и *гуанин*а (Г) с *цитозин*ом (Ц) [9]. Молекулы РНК являются линейными полинуклеотидами с длиной цепи от нескольких десятков до нескольких десятков тысяч нуклеотидов (их молярная масса изменяется от 10^4 до 10^6 [2, 9]. Причём, каждая индивидуальная молекула РНК имеет определённую последовательность своих нуклеотидов. В живом организме молекулы РНК находятся в виде комплексов с белками – *рибонуклеопротеидов*.

Значительный вклад в развитие *мировой генетики* был внесен английским ученым-биологом Р. Фишером, ставшим основателем математической *генетики*, и известным украинско-российским ученым-биологом Н.И. Вавиловым (рис. 11) [2, 7]. Отметим, что Н.И. Вавилов основал и обосновал современное учение о биологических основах селекции, учение о мировых центрах происхождения культурных растений и учение об иммунитете растений, а также открыл закон гомологичности (одинаковости) рядов в наследственной изменчивости живых организмов (1920 год) [2, 7]. Он возглавлял Институт растениеводства АН СССР и основал Институт генетики АН СССР [2]. В период сталинских репрессий и лысенковщины в советской науке, когда *генетика* в СССР была объявлена лженаукой, он был в 1940 году арестован и заключен в тюрьму (в 1955 году он посмертно был реабилитирован) [2, 7]. Выдающийся российский физик-теоретик современности, лауреат Нобелевской премии по физике за 2003 год (за изучение механизмов сверхпроводимости вещества [10]), академик РАН Виталий Лазаревич Гинзбург (1916-2010 гг.) не так давно о том «темном» периоде для прогрессивной советской науки говорил следующее [11]: «...Преследование передовой науки со стороны «корифея всех наук» Сталина – это проявления и, так сказать, плоды несвободы при тоталитарном строе. Документально доказано, что лысенковщина с её «мичуринским учением» и отрицанием генетики стала возможна только в результате сталинского произвола. Сопротивление большинства советских биологов было просто подавлено силой, негодных изгоняли с работы, а некоторых и арестовывали. Самый известный пример из этой истории – трагическая судьба академика Н.И. Вавилова».



Рис. 11. Выдающийся советский ученый-биолог, академик АН СССР Николай Иванович Вавилов (1887-1943 гг.) [9]

Поэтому нам можно уверенно констатировать, что парность «задатков» (*генов*), парность *хромосом*, *двойная спираль* молекулы ДНК – вот логическое следствие и магистральный путь развития генетики 20-го века на основе пионерских научных идей в области *наследственности* растений видного австрийско-чешского ученого-натуралиста Г. Менделя [3, 5].

3. Краткие общебиологические основы наследственности для живых организмов. Отметим, что первые идеи о механизме наследственности в природе высказали еще древнегреческие ученые Демокрит, Гиппократ, Платон и Аристотель. Автор первой научной теории эволюции живых организмов французский ученый Ж.-Б. Ламарк воспользовался идеями древнегреческих ученых для объяснения постулированного им на рубеже 18-19 веков принципа передачи приобретенных в течение жизни индивидуума новых признаков своему потомству. Как уже отмечалось выше, Ч. Дарвин выдвинул теорию пангенезиса, изложенную в его труде «Изменение домашних животных и культурных растений» (1868 год) и объяснявшую наследование потомками приобретенных в процессе существования живого организма признаков. Новое слово о механизме наследственности растений сказал Г. Мендель, сформулировав при этом основные законы передачи наследственных признаков от их родителей к потомкам. Ученые многие годы «бились» над проблемой *наследственности*, пытаясь определить при этом, какие же именно молекулы в клетках живого организма отвечают за наследственность. После открытия во второй половине 20-го столетия молекулярной структуры ДНК и РНК ученые-биологи поняли, что именно ДНК и РНК содержат в своей структуре «запись» наследственной информации, тот *генетический код*, ту наследственную программу, согласно которой при развитии нового организма (потомка) будут формироваться его признаки и свойства. Причем, данная наследственная информация будет определяться последовательностью (порядком) размещения в молекуле ДНК ее *нуклеотидов* на исследуемом фрагменте ДНК (рис. 12) [2]. Оказалось, что разные индивиды (организмы) могут отличаться друг от друга по составу *нуклеотидов* (при постоянной длине фрагмента ДНК) или по длине самого фрагмента ДНК (за счёт вставки или выпадения

отдельных *нуклеотидов*) [3]. Гипотеза Уотсона – Крика дала возможность понять, как происходит постоянное и точное воспроизведение в клетках живых организмов молекул ДНК (репликация этих биополимерных молекул) или иными словами как обеспечивается сохранение и поддержание генетической программы организма [3]. Сама идея о возможности воспроизведения клетками биологического организма наследственного материала была высказана еще в 1927 году советским ученым Н.К. Кольцовым [4]. Однако Н.К. Кольцов связывал эту способность с функцией белковых молекул *хромосом*. В конце концов генетиками было установлено, что воспроизведение (репликация) молекул ДНК происходит путем удвоения ее цепей за счет предварительного разъединения двойной спирали ДНК на две одиночные с дальнейшей достройкой на каждой из них ее точной копии согласно правилу соответственности или комплементарности [3]. В ходе дальнейших генетических исследований, проведенных в ведущих научных лабораториях мира, был раскрыт сложный механизм воспроизведения ДНК. Учеными-биологами была выявлена роль ферментов в этом тонком внутриклеточном процессе. Было показано, что принципиальная схема репликации биополимерных молекул ДНК сходна как у низших, так и у высших живых организмов [4, 5]. Параллельно с этим у генетиков вырисовывалась картина функционирования наследственной записи, связанная с осуществлением генетического контроля биосинтеза белков. Здесь выяснилась важная роль в этом биопроцессе макромолекул двух видов РНК – так называемой *информационной РНК* и *транспортной РНК* [2]. На основе молекулярного анализа структур ядра клеток ученые-генетики получили экспериментально установленные данные о структуре и свойствах *генов*. С их помощью было развито представление о *гене* как отрезке макромолекулы ДНК (заметим, что у некоторых вирусов *ген* является отрезком макромолекулы РНК), который определяет строение первичной структуры молекулы белка живого организма [3, 4]. Данное представление об единице *наследственности* – *гене* является на сегодня основой современной *генетики*.



Рис. 12. Схематический фрагмент молекулы ДНК, поясняющий роль нуклеотидов («перемычек») в наследственных отличиях организмов растительного и животного миров [2]

На рис. 13 в дополнение к рис. 5 и 12 показан увеличенный фрагмент спиралей молекулы ДНК [9].

Дальнейшим важным шагом в познании человеком функции *генов* было установление механизмов регуляции их работы. В 1961 году французские

ученые-генетики Ф. Жакоб и Ж. Моно выявили, что у микроорганизмов наряду со структурными генами, определяющими биосинтез ферментов, существуют участки ДНК, управляющие активностью этих структурных генов [3]. Эти участки ДНК и соответствующие им *гены* были названы регуляторными. Было выяснено, что *гены-регуляторы* занимаются кодированием белков-репрессоров. Последние могут «закрывать» или «открывать» операторные внутриклеточные участки. Именно после этого становится возможным соединение ферментов, ведущих синтез копий *генов* в виде *информационных РНК* (РНК-полимераз), с молекулами ДНК [3, 4]. Продвигаясь по *гену*, РНК-полимераза ведет копирование (считывание или транскрипцию) его генетической информации [3]. Следует обратить внимание читателя на то, что в нашем случае под генетической информацией следует рассматривать некоторую программу, при выполнении которой можно получить определенный биологический результат. Примечательно то, что все существующие формы земной жизни, в том числе, бактерии, грибы, растения и животные, имеют одни и те же основные биологические механизмы, предназначенные для копирования соответствующих макромолекул ДНК и синтеза белков. Вот какой удивительный биологический микромеханизм воспроизведения *генов* и соответственно ДНК открылся ученым-биологам!

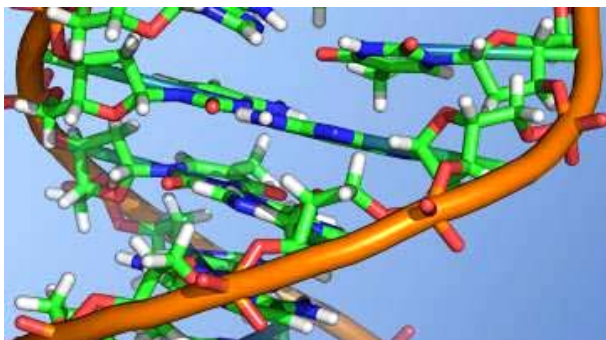


Рис. 13. Укрупненный фрагмент двойной спирали ДНК [9]

С 1961 года ученые-микробиологи всего мира приступили к расшифровке *генетического кода человека* [12]. Согласно данным молекулярной биологии основная программа химических процессов, происходящих на внутриклеточном уровне в любом живом организме (в том числе и в организме человека), записана в строгой последовательности ранее указанных нами пар азотистых оснований-*нуклеотидов* (поперечных «перемычек» или «ступенек» в двойной спирали ДНК, состоящих из пурино-пиримидиновых соединений *аденина* (А) с *тимин*ом (Т) и *гуанина* (Г) с *цитозин*ом (Ц), изображенных на рис. 5, 12 и 13) биополимерной молекулы ДНК [2, 9]. Поэтому, если известна последовательность данных пар оснований-*нуклеотидов* в макромолекуле ДНК *хромосом* клетки тела любого организма, то она расскажет нам все о химических реакциях и наследственной информации данного вида биологического организма. На рис. 14 показана постадийная упаковка длинных макромолекул ДНК в *хромосомах* клеток живого организма [9].

Изучение хромосом у животных и растений привело ученых-биологов к выводу, что каждый вид жи-

вых существ характеризуется строго определенным числом *хромосом*. Деление материала *хромосом* на две равные части как нельзя лучше свидетельствовало в пользу гипотезы, что именно в *хромосомах* сосредоточена *генетическая память* живых организмов [2]. В развитие этой гипотезы микробиологами было введено новое понятие *геном*, происходящее от греческого слова «*genos*» – «*происхождение*» и обозначающее «*совокупность генов, содержащихся в одном (гаплоидном) наборе хромосом данной растительной или животной клетки*» [1, 9]. *Геном* человека – это *геном* биологического вида *Homo sapiens*. В ходе микробиологических исследований было установлено, что в нормальной ситуации в большинстве соматических клеток (клеток тела) человека должно присутствовать 46 *хромосом* (рис. 15) [9]. Заметим, что на рис. 15 хромосомы с 1-ой по 22-ую пару пронумерованы в порядке уменьшения их размера. Оказалось, что 44 из них (22 пары) не зависят от пола (аутосомные *хромосомы*), а одиночные X-*хромосома* и Y-*хромосома* определяют будущий пол организма (при оплодотворении образуемое из них в ядре женской яйцеклетки хромосомное соединение вида XY определяет мужской пол зародыша, а хромосомное соединение вида XX – женский пол зародыша) [5, 9].



Рис. 14. Последовательные стадии упаковки биополимерных молекул ДНК в хромосомах клеток организмов (начиная от двойной спирали и заканчивая целой хромосомой) [9]

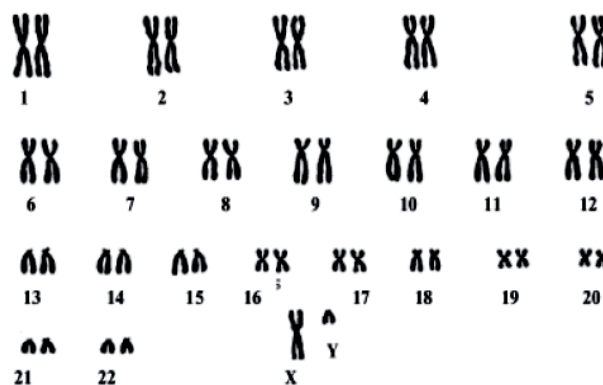


Рис. 15. Внешний вид под электронным микроскопом полного набора хромосом, содержащихся внутри ядра каждой отдельной клетки человека и определяющих его геном [9]

Хромосомные пары соматических клеток потомков человека содержат по одной копии хромосом с 1-ой по 22-ую от каждого своего родителя, а также

X-хромосому от матери и Y- или X-хромосому от отца (см. рис. 15). Отметим, что *хромосомный* набор человека был впервые описан лишь в 1956 году учеными-биологами Ю. Тио и А. Леваном [9]. Они же и определили количественный состав *хромосом* человека и дали их общую морфологическую характеристику. Интересно указать и то, что длины *хромосом* человека находятся в пределах от 1,5 до 10 мкм [2, 9]. Изучение строения (размера и формы) *хромосом* человека показало, что большинство из них по внешнему виду напоминают кегли, состоящие из двух толстых частей (хроматид) и тонкой перетяжки (центромеры) между ними (см. рис. 15) [9]. В рамках международного проекта «Геном человека» было установлено, что одинарный (гаплоидный) набор *хромосом* в соматической клетке тела человека в общей сложности содержит приблизительно 3,2 миллиарда пар азотистых оснований-нуклеотидов (поперечных «перемычек» или «ступенек») в двойной спирали биополимерной макромолекулы ДНК (см. рис. 12 и 13), образующих в сумме от 20 000 до 25 000 *генов*, кодирующих синтезируемый в клетке человека белок [2, 9]. Именно такое количество *генов* образует единичную ячейку – *геном* человека в наследственной основе биологического вида *Homo sapiens* [9]. Удивительным оказался тот факт, что число человеческих *генов* значительно меньше (разница более чем в 2 раза), чем у многих более простых организмов (например, у дождевого червя и мушки дрозофилы). Содержимое *хромосом*, находящихся в стадии интерфаза в клеточном ядре человека (в эухроматине), было выписано генетиками в виде последовательности определенных символов. Отметим, что сейчас эта генетическая последовательность активно и широко используется учеными в биомедицине и специалистами-микробиологами в лабораториях органов здравоохранения по всему миру.

4. Современные достижения в биологии и генетике живых организмов. Международный научно-исследовательский проект «Геном человека» (The Human Genome Project, HGP) начался в 1990 году под руководством выдающегося ученого-биолога современности, лауреата Нобелевской премии (1962 год) Джеймса Уотсона (см. рис. 3) под эгидой Национальной организации здравоохранения США [9]. Отметим, что по результатам данного проекта в 2000 году был выпущен рабочий черновик структуры *генома* человека, а результаты расшифровки полного *генома* человека были представлены научной общественности в 2003 году [9]. Требуется указать, что и на сегодня дополнительный микробиологический анализ некоторых участков ДНК, являющейся самой главной молекулой живой природы, для гаплоидного набора *хромосом* человека ещё не закончен. В ходе этих исследований выяснилось, что человеческий *геном* содержит значительно меньшее число *генов*, нежели ожидалось в начале данного большого биологического проекта (предполагалось, что *геном* человека должен содержать порядка 10^5 *генов*). Только для 1,5 % всего обработанного на современных мощных компьютерах [13] микробиологического материала удалось выяснить их биофункцию, остальная часть составляет пока так называемую «мусорную» ДНК [9]. Полученные уже данные по *геному* человека имеют очевидную фундаментальную

значимость. Ведь определение *генома* человека и структуры человеческих *генов* является важным шагом для разработки новых медикаментов и развития других аспектов мирового здравоохранения.

Небезынтересна для читателя та информация, которая касается физических параметров ДНК человека. Оказалось, что в клетках человека [9]: диаметр двойной спирали ДНК равен 2 нм (напомним, что один нанометр равен 10^{-9} м); расстояние между соседними парами нуклеотидов, состоящими из четырех ранее указанных нами азотистых оснований *аденина* (А) с *тимин*-ном (Т) и *гуанина* (Г) с *цитозина* (Ц) (поперечных «перемычек» или «ступенек» в двойной спирали ДНК), составляет 0,34 нм; один поворот двойной спирали ДНК состоит из 10 пар упомянутых выше оснований-нуклеотидов. Микробиологам удалось установить, что последовательность пар оснований-нуклеотидов в двойной спирали макромолекулы ДНК нерегулярна, но сами эти пары уложены в данной молекуле как в кристалле [9]. Это дало основание ученым-биологам характеризовать биополимерную молекулу ДНК как линейный аperiодический кристалл. Число отдельных макромолекул ДНК в клетке человека (рис. 16) равно числу *хромосом*, входящих в ее ядро. Следует заметить, что клетка – это сложная структурно-функциональная единица любого живого организма, способная к делению и обмену с окружающей средой. Самыми крупными клетками в организме человека являются яйцеклетка и нервная клетка, а самыми маленькими – лимфоциты крови [14].

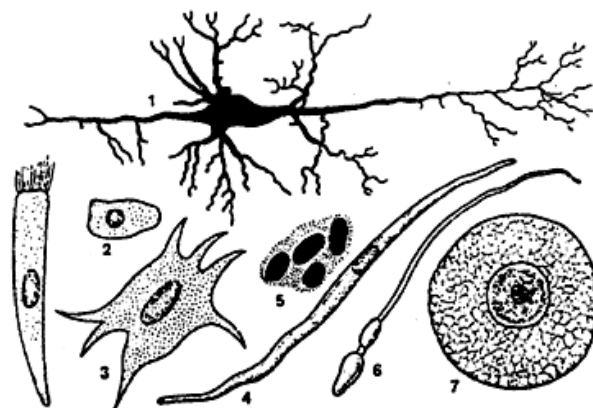


Рис. 16. Основные виды и формы клеток человека (1 – нервная; 2 – эпителиальная; 3 – соединительная; 4 – гладкая мышечная; 5 – эритроцит; 6 – сперматозоид; 7 – яйцеклетка) [14]

На рис. 17 приведено внутреннее ультрамикроскопическое строение клетки человека, представляющей собой сложную систему биополимеров. Она содержит [14]: клеточную оболочку – цитолемму (толщиной до 10 мкм), которая осуществляет транспорт необходимых веществ в клетку и обеспечивает ее взаимодействие с соседними клетками и межклеточным веществом; ядро, в котором происходит синтез белка и обеспечивается хранение генетической информации в виде ДНК (оно снаружи покрыто ядерной оболочкой, которая представлена внешней и внутренней мембранами); цитоплазму и находящиеся в ней разные органеллы. Длина такой свернутой макромолекулы ДНК в наибольшей по размеру *хромосоме* человека (см. рис. 14 и 15) составляет

около 80 мм. Следует подчеркнуть то обстоятельство, что подобных гигантских полимеров пока не выявлено ни в природе, ни среди искусственно синтезированных химических соединений [2, 9].

Строение клетки на рис. 17 представлено согласно научным данным М.Р. Сапина и Г.Л. Билич (1989 год) [14]. У человека длина всех макромолекул ДНК, содержащихся во всех хромосомах одной клетки, составляет примерно 2 м [9]. Так как организм взрослого человека состоит примерно из $5 \cdot 10^{13}$ клеток [14], то общая длина всех биополимерных молекул ДНК в его организме будет равна около 10^{14} м! Вот такой огромной суммарной длиной характеризуются молекулы ДНК всего лишь одного человека! При этом общее число *генов*, локализованных в гаплоидном (одинарном) наборе *хромосом* человека, составит примерно порядка 10^4 . Именно данная совокупность *генов* и составляет *генотип* человека [9]. Под размером *генома* человека обычно подразумевают общее содержание количества вещества ДНК в одинарном (гаплоидном) наборе *хромосом* ядра его соматической клетки. Необходимо указать, что большинство клеток нашего организма содержит двойной (диплоидный) набор совершенно одинаковых *хромосом*. В микробиологии измерения размера *генома* человека или иного организма проводятся в дальтонах, парах *нуклеотидов* (п. н.) или пикограммах (пг) [9]. Соотношения между этими биологическими единицами измерения *генома* следующие [9]: $1 \text{ пг} = 10^{-12} \text{ г} = 0,6 \cdot 10^{12} \text{ дальтон} = 0,9 \cdot 10^9 \text{ п. н.}$ Так как в гаплоидном *геноме* человека содержится до 3,2 миллиарда п. н., то они равны 3,5 пг ДНК.

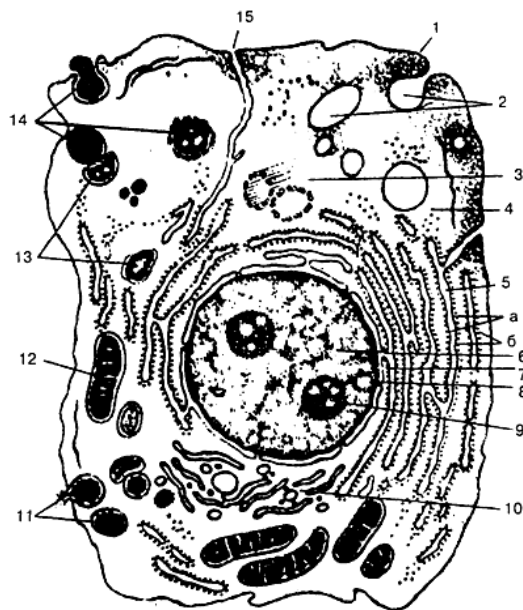


Рис. 17. Схема современного ультрамикроскопического строения клетки человека (1 – цитолемма (плазматическая мембрана); 2 – пиноцитозные пузырьки; 3 – центросома (клеточный цитосентр); 4 – гиалоплазма; 5 – эндоплазматическая сеть (а – мембраны эндоплазматической сети, б – рибосомы); 6 – ядро; 7 – связь перинуклеарного пространства с полостями эндоплазматической сети; 8 – ядерные поры; 9 – ядрышко; 10 – внутриклеточный сетчатый аппарат (комплекс Гольджи); 11 – секреторные вакуоли; 12 – митохондрии; 13 – лизосомы; 14 – три последовательные стадии фагоцитоза; 15 – связь клеточной оболочки (цитолеммы) с мембранами эндоплазматической сети) [14]

Поэтому с учетом диплоидного (двойного) набора *хромосом* в клетке человека в ядре одной его клетки будет содержаться около 7 пг ДНК [9]. Тогда общее количество вещества $M_{\text{ДНК}}$ наследственного материала молекул ДНК в организме человека составит около $M_{\text{ДНК}} = 7 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 10^{13} \text{ г} = 350 \text{ г}$. Если учесть, что средний вес клетки человека равен примерно 1000 пг [9, 14], то становится ясным, что генетический материал ее молекул ДНК составляет около 0,7 % от веса (массы) его клетки. В микробиологии считается, что для того, чтобы воспроизвести на персональном компьютере самым мелким шрифтом ту огромную информацию, которая содержится в молекулах ДНК *хромосом* только одной клетки человека, понадобилось бы тысяча книг по 1000 страниц в каждой! Просто удивительная вещь, не правда ли, уважаемый читатель!? Вот каким огромным по объему заложенной в нем биологической информации оказался полный размер *генома* человека. Нам не следует думать, что *геном* человека является наибольшим по размеру из всех существующих в природе. Так, у некоторых представителей фауны (например, у ящерицы саламандры) и флоры (например, у растения лилии) общая длина макромолекул ДНК, содержащихся в их одной клетке, в тридцать раз больше, чем у человека [9]. По имеющимся на сегодня данным, сами *гены* занимают не более 1,5 % от общей длины макромолекулы ДНК [9]. По авторитетному мнению известного американского ученого-биолога, профессора Джина Майерса, изучавшего в 2001 году с помощью компьютера порядок расположения в *хромосоме* человека миллионов фрагментов макромолекулы ДНК, содержащих азотистые основания-*нуклеотиды* (поперечные «перемычки» или «ступеньки» между спиралями этой молекулы «жизни»), следует, что [9]: «На молекулярном уровне мы восхитительно сложны! Архитектура жизни не может не поражать человека: система предельно сложна и в ней чувствуется разумный замысел!». Кроме того, высказывания других ученых-биологов, изучавших *геном* человека, также предполагают, что «*геном* человека является продуктом творчества» [2, 9].

Кстати, всемирно известный испанский художник Сальвадор Дали после выдающегося научного события в биологии, произошедшего во второй половине 20-го столетия г. Кембридже (Англия) – открытия Дж. Уотсоном и Ф. Криком двойной спирали ДНК, в приподнятом настроении также сказал, что «это для него явилось доказательством существования Бога!» [9].

Среди других современных достижений в области биологии и генетики отметим следующие [9]:

- В 1972 году в микробиологической лаборатории профессора Пола Берга были получены первые рекомбинантные ДНК (Нобелевская премия по химии за 1980 год, врученная П. Бергу и Г. Бойеру). Этими биологическими исследованиями были заложены научно-технические основы генной инженерии.

- В 1976 году было совершено открытие у животных (на примере дрозофилы) «прыгающих генов», сделанное Д. Хогнессом (США) и российскими учеными во главе с Г.П. Георгиевым и В.А. Гвоздевым.

- В 1989 году Т.Р. Чех и С. Альтман выполнили открытие «каталитических свойств некоторых природных РНК (рибозимов)» и получили Нобелевскую премию по химии.

• В 1992 году Э. Кребсу и Э. Фишеру была присуждена Нобелевская премия по физиологии и медицине за открытие «обратимого фосфорилирования белков как важного регулирующего механизма клеточного метаболизма».

• В 1997 году Нобелевская премия по физиологии и медицине была присуждена американцу С. Прузинеру за вклад в изучение «болезнетворного агента белковой природы – приона, вызывающего губчатую энцефалопатию или «коровье бешенство» у крупного рогатого скота».

• В 1999 году Роберт Фурчготт, Луис Игнаро и Ферид Мурад получили Нобелевскую премию по химии за открытие «роли оксида азота в качестве сигнальной молекулы или регулятора и переносчика сигналов в сердечно-сосудистой системе человека».

• В 2000 году была присуждена Нобелевская премия по физиологии и медицине А. Карлссону, П. Грингарду и Э. Кенделу за открытие, касающееся «передачи сигналов в нервной системе человека».

• В 2001 году Нобелевская премия по физиологии и медицине была присуждена Л. Хартвеллу, Т. Ханту и П. Нерсу за открытие «ключевых регуляторов клеточного цикла».

• В 2002 году Нобелевская премия по физиологии и медицине была присуждена С. Бреннеру, Р. Хорвиту и Дж. Салстону за их открытия в области «генетического регулирования развития органов и запрограммированной клеточной смерти у человека».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
2. http://vse-pro-geny.com/ru_osnovy-genetyky.html.
3. <http://bibliotekar.ru/624-2/18.htm>.
4. <http://www.bestreferat.ru/referat-5562.html>.
5. Алиханян С.И., Акифьев А.П., Чернин Л.С. Общая генетика: Учебник. – М.: Высшая школа, 1985. – 356 с.
6. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 23: Изобретение микроскопа и изучение микромира // *Электротехника і електромеханіка*. – 2014. – №6. – С. 3-16.
7. Скляренко В.М., Сядро В.В. Открытия и изобретения. – Х.: Веста, 2009. – 144 с.
8. Храмов Ю.А. История физики. – К.: Феникс, 2006. – 1176 с.
9. http://www.buology.narod2.ru/Genom_cheloveka.
10. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 2-х томах. Том 1. – Х.: Изд-во "НТМТ", 2011. – 311 с.
11. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Лысенковщина>.
12. <http://elementy.ru/trefil/21149>.
13. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 20: Изобретение компьютера и информационной сети Интернет // *Электротехника і електромеханіка*. – 2014. – №3. – С. 3-15.
14. <http://botan0.ru/?cat=1&id=2>.

REFERENCES

1. *Bol'shoj illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov* [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. (Rus).
2. Available at: http://vse-pro-geny.com/ru_osnovy-genetyky.html (accessed 10 April 2012).
3. Available at: <http://bibliotekar.ru/624-2/18.htm> (accessed 14 August 2012).
4. Available at: <http://www.bestreferat.ru/referat-5562.html> (accessed 20 September 2011).

5. Alikhanian S.I., Akifyev A.P., Chernin L.S. *Obshhaya genetika: Uchebnik* [General Genetics: Textbook]. Moscow, Higher School Publ., 1985. 356 p. (Rus).

6. Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in a science and technique. Part 23: Invention of microscope and study of microscopic world. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.6, pp. 3-16.

7. Skljarenko V.M., Sjadro V.V. *Otkrytija i izobretenija* [Discoveries and inventions]. Kharkov, Vesta Publ., 2009. 144 p.

8. Hramov Ju.A. *Istorija fiziki* [The history of physics]. Kiev, Feniks Publ., 2006. 1176 p.

9. Available at: http://www.buology.narod2.ru/Genom_cheloveka (accessed 23 March 2012).

10. Baranov M.I. *Antologija vydaiushchikhsia dostizhenii v nauke i tekhnike: Monografiia v 2-kh tomakh. Tom 1.* [An anthology of outstanding achievements in science and technology: Monographs in 2 vols. Vol.1]. Kharkov, NTMT Publ., 2011. 311 p.

11. Available at: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Lysenkovshchina> (accessed 11 April 2012).

12. Available at: <http://elementy.ru/trefil/21149> (accessed 07 April 2012).

13. Baranov M.I. An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 20: Invention of computer and the Internet information network. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.3, pp. 3-15.

14. Available at: <http://botan0.ru/?cat=1&id=2> (accessed 11 May 2011).

Поступила (received) 05.10.2012

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 25: Openings in biology and genetics of living organisms.

Purpose. Formulation in the compressed type of basic scientifically-historical information, touching the topics for all of humanity and biological science – geneticists taking into account the known for today scientific achievements on the way of its evolutionary development is presented. **Methodology.** Scientific methods of receipt and systematization of knowledges. **Methods of historical method at becoming and development of biological science and genetics.** **Results.** Short history of origin and becoming of classic genetics is described. The portraits of row of domestic and foreign scientists, bringing in a prominent contribution to development of genetics as sciences are presented. Short general biological bases of heredity are given for living organisms. Information is resulted about basic modern fundamental achievements and scientific openings of humanity in area of biology and genetics of living organisms. **Originality.** First by a scientist-electro-physicist for the wide circle of readers the simple and clear appearance is expound short basic scientific information about genes, genome and difficult mechanisms of transmission in the animal (vegetable) kingdom of the inherited information. **Practical value.** System built scientific popularization of existent knowledges of humanity in area of such section of biological science as genetics and expansion for the large number of people of scientific range of interests about outward us things and flowings in its difficult biological processes. References 14, figures 17.

Key words: history, scientific openings, biology, genetics.

В.С. Маляр, В.С. Мадай, І.А. Добушовська

ДИНАМІКА ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННОМУ ДВИГУНІ
З ПОСЛІДОВНО УВІМКНЕНИМИ КОНДЕНСАТОРАМИ

Розглядається проблема математичного моделювання динамічних режимів асинхронних двигунів з поздовжньо-ємнісною компенсацією реактивної потужності. В основу алгоритму розрахунку покладено математичну модель асинхронного двигуна високого рівня адекватності, в якій враховується насичення та витіснення струму. Бібл. 4, рис. 1.

Ключові слова: асинхронний двигун, компенсація реактивної потужності, характеристики пуску, резонанс, конденсатори, субгармонічні коливання.

Рассматривается проблема математического моделирования динамических режимов асинхронных двигателей с продольно-емкостной компенсацией реактивной мощности. В основу алгоритма расчета положена математическая модель асинхронного двигателя высокого уровня адекватности, в которой учитывается насыщение и вытеснение тока. Библ. 4, рис. 1.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, компенсация реактивной мощности, характеристики пуска, резонанс, конденсаторы, субгармонические колебания.

Вступ. Одним з основних чинників, від яких залежать витрати електроенергії, є підвищення коефіцієнта потужності споживачів [2], серед яких значну частину складають асинхронні двигуни (АД). Для цього використовується як поперечна компенсація, так і поздовжня. При поздовжній компенсації АД живляться від лінії через конденсатори, а тому за певних умов можуть виникати резонансні явища, наслідком яких є не тільки значне зростання струму двигуна та напруги на ньому, але й поява коливань швидкості обертання ротора [1]. Отже проблема дослідження роботи АД з послідовно увімкненими конденсаторами має як теоретичне, так і практичне значення.

Суть проблеми. На практиці важливою є проблема дослідження впливу величини ємності C послідовно увімкнених конденсаторів на поведінку двигуна під час пуску, і перш за все появу резонансних явищ [1, 3]. Відомі методики розрахунку значення ємності конденсаторів для компенсації реактивної потужності є досить наближеними [3], а тому потребують або експериментальної перевірки, або розрахунку перехідних процесів з використанням математичної моделі АД, яка забезпечує достовірність результатів математичного експерименту.

Метою статті є розроблення математичної моделі для розрахунку пускових режимів АД з послідовно увімкненими конденсаторами.

Математична модель. Дослідження резонансних процесів в АД потребує достатньо точного визначення параметрів двигуна, якими є активні опори та власні і взаємні індуктивності електричних контурів. Зазначені параметри залежать від витіснення струму в стержнях короткозамкненого ротора та насичення магнітопроводу, а тому достовірні результати розрахунку можна отримати лише на основі математичних моделей високого рівня адекватності.

В розробленому алгоритмі процеси в АД розглядаються у трифазних координатних осях [4]. Для урахування витіснення струму кожний стержень короткозамкненого ротора розбивається по висоті на n елементарних, в результаті чого обмотка ротора представляється n трифазними обмотками. При цьому система

диференціальних рівнянь (ДР) електричної рівноваги, яка описує динамічний режим, складається з:

- трьох рівнянь для статора:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_A}{dt} - \frac{d\psi_B}{dt} &= u_{AB} - r_A i_A + r_B i_B - u_{kA} + u_{kB}; \\ \frac{d\psi_B}{dt} - \frac{d\psi_C}{dt} &= u_{BC} - r_B i_B + r_C i_C - u_{kB} + u_{kC}; \\ \frac{di_A}{dt} + \frac{di_B}{dt} + \frac{di_C}{dt} &= 0; \end{aligned} \quad (1a)$$

- $3n$ рівнянь для ротора:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{aj}}{dt} - \frac{d\psi_{bj}}{dt} &= -r_{aj} i_{aj} + r_{bj} i_{bj} - \alpha(\psi_{bj} - 2\psi_{cj} + \psi_{aj}); \\ \frac{d\psi_{bj}}{dt} - \frac{d\psi_{cj}}{dt} &= -r_{bj} i_{bj} + r_{cj} i_{cj} - \alpha(\psi_{cj} - 2\psi_{aj} + \psi_{bj}); \\ \frac{di_{aj}}{dt} + \frac{di_{bj}}{dt} + \frac{di_{cj}}{dt} &= 0; \quad (j = 1, \dots, n), \end{aligned} \quad (1b)$$

- трьох рівнянь для конденсаторів:

$$\frac{du_{kA}}{dt} = \frac{i_A}{C}, \quad \frac{du_{kB}}{dt} = \frac{i_B}{C}, \quad \frac{du_{kC}}{dt} = \frac{i_C}{C}, \quad (1b)$$

- рівняння механічної рівноваги:

$$\frac{J\omega_0}{p_0} \frac{ds}{dt} = M_c - M_e, \quad (1r)$$

де $\alpha = \omega_0(1-s)/\sqrt{3}$; s – ковзання; ω_0, ω – частота напруги та кутова швидкість обертання ротора; ψ_k, i_k, r_k ($k = A, B, C, a_j, b_j, c_j$) – потокозчеплення, струми та активні опори фаз; u_{AB}, u_{BC} – лінійні напруги; J – момент інерції системи, p_0 – кількість пар полюсів АД; M_c – момент навантаження; $M_e = \frac{P}{\sqrt{3}} L_\mu ((i_{\mu B} - i_{\mu C})i_A +$

$+(i_{\mu C} - i_{\mu A})i_B + (i_{\mu A} - i_{\mu B})i_C)$ – електромагнітний момент АД в фазних осях [4]; $i_{\mu A}, i_{\mu B}, i_{\mu C}$ – проекції на осі фаз зображуючого вектора струму i_μ . Індуктивність L_μ визначається з кривої намагнічування головного магнітного шляху

$$\psi_\mu = \psi_\mu(i_\mu). \quad (2)$$

Під час числового інтегрування нелінійної системи ДР (1) для визначення матриці диференціальних індуктивностей контурів АД як похідної вектора поточкозчеплень по вектору струмів використовують, крім характеристики намагнічування (2), нелінійні залежності поточкозчеплень розсіювання статора та ротора від струмів статора (s) та ротора (r)

$$\psi_{\sigma s} = \psi_{\sigma s}(i_1), \quad \psi_{\sigma r} = \psi_{\sigma r}(i_2), \quad (3)$$

де i_1, i_2 – модулі зображувальних векторів струмів.

Для прикладу на рис. 1 наведені залежності від часу струму фази А обмотки статора та швидкості обертання ротора під час пуску без навантаження двигуна 4AP160S4Y3 ($P = 15$ кВт, $U = 230$ В, $I = 29,9$ А; $p_0 = 2$) при ємності $C = 950$ мкФ. Як видно з рис. 1, при цьому виникає самозбудження, яке переходить в режим субгармонічних коливань з частотою 25 Гц, що призводить до механічних гойдань ротора АД.

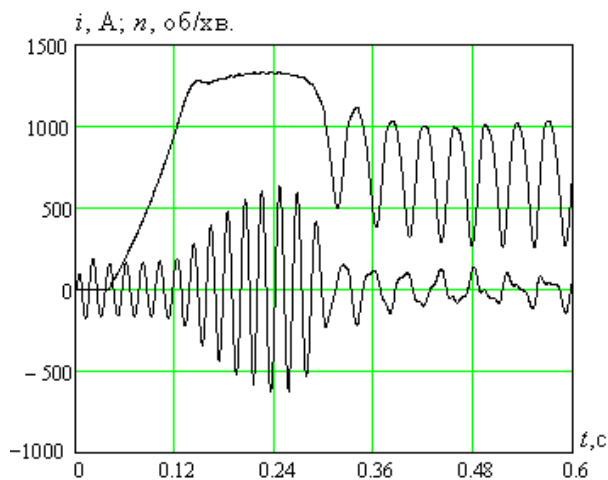


Рис. 1. Часові залежності струму фази обмотки статора та швидкості обертання ротора під час пуску

Висновки.

Викладено алгоритм і результати математичного моделювання процесів в пускових режимах АД, який живиться від мережі через послідовно увімкнені конденсатори.

Показано, що за деяких значень величини ємності можуть виникати процеси самозбудження і появи субгармонічних коливань.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Голован А.Т., Чжан Чен-Шен. Механическое качение асинхронной машины при ее работе с последовательно включенными конденсаторами // Электричество. – 1962. – №10. – С. 12-15.
2. Данцис Я.Б., Жилов Г.М. Емкостная компенсация реактивных нагрузок мощных токоприемников промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1980. – 176 с.
3. Рудницький В.Г., Бондаренко В.В. Аналіз виникнення самозбудження асинхронних двигунів при поздовжньому вмиканні ємності в пристрої регулювання напруги та реактивної потужності // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2006. – Вип. 66. – С. 232-233.
4. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. – К.: Наукова думка, 1979. – 208 с.

REFERENCES

1. Golovan A.T., Zhang Chen-Shen. Mechanical swinging asynchronous motors with a series connection capacitors. *Electricity*, 1962, no.10, pp. 12-15. (Rus).
2. Dancis J.B., Zulov G.M. *Emkostnaja kompensacija reaktivnyh nagruzok moshhnyh tokopriemnikov promyshlennyh predpriyatij* [Capacity indemnification of reactive power for powerful consumers of industrial enterprises]. Moscow, Energija Publ., 1980. 176 p. (Rus).
3. Rydnyckij V.G., Bondarenko V.V. Analysis of the occurrence of self-excited of asynchronous motors with a series connection capacitors in the device voltage and reactive power control. *Elektromashinostoenie i elektrooborudovanie – Electrical Engineering and Electric Equipment*, 2006, no.66, pp. 232-233. (Ukr).
4. Filc R.V. *Matematicheskie osnovy teorii elektromekhanicheskikh preobrazovatelej* [Mathematical foundations of electromechanical transducers theory]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1979. 208 p. (Rus).

Надійшла (received) 23.12.2014

Маляр Василь Сафронів¹, д.т.н., професор,
Мадай Володимир Степанович¹, к.т.н., доцент,
Добушовська Ірина Андріївна¹,
¹ Національний університет «Львівська політехніка»,
79013, Львів, вул. С. Бандери, 12,
тел/phone +38 032 2582119, e-mail: maday@polynet.lviv.ua

V.S. Malyar¹, V.S. Maday¹, I.A. Dobushovska¹

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

Dynamic regimes of asynchronous motors with concatenated capacitors.

Purpose. Development of mathematical model for calculation of starting modes of asynchronous motor connected in series with capacitors. **Method.** Mathematical modeling of dynamic modes of asynchronous motors with lateral capacitor compensation of reactive power. **Results.** The calculation algorithm and results of mathematic modeling of processes during starting modes of asynchronous motor feeding from the network through capacitors connected in series are presented. It is shown that for some values of capacitance the self-excitation processes and subharmonic oscillations can appear. **Scientific novelty.** Mathematic modeling and research of processes in asynchronous motor under its feeding through capacitors is carried out for the first time. The calculation algorithm is based on the mathematical model of asynchronous motor with high level of adequacy, which takes into account the magnetic core saturation and the current displacement in limbs of the rotor. **Practical implication.** Developed mathematical model makes it possible to investigate the possibility of self-excitation modes appearing in condition of their feeding from line with lateral compensation of reactance in order to avoid the negative effects typical for them. References 4, figure 1.

Key words: asynchronous motor, compensation of reactive power, starting characteristics, resonance, capacitors, subharmonic oscillations.

ЄМНІСНИЙ НАКОПИЧУВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ У КОНТУРІ ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННОЇ МАШИНИ ДЛЯ ФОРСУВАННЯ ТА ГАСІННЯ ПОЛЯ

В роботі проаналізовано існуючі силові схеми регулювання струму збудження синхронних двигунів. Розглянуто питання використання накопичувального пристрою в контурі обмотки збудження, на підставі чого запропоновано структуру системи керування динамічними режимами збудження синхронного двигуна, що дозволяє підтримувати заданий струм збудження синхронного двигуна певний період часу, за рахунок енергії конденсатора, введеної в контур збудження транзисторним перетворювачем. Бібл. 8, рис. 5.

Ключові слова: синхронний двигун, автоматичне регулювання збудження, релейне керування, транзисторний перетворювач, ємнісний накопичувач, математична модель.

В работе проанализированы существующие силовые схемы регулирования тока возбуждения синхронных двигателей. Рассмотрены вопросы использования накопительного устройства в контуре обмотки возбуждения, на основании чего предложено структуру системы управления динамическими режимами возбуждения синхронного двигателя, позволяющей поддерживать заданный ток возбуждения синхронного двигателя определенный период времени, за счет энергии конденсатора, введенной в контур возбуждения транзисторным преобразователем. Библ. 8, рис. 5.

Ключевые слова: синхронный двигатель, автоматическая, регулировка возбуждения, релейное управление, транзисторный преобразователь, емкостной накопитель, математическая модель.

Вступ. Для підвищення стійкості роботи синхронних двигунів (СД) і збільшення віддачі в мережу реактивної потужності при короточасних зниженнях напруги використовується параметричне або релейне форсування збудження [1]. Однак при роботі потужних тиристорних електроприводів прокатних станів та інших електроприймачів з різкозмінним навантаженням, перетоки реактивної потужності, що викликають втрати електроенергії і коливання напруги в мережах, як правило, не можуть бути ефективно скомпенсовані синхронними двигунами оснащеними серійними тиристорними збудниками з регламентованою кратністю форсування напруги [2]. Обмежені можливості існуючих тиристорних збудників і пристроїв форсування збудження можна істотно розширити за допомогою використання ємнісних накопичувачів [3].

Мета роботи. Розробка схемного рішення та системи керування ємнісним накопичувальним пристроєм в контурі збудження синхронної машини для форсування та гасіння поля.

Матеріали та результати досліджень. Автоматичне регулювання збудження (АРЗ) синхронних двигунів по струму статора – компаундування двигунів (компенсація реакції якоря) є простим параметричним регулюванням збудження безперервної дії без зони нечутливості. Воно створює оптимальні режими як для двигуна з точки зору його використання і стій-

кості, так і для живлячої мережі. Наявність компаундування дозволяє автоматично підтримувати високий коефіцієнт потужності при зміні навантаження, отримувати підвищений середньорічний к.к.д. і підвищену перевантажувальну здатність, особливо при ударних навантаженнях [1].

Виділяють схеми АРЗ СД за струмом статора (рис. 1). Система збудження за відхиленням (рис. 1,а), до якої входять керований випрямляч TR1, що живиться від трансформатора напруги TV, та АРЗ, який, в даному випадку, забезпечує підтримання заданого коефіцієнта потужності статора і обмеження кута навантаження θ . Системи збудження за компенсацією реакції якоря містять контур компаундування, який складається з трансформаторів струму ТА та некерованого випрямляча TR2, вихідний струм якого алгебраїчно додається до нерегульованого (рис. 1,б – регулювання за збуренням), або регульованого (рис. 1,в – комбіноване регулювання за збуренням і за відхиленням) струму збудження СД [4].

АРЗ СД за струмом статора характеризується коефіцієнтом компаундування k_c , зі зростанням якого зростає перевантажувальна здатність СД. Проте надмірно великі значення коефіцієнта компаундування можуть призвести до саморозкачування двигуна і втрати стійкості [4], що є додатковим обмеженням в задачі ефективного компаундування.

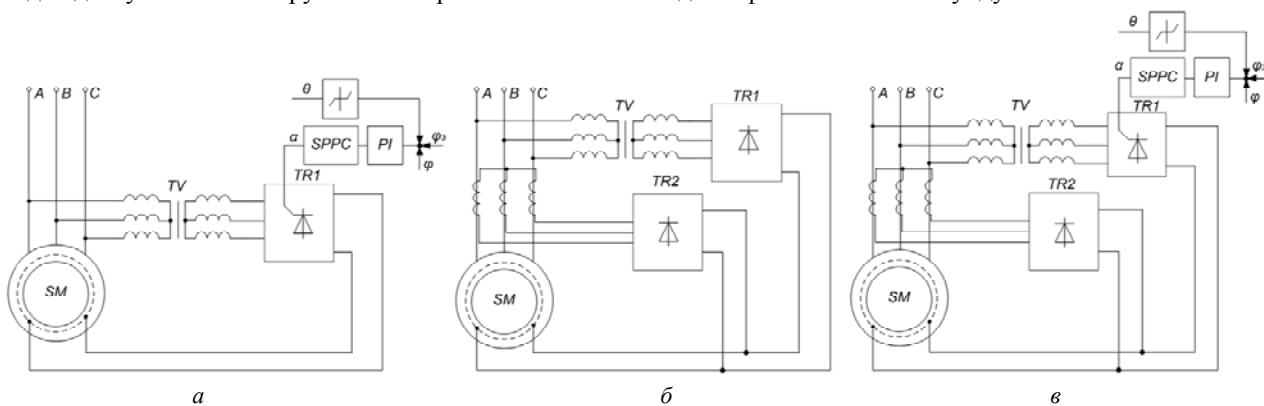


Рис. 1. Існуючі схеми систем збудження синхронних двигунів

Найбільш ефективним способом реалізації зазначеної задачі є форсування збудження з ємнісною компенсацією інерційності контуру збудження шляхом розряду попередньо зарядженого конденсатора в цьому контурі з одночасною подачею форсуючої напруги від тиристорного перетворювача [5]. Окрім цього, ємнісний накопичувач, можливо використовувати в обмотці збудження для полегшення запуску СД, як це пропонується в роботі (рис. 2,а). Система містить тиристорний регулятор напруги в статорі і ступінчастий ємнісний накопичувач енергії в роторі. Управління блоками здійснює мікропроцесорний модуль MCU, який видає керуючі сигнали на блок управління тиристорами AUZ для підтримки струму статора на заданому рівні і на блок ємнісного накопичувача, результуюча ємність якого змінюється за заданим алгоритмом у функції ковзання.

При подачі напруги на статор СД від тиристорного регулятора напруги, струм в обмотці збудження замикається через послідовно з'єднані ємнісні накопичувачі C1 і C2 при включених тиристорах VS9 і VS10, причому C2 зашунтований резистором R2. У міру збільшення частоти обертання ротора і збільшення ємнісного опору накопичувачів C1 і C2 тиристори VS9 і VS10 закриваються. При цьому обмотка збудження замикається на накопичувач C1 і резистор R1. При подальшому збільшенні частоти обертання ротора включаються тиристори VS7 і VS8. При цьому обмотка збудження замикається на паралельно включені кола C1-R1 і C2-R2. Підтримання необхідного електромагнітного моменту забезпечується необхідним кутом управління тиристорами, що задається системою керування [5].

Однак недоліками систем форсування та полегшеного запуску з використанням ємнісного накопичувача в більшості випадків є односторонність передачі енергії між обмоткою збудження та ємнісним накопичувачем, і як наслідок використання розрядних резисторів у випадку гасіння накопиченої обмоткою збудження електромагнітної енергії (рис. 2,б) [6].

На підставі аналізу приведених схемних рішень, запропоновано систему керування збудженням, з накопичувальним пристроєм (рис. 3). До системи збудження додатково паралельно через буферний дросель L підключено мостовий транзисторний перетворювач ПІ з накопичувальним конденсатором С. Для керування процесом передачі енергії розроблено систему керування CS.

В стаціонарному режимі живлення обмотки синхронної машини здійснюється від тиристорного перетворювача, який отримує живлення через узгоджувальний трансформатор від мережі. На виході випрямляча формується напруга, середнє значення якої зумовлюється фазними напругами вторинної обмотки трансформатора TV:

$$\begin{aligned} u_A &= E_{2m} \sin(\omega t); \quad u_B = E_{2m} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}); \\ u_C &= E_{2m} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}); \end{aligned} \quad (1)$$

та імпульсами, які подаються з кутом управління α , що забезпечує на активно-індуктивному навантаженні

(обмотка збудження СД) роботу вентилів з кутом провідності $\lambda = 2\pi/3$, тобто комутаційна функція для вентилів фази А [7] (аналогічно для фаз В та С):

$$\psi_A = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^n \left[\frac{1}{2k-1} \sin[(2k-1)\frac{\lambda}{2}] \cdot \cos[(2k-1)[(\omega t - \frac{\pi}{2}) - \alpha]] \right]. \quad (2)$$

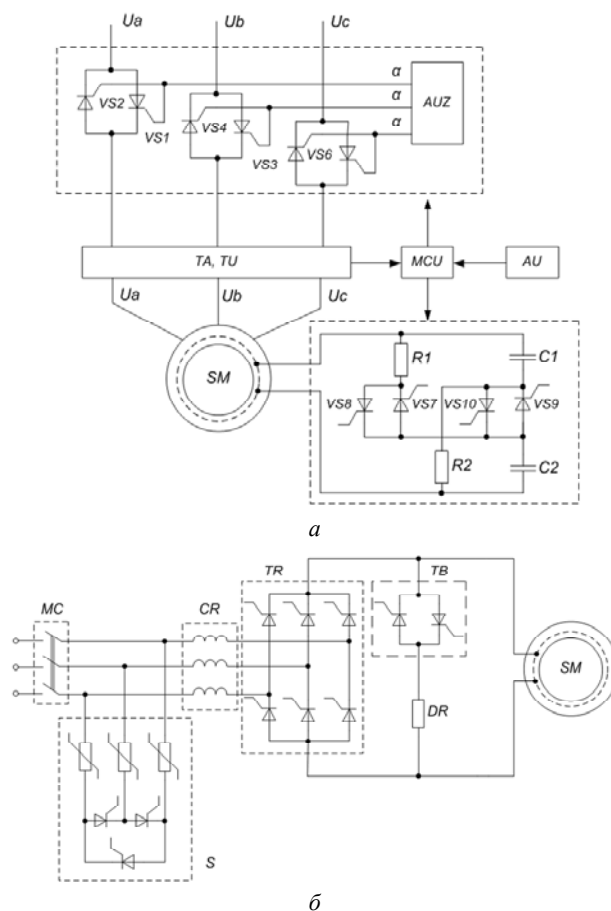


Рис. 2. Схемні рішення систем управління струмом збудження: а – система запуску СД з використанням ємнісного накопичувача енергії; б – система регулювання збудженням з використання розрядного резистора у колі збудження

В результаті чого на до обмотки збудження прикладається напруга

$$u_d = u_f = u_A \psi_A + u_B \psi_B + u_C \psi_C, \quad (3)$$

забезпечуючи середнє значення:

$$U_f = k_{cx} E_{2m} (1 - \cos \alpha), \quad (4)$$

де k_{cx} – коефіцієнт схеми випрямляча, E_{2m} – максимальне значення випрямленої напруги.

В динамічному процесі під час зміни електричних параметрів режиму статора синхронної машини (струм статора), або механічних параметрів режиму (момент навантаження), відповідним чином змінюється е.р.с. взаємодукції ротора і струм збудження:

$$i_f = \frac{u_f - d\psi_f / dt}{r_f}. \quad (5)$$

Виникає необхідність зміни струму збудження за новим законом відповідно до заданого значення струму збудження i_{ref} формованого за датчиком струму (DC) збудження (рис. 3), який надходить на один з входів блоків порівняння (BC1, 2) на другий вхід яких надходить з виходу датчика струму збудження (ТА)

сигнал поточного струму збудження i_f . В результаті порівняння на виході BC1 формується сигнал відхилення струму $\Delta i_1 = i_{ref} - i_f$, а на виході BC2 формується сигнал відхилення струму $\Delta i_2 = i_f - i_{ref}$.

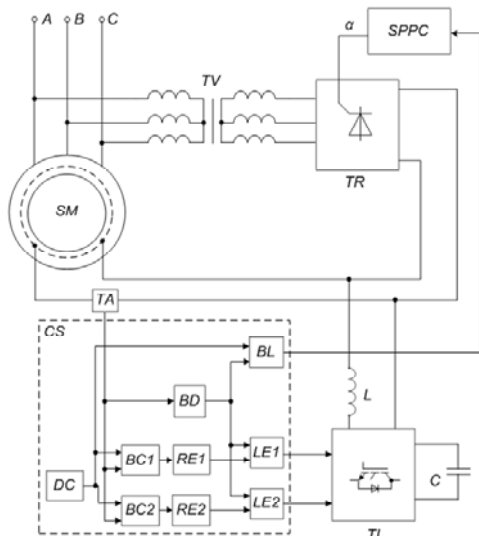


Рис. 3. Система керування збудженням СД в динамічних режимах

Сигнали з блоків порівняння надходять на відповідні релейні елементи (RE1,2), на виході яких формується сигнал:

$$u_{RE1} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \Delta i_1 \geq \Delta i_{ref}; \\ 0, & \text{якщо } \Delta i_1 < \Delta i_{ref}; \end{cases} \quad (6)$$

де Δi_{ref} – наперед задане відхилення струму, яке складає 5 % від номінального струму збудження синхронної машини.

Сигнал з релейних елементів (RE) надходить на другі входи логічних елементів (LE1,2) на перший вхід яких надходить сигнал u_{BD} , що формується на виході блоку диференціювання (BD). На вхід блоку диференціювання надходить сигнал поточного струму збудження i_f , на підставі якого формується сигнал:

$$u_{BD} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \frac{di_f}{dt} \neq 0; \\ 0, & \text{якщо } \frac{di_f}{dt} = 0; \end{cases} \quad (7)$$

що забезпечує визначення статичного чи динамічного режиму за струмом збудження

В результаті на виходах логічних елементів формується сигнал:

$$u_{LE} = u_{RE} \cup u_{BD}. \quad (8)$$

Ці сигнали керують роботою транзисторного перетворювача ТІ, забезпечуючи передачу енергії конденсатора. Напруга збудження визначається напругою транзисторного перетворювача та падінням напруги на буферній індуктивності

$$u_f = u_{TI} - L \frac{di_f}{dt}; \quad (9)$$

де u_{TI} – напруга транзисторного перетворювача:

$$u_{TI} = u_{LE} u_C = u_{LE} \frac{1}{C} \int i_C dt; \quad (10)$$

де u_{LE} – сигнал, що поступає з виходу логічних елементів не керуючі електроди транзисторів (1 або 0); u_C – напруга конденсатора:

$$u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt = \frac{1}{C} \int i_L u_{LE} dt. \quad (11)$$

Це призводить до розряду конденсатора. Зниження запасу енергії конденсатора може бути компенсовано його зарядом під час гасіння поля СД, або зарядом від тиристорного перетворювача у статичному режимі.

Оскільки $i_L = i_f$, то рівняння балансу напруги в контурі обмотки збудження в динамічному процесі:

$$i_f r_f + \frac{d\psi_f}{dt} = u_{LE} \frac{1}{C} \int i_f u_{LE} dt - L \frac{di_f}{dt}. \quad (12)$$

У статичному режимі, коли струм i_f незмінний та відповідно $di_f/dt = 0$, вихідний сигнал BD, що надходить на другий вхід блоку блокування (BL), на перший вхід якого надходить сигнал струму i_{ref} , розблоковує роботу тиристорного перетворювача (TR), блокуючи роботу транзисторного перетворювача ТІ. При цьому на виході BL формується сигнал управління:

$$u_{BL} = i_{ref} \cdot u_{BD}, \quad (13)$$

де u_{BD} – логічна інверсія сигналу u_{BD} .

Сигнал з виходу BL надходить до системи імпульсно-фазового керування (SPPC), що забезпечує формування кута керування TR:

$$\alpha = K \cdot u_{BL} \cdot \pi, \quad (14)$$

де $K = 1/u_{BLmax}$ – коефіцієнт масштабування, u_{BLmax} – максимальне значення напруги управління TR.

Напруга конденсатора обирається з умови $U_C = 5U_{фном}$, що обумовлено ГОСТ 183-74, по випробуванню ізоляції обмоток синхронних машин, де $U_{фном}$ – номінальна напруга збудження.

На рис. 4 наведені результати модельних досліджень динамічних режимів роботи пристрою при живленні обмотки збудження синхронного двигуна СДЕ2-15-34-6У2, параметри схеми перетворювача обрані за рекомендаціями [8], буферний дросель, $L = 4 \cdot 10^{-6}$ Гн, конденсатор, $C = 0,4$ Ф, $U_C = 180$ В.

Моделювання форсування збудження проведено з лінійним збільшенням струму збудження від 135 до 300 А, та з швидкістю наростання струму $di_f/dt = 220$ А/с. Моделювання гасіння струму збудження проводилось з лінійним зменшенням струму від 295 до 100 А зі швидкістю спадання струму $di_f/dt = 300$ А/с. В результаті проведення модельного експерименту отримані часові залежності: зміни напруги (рис. 4,а); струму збудження (рис. 4,б); енергії конденсатора, буферної індуктивності та втрат в контурі (рис. 4,в).

Таким чином, пристрій (рис. 3) забезпечує двосторонню передачу енергії між обмоткою збудження та конденсатором з високими показниками швидкості зміни струму, що може забезпечити достатні показники для підвищення швидкодії системи компаундування в складі АРЗ СД.

Для оцінки впливу імпульсного регулювання напруги транзисторного перетворювача (ТІ, рис. 4) отримано часову залежність коефіцієнту форми напруги – рис. 5, при живленні обмотки збудження від тиристорного перетворювача TR, та накопичувально-го перетворювача ТІ. При чому показник під час роботи ТІ є нижчим ніж під час роботи TR.

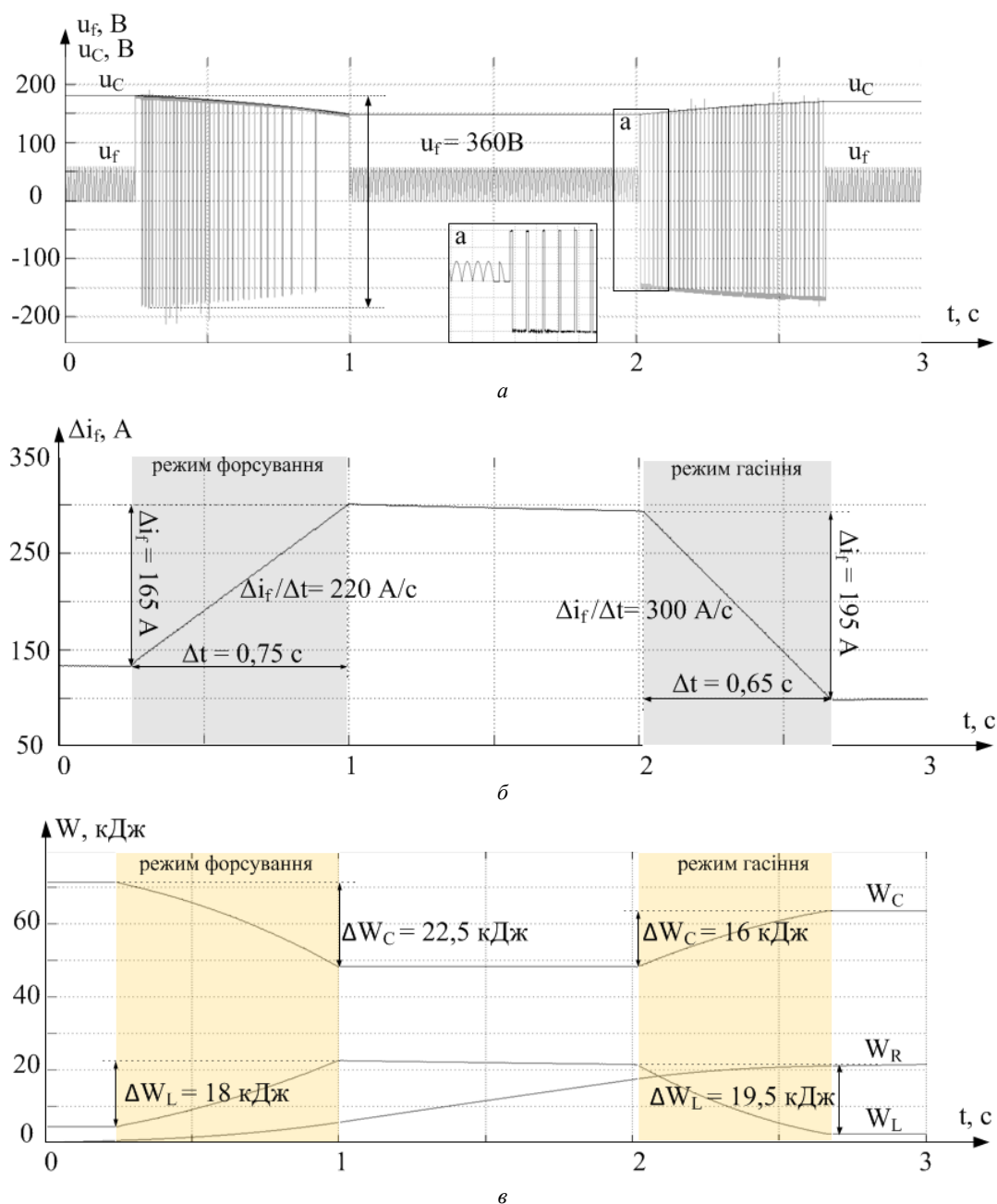


Рис. 4. Напряга (а), струм (б) та енергія (в) збудження при моделюванні режимів форсування і гасіння поля

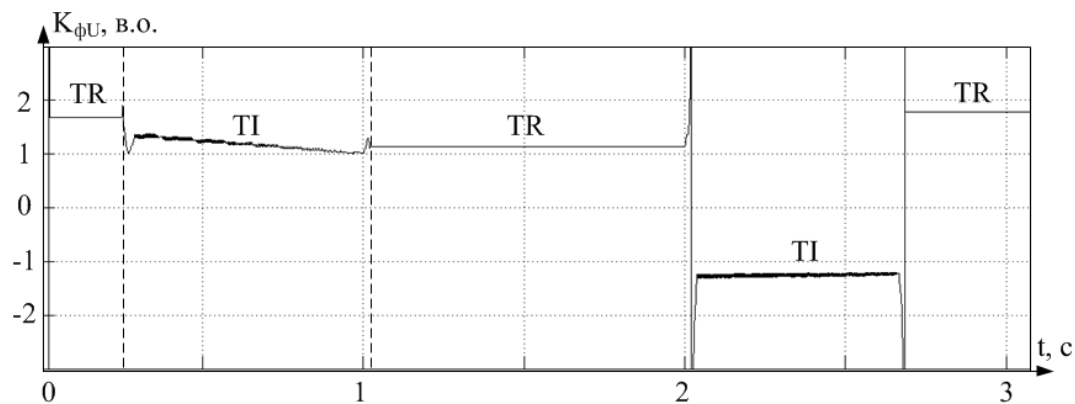


Рис. 5. Коефіцієнт форми напруги обмотки збудження

Висновок.

1. Висока інерційність обмотки збудження призводить до збільшення тривалості перехідного процесу

під час роботи систем АРЗ СД, знижуючи їх ефективність, для підвищення якої застосовуються силові схеми, які мають у складі конденсаторні накопичувачі

енергії, при цьому існуючі схемні рушення не забезпечують двосторонній обмін енергією між накопичувачем та обмоткою збудження.

2. Запропонована схема конденсаторного накопичувального пристрою для регулювання струму збудження СД забезпечує високі показники форсування, зокрема для двигуна СДЕ2-15-34-6У2 з номінальним струмом збудження 270А до 200 А/с.

3. Живлення обмотки збудження від транзисторного перетворювача з ємнісним накопичувачем характерно наявністю пульсацій напруги, що обумовлено роботою транзисторного перетворювача, однак коефіцієнт форми напруги є меншим, ніж при живленні від тиристорного перетворювача.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Калентионок Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 375 с.
2. Слодарж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. – М.: Энергия, 1977. – 216 с.
3. Низимов В.Б., Колычев С.В., Сторожко В.С., Низимов Р.В. Управление синхронными двигателями с накопителями энергии в контуре возбуждения // Вісник КрНУ ім. М. Остроградського. – 2008. – №50. – С. 108-112.
4. Плахтина О.Г., Куцук А.С., Семенюк М.Б. Регулювання збудження синхронних електроприводів з компенсацією реакції якоря // Вісник НТУ «ХПІ». – 2010. – №28. – С. 421-422.
5. Низимов В.Б., Колычев С.В., Снижко А.А. Система параметрического пуска СД со ступенчатым накопителем энергии в обмотке возбуждения // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. – 2011. – №1(16). – С. 101-106.
6. Осипов О.И., Мельников В.В., Оськин А.А., Куций К.Л. Управление тиристорными возбудителями высоковольтных синхронных двигателей // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2008. – №26(126). – С. 56-60.
7. Мыцык Г.С., Бериллов А.В., Михеев В.В. Проектирование устройств силовой электроники (трансформаторно-полупроводниковые устройства): учебное пособие по курсам «Электронные энергетические системы». – Москва: Изд. дом МЭИ, 2010. – 282 с.
8. Routimo M., Salo M., Tuusa H. Comparison of voltage-source and current-source shunt active power filters // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2007. – no.2(22). – pp. 636-643.

REFERENCES

1. Kalentionok E.V. *Ustoichivost' elektroenergeticheskikh system* [The stability of electric power systems]. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ., 2008. 375 p. (Rus).
2. Slodazh M.I. *Rezhimy raboty, releinaia zashchita i avtomatika sinkhronnykh elektrodvigateli* [Safe mode works, relay protection and automation synchronous motors]. Moscow, Energiia Publ., 1977. 216 p. (Rus).
3. Nizimov V.B., Kolychev S.V., Storoshko V.S., Nizimov R.V. Control of synchronous motors with energy storage in circuit excitation. *Visnyk KrNU im. M. Ostrohradskoho – Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, 2008, no.50, pp. 108-112. (Rus).
4. Plahytina O.G., Kucyk A.S., Semenjuk M.B. Excitation regulation of synchronous electric drives with compensation of armature reaction. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2010, no.28, pp. 421-422. (Ukr).
5. Nizimov V.B., Kolychev S.V., Snizhko A.A. Parametric system start-up of a synchronous motor with a step-energy storage in the field winding. *Zbirnyk naukovykh prac' Dniprodzerzhyn'skogo derzhavnogo tekhnichnogo universytetu – The*

collection of scientific works of Dneprodzerzhinsk State Technical University, 2011, no.1(16), pp. 101-106. (Rus).

6. Osipov O.I., Mel'nikov V.V., Os'kin A.A., Kutsyi K.L. Control of thyristor exciters for high-voltage synchronous motors. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the South Ural State University*, 2008, no.26(126), pp. 56-60. (Rus).
7. Mytsyk G.S., Berilov A.V., Mikheev V.V. *Poiskovoe proektirovaniye ustroystv silovoi elektroniki: (transformatorno-poluprovodnikovyye ustroystva): uchebnoye posobie po kursam «Elektronnyye energeticheskiye sistemy»* [Exploratory design of power electronics devices (transformer-semiconductor devices): a textbook for the course "E-Energy Systems"]. Moscow, MEI Publ., 2010. 282 p. (Rus).
8. Routimo M., Salo M., Tuusa H. Comparison of voltage-source and current-source shunt active power filters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, no.2(22), pp. 636-643. doi: 10.1109/tpel.2006.890005.

Надійшла (received) 27.01.2015

Слободенюк Дмитро Володимирович¹, аспірант,
Бялобрзеський Олексій Володимирович¹, к.т.н., доц.,

¹Кременчуцький національний університет
ім. Михайла Остроградського,
39600, Полтавська обл., Кременчук, вул. Першотравнева, 20,
тел/phone +38 05366 30050,
e-mail: dv2907@mail.ru, seemal@kdu.edu.ua

D.V. Slobodeniuk¹, O.V. Bialobrzieski¹

¹Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University,
20, Pershotravneva Str., Kremenchuk, Poltava region, 39600,
Ukraine.

The capacitive storage device in the circuit of synchronous motor excitation for the field forcing and discharge.

Purpose. Development of circuitry and control system with capacitive storage device in the exciting circuit of the synchronous motor for forcing and blacking out the field. **Methodology.** Mathematical modeling of transient process in dynamic modes in exciting coil of the synchronous motor with taking into consideration the flux linkage in the exciting circuit and analysis of the received results, possible future researches in this field. **Results.** This paper analyzes the existing loading patterns of regulating exciting current of the synchronous motors. The authors study the issues of applying the storage device in the circuit coil and suggest the structure of the system of controlling dynamic modes of exciting synchronous motor which allows maintaining the specified synchronous motor exciting circuit during a certain period of time due to the capacitor energy introduced into the exciting circuit by a transistor converter. A mathematical model of the suggested device has been developed. There have been received diagrams of the transient process by modeling dynamic modes. **Originality.** The authors suggest the system of exciting with the storage condenser to apply effectively the compensative ability and enhance stability of the synchronous engine by regulating the exciting circuit in the dynamic modes. **Practical value.** On the basis of the conducted investigations the device ensures two-way transmission of energy between the exciting coil and capacitor with high characteristics of the circuit change speed which can provide sufficient characteristics for enhancing the automatic control system performance of exciting the synchronous motor is developed. References 8, figures 5.

Key words: synchronous motor, automatic control of exciting, relay control, transistor converter, storage condenser, mathematical model.

Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, И.В. Бовдуй, А.В. Волошко, Е.В. Виниченко, Д.А. Котляров

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ С РАЗЛИЧНЫМИ АЛГОРИТМАМИ УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОДНОЙ ОБМОТКИ

Мета. Розробка методики і проведення експериментальних досліджень макета системи активного екранування техногенного магнітного поля промислової частоти з різними алгоритмами управління за допомогою однієї обмотки магнітного виконавчого органу. Методика. В ході математичного моделювання визначаються геометричні розміри обмотки магнітного виконавчого органу виходячи з розмірів області, в якій здійснюється захист, а конфігурація обмотки магнітного виконавчого органу визначається виходячи з необхідної рівномірності розподілу магнітного поля. Результати. Проведено експериментальні дослідження розімкнутих, замкнутих і комбінованих систем активного екранування техногенного магнітного поля промислової частоти з однією обмоткою магнітного виконавчого органу. Наукова новизна. Вперше експериментально підтверджена можливість зменшення рівня індукції техногенного магнітного поля промислової частоти в заданій зоні в 3-5 раз з однією обмоткою магнітного виконавчого органу. Показана можливість зменшення рівня індукції магнітного поля в обмеженій зоні розглянутого простору в 15-20 раз. Практична значимість. На підставі проведених розрахунків був виготовлений макет системи активного екранування техногенного магнітного поля промислової частоти з різними алгоритмами управління за допомогою однієї обмотки магнітного виконавчого органу. Бібл. 12, рис. 10.

Ключові слова: техногенне магнітне поле промислової частоти, система активного екранування, одна обмотка, алгоритм управління, експериментальні дослідження.

Цель. Разработка методики и проведение экспериментальных исследований макета системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты с различными алгоритмами управления с помощью одной обмотки магнитного исполнительного органа. Методика. В ходе математического моделирования определяются геометрические размеры обмотки магнитного исполнительного органа исходя из размеров защищаемой области, а конфигурация обмотки магнитного исполнительного органа определяется исходя из требуемой равномерности распределения магнитного поля в защищаемой области. Результаты. Проведены экспериментальные исследования разомкнутых, замкнутых и комбинированных систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты с одной обмоткой магнитного исполнительного органа. Научная новизна. Впервые экспериментально подтверждена возможность уменьшения уровня индукции техногенного магнитного поля промышленной частоты в заданной зоне в 3-5 раз с одной обмоткой магнитного исполнительного органа. Показана возможность уменьшения уровня индукции магнитного поля в ограниченной зоне рассматриваемого пространства в 15-20 раз. Практическая значимость. На основании проведенных расчетов был изготовлен макет системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты с различными алгоритмами управления с помощью одной обмотки магнитного исполнительного органа. Библ. 12, рис. 10.

Ключевые слова: техногенное магнитное поле промышленной частоты, система активного экранирования, одна обмотка, алгоритм управления, экспериментальные исследования.

Введение. Магнитное поле техногенного происхождения является одним из экологических факторов, негативно влияющих на биологические объекты, и приводит к раковым заболеваниям. В связи с этим во всем мире проводятся интенсивные исследования и комплекс мероприятий по поддержанию параметров внутреннего магнитного поля на уровне магнитного поля Земли для выполнения экологических норм внутри рабочих помещений энергонасыщенных объектов, а также для создания комфортных условий жизни и работы.

Анализ последних достижений и публикаций по данной проблеме. Для уменьшения уровня техногенного магнитного поля разрабатываются системы пассивного активного и интегрированного экранирования [1-9]. Существующие системы активного экранирования техногенного магнитного поля, как правило, являются разомкнутыми. В работах [10-11] рассмотрены вопросы построения замкнутых систем компенсации магнитного поля технических объектов с различными способами формирования обратных связей. Однако в этих работах не проведены

экспериментальные исследования эффективности систем активного экранирования магнитного поля промышленной частоты.

В мировой практике [1-4] наиболее широкое распространение получили системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты внутри заданной области пространства с помощью одной обмотки магнитного исполнительного органа. Потому рассмотрим экспериментальные исследования эффективности макета такой системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты внутри заданной области пространства с помощью одной обмотки магнитного исполнительного органа с регулируемым током, установленной в зоне, где необходимо поддерживать параметры внутреннего магнитного поля в заданных пределах.

Целью данной работы является разработка методики экспериментальных исследований макета системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты с различными алгоритмами управления с помощью одной обмотки магнитного исполнительного органа. **Задачей работы** является прове-

дение экспериментальных исследований макета системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты с различными алгоритмами управления с помощью одной обмотки магнитного исполнительного органа и оценка эффективности системы активного экранирования магнитного поля.

Физическая модель и результаты экспериментальных исследований. Для проведения экспериментальных исследований систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты изготовлены физические макеты трехфазного токопровода для макетирования техногенного магнитного поля и самой системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты.

Внешний вид макета обмотки магнитного исполнительного органа и трехфазного токопровода показан на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид макета обмотки магнитного исполнительного органа и трехфазного токопровода

Наиболее простым магнитным исполнительным органом систем активного экранирования техногенного магнитного поля является одна обмотка, определенным образом расположенная относительно пространства, в котором необходимо уменьшить уровень техногенного магнитного поля промышленной частоты. Наиболее эффективно располагать эту обмотку таким образом, чтобы ее плоскость была ортогональна направлению вектора индукции техногенного магнитного поля, которое необходимо экранировать.

Геометрические размеры обмотки магнитного исполнительного органа определяют размеры защищаемой области [12], а конфигурация обмотки магнитного исполнительного органа определяет требуемую равномерность распределения магнитного поля в защищаемой области. В конструкции рамки предусмотрены держатели для крепления контрольно-измерительных приборов фирмы Lutron и трехкомпонентного измерительного индукционного преобразователя Д4/3-2. Контрольно-измерительные приборы фирмы Lutron моделей EMF-827 и EMF-828 используются для оценочного измерения величины индукции магнитного поля частотой 50 Гц в внутри заданной области пространства. Трехкомпонентный индукционный преобразователями Д4/3-2 используется для измерения величины индукции магнитного поля частотой 50 Гц в месте установки датчика поля и используется для формирования сигналов управления системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты внутри заданной области пространства.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований макета такой системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты с помощью одной обмотки магнитного исполнительного органа и экспериментально оценим эффективность системы активного экранирования техногенного магнитного поля при различных алгоритмах управления.

Наиболее простой системой активного экранирования техногенного магнитного поля по алгоритму управления является разомкнутая система управления, схема которой показана на рис. 2. В этой системе управления (СУ) используется датчик тока токопровода (ДТ), с помощью которого измеряется ток одного токопровода и при предположении о симметрии фазных токов могут быть восстановлены токи других токопроводов. Данные токопроводы являются источниками техногенного магнитного поля, по которому и может быть построена разомкнутая система компенсации этого техногенного магнитного поля – система активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты в заданном пространстве.

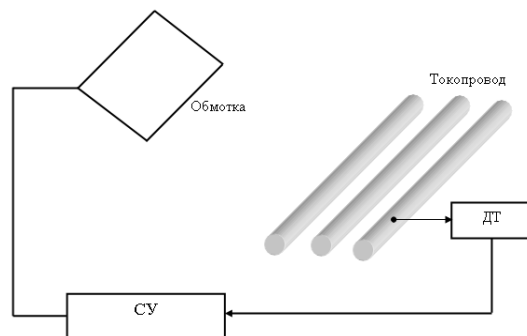


Рис. 2. Схема разомкнутой системы активного экранирования магнитного поля по датчику тока токопровода

Настройка усилителя и фазовращателя разомкнутой системы компенсации выполнена таким образом, что в центре обмотки достигается минимальное значение индукции магнитного поля, оставшегося после компенсации внешнего техногенного магнитного поля.

На рис. 3 показаны поверхности распределения индукции исходного магнитного поля в плоскости рамки и индукции магнитного поля с включенной системой управления обмоткой по датчику тока токопровода.

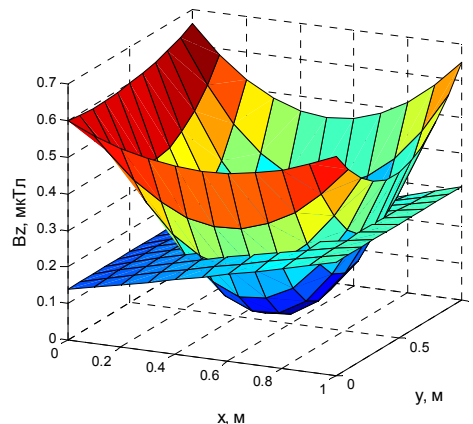


Рис. 3. Поверхности распределения индукции исходного техногенного магнитного поля и магнитного поля с включенной разомкнутой системой активного экранирования

В рассматриваемой разомкнутой системе в центре рамки обеспечивается уменьшение напряженности магнитного поля в 12 раз. Как видно из этого рисунка, система эффективно компенсирует магнитное поле только в центральной области рамки, на которую она настроена, однако по краям рамки система увеличивает уровень индукции магнитного поля почти в 6 раз за счет перекомпенсации.

Заданное пространство, в котором необходимо экранировать техногенное магнитное поле промышленной частоты с помощью системы активного экранирования, может быть образом расположено на различном расстоянии и различно ориентировано относительно токопроводов, являющихся источниками техногенного магнитного поля промышленной частоты. В рассмотренной системе обмотка магнитного исполнительного органа расположена на расстоянии – 3 м от токопровода. Проведем теперь экспериментальные исследования системы для случая, когда обмотка магнитного исполнительного органа расположена ближе к токопроводу – на расстоянии 1,2 м. По аналогии с ранее рассмотренной системой, выполним настройку усилителя и фазовращателя разомкнутой системы активного экранирования техногенного магнитного поля в заданном пространстве таким образом, чтобы минимальное значение индукции магнитного поля, оставшейся после активного экранирования внешнего техногенного магнитного поля, в достигало в центральной части обмотки магнитного исполнительного органа.

На рис. 4 показаны поверхности распределения индукции исходного магнитного поля в плоскости рамки и индукции магнитного поля с рассматриваемой включенной системой управления.

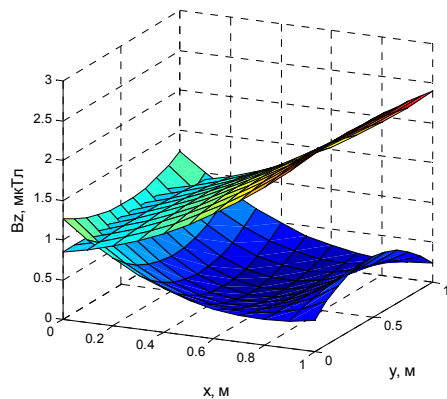


Рис. 4. Поверхности распределения индукции исходного техногенного магнитного поля и магнитного поля с включенной разомкнутой системой активного экранирования

Как видно из рис. 4, напряженность магнитного поля, оставшаяся после активного экранирования внешнего техногенного магнитного поля, уменьшилась примерно в 20 раз в центральной части обмотки, на которую и настраивалась система активного экранирования техногенного магнитного поля в заданном пространстве. Система управления эффективно экранирует уровень магнитного поля в центральной части обмотки и в области, расположенной ближе к токопроводу, однако в области пространства, удаленной от токопровода, система не значительно увеличивает уровень индукции исходного магнитного поля за счет

перекомпенсации. Такое распределение поля системы активного экранирования обусловлено ее настройкой на минимальное значение уровня индукции в центральной части рассматриваемой области, а само явление перекомпенсации, а в ряде случаев и весьма существенное, известно из многих работ [7].

Для построения замкнутой системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты необходимо иметь датчик, измеряющий индукцию магнитного поля непосредственно в рассматриваемой области пространства, где необходимо экранировать внешнее техногенное магнитное поле. Этот датчик магнитного поля может быть установлен в различных точках рассматриваемой области пространства, где необходимо экранировать внешнее техногенное магнитное поле. Вначале рассмотрим замкнутую систему по датчику магнитного поля, который расположен в центре обмотки. Схема такой системы показана на рис. 5.

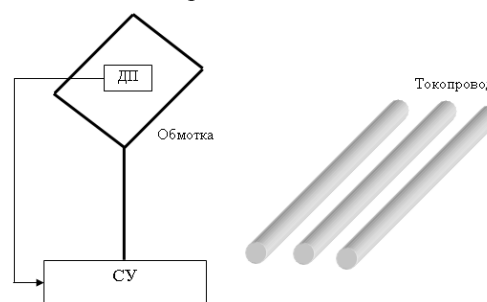


Рис. 5. Схема замкнутой системы по датчику поля, расположенному в центре обмотки

На рис. 6 показаны поверхности распределения магнитного поля в плоскости рамки в ее центральной части разомкнутой и замкнутой системы управления. Высокая эффективность компенсации в 5 раз уровня магнитного поля замкнутой системы проявляется только в зоне расположения датчика поля и по правому краю в 3 раза, а по левому краю рамки замкнутая система не только не компенсирует, а даже усиливает уровень магнитного поля.

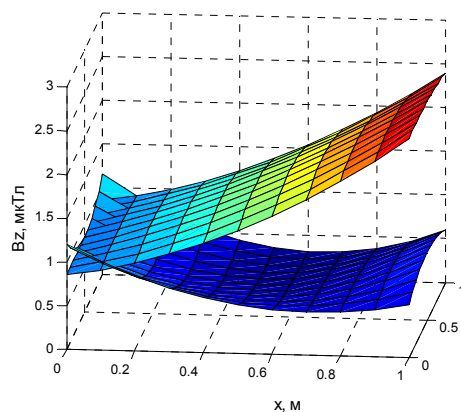


Рис. 6. Поверхности распределения индукции исходного техногенного магнитного поля и индукции магнитного поля с замкнутой системой активного экранирования по датчику поля, расположенному в центре обмотки

Рассмотрим теперь замкнутую систему, когда датчик магнитного поля расположен не в центре обмотки, а в некоторой точке рассматриваемого

пространства, удаленной от обмотки магнитного исполнительного органа системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты в заданном пространстве. Схема такой системы показана на рис. 7.

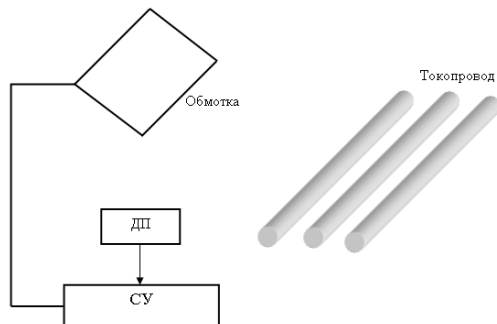


Рис. 7. Схема замкнутой системы компенсации магнитного поля по датчику, расположенному в стороне от обмотки

На рис. 8. показаны поверхности распределения в плоскости установки датчика поля индукции исходного магнитного поля и индукции магнитного поля с включенной системой активного экранирования поля по датчику, расположенному в стороне от обмотки.

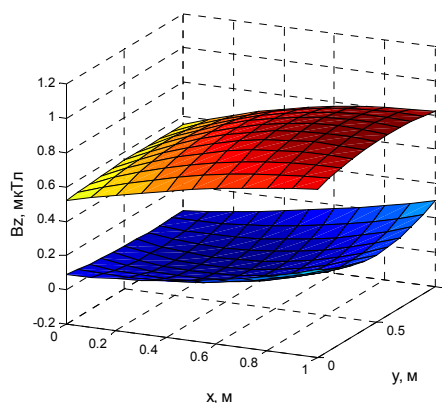


Рис. 8. Поверхности распределения индукции исходного магнитного поля и магнитного поля с включенной системой активного экранирования в плоскости установки датчика поля

Эффективность системы активного экранирования техногенного магнитного поля в плоскости установки датчика поля составляет около 5 во всей области.

Рассмотрим теперь замкнутую систему активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты по датчику поля, в качестве которого используется измерительная обмотка, намотанная на исполнительную обмотку. Схема такой системы показана на рис. 9.

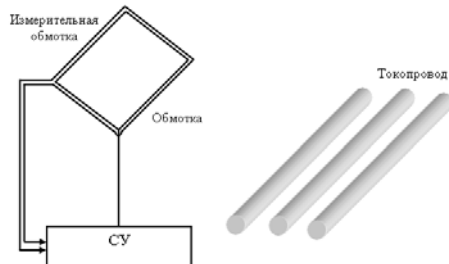


Рис. 9. Схема замкнутой системы активного экранирования с датчиком поля в виде измерительной обмотки

На рис. 10. показаны поверхности распределения индукции магнитного поля в центре рамки исходного техногенного магнитного поля и индукции магнитного поля, оставшегося после включения такой замкнутой системы. Эффективность системы активного экранирования техногенного магнитного поля в плоскости рамки составляет 1,6.

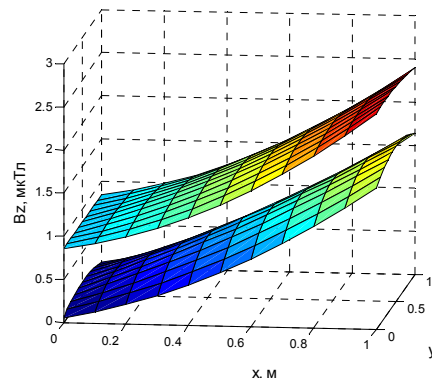


Рис. 10. Поверхности распределения индукции исходного магнитного поля и магнитного поля с включенной системой активного экранирования в плоскости установки датчика поля

Выводы.

1. Проведены экспериментальные исследования разомкнутых, замкнутых и комбинированных систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты с одной обмоткой магнитного исполнительного органа.

2. Экспериментально подтверждена возможность уменьшения уровня индукции техногенного магнитного поля промышленной частоты в заданной зоне в 3-5 раз с одной обмоткой магнитного исполнительного органа. Показана возможность уменьшения уровня индукции магнитного поля в ограниченной зоне рассматриваемого пространства в 15-20 раз.

3. Для дальнейшего повышения эффективности систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты необходимо синтезировать дополнительные обмотки магнитного исполнительного органа системы активного экранирования, с помощью которых потенциально можно достигнуть заданного уровня экранирования магнитного поля с помощью системы активного экранирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). <http://www.emfservices.com/afcs.html>.
2. Beltran H., Fuster V., García M. Magnetic field reduction screening system for a magnetic field source used in industrial applications // 9 Congreso Hispano Luso de Ingeniería Eléctrica (9 CHLIE), Marbella (Málaga). – 2005. – pp. 84-99.
3. Celozzi S., Garzia F. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization // IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology. – 2004. – Vol. 151. – № 1. – pp. 2-7.
4. Ter Brake H.J.M., Wieringa H.J., Rogalla H. Improvement of the performance of a μ -metal magnetically shielded room by means of active compensation (biomagnetic applications) // Measurement Science and Technology. – 1991. – Vol. 2(7). – pp. 596-601.
5. Yamazaki K., Kato K., Kobayashi K. MCG Measurement in the environment of active magnetic shield // Neurology and Clinical Neurophysiology. – 2004. – Vol. 40. – pp. 1-4.

6. Celozzi S. Active compensation and partial shields for the power-frequency magnetic field reduction // Conference Paper of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Minneapolis (USA). – 2002. – Vol. 1. – pp. 222-226.
7. Shenkman A., Sonkin N., Kamensky V. Active protection from electromagnetic field hazards of a high voltage power line // HAIT Journal of Science and Engineering. Series B: Applied Sciences and Engineering. – Vol. 2. – Issues 1-2, pp. 254-265.
8. Ter Brake H.J.M., Huonker R., Rogalla H. New results in active noise compensation for magnetically shielded rooms // Measurement Science and Technology. – 1993. – Vol. 4. – Issue 12. – pp. 1370-1375.
9. Kazuo Kato, Keita Yamazaki, Tomoya Sato, Akira Haga, Takashi Okitsu, Kazuhiro Muramatsu, Tomoaki Ueda, Masahito Yoshizawa. Shielding effect of panel type active magnetic compensation // IEEE Transactions on Fundamentals and Materials. – 2005. – Vol. 125. – Issue 2. – pp. 99-106.
10. Розов В.Ю., Ассуиров Д.А. Метод активного экранирования внешнего магнитного поля технических объектов // Технічна електродинаміка. – 2006. – №3. – С. 13-16.
11. Розов В.Ю., Ассуиров Д.А., Реуцкий С.Ю. Замкнутые системы компенсации магнитного поля технических объектов с различными способами формирования обратных связей // Технічна електродинаміка. – 2008. – №4. – С. 97-100.
12. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пилюгина О.Ю. Метод расчета магнитного поля трехфазных линий электропередачи // Технічна електродинаміка. – 2014. – №5. – С. 11-13.

REFERENCES

1. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). Available at: <http://www.emfservices.com/afcs.html> (accessed 10 September 2012).
2. Beltran H., Fuster V., García M. Magnetic field reduction screening system for a magnetic field source used in industrial applications. 9 Congreso Hispano Luso de Ingeniería Eléctrica (9 CHLIE), Marbella (Málaga, Spain), 2005, pp. 84-99.
3. Celozzi S., Garzia F. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization. IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology, 2004, Vol.151, no.1, pp. 2-7. doi: 10.1049/ip-smt:20040002.
4. Ter Brake H.J.M., Wieringa H.J., Rogalla H. Improvement of the performance of a mu-metal magnetically shielded room by means of active compensation (biomagnetic applications). Measurement Science and Technology, 1991, Vol. 2(7), pp. 596-601. doi: 10.1088/0957-0233/2/7/004.
5. Yamazaki K., Kato K., Kobayashi K. MCG Measurement in the environment of active magnetic shield. Neurology and Clinical Neurophysiology, 2004, Vol. 40, pp. 1-4.
6. Celozzi S. Active compensation and partial shields for the power-frequency magnetic field reduction. Conference Paper of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Minneapolis (USA), 2002, Vol. 1, pp. 222-226. doi: 10.1109/isemc.2002.1032478.
7. Shenkman A., Sonkin N., Kamensky V. Active protection from electromagnetic field hazards of a high voltage power line. HAIT Journal of Science and Engineering. Series B: Applied Sciences and Engineering, Vol. 2, Issues 1-2, pp. 254-265.
8. Ter Brake H.J.M., Huonker R., Rogalla H. New results in active noise compensation for magnetically shielded rooms. Measurement Science and Technology, 1993, Vol. 4, Issue 12, pp. 1370-1375. doi: 10.1088/0957-0233/4/12/010.
9. Kazuo Kato, Keita Yamazaki, Tomoya Sato, Akira Haga, Takashi Okitsu, Kazuhiro Muramatsu, Tomoaki Ueda, Masahito Yoshizawa. Shielding effect of panel type active magnetic compensation. IEEE Transactions on Fundamentals and Materials, 2005, Vol. 125, Issue 2, pp. 99-106. doi: 10.1541/ieejfms.125.99.

10. Rozov V.Yu., Assiurov D.A. Method of external magnetic field active shielding of technical objects. Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics, 2006, no.3, pp. 13-16. (Rus).
11. Rozov V.Yu., Assiurov D.A., Reyskiy S.Yu. Technical objects magnetic-field closed loop compensation systems with different feed-backs forming. Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics, 2008, no.4, pp. 97-100. (Rus).
12. Rozov V.Yu., Reyskiy S.Yu., Pyliugina O.Yu. The method of calculation of the magnetic field of three-phase power lines. Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics, 2014, no.5, pp. 11-13. (Rus).

Поступила (received) 20.11.2014

Кузнецов Борис Иванович¹, д.т.н., проф.,
Никитина Татьяна Борисовна², д.т.н., проф.,
Бовдуй Игорь Валентинович¹, к.т.н., н.с.,
Волошко Александр Валерьевич¹, к.т.н., н.с.,
Виниченко Елена Владимировна¹, м.н.с.,
Котляров Денис Александрович¹, аспирант,

¹ Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма Национальной Академии Наук Украины», 61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19, тел/phone +38 050 5766900, e-mail: bikuznetsov@mail.ru
² Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Харьков, ул. Петровского, 25, e-mail: tatjana55555@gmail.com

B.I. Kuznetsov¹, T.B. Nikitina², I.V. Bovydy¹, A.V. Voloshko¹,
E.V. Vinichenko¹, D.A. Kotliarov¹

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

² Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

Experimental research of the power frequency technogenic magnetic field active screening in system with different control algorithms and with a single coil.

Purpose. Development of methodology and experimental studies of the layout of the active screening of technogenic power frequency magnetic fields with different control algorithms with a single coil magnetic executive body. **Methodology.** In the course of mathematical modeling to determine geometrical size of the magnetic coil executive body based on the size of the protected area, and the configuration of the coil magnetic executive body is determined based on the required uniformity of the magnetic field distribution in the protected area. **Results.** Experimental studies of open, closed and combined systems of active screening of technogenic power frequency magnetic fields with a single coil magnetic executive body. **Originality.** For the first time experimentally confirmed the possibility of reducing the level of induction of man-made power frequency magnetic fields in a given area 3-5 times with a single coil magnetic executive body.. The possibility of reducing the level of the magnetic field in a limited area of the space by 15-20 times **Practical value.** On the basis of the calculations the layout of active screening of technogenic power frequency magnetic fields with different control algorithms with a single coil magnetic executive body has been made. References 12, figures 10.

Key words: power frequency technogenic magnetic field, active screening in system, single coil, control algorithms, experimental investigations.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С СОГЛАСУЮЩИМИ РЕДУКТОРАМИ И ТРАНСФОРМАТОРАМИ

Досліджено роботу різних асинхронних двигунів у складі регульованих електроприводів, що виконують одну і ту ж технічну задачу, з урахуванням включення таких елементів, як узгоджувальні трансформатор і редуктор. Зроблено зіставлення характеристик двигунів в статичних та динамічних режимах. Визначено енергетичні, массогабаритно-вартісні показники електроприводів. Обґрунтовано можливість вибору кращого варіанту приводу, як за вищевказаними показниками, так і за вартістю втрат активної енергії. Бібл. 12, табл. 2, рис. 10.

Ключові слова: асинхронний електропривод, редуктор, трансформатор, регульований асинхронний двигун, регульовальні характеристики, динамічні моделі, тепловий стан, діапазонні критерії, вартість втрат, обґрунтований вибір.

Исследована работа разных асинхронных двигателей в составе регулируемых электроприводов, которые выполняют одну и ту же техническую задачу, с учетом включения таких элементов, как согласующие трансформатор и редуктор. Проведено сопоставление характеристик двигателей в статических и динамических режимах. Определены энергетические, массогабаритностоймостные показатели электроприводов. Обоснована возможность выбора лучшего варианта привода, как по вышеуказанным показателям, так и по стоимости потерь активной энергии. Библ. 12, табл. 2, рис. 10.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, редуктор, трансформатор, регулируемый асинхронный двигатель, регулировочные характеристики, динамические модели, тепловое состояние, диапазонные критерии, стоимость потерь, обоснованный выбор.

Введение. Разнообразие систем асинхронных регулируемых электроприводов (РЭП) характеризуется включением в них таких элементов, как согласующих редукторов и трансформаторов. Использование этих элементов значительно изменяет эксплуатационные характеристики РЭП. Большинство статей посвящено моделированию электроприводов, как в статических, так и в динамических режимах, без таких элементов [1-4] и целесообразно рассмотреть моделирование РЭП, когда применяются эти элементы.

Постановка задачи. Для формирования моделей согласующих трансформаторов и редукторов следует ввести ряд их исходных данных, определяющих как функциональные свойства, так и массогабаритностоймостные показатели. Последние дают возможность рассмотреть экономические аспекты РЭП. К числу функциональных относятся: для редуктора – передаточное число ($i_{ред}$), для трансформатора – коэффициент трансформации ($k_{тр}$). Корректность расчета энергетического баланса электропривода требует использования КПД рассматриваемых элементов ($\eta_{ред}$, $\eta_{тр}$).

Моделируя РЭП с включением редукторов и трансформаторов в статических и динамических режимах определяются частота вращения ($n_{мех}$), момент на приводном механизме ($M_{мех}$), потребляемая приводом мощность ($P_{РЭП}$), КПД привода ($\eta_{РЭП}$), мощность нагрузочного механизма ($P_{мех}$). Кроме того, представляется возможным рассчитать массогабаритностоймостные показатели всего РЭП при использовании тех или иных рассматриваемых компонентов.

Выражения, учитывающие включение редуктора и трансформатора в РЭП при рассмотрении статических режимов, имеют вид:

$$\begin{aligned} n_{мех} &= \frac{n}{i_{ред}}, \quad M_{мех} = M_{дв} \cdot i_{ред} \cdot \eta_{ред}, \\ M_{мех} &= M_{дв} \cdot i_{ред} \cdot \eta_{ред}, \quad P_{мех} = P_{дв} \cdot \eta_{ред}, \\ P_{РЭП} &= P_1 + (1 - \eta_{тр}) \cdot P_1 + (1 - \eta_{ред}) \cdot P_1 + (1 - \eta_{тр}) \cdot P_1, \\ \eta_{РЭП} &= \eta_{АД} \cdot \eta_{тр} \cdot \eta_{ред} \cdot \eta_{тр}, \quad U_2 = U_{вх} / k_{тр}, \end{aligned}$$

где $M_{дв}$ – момент на валу двигателя; $P_{дв}$ – механическая мощность на валу двигателя; P_1 – потребляемая двигателем активная мощность; $\eta_{тр}$ – КПД преобразователя; $U_{вх}$ – первичное напряжение трансформатора; U_2 – вторичное напряжение трансформатора.

Математические модели (ММ), используемые для исследования переходных электромагнитных и электромеханических процессов в регулируемых асинхронных двигателях, основаны на системах нелинейных дифференциальных уравнений равновесия напряжений и токов в системе преобразованных координат [5, 6].

$$\frac{d}{dt} \Psi_{s\alpha} = u_{s\alpha}(t) - r_s d(t) [x_r \Psi_{s\alpha}(t) - x_M(t) \Psi_{s\alpha}(t)],$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{s\beta} = u_{s\beta}(t) - r_s d(t) [x_r \Psi_{s\beta}(t) - x_M(t) \Psi_{s\beta}(t)],$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{r\alpha} = (-p\omega_r \cdot i_{ред} \Psi_{s\beta}(t) - r_r(t) d(t) (x_s(t) \Psi_{r\alpha}(t) - x_M(t) \Psi_{s\alpha}(t))),$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{r\beta} = (p\omega_r \cdot i_{ред} \Psi_{s\beta}(t) - r_r(t) d(t) (x_s(t) \Psi_{r\beta}(t) - x_M(t) \Psi_{s\beta}(t))),$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \left\{ \frac{3p}{2} d(t) x_M(t) [\Psi_{s\beta}(t) \Psi_{s\alpha}(t) - \Psi_{s\beta}(t) \Psi_{s\alpha}(t)] - M_c(\omega_r) \cdot \eta_{ред} \right\},$$

где $\Psi_{s\alpha}(t)$, $\Psi_{s\beta}(t)$, $\Psi_{r\alpha}(t)$ и $\Psi_{r\beta}(t)$ – потокосцепления статорных и роторных обмоток по осям α и β ; ω_r – угловая частота вращения механизма; p – число пар полюсов; J – суммарный момент инерции привода, приведенный к валу двигателя; $M_c(\omega_r)$ – зависимость момента сопротивления механизма от частоты вращения; r_s , $r_r(t)$, $x_s(t)$, $x_r(t)$, $x_M(t)$ – активные и полные реактивные сопротивления обмоток статора и ротора и сопротивление взаимной индукции; $d(t)$ – вспомогательная переменная $d(t) = [x_s(t) \cdot x_r(t) - (x_M(t))^2]^{-1}$; $u_{s\alpha}(t)$ и $u_{s\beta}(t)$ – мгновенные

значения напряжений по осям α и β , которые определяются амплитудой напряжения U_m (зависящей от закона частотного управления) и угловым положением обобщенного вектора напряжения φ_1

$$u_{s\alpha}(t) = U_m(t) \cdot \cos(\varphi_1), \quad u_{s\beta}(t) = U_m(t) \cdot \sin(\varphi_1),$$

при этом система дополняется еще двумя дифференциальными уравнениями

$$\frac{d}{dt} \varphi_1 = \omega_1 \quad \text{и} \quad \frac{d}{dt} \omega_1 = \varepsilon_1(t),$$

где ω_1 – угловая частота вращения, а $\varepsilon(t)$ – график угловых ускорений обобщенного вектора напряжения, определяемый задаваемой тахограммой движения привода. Выражения, связывающие мгновенные значения токов и потокосцеплений, имеют следующий вид:

$$i_{s\alpha}(t) = d(t) \cdot [x_r(t) \Psi_{s\alpha}(t) - x_M(t) \Psi_{s\beta}(t)], \\ i_{s\beta}(t) = d(t) \cdot [x_r(t) \Psi_{s\beta}(t) - x_M(t) \Psi_{s\alpha}(t)],$$

где $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ – токи статора по осям α и β .

Действующее значение тока статора

$$i_1(t) = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [i_{s\alpha}(t)^2 + i_{s\beta}(t)^2]}.$$

В каждом из уравнений имеют место нелинейные коэффициенты – параметры двигателя, изменяющиеся в каждой рабочей точке, в том числе и вследствие явлений насыщения магнитной системы и вытеснения тока в обмотке ротора [7]. При расчетах динамических режимов учитываются изменения на каждом шаге интегрирования системы, т.е. в определенных точках характеристики перехода от одной частоты вращения к другой, величин и частот питающего напряжения в соответствии с используемым законом частотного регулирования, параметров схемы замещения. При нагрузках вентиляторного и тягового характера изменяется также момент нагрузки, значение которого, соответствующее угловой частоте вращения привода, определяется по нагрузочной характеристике.

Потребляемая двигателем условная активная мощность в динамических режимах рассчитывается через действующие значения напряжений и токов

$$P_1' = \frac{3}{2} \cdot [U_{s\alpha} \cdot I_{s\alpha} + U_{s\beta} \cdot I_{s\beta}]$$

Реальная потребляемая активная мощность P_1 больше условной на величину суммы неучтенных потерь (в магнитопроводе, добавочных, механических)

$$P_1 = P_1' + \Delta P_{ст\text{ осн}} + \Delta P_{ст\text{ доб}} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб}.$$

Мощность на валу двигателя может быть определена через потокосцепления и токи с использованием значения частоты вращения ротора

$$P_2 = \omega_r \frac{3p}{2} [I_{r\beta} \Psi_{r\alpha} - I_{r\alpha} \Psi_{r\beta}] - \Delta P_{мех} - \Delta P_{доб}.$$

Мгновенное значение КПД определяется отношением мгновенных значений мощности на валу двигателя P_2 к потребляемой активной мощности P_1 .

Результаты исследований. При моделировании РЭП в соответствии с принципами системного подхода необходимо совместное рассмотрение преобразователей, двигателей и нагрузок, а также редукторов и согласующих трансформаторов [8]. На кафедре элект-

рических машин Одесского национального политехнического университета разработан программный продукт DIMASDrive [9], позволяющий осуществить такое моделирование.

С целью ограничения исследований дальше рассмотрен РЭП с транзисторным преобразователем частоты с автономным инвертором напряжения и ШИМ-регулированием. Рассматривался закон частотного управления $U/f = \text{const}$. В качестве нагрузки использовалась тяговая нагрузка, $P_{нагр} = 35$ кВт с максимальным моментом 1500 Н·м. При заданной постоянной по величине нагрузке, требуемый диапазон регулирования (30-250 об/мин) в системах РЭП может быть обеспечен разными двигателями, при условии включения редукторов и трансформаторов.

Рассмотрены три варианта РЭП при напряжении питающей сети 400 В и частоте сети 60 Гц.

Для безредукторного РЭП (рис. 1) выбран двигатель 4A355M12, работающий с частотным преобразователем (Mitsubishi FR-A 540 L-G EC, 57000 у.е., 75 кг, $\eta_{np} = 0,98$) [10].

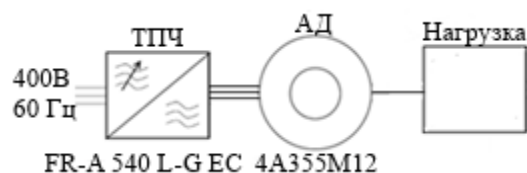


Рис. 1. Структурная схема безредукторного РЭП

Для РЭП с редуктором (рис. 2) выбран двигатель 4A250M4, работающий с частотным преобразователем (Mitsubishi FR-A 540 L-G EC, 57000 у.е., 75 кг, $\eta_{np} = 0,98$) и редуктором (1ЦУ200, 1000 у.е., 135 кг, $\eta_{ред} = 0,98$, $i_{ред} = 6,3$) [10, 11].

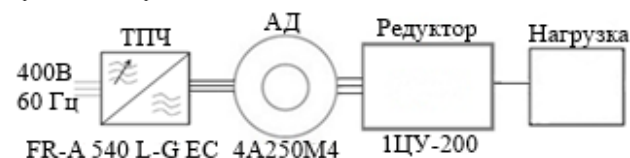


Рис. 2. Структурная схема РЭП с редуктором

Для РЭП с трансформатором и редуктором (рис. 3) выбран двигатель 4A200L4, повышающий трансформатор (1000 у.е., 510 кг, $\eta_{тр} = 0,98$, $\kappa_{тр} = 0,8$), редуктор (1ЦУ-200, 1000 у.е., 170 кг, $\eta_{ред} = 0,98$, $i_{ред} = 10$) и транзисторный преобразователь частоты (Mitsubishi FR-A 540 EC, 33468 у.е., 35 кг, $\eta_{np} = 0,98$) [10-12].

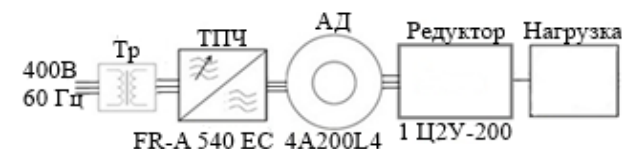


Рис. 3. Структурная схема РЭП с редуктором и трансформатором

Регулировочные характеристики, представляющие собой зависимости изменения электрических, энергетических и тепловых величин от числа оборотов, могут быть получены при использовании семейств характеристик, в том числе и механических, при различных параметрах регулирования, на которые накладываются характеристики нагрузочного

механизма. На рис. 4. представлено семейство механических характеристик двигателя и заданной нагрузки, соответствующие структурной схеме, изображенной на рис. 3.

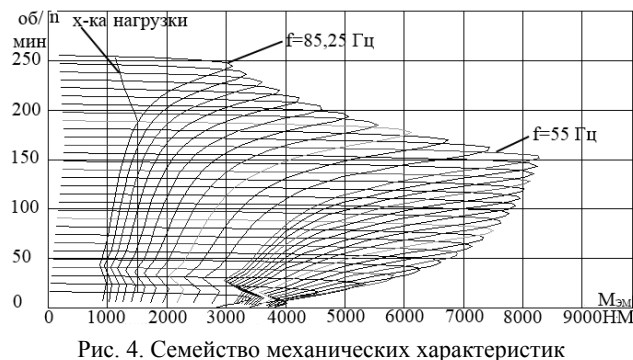


Рис. 4. Семейство механических характеристик

На рис. 5 – 7. представлены регулировочные характеристики рассматриваемых РЭП.

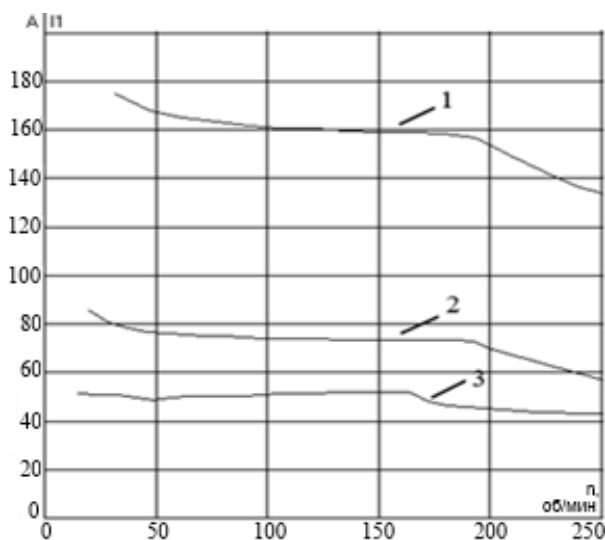


Рис. 5. Изменение потребляемых двигателями токов в диапазоне регулирования: 1 – РЭП без редуктора, 2 – РЭП с редуктором, 3 – РЭП с редуктором и трансформатором

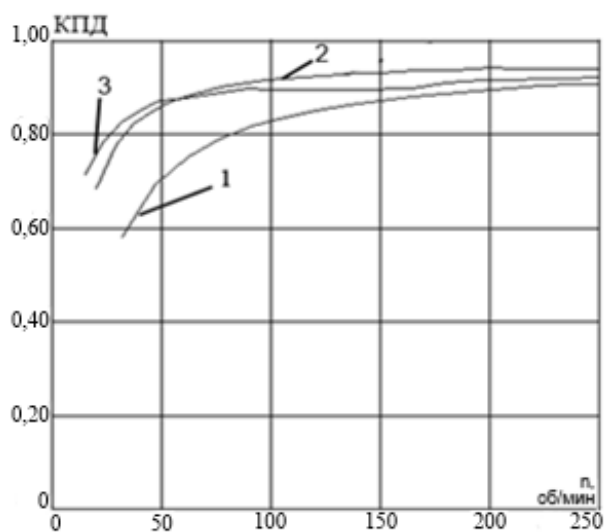


Рис. 6. Характеристики КПД двигателей в диапазоне регулирования: 1 – РЭП без редуктора, 2 – РЭП с редуктором, 3 – РЭП с редуктором и трансформатором

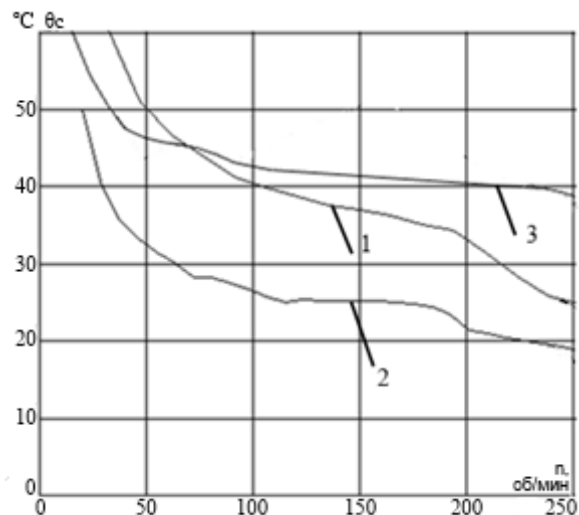


Рис. 7. Изменение температур статорных обмоток двигателя в диапазоне регулирования: 1 – РЭП без редуктора, 2 – РЭП с редуктором, 3 – РЭП с редуктором и трансформатором

При таком сочетании механических характеристик и нагрузки наблюдается трехзонность, которая проявляется на характере регулировочных характеристик. В пределах каждой зоны имеет место однообразное изменение механических характеристик двигателя и характеристики нагрузки.

В табл. 1 приведены значения показателей рассмотренных РЭП, к числу которых относятся среднедиапазонные КПД ($\eta_{ср}$) и приведенные затраты ($\Pi З_{ср}$), а также массагабаритстоимостные показатели как двигателей, так и приводов.

Таблица 1

Сравнение показателей различных РЭП

Показатели и параметры	РЭП		
	Без редуктора и трансформатора	С редуктором	С редуктором и трансформатором
$\eta_{ср}$ АД, %	88	93,55	90,34
$\cos \varphi_{ср}$ АД, о.е.	0,76	0,89	0,64
$\eta_{ср}$ РЭП, %	86,31	89,9	85,23
$\Pi З_{ср}$ АД, у.е.	102926	10908	44690
$\Pi З_{ср}$ РЭП, у.е.	205991	108381	118600
Масса АД, кг	1670	560	325
Объем АД, $дм^3$	161,7	75,6	34
Стоимость АД, у.е.	18039	5437	3294
Масса РЭП, кг	1745	770	1040
Объем РЭП, $дм^3$	290,7	255,6	666
Стоимость РЭП, у.е.	75039	63437	38762

Также выполнено моделирование для каждого схемного решения РЭП при работе на заданную тахограмму (пуск 1,5 с на 150 об/мин, 1 с – 185 об/мин) с учетом переходных процессов.

На рис. 8 – 10 представлены характеристики, полученные при моделировании работы рассмотренных РЭП на заданную тахограмму.

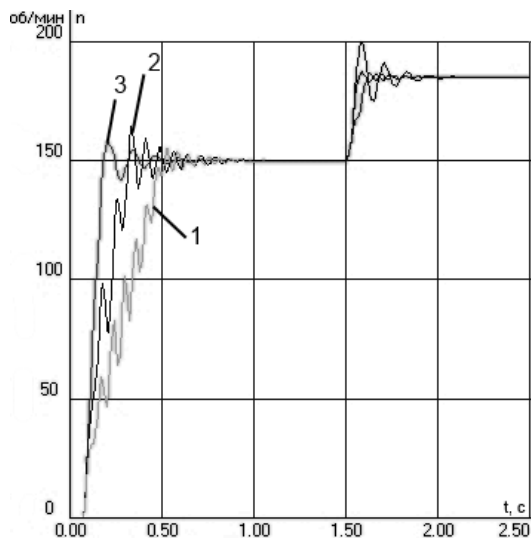


Рис. 8. Характеристики частот вращения механизма:
1 – РЭП без редуктора, 2 – РЭП с редуктором,
3 – РЭП с редуктором и трансформатором

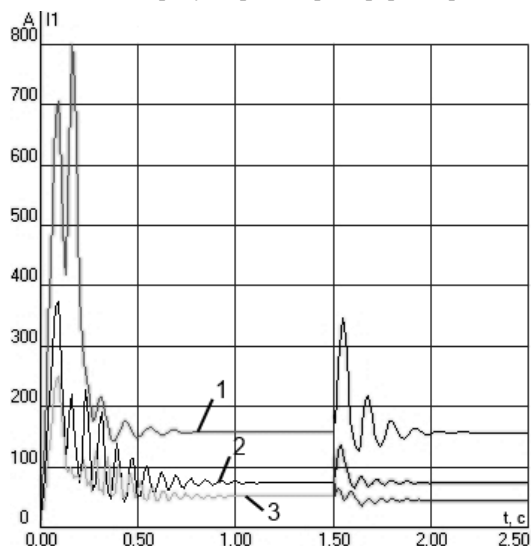


Рис. 9. Характеристики потребляемых двигателями токов:
1 – РЭП без редуктора, 2 – РЭП с редуктором,
3 – РЭП с редуктором и трансформатором

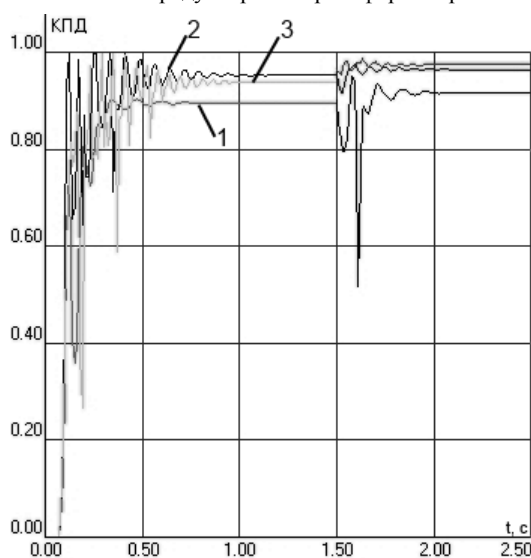


Рис. 10. Характеристики КПД двигателей:
1 – РЭП без редуктора, 2 – РЭП с редуктором,
3 – РЭП с редуктором и трансформатором

Может быть выполнен расчет стоимости потерь активной энергии за год:

$$C_a = C_a \cdot T_{\text{год}} \cdot K_3 \cdot P_{\text{мех}} \times (1 + 0,04 - \eta_{\text{РЭП}}) / \eta_{\text{РЭП}},$$

где $C_a = 0,65$ грн – цена за 1 кВт·ч; $T_{\text{год}} = 3000$ – число часов работы РЭП в году; K_3 – коэффициент загрузки (принимается равным 1,0); 0,04 – относительная величина потерь в распределительной сети потребителя.

Выполнено сопоставление рассмотренных вариантов РЭП по стоимости потерь активной энергии за год (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение стоимостей потерь активной энергии различных РЭП

Показатели и параметры	РЭП		
	Без редуктора и трансформатора	С редуктором	С редуктором и трансформатором
$\eta_{\text{ср}} \text{ РЭП, \%}$	86,3	89,9	85,2
Стоимость потерь активной энергии за год, грн	11600	8840	12480

Выводы.

1. На основании моделирования различных РЭП, в том числе включающих редуктор и согласующий трансформатор и обеспечивающих требуемый диапазон регулирования на заданную по величине и характеру нагрузку, исследована работа разных двигателей, в результате чего проведено сопоставление характеристик двигателей в статических и динамических режимах, определены энергетические, массогабаритно-стоимостные показатели электроприводов.

2. Проведенные исследования дают возможность обосновать выбор лучшего варианта привода в зависимости от выбранного критерия, в том числе и критерия стоимости потерь активной энергии.

3. Аналогично может быть проведено моделирование разнообразных РЭП с редукторами и трансформаторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
2. Чермалых В.М., Чермалых А.В., Майданский И.Я. Исследование динамики и энергетических показателей асинхронного электропривода с векторным управлением // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – №30. – С. 41-45.
3. Мощинский Ю.А., Аунг Вин Тут. Обобщенная математическая модель частотно-регулируемого асинхронного двигателя с учетом потерь в стали // Электричество. – 2007. – №11. – С. 60-66.
4. Khezzer A., El Kamel Oumaamar M., Hadjami M., Bouchenna M., Razik H. Induction motor diagnosis using line neutral voltage signatures. IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2009 (Nov.). – vol.56. – no.11. – pp. 4581-4591.
5. Шестаков А.В. Математическая модель рабочих характеристик асинхронных двигателей с частотным управлением // Электротехника. – 2011. – №2. – С. 23-29.
6. Nandi S., Toliyat H.A., Li X. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors – a review. IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2005 (Dec.). – vol.20. – no.4. – pp. 719-729.

7. Петрушин В.С., Якимец А.М. Моделирование динамических режимов асинхронных двигателей при частотном регулировании // Вісник НТУ «ХПІ». – №10. – С. 156-157.
8. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе: Учебное пособие. – Одесса: Наука и техника, 2006. – 320 с.
9. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Программный продукт «DIMASDrive». Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода (свидетельство о регистрации программы ПА№4065). – К.: Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.
10. Частотные преобразователи. Серия FR-A 540. – Режим доступа: <http://univolts.ru/trademap/electric/mitsubishi/invertors/fra540/>.
11. Завод приводной техники. Характеристики редукторов. Основные технические данные редукторов. – Режим доступа: <http://www.reduktor-ptp.ru/>.
12. Производство трансформаторов. Характеристики трансформаторов. Основные технические данные трансформаторов. – Режим доступа: <http://transtechno2.ru/produktsiya-3/>.

REFERENCES

1. Shreiner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektropriwodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC drives with solid state frequency converters]. Ekaterinburg, URO RAN Publ., 2000. 654 p. (Rus).
2. Chermalykh V.M., Chermalykh A.V., Maidanskii I.Ia. Study of the dynamics and energy performance of asynchronous electric drive with vector control. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2008, no.30, pp. 41-45. (Rus).
3. Moshchinskii Iu.A., Aung Vin Tut. Generalized mathematical model of frequency controlled induction motor considering iron loss. *Elektrichestvo – Electricity*, 2007, no.11, pp. 60-66. (Rus).
4. A. Khezzar, M. El Kamel Oumaamar, M. Hadjami, M. Boucherma, H. Razik. Induction motor diagnosis using line neutral voltage signatures. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009 (Nov.), vol.56, no.11, pp. 4581-4591. doi: 10.1109/tie.2008.2010209.
5. Shestakov A.V. A mathematical model of the performance of asynchronous motors with frequency control]. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2011, no.2, pp. 23-29. (Rus).
6. S. Nandi, H.A. Toliyat, X. Li. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors – a review. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005 (Dec.), vol.20, no.4, pp. 719-729. doi: 10.1109/tec.2005.847955.
7. Petrushin V.S., Yakimets A.M. Simulation of dynamic modes of induction motors with frequency regulation. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2001, no.10, pp. 156-157. (Rus).
8. Petrushin V.S. *Asinhronnye dvigateli v reguliruemom elektroprihode: Uchebnoe posobie* [Induction motors in adjustable electric: Textbook]. Odessa, Nauka i tehnika Publ., 2006. 320 p. (Rus).
9. Petrushin V.S., Rjabinin S.V., Jakimec A.M. *Programmnyy produkt "DIMASDrive". Programma analiza raboty, vybora i proektirovaniya asinhronnykh korotkozamknytykh dvigatelej sistem reguliruemogo jelektroprihoda* [Program performance analysis, selection and design of asynchronous cage motors controlled drive systems]. Patent UA, no.4065.
10. *Chastotnye preobrazovateli. Seriya FR-A 540* (Frequency converters. Series FR-A 540) Available at: <http://univolts.ru/trademap/electric/mitsubishi/invertors/fra540/> (accessed 13 September 2012).
11. *Zavod privodnoi tekhniki. Kharakteristiki reduktorov. Osnovnye tekhnicheskie dannye reduktorov* (Plant drive technology. Features reducers. Main technical data reducers) Available at: <http://www.reduktor-ptp.ru/> (accessed 18 March 2013).

12. *Proizvodstvo transformatorov. Kharakteristiki transformatorov. Osnovnye tekhnicheskie dannye transformatorov* (Production of transformers. Characteristics of transformers. Main technical data transformers) Available at: <http://transtechno2.ru/produktsiya-3/> (accessed 08 April 2013).

Поступила (received) 21.01.2015

Петрушин Виктор Сергеевич¹, д.т.н., проф.,
Якимец Андрей Миронович¹, к.т.н., доц.,
Еноктаев Ростислав Николаевич¹, магистр,
¹ Одесский национальный политехнический университет,
65044, Одесса, пр. Шевченко, 1,
тел/phone +38 048 7058494,
e-mail: victor_petrushin@ukr.net, yakimets_andriy@ukr.net,
rostik-enok@inbox.ru

V.S. Petrushin¹, A.M. Yakimets¹, R.N. Jenoktajev¹
¹ Odessa National Polytechnic University,
1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine.

Modeling controlled asynchronous electric drives with matching reducers and transformers.

Purpose. Working out of mathematical models of the speed-controlled induction electric drives ensuring joint consideration of transformers, motors and loadings, and also matching reducers and transformers, both in static, and in dynamic regimes for the analysis of their operating characteristics. **Methodology.** At mathematical modelling are considered functional, mass, dimensional and cost indexes of reducers and transformers that allows observing engineering and economic aspects of speed-controlled induction electric drives. The mathematical models used for examination of the transitive electromagnetism and electromechanical processes, are grounded on systems of nonlinear differential equations with nonlinear coefficients (parameters of equivalent circuits of motors), varying in each operating point, including owing to appearances of saturation of magnetic system and current displacement in a winding of a rotor of an induction motor. For the purpose of raise of level of adequacy of models a magnetic circuit iron, additional and mechanical losses are considered. **Results.** Modelling of the several speed-controlled induction electric drives, different by components, but working on a loading equal on character, magnitude and a demanded control range is executed. At use of characteristic families including mechanical, at various parameters of regulating on which performances of the load mechanism are superimposed, the adjusting characteristics representing dependences of a modification of electrical, energy and thermal magnitudes from an angular speed of motors are gained. **Originality.** The offered complex models of speed-controlled induction electric drives with matching reducers and transformers, give the chance to realize well-founded sampling of components of drives. They also can be used as the design models by working out of speed-controlled induction motors. **Practical value.** Operating characteristics of various speed-controlled induction electric drives are observed and depending on the chosen measure including measure of cost of losses of active energy, sampling of the best alternative of the drive is realized. References 12, tables 2, figures 10.

Key words: induction electric drive, reducer, transformer, an speed-controlled induction motor, adjusting characteristics, dynamic models, thermal state, band measure, cost of losses, well-founded sampling.

ЭКРАНИРОВАНИЕ ОДНОРОДНОГО ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИМ КОЛЬЦОМ

Шляхом аналітичного та чисельного моделювання досліджено ефективність екранування однорідного гармонійного магнітного поля за допомогою електропровідного кільця. Встановлено залежності коефіцієнту екранування від радіуса кільця та його поперечного перерізу. Визначено параметри електропровідного кільця, застосування якого дозволяє знизити діюче значення магнітної індукції на 30 %. Бібл. 11, рис. 5.

Ключові слова: електропровідне кільце, електромагнітне екранування, аналітичне моделювання, Comsol Multiphysics.

Путем аналитического и численного моделирования исследована эффективность экранирования однородного гармонического магнитного поля при помощи электропроводящего кольца. Установлены зависимости коэффициента экранирования от радиуса кольца и его поперечного сечения. Определены параметры электропроводящего кольца, применение которого позволяет снизить действующее значение магнитной индукции на 30 %. Библ. 11, рис. 5.

Ключевые слова: электропроводящее кольцо, электромагнитное экранирование, аналитическое моделирование, Comsol Multiphysics.

Введение. Наличие ограничений по уровню низкочастотного магнитного поля (МП), в котором может стабильно работать современная электронная аппаратура, а также его негативное влияние на здоровье человека вызывают необходимость снижения магнитной индукции до допустимых значений.

Распространенным методом снижения МП является применение пассивных экранов различных типов. Для снижения уровня МП в локальной области применяются магнитостатические (магнитные) и электромагнитные экраны. Обычно такие экраны выполняются в форме короба или цилиндра [1-3]. Известны экраны, имеющие форму специфических тел вращения [4]. Для снижения МП в широкой области, например, вдоль трасс линий электропередачи, используют контурные экраны, представляющие собой один или несколько короткозамкнутых витков. В литературе широко рассмотрены контурные экраны для снижения МП воздушных линий электропередачи, выполненные в форме вытянутых прямоугольников [5-7]. Возможность применения контурных экранов для снижения МП в локальной области детально не изучена.

Электропроводящее кольцо является простейшим пассивным контурным экраном. Его использование для снижения однородного гармонического МП предложено в [1, с. 50]. Однако не было найдено распределение экранированного МП, не определена зависимость коэффициента экранирования от координат точки наблюдения, не рассмотрены массивные кольца. Решению этих задач посвящена настоящая статья.

Аналитическое решение. Рассмотрим электропроводящее кольцо радиуса r_1 с круглым поперечным сечением радиуса r_2 , находящееся в однородном гармоническом МП $\vec{B}_0$ промышленной частоты 50 Гц (рис. 1).

Внешнее МП индуцирует в кольце ток проводимости, этот ток создает противоположно направленное вторичное МП. В результате суперпозиции внешнего и вторичного МП образуется результирующее поле, магнитная индукция которого в центральной области кольца меньше B_0 . Для достижения максимальной эффективности экранирования плоскость кольца целесообразно ориентировать перпендикулярно внешнему МП. Поэтому будем считать, что вектор

магнитной индукции $\vec{B}_0$ внешнего МП направлен параллельно оси кольца.

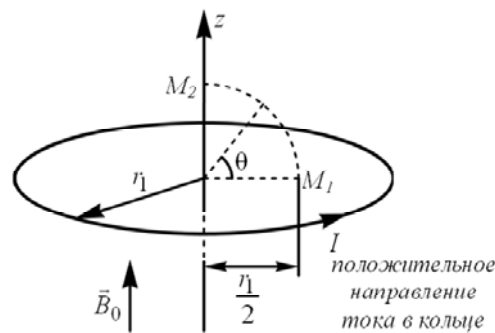


Рис. 1

Внешнее МП описывается частотой ω и амплитудой B_0 . Поскольку оно гармонично, то все зависящие от времени величины изменяются по гармоническому закону. Поэтому зависящие от времени величины далее описываются в терминах комплексных амплитуд. Без ограничения общности положим фазу внешнего МП равной нулю. Тогда комплексная амплитуда его магнитной индукции равна

$$\dot{\vec{B}}_0 = \vec{e}_z \cdot B_0,$$

где $\vec{e}_z$ – единичный вектор, направленный параллельно оси кольца.

Если геометрические параметры электропроводящего кольца связаны соотношением

$$r_1 \gg r_2, \quad (1)$$

то оказывается возможным получить распределение экранированного МП аналитически.

Комплексная амплитуда силы тока, который наводится в кольцо, определяется из закона Ома в интегральной форме и закона Фарадея:

$$\dot{I} = -\frac{j\omega\dot{\Phi}_0}{R + j\omega L}, \quad (2)$$

где $\dot{\Phi}_0$ – комплексная амплитуда потока вектора $\vec{B}_0$ через кольцо; R , L – соответственно, активное сопротивление и коэффициент самоиндукции кольца; j – мнимая единица.

В силу допущения (1) поток внешнего МП через кольцо равен

$$\Phi_0 = B_0 \cdot \pi r_1^2; \quad (3)$$

активное сопротивление электропроводящего кольца

$$R = \rho \frac{2\pi r_1}{\pi r_2^2} = \frac{2\rho r_1}{r_2^2}, \quad (4)$$

где ρ – его удельное сопротивление; коэффициент самоиндукции кольца [8, с. 207]

$$L = \mu_0 r_1 \cdot \left(\ln \frac{8r_1}{r_2} - \frac{7}{4} \right), \quad (5)$$

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

С учетом (2) – (5) выражение для комплексной амплитуды силы тока в кольце имеет следующий вид:

$$\dot{I} = \frac{\pi}{\mu_0} \cdot \frac{r_1 B_0}{\frac{7}{4} - \ln \frac{8r_1}{r_2} + j \cdot \frac{2\rho}{\mu_0 \omega r_2^2}}. \quad (6)$$

Имея выражение для силы тока, наводимого в кольце, можно определить комплексную амплитуду магнитной индукции $\dot{\vec{B}}^{coil}$ создаваемого им вторичного МП [9, 10]:

$$\begin{cases} \dot{B}_r^{coil}(r, z) = \frac{\mu_0 \dot{I}}{2\pi} \cdot \frac{z}{r \sqrt{(r_1 + r)^2 + z^2}} \times \\ \times \left[-K(k) + \frac{r_1^2 + r^2 + z^2}{(r_1 - r)^2 + z^2} \cdot E(k) \right], \\ \dot{B}_z^{coil}(r, z) = \frac{\mu_0 \dot{I}}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{(r_1 + r)^2 + z^2}} \times \\ \times \left[K(k) + \frac{r_1^2 - r^2 - z^2}{(r_1 - r)^2 + z^2} \cdot E(k) \right], \\ \dot{B}_\varphi^{coil} \equiv 0, \end{cases} \quad (7)$$

где $\dot{B}_r^{coil}$, $\dot{B}_\varphi^{coil}$, $\dot{B}_z^{coil}$ – компоненты $\dot{\vec{B}}^{coil}$ в цилиндрической системе координат (начало координат совпадает с центром кольца); $K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}}$ и

$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi$ – полные нормальные эллиптические интегралы Лежандра, соответственно, 1-ого и 2-ого рода; $k = \sqrt{\frac{4r_1 r}{(r_1 + r)^2 + z^2}}$ – числовой коэффициент.

Комплексная амплитуда магнитной индукции поля, образованного в результате суперпозиции внешнего МП и поля индуцированных в кольце токов, равна $\dot{\vec{B}} = \vec{e}_z B_0 + \dot{\vec{B}}^{coil}$. Следовательно, действующее значение магнитной индукции экранированного МП

$$B_{rms} = \frac{|\dot{\vec{B}}|}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{|B_0 + \dot{B}_z^{coil}|^2 + |\dot{B}_r^{coil}|^2}{2}}. \quad (8)$$

Коэффициент экранирования S определяется как отношение действующего значения магнитной индукции при использовании экрана к действующему значению магнитной индукции в его отсутствии [3, с. 27]. Следовательно,

$$S = \frac{\sqrt{|B_0 + \dot{B}_z^{coil}|^2 + |\dot{B}_r^{coil}|^2}}{B_0}, \quad (9)$$

где компоненты вектора $\dot{\vec{B}}^{coil}$ и комплексная амплитуда тока $\dot{I}$ задаются, соответственно, выражениями (7) и (6).

Полученные выражения (8) и (9) применимы для анализа экранирующих характеристик «тонких» электропроводящих колец, параметры которых удовлетворяют критерию (1).

Численное моделирование. Определение распределения МП вблизи массивного электропроводящего кольца аналитическими методами затруднительно. Поэтому целесообразно прибегнуть к численному моделированию.

Рассматриваемые в данной работе электромагнитные процессы протекают с промышленной частотой 50 Гц. Поэтому они описываются системой уравнений Максвелла в квазистационарном приближении. Распределение МП может быть получено путем решения уравнения закона полного тока в квазистационарном приближении, записанного в терминах магнитного векторного потенциала [11, с. 107]. При этом уместно использовать калибровку Вейля. Для решения этого уравнения, дополненного соответствующими условиями, накладываемыми на магнитный векторный потенциал на границе раздела «воздух-кольцо», использовался интерфейс «Magnetic Fields (mf)», который входит в «AC/DC Module» программной среды COMSOL Multiphysics [11].

Поскольку внешнее МП параллельно оси кольца, была использована осесимметричная модель. Осью симметрии модели, построенной в программной среде COMSOL Multiphysics, является ось электропроводящего кольца. Магнитное поле на границе расчетной области задавалось равным внешнему однородному МП. При этом размер расчетной области намного превосходил радиус кольца r_1 . Во всех подобластях расчетной области использовалась сетка типа «Free Triangular». Максимальный размер элементов разбиения в воздушном пространстве не превышал $r_1/20$, максимальный размер элементов разбиения внутри сечения кольца не превышал $r_2/10$. Правильность численного решения была проверена путем сравнения с решениями, получаемыми при увеличении размеров расчетной области, и решениями, получаемыми при использовании более густой сетки. Корректность использованной компьютерной модели подтверждается совпадением при $r_1 \gg r_2$ численного и аналитического результатов.

Результаты исследования и их анализ. Электропроводящее кольцо характеризуется двумя геометрическими параметрами: радиусом кольца r_1 и радиусом поперечного сечения r_2 . Частота внешнего магнитного поля $\omega = 2\pi \cdot 50$ с⁻¹.

Исследуем зависимость коэффициента экранирования от r_2 . Рассмотрим набор из пяти электропроводящих колец радиуса $r_1 = 0.15$ м. Будем полагать, что кольца выполнены из алюминия, который обладает высокой электропроводностью (при относительно низкой цене). Радиус поперечного сечения наименьшего из них положим равным $r_2 = 5$ мм, его объем обозначим V_0 . Другие кольца пусть имеют большее поперечное сечение, а их объем равен $2V_0, 3V_0, 4V_0$ и $5V_0$.

На рис. 2 представлено распределение коэффициента экранирования S в плоскости кольца ($z = 0$). Кривая с номером k соответствует кольцу объема $k \cdot V_0$. Сплошные линии построены согласно выражению (9), точки – результаты численного моделирования.

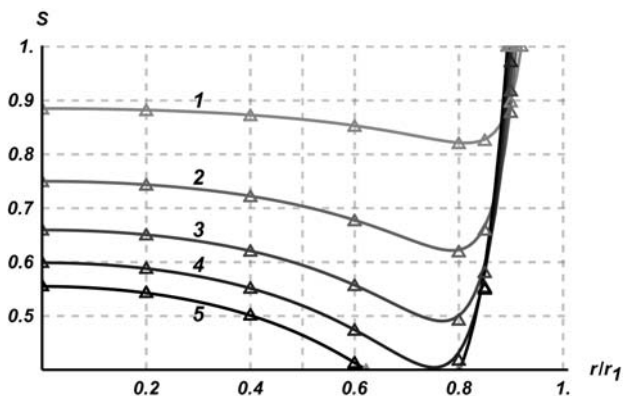


Рис. 2

Как видно из представленных распределений наибольшее снижение МП наблюдается в точке, удаленной от центра на расстояние $(0.7 \div 0.8) \cdot r_1$. Увеличение МП в точках $r > 0.8 \cdot r_1$ обусловлено близостью контура кольца, по которому протекает наведенный ток.

На рис. 3 представлено распределение коэффициента экранирования S вдоль оси кольца ($r = 0$).

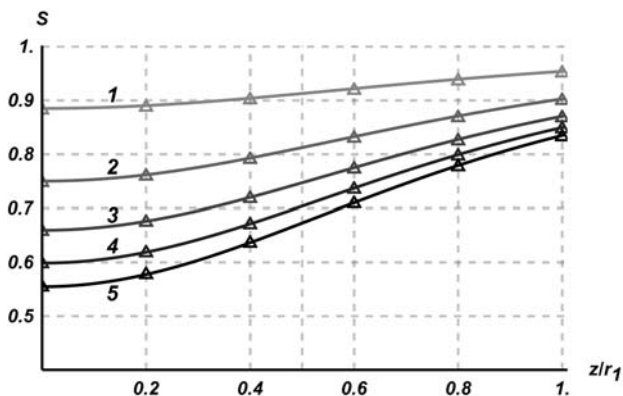


Рис. 3

Для всех колец зависимость $S(z)$ монотонна: наибольшее снижение МП наблюдается в центре кольца, а при удалении от его плоскости индукция МП растет.

Из рис. 2 и рис. 3 видно, что область экранирования, расположенную в центральной области кольца, целесообразно ограничить сферой радиуса $r_1/2$. Коэффициент экранирования на границе этой области может превышать значения S для точек, лежащих на оси или в плоскости кольца. На рис. 4 представлено распределение S вдоль дуги $r = r_1/2$: значение $\theta = 0$ соответствует точке M_1 на рис. 1, $\theta = \pi/2$ – точке M_2 .

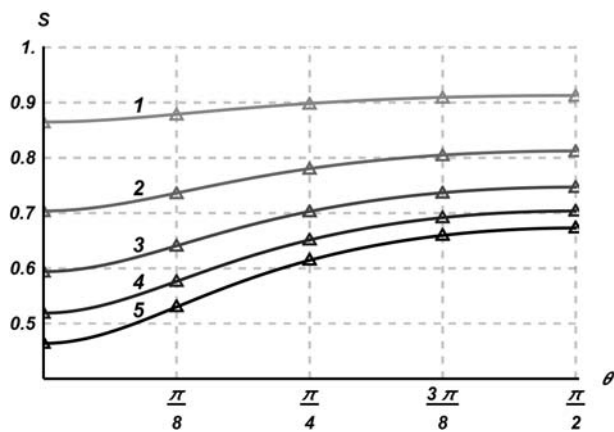


Рис. 4

Из полученных распределений можно сделать вывод, что электропроводящее кольцо радиуса $r_1 = 0.15$ м с поперечным сечением радиуса $r_2 = 5$ мм позволяет снизить уровень МП на 10 % (кривая 1 на рис. 2 – 4), с поперечным сечением радиуса $r_2 = 7.1$ мм – на 20 % (кривая 2 на рис. 2 – 4), с поперечным сечением радиуса $r_2 = 10$ мм – на 30 % (кривая 4 на рис. 2 – 4).

Исследуем зависимость коэффициента экранирования от радиуса кольца r_1 . Так как значения S зависят от точки наблюдения, то введем $S^* = \max \{S(r, z), r^2 + z^2 \leq (r_1/2)^2\}$, где $r_1/2$ – радиус области экранирования. На рис. 5 представлена зависимость S^* от радиуса кольца r_1 . Радиус поперечного сечения кольца r_2 пробегает значения от 5 мм до 11.2 мм: на рис. 5 кривая с номером k соответствует кольцу с поперечным сечением радиуса $r_2 = \sqrt{k} \cdot 5$ (мм). Сплошные линии построены согласно выражению (9), точки – результаты численного моделирования.

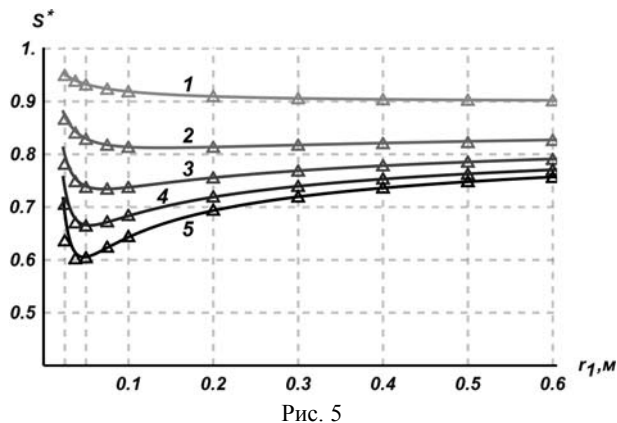


Рис. 5

Из (6) – (7) следует, что (формально) при $r_1/r_2 \rightarrow \infty$ $S^* \rightarrow 1$. Однако из рис. 5 видно, что при $r_1 > 0.5$ м изменение коэффициента экранирования с увеличением радиуса кольца незначительно.

Как следует из рис. 5, зависимость $S^*(r_1)$ имеет один минимум. Причем для проводящих колец с поперечным сечением $r_2 \approx 10$ мм и более минимум достигается при $r_1 \approx 0.05$ м. Дальнейшее увеличение радиуса кольца r_1 при сохранении его поперечного сечения хотя и позволяет расширить область экранирования, но приводит к увеличению коэффициента экранирования, а значит к ухудшению эффективности экранирования МП электропроводящим кольцом.

Выводы.

1. Предложены методы аналитического и численного моделирования, позволяющие находить распределение коэффициента экранирования при снижении уровня однородного гармонического магнитного поля электропроводящим кольцом.
2. Область экранирования электропроводящим кольцом целесообразно ограничивать сферой с радиусом, равным половине радиуса кольца.
3. Электропроводящее кольцо радиуса 0.15 м с поперечным сечением радиуса 5 мм позволяет снизить уровень МП на 10 %, с поперечным сечением радиуса 7.1 мм – на 20 %, с поперечным сечением радиуса 10 мм – на 30 %.
4. Зависимость коэффициента экранирования электропроводящего кольца от его радиуса имеет немонотонный характер: для заданного поперечного сечения существует такой радиус кольца, при котором эффективность экранирования максимальна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рогинский В.Ю. Экранирование в радиоустройствах. – Л.: Энергия, 1969. – 112 с.
2. Шапиро Д.Н. Электромагнитное экранирование. – Долгопрудный: Издательский Дом "Интеллект", 2010. – 120 с.
3. Каден Г. Электромагнитные экраны в высокочастотной технике и технике электросвязи. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 327 с.
4. Ziolkowski M., Gratkowski S. Active, passive and dynamic shielding of static and low frequency magnetic fields // XV International Symposium on Theoretical Engineering. – VDE, 2009. – pp. 1-5.
5. Дикой В.П., Токарский А.Ю., Рубцова Н.Б., Красин О.В. Элементы теории контурных экранов // Повышение эффективности работы энергосистем: Труды ИГЭУ. – 2001. – №4. – С. 225-254.
6. Brandão Faria J.A., Almeida M.E. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – Vol.22. – №2. – pp. 951-959.
7. Lee B.Y., Myung S.H., Cho Y.G., Lee D.I., Lim Y.S., Lee S.Y. Power frequency magnetic field reduction method for residents in the vicinity of overhead transmission lines using passive loop // Journal of Electrical Engineering and Technology. – 2011. – Vol.6. – №6. – pp. 829-835.
8. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
9. Simpson J.C., Lane J.E., Immer C.D., Youngquist R.C. Simple analytic expressions for the magnetic field of a circular current loop. – Preprint, NASA Kennedy Space Center, 2001. – P. 7.
10. Zhao D., Gao L. Spatial distribution of the magnetic field generated by a circular arc current // Advanced studies in theoretical physics. – 2010. – Vol.4. – №6. – pp. 275-282.
11. Comsol Multiphysics Modeling Guide. – Version: COMSOL 3.5a. – November, 2008.
12. Ziolkowski M., Gratkowski S. Active, passive and dynamic shielding of static and low frequency magnetic fields. XV International Symposium on Theoretical Engineering. VDE, 2009, pp. 1-5.
13. Dikoy V.P., Tokarskiy A.Yu., Rubtsova N.B., Krasin O.V. Some theoretical aspects of loop shields. *Povyshenie effektivnosti raboty energosistem: Trudy IGEU – Improvement of power system efficiency: Proceedings of the Ivanovo State Power University*, 2001, no.4, pp. 225-254. (Rus).
14. Brandão Faria J.A., Almeida M.E. Accurate calculation of magnetic-field intensity due to overhead power lines with or without mitigation loops with or without capacitor compensation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, vol.22, no.2. pp. 951-959. doi:10.1109/tpwrd.2006.883025.
15. Lee B.Y., Myung S.H., Cho Y.G., Lee D.I., Lim Y.S., Lee S.Y. Power frequency magnetic field reduction method for residents in the vicinity of overhead transmission lines using passive loop. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2011, vol.6, no.6, pp. 829-835. doi:10.5370/jeet.2011.6.6.829.
16. Kalantarov P.L., Tseytlin L.A. *Raschet induktivnostey* [Inductance calculations]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 488 p. (Rus).
17. Simpson J.C., Lane J.E., Immer C.D., Youngquist R.C. *Simple analytic expressions for the magnetic field of a circular current loop*. Preprint, NASA Kennedy Space Center Publ., 2001. 7 p.
18. Zhao D., Gao L. Spatial distribution of the magnetic field generated by a circular arc current. *Advanced Studies in Theoretical Physics*, 2010, vol.4, no.6, pp. 275-282.
19. Comsol Multiphysics Modeling Guide. Version: COMSOL 3.5a. November, 2008.

REFERENCES

1. Roginskiy V.Yu. *Ekranirovaniye v radioustroystvakh* [Shielding in radio devices]. Leningrad, Energiya Publ., 1969. 112 p. (Rus).
2. Shapiro D.N. *Elektromagnitnoye ekranirovaniye* [Electromagnetic shielding]. Dolgoprudny, «Intellekt» Publ. House, 2010. 120 p. (Rus).
3. Kaden G. *Elektromagnitnyye ekrany v vyisokochastotnoy tekhnike i tekhnike elektrosvyazi* [Electromagnetic shields in high-frequency technology and communication technology]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1957. 327 p. (Rus).

Поступила (received) 09.12.2014

Гринченко Владимир Сергеевич¹, к.т.н.,
Чунихин Константин Вадимович¹,

¹ Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма Национальной Академии Наук Украины», 61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19, тел/phone: +38 066 489 44 99, e-mail: vsgrinchenko@gmail.com

V.S. Grinchenko¹, K.V. Chunikhin¹

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

Shielding of a uniform alternating magnetic field using a circular passive loop.

The magnetic and electromagnetic shields are used to reduce the magnetic field in local spaces. Usually these shields are implemented in the form of a box or a cylinder. At the same time the magnetic field reduction in local spaces by means of passive loops is not considered in detail yet. So, the present study considers shielding capabilities of a circular passive loop. The authors have performed an analytical and numerical modeling of a process of a uniform harmonic magnetic field shielding. The simulated results permit to find out the spatial distribution of the shielded magnetic field. Dependencies of shielding effectiveness on the passive loop radius and cross-section are determined. Moreover, the non-monotonic behavior of the loop radius dependence is shown. We have substantiated that the shielded volume of a circular passive loop is advisable to limit by the sphere with a half loop radius. Presented results give parameters of the circular passive loop that reduces the rms value of the magnetic flux density by 30 %. References 11, figures 5.

Key words: circular passive loop, electromagnetic shielding, analytical modeling, Comsol Multiphysics.

МЕТОДЫ НОРМАЛИЗАЦИИ СТАТИЧЕСКОГО ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЖИЛЫХ ДОМАХ

Показана необхідність нормалізації до безпечних значень індукції статичного геомагнітного поля (ГМП) у приміщеннях висотних каркасно-монолітних житлових будинків, масивні феромагнітні несучі конструкції яких значно (на 50%) послаблюють природне ГМП. Теоретично і експериментально обґрунтовані методи нормалізації ГМП, що реалізуються без застосування додаткових екрануючих елементів. Розроблено рекомендації з проектування та будівництва «магніто-чистих» житлових будинків з комфортними умовами проживання за статичним геомагнітним полем. Бібл. 15, рис. 8.

Ключові слова: статичне магнітне поле, залізобетонні конструкції, нормалізація геомагнітного поля в приміщеннях.

Показана необходимость нормализации до безопасных значений индукции статического геомагнитного поля (ГМП) в помещениях высотных каркасно-монолитных жилых домов, массивные ферромагнитные несущие конструкции которых значительно (на 50%) ослабляют естественное ГМП. Теоретически и экспериментально обоснованы методы нормализации ГМП, реализуемые без применения дополнительных экранирующих элементов. Разработаны рекомендации по проектированию и строительству «магниточистых» жилых домов с комфортными условиями проживания по статическому геомагнитному полю. Библ. 15, рис. 8.

Ключевые слова: статическое магнитное поле, железобетонные конструкции, нормализация геомагнитного поля в помещениях.

Введение. В настоящее время в жилищном строительстве широко применяются каркасно-монолитные технологии, которые основаны на использовании значительного объема стальных элементов, армирующих железобетонные конструкции. Так, для современных каркасно-монолитных домов (рис. 1,а) применяются железобетонные колонны и межэтажные перекрытия, содержащие около 15 % конструкционной стали в их объеме [1-4], что существенно превышает объем стали, который используется в распространенных ранее домах из сборного железобетона.

Увеличение удельного объема стальных элементов железобетонных конструкций в современных домах, а также возможность их неконтролируемого намагничивания при монтажных электросварочных работах приводит к существенному усилению эффекта магнитостатического экранирования (ослабления) естественного геомагнитного поля (ГМП) внутри помещений [5], что может негативно влиять на здоровье людей [6]. Так, при естественном для Украины модуле вектора индукции ГМП в 50 мкТл, индукция ГМП в помещениях каркасно-монолитных домов (рис. 1б) ослабляется до опасных значений – менее 25 мкТл [8], что может создавать стрессовые состояния и вызывать негативные эффекты в нервной, сердечно-сосудистой и иммунной системах человека [6].

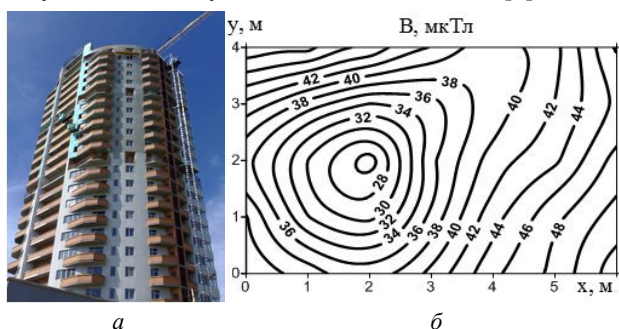


Рис. 1. Каркасно-монолитный жилой дом (а) и экспериментальные значения распределения индукции ГМП в одном из его помещений на высоте 1 м от пола (б)

В соответствии с международным стандартом SBM-2008 [7], который является руководящим доку-

ментом при независимом тестировании домов в Европе, США, Канаде, Австралии, комфортные условия проживания в жилых домах обеспечиваются при отклонении ГМП не более чем на 10 % от естественного значения. Поэтому, комфортный уровень индукции ГМП в жилых помещениях, который не оказывает отрицательного влияния на здоровье населения, должен составлять не менее 90% естественного ГМП (не менее 45 мкТл в широтной зоне Украины).

Поэтому актуальной и социально значимой задачей является нормализация индукции ГМП в помещениях современных жилых домов до безопасного уровня в 45 мкТл. Однако известные методы нормализации ГМП носят либо общий характер [8], либо предполагают использование громоздких экранирующих элементов [9, 10], которые сложно устанавливать в жилых помещениях.

Целью работы является разработка методов нормализации до безопасного уровня статического ГМП в помещениях современных жилых домов.

Исследование явления ослабления ГМП железобетонными строительными конструкциями. Очевидно, что для разработки методов нормализации ГМП в помещениях необходимо определить влияние физических и геометрических параметров реальных стальных строительных конструктивных элементов домов на интенсивность ослабления ГМП.

Известно [8, 11], что основной причиной ослабления ГМП в помещениях является намагниченность ферромагнитных стальных элементов строительных конструкций, создающая во внешнем пространстве возмущающее магнитное поле напряженностью $\vec{H}_B$, вектор которого может быть направлен навстречу вектору ГМП [8].

$$\vec{H}_B(p) = \vec{H}_{i_{ГМП}}(p) + \vec{H}_r(p), \quad (1)$$

где $\vec{H}_{i_{ГМП}}$, $\vec{H}_r$ – магнитное поле от индуцированной $\vec{j}_i$ и остаточной $\vec{j}_r$ намагниченности.

Магнитное поле остаточной намагниченности $\vec{H}_r$ создается намагниченными ферромагнитными

элементами конструкции при напряженности поля сторонних источников равной нулю и может быть определено выражением [11]:

$$\vec{H}_r = F(V_k, \vec{j}_r), \quad (2)$$

где V_k – объем ферромагнитной конструкции.

Значение $\vec{H}_r$ определяется предшествующим магнитным (механическим) влиянием на ферромагнитный элемент и в общем случае является случайной величиной, что затрудняет его моделирование. Эффективное снижение $\vec{H}_r$ обеспечивает размагничивание ферромагнитных конструкций [8].

Магнитное поле $\vec{H}_{i\Gamma\Pi\Pi}$ может быть определено выражением [11]:

$$\vec{H}_{i\Gamma\Pi\Pi} = F(V_k, \vec{j}_i); \quad \vec{j}_i = (\mu_n - 1)\vec{H}_{\Gamma\Pi\Pi}N, \quad (3)$$

где μ_n – относительная начальная магнитная проницаемость материала стальных элементов строительных конструкций; N – размагничивающий коэффициент, зависящий от формы граничной поверхности стального элемента конструкции.

Как следует из (3) с учетом [11], величина $\vec{H}_{i\Gamma\Pi\Pi}$, определяющая уровень ослабления ГМП, увеличивается при увеличении объема V_k ферромагнитного элемента и величины индуцированной намагниченности $\vec{j}_i$, которая пропорциональна магнитной проницаемости μ_n и уменьшается при уменьшении коэффициента размагничивания N .

Как правило, вектор индуцированной намагниченности совпадает с вектором ГМП [8]. При этом намагниченный в ГМП элемент (например, стальная колонна высотой h , радиусом r и магнитной проницаемостью μ_n) ослабляет ГМП вблизи его поверхности как показано на рис. 2. Зона ослабления ГМП, выделенная штриховкой на рис. 2, прилегает к боковым поверхностям колонны и распространяется перпендикулярно вектору индукции намагничивающего поля.

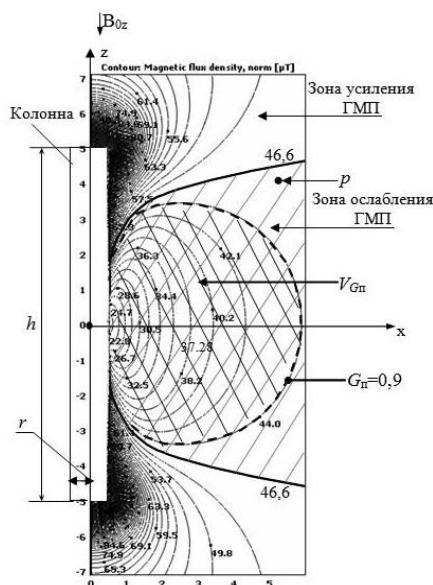


Рис. 2. Распределение модуля вектора индукции магнитного поля вблизи стальной цилиндрической колонны под действием вертикальной составляющей $\vec{B}_{\Gamma\Pi\Pi z}$ ГМП с индукцией 46,6 мкТл, полученное в программной среде COMSOL

Моделирование явления ослабления ГМП будем осуществлять на примере цилиндрической сплошной стальной колонны (рис. 2), определяя напряженность $\vec{H}_l(p)$ искаженного ГМП в точках p внешней области (рис. 2):

$$\vec{H}_l(p) = \vec{H}_{\Gamma\Pi\Pi} + \vec{H}_{i\Gamma\Pi\Pi}(p), \quad (4)$$

где $\vec{H}_{i\Gamma\Pi\Pi}(p)$ – напряженность МП, создаваемая индуцированной намагниченностью колонны в точке p .

Явление ослабления ГМП возникает при выполнении условия:

$$0 \leq |\vec{H}_l(p)| < |\vec{H}_{\Gamma\Pi\Pi}|. \quad (5)$$

Оценку уровня ослабления ГМП будем выполнять с помощью коэффициента ослабления ГМП $G(p)$ [11]:

$$G(p) = \frac{|\vec{H}_l(p)|}{H_{\Gamma\Pi\Pi}} = \frac{|\vec{H}_{\Gamma\Pi\Pi} + \vec{H}_{i\Gamma\Pi\Pi}(p)|}{H_{\Gamma\Pi\Pi}}, \quad 0 \leq G < 1. \quad (6)$$

Выразим объем колонны V_k (рис. 2) через его радиус r и коэффициент протяженности b :

$$V_k = 2\pi r^3 b, \quad \text{где } b = 0,5h/r. \quad (7)$$

Из (7) следует, что V_k линейно зависит от коэффициента протяженности b колонны.

Коэффициент размагничивания N колонны зависит от коэффициента его протяженности b нелинейно и изменяется, приблизительно, от 0,3 до 0,0004 [12], при изменении b от 1 до 100:

$$N = F(b). \quad (8)$$

Существенное влияние на уровень ослабления ГМП также может оказывать материал колонны, характеризующий магнитной проницаемостью μ_n (3). Так, широко используемые в строительстве конструкционные стали имеют $\mu_n \approx 100 - 300$ [12]. Минимальные значения $\mu_n = 1,01 - 1,02$ имеют маломagnetные стали (например, 45Г17Ю3), используемые для снижения магнитного поля корпусов кораблей [13].

Оценим свойство колонны ослаблять ГМП до опасного уровня (ее гипогеомагнитность) по величине объема пространства $V_{G\Pi}$, в котором $G(p) \leq 0,9$ (рис. 2). Для этого будем использовать коэффициент гипогеомагнитности колонны ($K_{ГК}$) [11], определяющий интенсивность ослабления ГМП колонной. Его значение равно объему $V_{G\Pi}$, отнесенному к кубу радиуса r колонны:

$$K_{ГК} = \frac{V_{G\Pi}}{r^3}. \quad (9)$$

Тогда опасное ослабление ГМП будет отсутствовать при $K_{ГК} \approx 0$ и увеличиваться при росте $K_{ГК}$.

Рассмотренный подход может быть использован для моделирования и оценки ослабления ГМП межэтажными перекрытиями [4]. Однако реальные железобетонные колонны и перекрытия содержат тысячи распределенных в пространстве армирующих стальных элементов [3, 4, 14], что приводит к необходимости создания упрощенных моделей железобетонных конструкций, позволяющих упростить моделирование ГМП в помещениях с приемлемой для инженерных расчетов погрешностью.

Такая модель предложена авторами в [4]. Она основана на замене сложной многоэлементной железобетонной конструкции с объемом V_k , содержащей ферро-

магнитные элементы с суммарным объемом V_Φ и магнитной проницаемостью μ_n , на эквивалентную ферромагнитную конструкцию с аналогичными внешней граничной поверхностью и объемом V_k , которая с ограниченной погрешностью [4] может быть охарактеризована эквивалентной магнитной проницаемостью μ_3 :

$$\mu_3 \approx (\mu_n - 1)K_V + 1; \quad K_V = \frac{V_\Phi}{V_k}. \quad (10)$$

Для численного моделирования ГМП в отдельном помещении дома авторами предложена [4, 5] экспериментально обоснованная упрощенная физическая модель (рис. 3,а), содержащая железобетонные элементы, охватывающие помещение с $b = 20$, и позволяющая с ограниченной погрешностью оценить уровень ослабления ГМП в отдельном помещении дома.

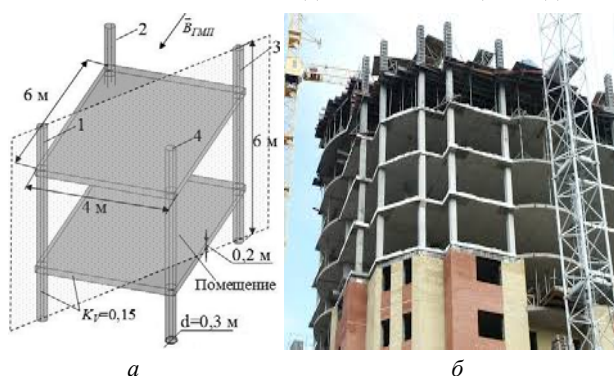


Рис. 3. Упрощенная физическая модель железобетонной конструкции (а), определяющая уровень ослабления ГМП в помещении типового каркасно-монолитного дома (б)

Дальнейший анализ будем проводить на основе предложенных выше упрощенных моделей отдельных железобетонных строительных конструкций, а также упрощенной физической модели помещения дома.

Синтез методов нормализации ГМП в помещениях. Под нормализацией ГМП подразумеваем меры, позволяющие минимизировать объем пространства V_{Gn} , где уровень индукции ГМП ослаблен более чем на 10 % от естественного ГМП, которые позволяют обеспечить комфортный уровень проживания населения в соответствии с [7]. Тогда с учетом (6) – (9) условия нормализации ГМП в помещении:

$$V_{Gn} \rightarrow 0, \text{ при } G_n = 0,9. \quad (11)$$

Очевидно, что нормализация ГМП в помещении будет обеспечена, если каждый из стальных элементов дома, а также стальной каркас конструкции дома в целом, не будет ослаблять ГМП более чем на 10 %.

Методы нормализации ГМП вблизи колонны. Из (11) с учетом [11] следует, что нормализация ГМП обеспечивается при минимизации коэффициента гипогеомагнитности колонны $K_{ГК}$:

$$K_{ГК} \rightarrow 0. \quad (12)$$

В соответствии с (3), (9) значение $K_{ГК}$ может быть представлено выражением:

$$K_{ГК} = F(V_k, N, \mu_3) \quad (13)$$

и зависит от таких параметров колонны, как ее объем V_k , коэффициент размагничивания N и относительная эквивалентная магнитная проницаемость μ_3 .

Из (7, 8) следует, что V_k и N являются функциями от b . Тогда $K_{ГК}$ в соответствии с (13) также является функцией от b

$$K_{ГК} = F(b, \mu_3) \quad (14)$$

и меры по нормализации ГМП колонны могут быть сведены к оптимизации ее параметров b и μ_3 .

Исследуем зависимость $K_{ГК}$ от b для цилиндрической колонны (рис. 2) на основе разработанного в [11] аналитического метода расчета магнитостатического поля для задач с осевой симметрией, основанного на концепции вторичных источников с использованием фиктивных магнитных зарядов, расположенных вне граничной поверхности ферромагнитного тела. Исследование проведем для наихудших условий ($G_n = 0,9$; $\mu_n = 300$; $V_k = 0,15$; $\mu_3 = 45$) и $B_{0z} = 46,6$ мкТл).

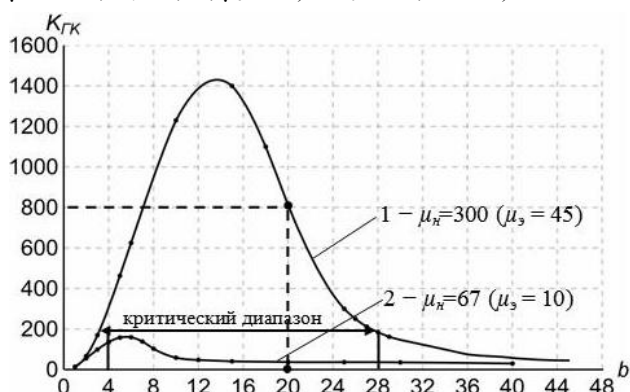


Рис. 4. Функциональная зависимость коэффициента гипогеомагнитности $K_{ГК}$ цилиндрической колонны от b при $G_n = 0,9$ и различных значениях магнитной проницаемости

Эта зависимость в виде кривой 1 представлена на рис. 4 и имеет экстремум из-за взаимодействия конкурирующих процессов роста $K_{ГК}$ при росте V_k и его спада при уменьшении N из-за роста b [11]. Анализ рис. 4 позволяет сформулировать условие нормализации ГМП вблизи колонны, основанное на исключении попадания значений b в критический диапазон:

$$4 > b > 28. \quad (15)$$

Согласно (10) и (13) нормализация ГМП также может быть проведена путем уменьшения эквивалентной магнитной проницаемости μ_3 колонны:

$$\mu_3 = F(\mu_n \cdot K_V), \quad (16)$$

что может быть достигнуто при уменьшении доли ферромагнитных элементов в объеме железобетонной колонны (уменьшении коэффициента K_V), а также при уменьшении магнитной проницаемости μ_n материала колонны.

Исследования зависимости $K_{ГК}$ от μ_n показали, что при уменьшении μ_n до значений 50-70 и $b = 20$, значение $K_{ГК}$ становится близким к нулю (кривая 2 на рис. 4) и искажения ГМП стальной колонной становятся незначительными.

Результаты проведенного выше анализа путей нормализации ГМП на примере цилиндрической стальной колонны могут быть распространены на другие протяженные стальные конструктивные элементы зданий, а в части уменьшения μ_n – на предложенную физическую модель конструкции помещения (рис. 3,а) в целом. Обоснованность такого подхода подтверждается результатами дальнейших исследований.

Методы нормализации ГМП в помещениях. На рис. 5 предложены методы нормализации ГМП, полученные на основе проведенного выше анализа.



Рис. 5 Методы нормализации геомагнитного поля в помещениях современных домов

Эффективным является метод 1.1 (рис. 5). Однако его практическая реализация ограничена необходимостью обеспечения достаточной прочности конструкции дома, что для современных каркасно-монолитных домов определяется долей ферромагнитных стальных элементов в их объеме (10). Данный метод естественно реализуется в деревянных и кирпичных малоэтажных домах (коттеджах), если использование в них стальных строительных конструкций ограничено.

Наиболее перспективным методом нормализации ГМП в помещениях современных многоэтажных домов является метод 1.2 – использование при строительстве домов специальных слабомагнитных конструкционных сталей с $\mu_n = (50-70)$. Эффективность этого метода иллюстрируется на рис. 6, 7, где представлены сравни-

тельные результаты численного моделирования в среде COMSOL Multiphysics распределения ГМП внутри помещения каркасно-монолитного дома (рис. 3) при использовании стандартной конструкционной стали с $\mu_n = 300$ и $\mu_3 = 45$ (а) и специальной слабомагнитной конструкционной стали с $\mu_n = 67$, $\mu_3 = 10$ (б).

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность этого метода, позволяющего нормализовать ГМП в помещении с уровня 36 мкТл до комфортного уровня 46 мкТл. Однако для его практической реализации необходимо создание и освоение в Украине технологии серийного производства слабомагнитных конструкционных строительных сталей с нормируемой начальной магнитной проницаемостью, которая не должна превышать 70 единиц.

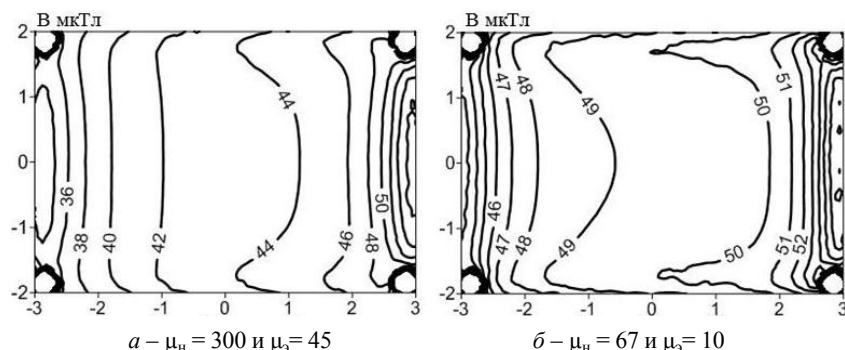


Рис. 6. Распределение индукции МП в помещении на высоте 0,5 м от поверхности пола при использовании в его железобетонных конструкциях стандартной (а) и специальной (б) конструкционной стали

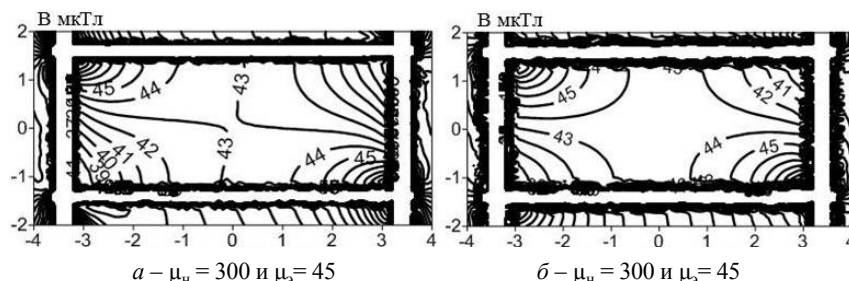


Рис. 7. Распределение индукции ГМП в помещении (рис. 8,б) на вертикальной плоскости, проходящей через оси колонн 1 и 3 при высоте колонн 6 м (а) и 18 м (б)

Эффективность метода 2.1 (рис. 5), основанного на увеличении относительной протяженности b колонн в соответствии с (15) (с $b = 20$ до $b = 60$) иллюстрируется на рис. 7, 8. Для рассматриваемого примера метод позволяет уменьшить ослабление ГМП вблизи колон-

ны 1 (рис. 3,а) с 39 мкТл (рис. 7,а) до 43 мкТл (рис. 7,б). Практическая реализация этого метода достигается при соединении стальной арматуры колонн с помощью ферромагнитных муфт (рис. 8,а) вместо сварки или скрутки, что позволяет сохранить однородность

магнитной проницаемости колонн в месте соединения ее стальной арматуры и осуществить фактическое удлинение колонн с 6 м (рис. 3,а) до 18 м (рис. 8,б).

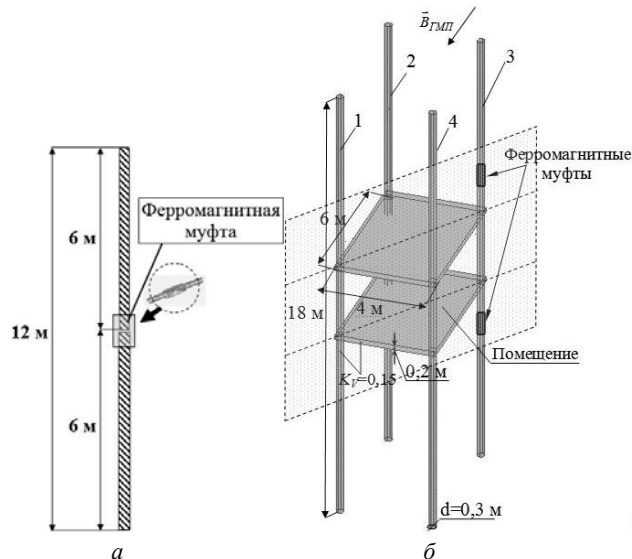


Рис. 8. Соединение стальной арматуры колонн с помощью ферромагнитных муфт (а) и модель помещения при удлинении колонн до 18 м (б)

Метод уменьшения относительной протяженности b колонн до значений менее 4 (2.2 на рис. 5) может быть реализован при разделении стальной арматуры колонн на отдельные фрагменты с немагнитными вставками, не попадающими в критический диапазон b (выполнении условия $b < 4$), а также при исключении из конструкции отдельных ферромагнитных элементов с b более 4.

Метод 3.1 (рис. 5) размагничивания стальных строительных конструкций перед их монтажом позволяет уменьшить остаточную намагниченность (2). Он находит практическое применение при строительстве экологически чистых домов в Европе [15] и может быть рекомендован для отечественных строительных технологий. Реализация этого метода требует применения размагничивающих установок на строительных площадках.

При использовании метода 3.1, важно одновременное использование и метода 3.2, уменьшающего намагничивание конструкций при их электросварке в процессе строительства. Метод 3.2 реализуется при максимальном приближении точки присоединения заземляющего провода сварочного аппарата к месту электросварки.

На основе разработанных методов нормализации ГМП (рис. 5) могут быть предложены следующие практические рекомендации по нормализации статического ГМП в помещениях жилых домов в процессе их проектирования и строительства:

а) использование при строительстве домов слабомагнитных сталей с относительной начальной магнитной проницаемостью менее 70;

б) максимально возможное снижение доли ферромагнитных материалов в объеме железобетонной конструкции;

в) проектирование домов с ограничением применения стальных элементов, которые попадают в критический диапазон коэффициента удлинения их конструкции b (выполнение условия $4 > b > 28$);

г) удлинение стальной арматуры колонн и перекрытий до значений, превышающих критический диапазон b (выполнение условия $b > 28$) с использованием ферромагнитных муфт, обеспечивающих высокую магнитную проницаемость в местах соединений стальных конструктивных элементов;

д) использование технологии размагничивания стальной арматуры перед ее монтажом для снятия остаточной намагниченности и применение технологий монтажа стальной арматуры, не приводящих к ее намагничиванию в процессе строительства.

Выводы.

1. Показано, что современные каркасно-монолитные жилые дома характеризуются значительным ослаблением статического геомагнитного поля (ГМП) и для обеспечения безопасных условий проживания требуется нормализация ГМП в их помещениях до значений не менее 90 % от естественного уровня.

2. На основе методов математического моделирования и экспериментальных исследований явления ослабления ГМП в жилых помещениях с использованием предложенных упрощенных физических моделей железобетонных строительных конструкций как источников ослабления ГМП, впервые научно обоснованы методы нормализации ГМП в помещениях жилых домов, реализуемые на этапах их проектирования и строительства без применения специальных конструктивных элементов.

3. Впервые предложены практические рекомендации по особенностям проектирования и строительства «магниточистых» жилых домов, обеспечивающих комфортные условия проживания населения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6698:2009 – [Чинний від 2011-06-01]. – К.: Мінрегіонбуд України 2011 – 71 с. – (Національний стандарт України).
2. Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови (ISO 6935-2:1991, NEQ): ДСТУ 3760:2006 – [Чинний від 2007-10-01]. – К.: Держспоживстандарт України 2007 – 28 с. – (Національний стандарт України).
3. Сетков В.И., Сербин Е.П. Строительные конструкции. – М.: ИНФРА-М, 2005. – 448 с.
4. Розов В.Ю., Левина С.В. Моделирование статического геомагнитного поля внутри помещений современных жилых домов // Технічна електродинаміка. – 2014. – №4. – С. 8-10.
5. Розов В.Ю., Пелевин Д.Е., Левина С.В. Экспериментальные исследования явления ослабления статического геомагнитного поля в помещениях // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – №6. – С. 72-76.
6. Сердюк А.М., Григор'єв П.Є., Акіменко В.Я., Протас С.В. Екологічна значущість геомагнітного поля та медично-біологічні передумови гігієнічної регламентації його ослаблення в умовах України // Довкілля і здоров'я. – 2010. – №3. – С. 8-11.
7. Standard of Building Biology Testing Methods: SBM-2008 – [Acting from July 2008]. – Germany: Institut für Baubiologie + Ökologie IBN, 2008. – 5 p. (www.createhealthyhomes.com/SBM-2008.pdf).
8. Розов В.Ю., Резинкина М.М., Думанский Ю.Д., Гвозденко Л.А. Исследование техногенных искажений геомагнитного поля в жилых и производственных помещениях и определение путей их снижения до безопасного уровня // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Ч. 2. – С. 3-8.

9. Пелевін Д.Є. Системи компенсації техногенних спотворень геомагнітного поля на робочих місцях оперативного персоналу електроенергетичних об'єктів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Пелевін Дмитро Євгенович, НТЦ МТО НАНУ. – Х., 2010. – 21 с.
10. Рябов Ю.Г., Ломаев Г.В., Кулешова Д.С. Концепция восстановления геомагнитного поля в экранированных объектах // Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. – №4. – С. 35-43.
11. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Левина С.В. Исследование явления ослабления статического геомагнитного поля стальной колонной // Технічна електродинаміка. – 2014. – №1. – С. 12-19.
12. Яновский Б.М. Земной магнетизм. – М.-Л.: Изд. ГЛАВСЕВМОРПУТИ, 1941. – 283 с.
13. Григорьев Б.П. Актуальные проблемы снижения физических полей судов // Международная конференция по судостроению. Труды. Секция F. Судовая электродинамика, магнетизм и гидродинамика. – Санкт-Петербург: Изд-во ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1994. – С. 169-176.
14. Городецкий А.С., Батрак Л.Г., Городецкий Д.А., Лезнюк М.В., Юсипенко С.В. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона. – К.: Изд. Факт, 2004. – 106 с.
15. <http://www.baufritz.com>.

REFERENCES

1. DBN B. 2.6698:2009. *Konstruktsii budynkiv i sporyd. Betonni ta zalizobetonni konstrukcii. Osnovni polozhennia* [National Standard DBN B. 2.6698:2009. Construction of buildings and structures. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions]. Kyiv, Minrehionbud Publ., 2011. 71 p. (Ukr).
2. DSTU 3760:2006. *Prokat armaturnykh dlia zalizobetonnykh konstruktsii. Zahalni tekhnichni umovy* [National Standard DSTU 3760:2006. Reinforcing steel bars for concrete reinforcement. General technical conditions]. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy Publ., 2007. 28 p. (Ukr).
3. Setkov V.I., Serbin E.P. *Stroitel'nye konstruktsii* [The building structures]. Moscow, INFRA-M Publ., 2005. 448 p. (Rus).
4. Rozov V.Yu., Levina S.V. Modeling of the static geomagnetic field indoor dwelling houses. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 2014, no.4, pp. 8-10. (Rus).
5. Rozov V.Yu., Pelevin D.Ye., Levina S.V. Experimental research into indoor static geomagnetic field weakening phenomenon. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.6, pp. 72-76. (Rus).
6. Serduk A.M., Grigoriev P.Ye., Akimenko V.Y., Protas S.V. Ecological significance of the geomagnetic field and the medical and biological conditions of hygienic regulation of its weakening in Ukraine. *Dovkilia i zdorovia – Environment and Health*. 2010, no.3, pp. 8-11. (Ukr).
7. *Standard of Building Biology Testing Methods: SBM-2008* [Acting from July 2008]. Germany: Institut für Baubiologie + Ökologie IBN, 2008, 5 p. Available at: www.createhealthyhomes.com/SBM-2008.pdf.
8. Rozov V.Yu., Rezinkina M.M., Dumanskiy Yu.D., Gvozdenko L.A. The study of man-caused distortions in the geomagnetic field of residential and industrial buildings and to identify ways to reduce them to a safe level. *Tekhnichna elektrodynamika. Tematichnyy vypusk «Problemy suchasnoyi elektrotekhniki» – Technical electrodynamics. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering»*. 2008, chapter 2, pp. 3-8. (Rus).
9. Pelevin D.Ye. *Sistemy kompensatsii tekhnohennykh spotovoren heomahnitnoho polia na robochyykh mistsiaxh operatyvnoho personalu elektroenerhetychnykh ob'ektiv*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Systems of compensation of technogenic distortions of the geomagnetic field on working places of operative personnel of electrical-power objects. Abstracts of cand. tech. sci. diss.]. Kharkiv, 2010. 21 p. (Ukr).

10. Ryabov Yu.G., Lomaev G.V., Kuleshova D.S. Idea of geomagnetic field recovery in screened objects. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestivosti – Technologies of electromagnetic compatibility*, 2010, no.4, pp. 35-43. (Rus).
11. Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Levina S.V. The study of the effect of weakening of static geomagnetic field by steel columns. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 2014, no.1, pp. 12-19. (Rus).
12. Janowski B.M. *Zemnoi magnetizm* [Earth's magnetism]. Moscow-Leningrad, Glavsevmorputi Publ., 1941. 283 p. (Rus).
13. Grigor'ev B.P. Actual problems of physical field reduction of ships. *Mezhdunarodnaia konferentsiia po sudostroeniui. Trudy. Sektsiia F. Sudovaia elektrodinamika, magnetizm i gidrofizika* [International Conference of Shipbuilding. Proceedings. Section F. Ship electrodynamics, magnetism and hydrophysics]. Saint Petersburg, Publishing of TsNII im. acad. A.N. Krylov, 1994, pp. 169-176. (Rus).
14. Horodetskii A.S., Batrak L.H., Horodetskii D.A., Lezniuk M.V., Yusipenko S.V. *Raschet i proektirovanie konstruktsii vysotnykh zdaniy iz monolitnogo zhelezobetona* [The calculation and design construction the high-rise building of reinforced concrete]. Kyiv, Fakt Publ., 2004. p. 106. (Rus).
15. Available at: <http://www.baufritz.com> (accessed 06 March 2015).

Поступила (received) 10.03.2015

Розов Владимир Юрьевич¹, д.т.н., чл.-корр. НАН Украины, Завальний Александр Вячеславович², к.т.н., доц., Золотов Сергей Михайлович², к.т.н., доц., Грецих Светлана Владимировна¹, м.н.с.,
¹ Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма Национальной Академии Наук Украины», 61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19, а/с 72, e-mail: gretskyh@gmail.com
² Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, 61002, Харьков, ул. Революции, 12, e-mail: Azavalniy@i.ua

V.Yu. Rozov¹, A.V. Zavalnyi², S.M. Zolotov², S.V. Gretsikh¹

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

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

The normalization methods of the static geomagnetic field inside houses.

In the paper, we show the necessity of normalization of the static geomagnetic field (GMF) inside high-rise frame-monolithic houses to safe values (90% of the natural rate at least). Massive ferromagnetic construction of these buildings significantly (up to 50 %) weakens the natural GMF. The normalization methods are based on mathematical modeling of GMF in a residential area. Simplified physical models of reinforced concrete building structures are developed and used. The results of experimental studies are also used in the framework of the development of the methods. The following methods of normalization of GMF are presented and justified: 1) the use of special steel with a relative permeability less than 70 in housing construction; 2) restrictions on the use of long steel elements with the elongation coefficient in the critical range of $4 < b < 28$; 3) demagnetization of steel reinforcement before installing; 4) preventing the magnetization of steel reinforcement in the construction process. Practical recommendations for the design of «magnetic clean» houses with comfortable living conditions in connection to the GMF are proposed. References 15, figures 8.

Key words: static magnetic field, reinforced concrete structures, normalization of the geomagnetic field in the premises.

Е.И. Байда

УТОЧНЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

У статті розглянута математична модель мультифізичного процесу магнітно-імпульсної обробки матеріалу, що включає систему рівнянь електромагнітного поля, теорії пружності, теплопровідності і електричного кола з ємнісним накопичувачем енергії. Отримано чисельне розв'язання розробленої математичної моделі. Показано вплив: температури нагріву деталі на процес; струмів, що виникають за рахунок руху деталі в магнітному полі. Наведено кількісні і якісні характеристики процесу. Бібл. 10, рис. 19.

Ключові слова: магнітно-імпульсна обробка, електромагнітне поле, математична модель.

В статье рассмотрена математическая модель мультифизического процесса магнитно-импульсной обработки материала, которая включает систему уравнений электромагнитного поля, теории упругости, теплопроводности и электрической цепи с емкостным накопителем энергии. Получено численное решение разработанной математической модели. Показано влияние: температуры нагрева детали на процесс; токов, возникающие за счет движения детали в магнитном поле. Приведены количественные и качественные характеристики процесса. Библ. 10, рис. 19.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка, электромагнитное поле, математическая модель.

Введение. Процессы, происходящие при магнитно-импульсной обработке материалов, достаточно полно описаны в научной литературе начиная от справочников [1] и заканчивая монографиями [2, 3], не говоря о многочисленных статьях [4-7]. Недостатком многих работ (по мнению автора), является неполнота рассмотрения совокупности основных физических процессов и их взаимосвязи, громоздкость математических формул и сложность расчетных программ, проверить которые практически невозможно, не проделав ту же работу, что и автор. Но в последние годы в связи с появлением специальных программных комплексов (Comsol Multiphysics, Ansys и т.д.) ситуация в плане теоретического описания процессов кардинально изменилась, что позволяет сосредоточить внимание на входных данных, полноте описания процесса и результатах, а не на программировании и методах решения задачи. Данная статья является попыткой комплексного описания совокупности процессов магнитно-импульсной обработки материала в одном из таких программных комплексов. К основным уравнениям, описывающим физику этого процесса, можно отнести:

- 1) систему уравнений электромагнитного поля;
- 2) систему уравнений теории упругости;
- 3) уравнение теплопроводности;
- 4) уравнение разрядной электрической цепи.

Сложность решения такой задачи заключается во взаимной связи всех процессов.

Цель статьи – исследование и тестирование математической модели протекания динамических процессов магнитно-импульсной обработки материалов, определение влияния параметров на характер процесса в целом.

На рис. 1 показана половина рассматриваемой геометрической модели в цилиндрической (r - z) системе координат.

Допущения, принимаемые в работе:

- прочностные характеристики (модуль упругости, предел текучести, коэффициент Пуассона) не зависят от температуры;
- деформация и нагрев рассчитываются только для заготовки.

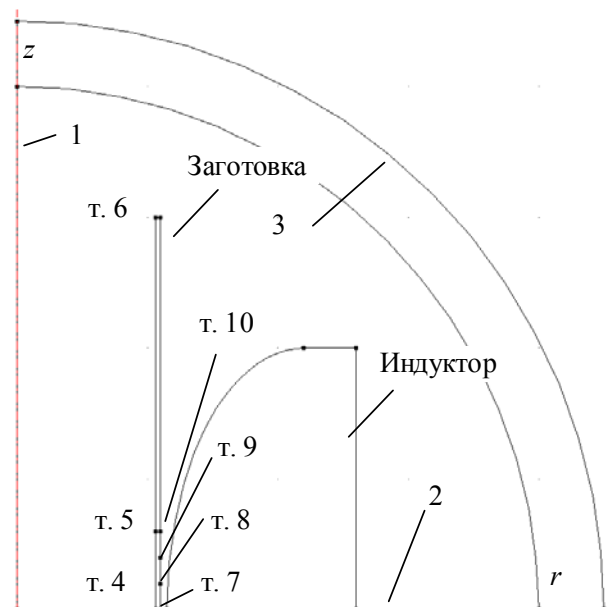


Рис. 1. Расчетная модель половины индуктора и заготовки в цилиндрической системе координат, где 1...3 – границы областей; т.4...т.10 – характерные точки на деформируемой заготовке

Размеры модели. Заготовка: толщина 2 мм, половина высоты 150 мм, диаметр 106 мм, материал – медь. Индуктор: половина высоты 200 мм; максимальная толщина 72 мм; минимальный зазор между индуктором и заготовкой 2,5 мм, материал индуктора – медь.

В статье рассматривается разряд емкостного накопителя энергии на массивный индуктор. Расчеты проводились для следующих параметров конденсатора: начальное напряжение – 1000 В; емкость – 5000 мкФ; тип разряда – аperiodический.

Математическая постановка задачи.

Система уравнение для векторного магнитного потенциала без учета токов смещения [8].

Окружающая среда:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \cdot \nabla \times \vec{A} \right) = 0, \quad (1)$$

где $\vec{A}$ – векторный магнитный потенциал; μ – абсолютная магнитная проницаемость.

Индуктор:

$$\sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \cdot \nabla \times \vec{A} \right) = \sigma \cdot \frac{u_c}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \vec{e}_\varphi, \quad (2)$$

где σ – проводимость материала; u_c – напряжение на емкости; r – значение радиуса внутри области индуктора; $\vec{e}_\varphi$ – орт.

Заготовка:

$$\begin{aligned} \sigma_T \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \cdot \nabla \times \vec{A} \right) &= \vec{e}_\varphi \cdot \sigma_T \cdot E_v; \\ \sigma_T &= \frac{\sigma_{T_0}}{1 + \alpha_e \cdot (T - T_0)}; \\ E_v &= V_z \cdot B_r - V_r \cdot B_z, \end{aligned} \quad (3)$$

где σ_T – удельная электрическая проводимость при температуре T ; α_e – температурный коэффициент сопротивления; E_v – напряженность электрического поля, вызванная деформацией заготовки; V – скорости деформации; B – магнитная индукция.

Как следует из (3), поле внутри заготовки определяется не только внешним полем, но и движением объекта.

Для уравнений (1) – (3) начальные условия нулевые, а граничные условия следующие: осевая симметрия на границе 1; симметрия на границе 2; имитация бесконечно удаленной области на границе 3.

Система уравнений, описывающая деформацию заготовки [9, 10]:

$$\begin{cases} -\rho \cdot \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \\ + \nabla \cdot ((\lambda + G) \cdot \nabla \cdot \vec{u} + G \cdot \beta \cdot \nabla \cdot \vec{v} + G \cdot \nabla \cdot \vec{u})) + \\ + \vec{f}_L - (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot \alpha \cdot \nabla \cdot T = 0; \\ \vec{v} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t}; \\ \lambda = \frac{\mu \cdot E}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}; \\ G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)}; \\ \vec{f}_L = \vec{j} \times \vec{B}, \end{cases} \quad (4)$$

где ρ – плотность; $\vec{u}$ – вектор перемещений; β – коэффициент демпфирования; α – коэффициент линейного расширения материала; T – температура; E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; $\vec{v}$ – скорость деформации заготовки; $\vec{f}_L$ – плотность силы Лоренца на единицу объема; $\vec{j}$ – плотность тока в заготовке; $\vec{B}$ – магнитная индукция.

В уравнении (4) значение деформации и скорости будут зависеть от координат и времени, поэтому в силу осевой симметрии

$$\begin{aligned} \vec{u} &= \vec{e}_r \cdot u_1(r, z, t) + \vec{e}_z \cdot u_2(r, z, t); \\ \vec{v} &= \vec{e}_r \cdot v_1(r, z, t) + \vec{e}_z \cdot v_2(r, z, t), \end{aligned}$$

где $\vec{e}$ – орты.

Коэффициент β определялся на основании уравнения, определяющего рассеяние энергии за период:

$$K = 1 - e^{-(2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot \beta \cdot \frac{1}{f}}, \quad (5)$$

где K – коэффициент, характеризующий потерю энергии при ударе; f – первая мода собственной частоты колебаний, определяемая на основании частотного уравнения.

Граничные условия: симметрия на нижней границе; нулевое радиальное перемещение на линии т.5...т.6; свободное перемещение на всех остальных границах. Так как деформируемый материал "весьма пластичен" (медь), то модуль упругости может быть представлен билинейной функцией, изменяющейся в зависимости от величины механических напряжений. Причем, если $\sigma > [\sigma_{ys}]$, где $[\sigma_{ys}]$ – предел текучести материала заготовки, то расчет производится по "кинематическому" модулю упругости.

Уравнения теплопроводности:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \cdot \nabla \cdot T) + q; \quad q = j^2 / \sigma_T, \quad (6)$$

где c – теплоемкость; ρ – плотность; T – температура; k – теплопроводность; q – объемная плотность внутренних источников тепла; j – плотность тока в заготовке, c , ρ , k – в данном расчете от температуры не зависят.

Ввиду кратковременности процесса в качестве граничных условий были выбраны теплоизолированные границы.

Уравнение электрической цепи. Принимаем, что напряжение подводится к индуктору через узкий зазор и равномерно распределено по поперечному сечению индуктора. Параметрами внешней электрической цепи пренебрегаем. Тогда:

$$u_c = U_{c0} - \frac{1}{C_e} \cdot \int_i i \cdot dt; \quad i = \int_S \left(-\frac{\partial A_\varphi}{\partial t} + \frac{u_c}{2 \cdot \pi \cdot r} \right) \cdot \sigma \cdot dS, \quad (7)$$

где u_c – напряжение на емкости; C_e – емкость конденсатора; i – ток индуктора; S – поперечное сечение индуктора; U_{c0} – начальное напряжение на конденсаторе.

Подлежащими определению являются значения векторного магнитного потенциала, деформации и скорости деформации, температуры и электрического напряжения, прикладываемого к индуктору. Все остальные величины являются производными от этих величин. Следовательно, система (1 – 3, 4, 6, 7) дает решение поставленной задачи.

Решение приведенной системы даже численными методами достаточно сложно, поскольку, помимо знаний по теории электромагнитного поля, теории упругости и теплопроводности, для получения численного решения необходимы глубокие знания по спецкурсам высшей и вычислительной математики, а также нужно обладать глубокими практическими навыками в области программирования на языках высокого уровня.

Как показывает практика, очень много времени занимает отладка и тестирование программы, если это вообще удастся сделать. Поэтому, в мировой практике над созданием таких программ работает, как правило, коллектив специалистов.

Ввиду того, что автор статьи не владеет всем объемом требуемых знаний, для решения задачи он воспользовался специальным прикладным пакетом программ, позволяющим существенно упростить процесс тестирования, отладки программы и получения результатов.

Результаты расчета электромагнитных характеристик. Изменение напряжения на конденсаторе показано на рис. 2, из которого следует, что время разряда конденсатора достаточно мало и составляет 20 мкс. Ток индуктора показан на рис. 3.

Исходя из закона сохранения энергии и учитывая небольшие потери энергии в заготовке, а также небольшое значение зазора, можно предположить, что ток в ней будет примерно таким же, как и на рис. 3, но с обратным знаком (рис. 4).

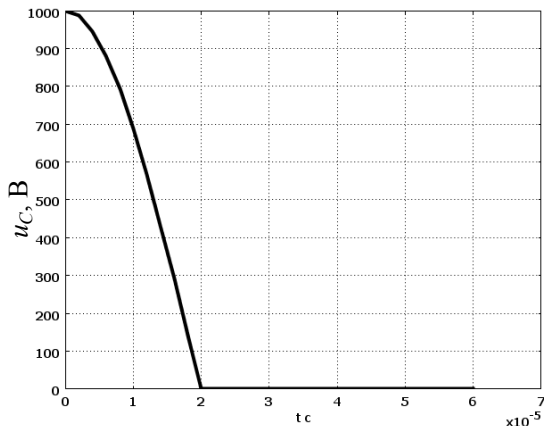


Рис. 2. Аperiodический разряд конденсатора

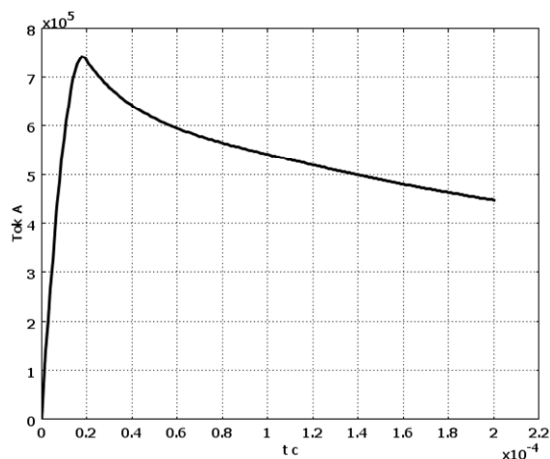


Рис. 3. Ток в индукторе

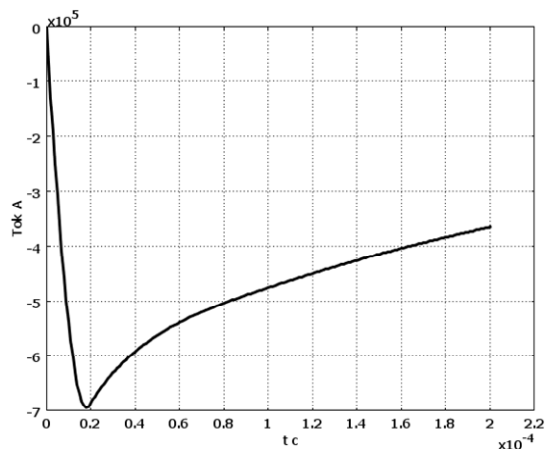


Рис. 4. Значение тока в деформируемом цилиндре

Полученные значения подтверждают высказанное предположение. Разница в максимальных значениях токов индуктора и заготовки отличается на величину не более 10 %.

Далее была исследована температура нагрева заготовки в некоторых характерных точках. Для этого вначале был получен график выделяемой тепловой мощности в заготовке, показанный на рис. 5 с учетом движения:

$$P = \int_V j \cdot \left(\frac{j}{\sigma_T} + E_v \right) \cdot dV, \quad (8)$$

где P – мощность, [Вт]; V – объем заготовки.

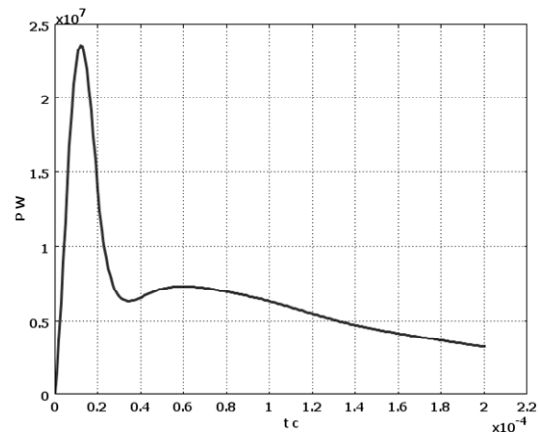


Рис. 5. Временная зависимость тепловой мощности в заготовке

Максимальное значение мощности, равное $2,4 \cdot 10^7$ Вт, – громадная величина, но учитывая небольшое время разряда и значительную теплоемкость материала, можно предположить, что нагрев за время разряда будет незначительным, что и подтверждается графиками изменения температур в характерных точках заготовки (рис. 6, расположение точек см. на рис. 1).

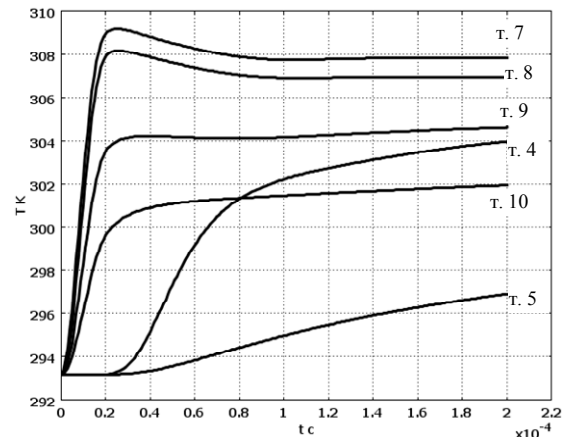


Рис. 6. Изменение температуры в точках на поверхности заготовки

Как и следовало ожидать, температура заготовки невелика и практически не влияет на значения проводимости и токов системы.

В большей степени на ток в заготовке влияет его составляющая, связанная с процессом движения. Так как значение напряженности электрического поля в случае движения проводника в магнитном поле определяется соотношением:

$$E_{\varphi} = -\frac{\partial A_{\varphi}}{\partial t} + (V_z \cdot B_r - V_r \cdot B_z), \quad (9)$$

то можно предположить, что ток, вызванный движением, будет иметь знак, противоположный наведенному

току, поскольку в данном примере $V_z \cdot B_r \approx 0$, а $V_r \cdot B_z \leq 0$, так как $V_r \leq 0$, $B_z \geq 0$, что подтверждается расчетом (рис. 7).

Ток, возникающий вследствие движения заготовки, уменьшает значение индуцированного тока в ней и, соответственно, влияет на ток индуктора. Разница между индуцированным в заготовке током и его суммарным значением и равна величине тока движения. Значение тока движения достаточно велико и влияет на силы, приложенные к заготовке. Следовательно, при разработке математической модели этот эффект необходимо учитывать.

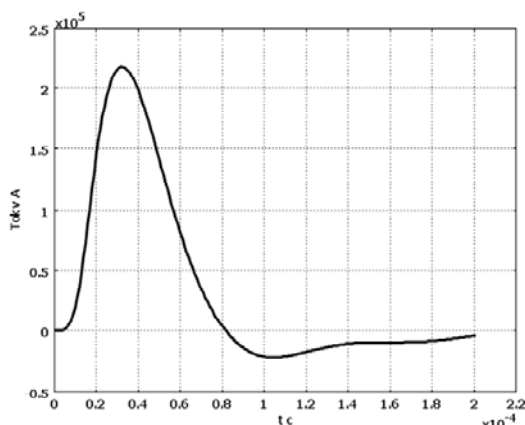


Рис. 7. Ток "движения" заготовки

На рис. 8 приведено значение интеграла от объемной плотности силы Лоренца (4) по объему заготовки.

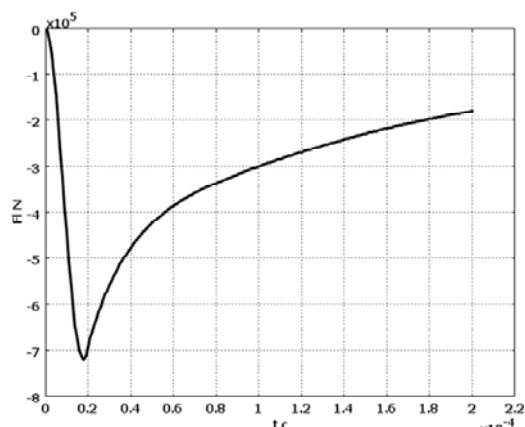


Рис. 8. Значение интеграла силы Лоренца по объему

Полученное суммарное значение силы достаточно велико, однако оно не дает информации о характере распределения этой силы. Поэтому интерес представляют значения силы на единицу объема в характерных точках заготовки. Так как сила Лоренца (радиальная компонента) объемная, то значения силы были рассмотрены в точках (4, 5, 7 ... 10).

Результат показан на рис. 9, из которого можно сделать вывод о том, что, несмотря на распределение силы Лоренца по объему заготовки, наибольшие ее значения расположены вблизи поверхности, что можно объяснить распределением плотности тока и магнитной индукции по толщине заготовки.

На рис. 10 показаны расчетные значения магнитной индукции в точках (4, 5, 7 ... 10).

Полученные значения магнитной индукции очень велики и сосредоточены вблизи поверхности заготовки,

что подтверждает характер распределения сил Лоренца. Такие значения магнитной индукции определяются значениями токов, расчет которых проводился в пренебрежении переходными контактными сопротивлениями и параметрами внешней электрической цепи. Эти параметры могут быть на порядки больше, чем идеальное сопротивление медного индуктора, которое принималось равным 1,7 мкОм при значении индуктивности индуктора порядка $5 \cdot 10^{-7}$ Гн. Для сравнения, переходное контактное сопротивление в случае хорошего контакта имеет порядок $10^{-4} \dots 10^{-5}$ Ом.

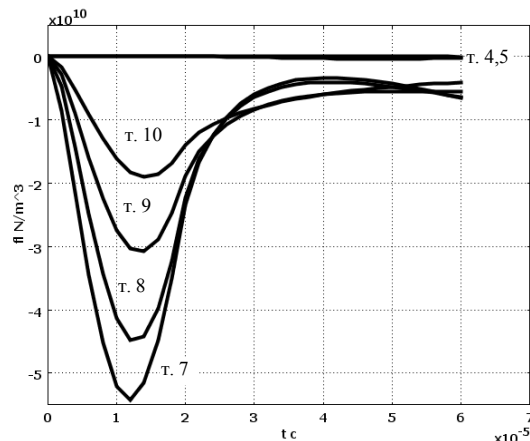


Рис. 9. Распределение объемных сил по толщине заготовки

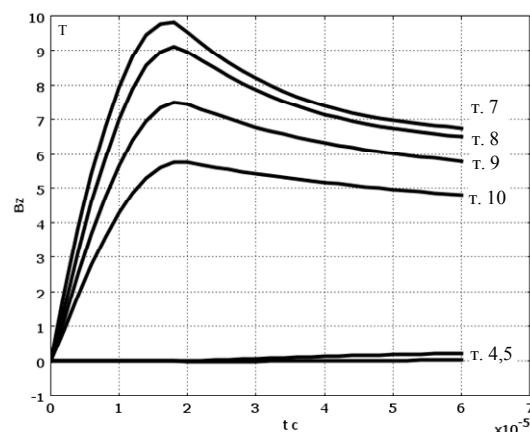


Рис. 10. Расчетные значения магнитной индукции

На рис. 11 показано распределение сил Лоренца по радиусу в плоскости $z = 0$.

Результаты исследования механических параметров деформации заготовки. Вполне естественно предположить, что полученные значения токов и, следовательно, сил будут оказывать значительное воздействие на заготовку.

На рис. 12 показано радиальное смещение точек 7 – 9, (см. рис. 1).

Если учесть, что максимум перемещения приходится на время $t = 8 \cdot 10^{-5}$ с, а максимум объемной силы на время $t = 1.2 \cdot 10^{-5}$ с (рис. 9), то можно предположить, что силы инерции играют существенную роль в движении заготовки и пренебрегать ими нельзя (по крайней мере, в данном случае).

Одним из граничных условий, задаваемых для силового расчета, было условие отсутствия радиального перемещения на линии т.5...т.6. Это означает возможность свободного перемещения заготовки вдоль этой линии в осевом направлении, что показано на рис. 13.

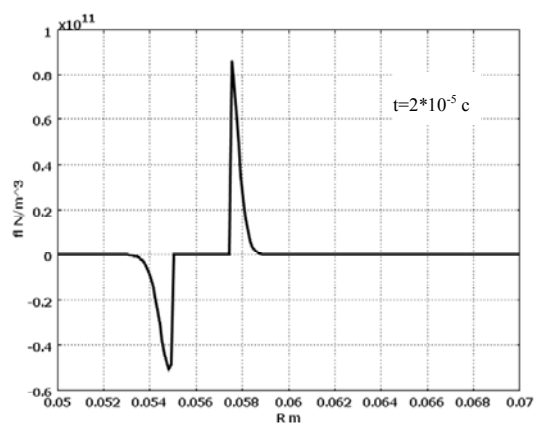


Рис. 11. Распределение силы Лоренца в заготовке и индукторе в плоскости $z = 0$

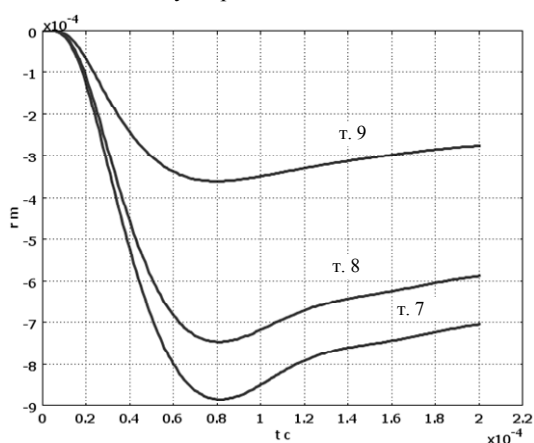


Рис. 12. Радиальное смещение точек заготовки

Необходимо отметить, что изначально т. (5, 10) находились на одной высоте, а получили разные перемещения (растяжение заготовки). Небольшая разница в радиальном перемещении наблюдается для точек (4, 7), находящихся на линии симметрии (см. рис. 1). Это свидетельствует о наличии изменения объема заготовки в процессе силового воздействия.

Значения скорости деформации достаточно велики и показаны на (рис. 14, рис. 15) для тех же точек, что и перемещения (рис. 12). Вертикальная составляющая скорости показана на рис. 15. Распределение напряжений по Мизесу показано на рис. 16.

Исходя из принятых допущений, пластическая деформация начинается при значениях механических напряжений более $2 \cdot 10^8$ Па через время примерно $2 \cdot 10^{-5}$ с (рис. 16). Сопоставив рис. 16 и рис. 12, можно заметить, что в процессе преобладает пластическая деформация заготовки.

Для оценки вклада температуры нагрева заготовки в распределение механических напряжений необходимо учесть следующее:

1. Несмотря на небольшую толщину заготовки (2 мм), распределение температуры по радиусу неравномерно (см. рис. 6), что обусловлено значительным градиентом температур в начальные моменты времени.
2. Неравномерность температур и большие градиенты наблюдаются и в осевом направлении.
3. На основании полученных данных заготовка, в расчетном плане, должна рассматриваться как цилиндр с "толстыми" стенками.

4. Так как температура нагрева является функцией трех переменных ($T = T(r, z, t)$), то аналитическое решение задачи расчета температурных напряжений по полученным значениям температуры затруднительно (в [3] приведены решения для частных случаев).

Поэтому, для оценки вклада температуры, проще решить задачу (1...4, 6, 7) при условии, что в (4):

$$\bar{f}_L = 0. \quad (10)$$

Это означает, что заготовка подвержена воздействию только температурных напряжений при точно таких же, как и ранее, значениях токов, температур и выделяемой тепловой мощности.

На рис. 17 приведены радиальные смещения заготовки под действием температуры.

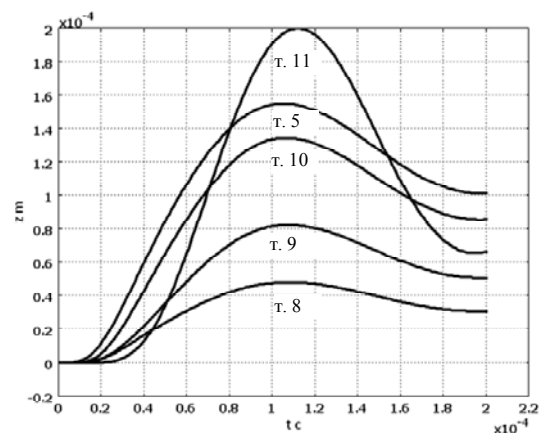


Рис. 13. Вертикальное смещение точек заготовки

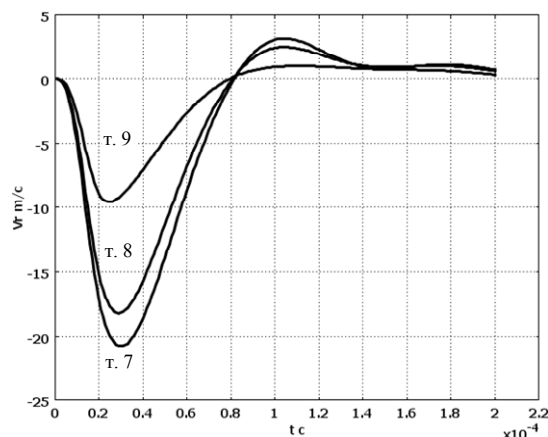


Рис. 14. Радиальная составляющая скорости точек на поверхности заготовки

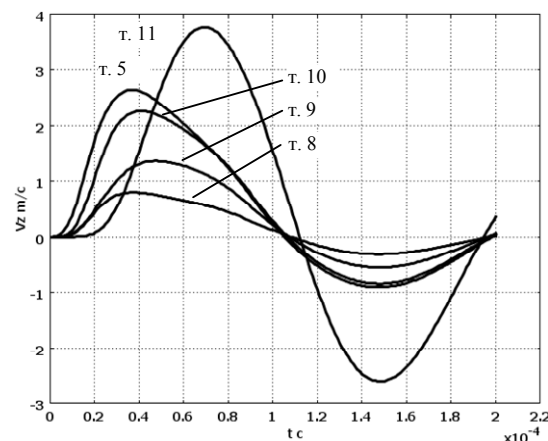


Рис. 15. Вертикальные составляющие скорости

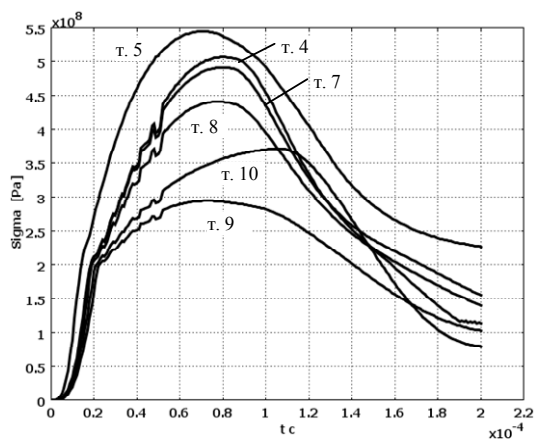


Рис. 16. Распределение напряжений

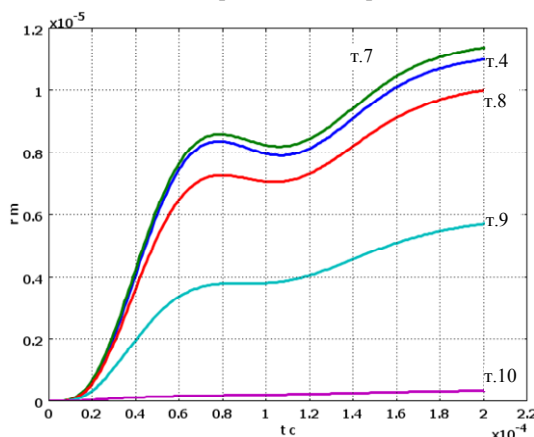


Рис. 17. Температурные радиальные перемещения

Сравнение рис. 17 с рис. 12 показывает: температурные перемещения на два порядка меньше суммарных деформационных перемещений и противоположны им по знаку. Тоже можно сказать и о величине вертикальных перемещений, но не об их знаке. Величина вертикальных температурных смещений имеет порядок 10^{-6} м.

На рис. 18 показана форма температурной и суммарной деформации заготовки в увеличенном масштабе, а также значения максимального эквивалентного механического напряжения.

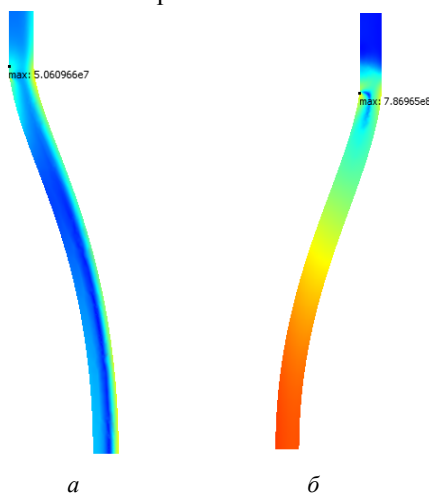


Рис. 18. Температурная (а) и суммарная (б) деформации заготовки

Из рис. 18 следует, что максимальные температурные напряжения сосредоточены на внешней поверхности цилиндрической заготовки и по направле-

нию противоположны суммарной деформации. Как следует из расчета, максимальными являются угловые и осевые напряжения, которые по модулю на порядок больше радиальных механических напряжений. Точка максимума напряжений на рис. 18 – точка прилегания заготовки к матрице.

На рис. 19 приведены значения эквивалентных температурных напряжений в точках, что и на рис. 16.

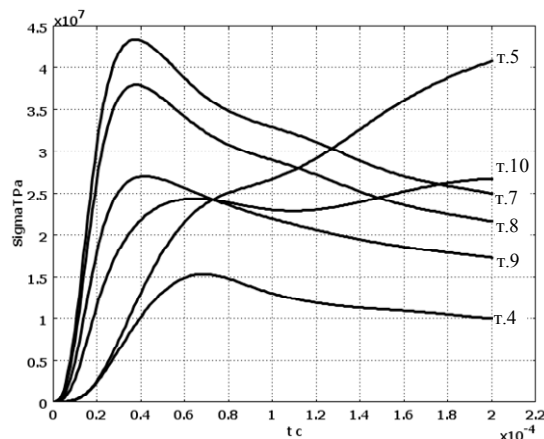


Рис. 19. Временная зависимость температурных напряжений

Из данных о температурных перемещениях и механических напряжениях следует:

- температурные перемещения составляют единицы процента от общих деформационных перемещений;
- механические температурные напряжения равны примерно 10 % от суммарных механических напряжений, что можно объяснить билинейной зависимостью модуля упругости;
- температурные напряжения (даже при полученных небольших температурах нагрева) составляют величину порядка 22 % от предела текучести материала, что можно объяснить значительными градиентами температуры.

Выводы.

1. Разработана и исследована математическая модель мультифизических процессов магнитно-импульсной обработки материалов, позволяющая уточнить динамический характер протекания и вклад основных физических процессов в процесс деформации заготовки.
2. Температуры нагрева заготовки невелики за счет кратковременности процесса, значительной теплоемкости материала и мало влияют на значения проводимости и токов в системе.
3. Токи, возникающие за счет движения деформируемой заготовки, имеют порядок суммарного тока заготовки и должны учитываться в расчетах.
4. Объемные силы Лоренца могут быть сведены к поверхностным силам для индуктора, но не для заготовки.
5. При расчетах токов, определяющее значение приобретают переходные контактные сопротивления и параметры внешней цепи подключения накопительного конденсатора, которые могут быть на порядки больше сопротивления и индуктивности индуктора.
6. Несовпадение времен максимума силы и перемещения доказывает значительное влияние сил инерции на процесс деформации.
7. Заготовка претерпевает как радиальные, так и осевые перемещения, связанные с изменением объема, что должно учитываться соответствующей составляющей в уравнении деформации (4).

8. Учитывая значения скоростей перемещения токов и время нарастания скорости (расчетные ускорения достигают значений 10^5 м/с²), можно говорить об ударном воздействии на заготовку, что требует учета кинематических характеристик материала.

9. Без учета билинейной зависимости модуля упругости заготовки, расчетные механические напряжения в заготовке в 5 раз превышают напряжения начала пластической деформации, чего быть не может.

10. Температурные деформации на порядок меньше механических напряжений (в данном расчете) и противоположны им по знаку.

11. Значительный градиент температур вызывает температурные поверхностные напряжения, которые по величине составляют примерно 22 % от предела текучести материала (для медной заготовки) и должны учитываться при расчете.

12. Теоретические положения данной работы нуждаются в дальнейшей экспериментальной проверке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке материалов. – Х.: Вища школа, 1977. – 189 с.
2. Туренко А.Н., Батыгин Ю.И., Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями. Монография. – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
3. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 200 с.
4. Бондаренко А.Ю. Электромагнитные процессы в плоской индукторной системе с двумя катушками при равномерном распределении в них поверхностных токов // *Электротехника и электромеханика*. – 2012. – №3. – С. 61-65.
5. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Чаплыгин Е.А., Смирнов Д.А. Электромагнитные процессы в индукционной индукторной системе с круговым витком с разрезом между двумя тонкими металлическими листами // *Электротехника и электромеханика*. – 2012. – №3. – С. 51-55.
6. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Сериков Г.С. Расчет усилий в индукционной индукторной системе прямоугольной геометрии с неферромагнитным массивным экраном и заготовкой // *Электротехника и электромеханика*. – 2009. – №3. – С. 61-64.
7. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Расчет электродинамических усилий в индукционной индукторной системе с неферромагнитным массивным экраном и листовой заготовкой // *Электротехника и электромеханика*. – 2009. – №4. – С. 56-59.
8. Рамо С., Уинери Дж. Поля и волны в современной радиотехнике. – М.-Л.: Государственное издательство научнотехнической литературы, 1948. – 631 с.
9. Френкель Я.И. Курс теоретической механики. – Л.: Типография «Красный печатник», 1939. – 386 с.
10. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. Пер. с англ. / Под ред. Шапиро Г.С. – М.: Наука, 1979. – 560 с.

REFERENCES

1. Belyj I.V., Fertik S.M., Himenko L.T. *Spravochnik po magnitno-impul'snoj obrabotke metallov* [Directory of magnetic-pulse treatment of metals]. Kharkiv, Vishcha shkola Publ., 1977, 189 p. (Rus).
2. Turenko A.N., Batygin Yu.V., Gnatov A.V. *Impul'snyie magnitnyie polya dlya progressivnykh tekhnologiy. Tom 3. Teoriia i eksperiment pritiiazheniia tonkostennykh metallov impul'snymi magnitnymi poliiami* [The pulse magnetic fields for advanced technologies. Vol.3. Theory and experiment of thin-walled metals attraction by the pulse magnetic fields]. Kharkov, KhNAHU Publ., 2009. 240 p. (Rus).
3. Shneerson G.A. *Polya i perehodnye processy v apparature sverhsil'nykh tokov* [Fields and transients in equipment ultra strong currents]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 200 p. (Rus).

4. Bondarenko A.Yu. Electromagnetic processes in a flat inductor system with two coils under uniform surface currents distribution in the coils. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.3, pp. 61-65. (Rus).

5. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin E.A., Smirnov D.O. Electromagnetic processes in an inductor induction inductive circular-turn system with a cut between two thin-walled metal sheets. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.3, pp. 51-55. (Rus).

6. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Serikov G.S. Calculation of forces in a rectangular-geometry induction inductor system with a non-ferromagnetic massive screen and a work-piece. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2009, no.3, pp. 61-64. (Rus).

7. Batygin Yu.V., Gnatov A.V. Calculation of electrodynamic forces in an induction inductor system with a non-ferromagnetic massive screen and a sheet work-piece. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2009, no.4, pp. 56-59. (Rus).

8. Ramo S., Uineri D. *Polia i volny v sovremennoi radio-tekhnike* [Fields and waves in modern radio engineering]. Moscow-Leningrad, State publishing scientific and technical literature, 1948. 631 p. (Rus).

9. Frenkel' Ya.I. *Kurs teoreticheskoi mekhaniki* [Course of Theoretical Mechanics]. Leningrad, Krasniy pechatnik Publ., 1939. 386 p. (Rus).

10. Timoshenko S.P., Gudier Dzh. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 560 p. (Rus).

Поступила (received) 20.12.2014

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.

A refined mathematical model of multiphysics processes for magnetic pulse treatment of materials.

Introduction. The complexity of the theoretical description of the magnetic pulse treatment of the material is in the mutual coupled processes of electromagnetic and thermal fields with plastic deformation of the material and processes in an electrical circuit. The paper deals with the combined transient mathematical model of the system of equations of the electromagnetic field, theory of elasticity, thermal conductivity and electrical circuit. **Purpose.** Research and testing of the developed mathematical model and assess the impact of various parameters on the process of deformation of the work piece. **Methodology.** Investigation of nonlinear mathematical model is carried out by the finite element method using a special software package. **Results.** The resulting solution of the transient mathematical model allows studying the influence of parameters of the circuit, the speed and the characteristics of the material to plastic deformation and heating of the work piece, which allows to select the optimum process parameters. **Originality.** This is an integrated approach to the development of a mathematical model, which includes the electromagnetic field equations, the theory of elasticity, thermal conductivity and electrical circuit equations with a storage capacitor. **Conclusions.** A comprehensive mathematical model and its solution are obtained. It is established a small effect of heating temperature on the amount of strain. Currents caused by movement of the work piece must be taken into account in the calculations. Inertial forces significantly affect the nature of the deformation. During the deformation it is necessary to consider the nonlinearity of elasticity modulus. Thermal deformation of the work piece is much less mechanical strain and opposite in sign to them, but the surface temperature stresses due to the high temperature gradient equal to 20 % of the yield strength of the work piece. References 10, figures 19.

Key words: magnetic pulse treatment, electromagnetic field, mathematical model.

ТРЕХЭЛЕКТРОДНЫЙ ВОЗДУШНЫЙ КОММУТАТОР С ГРАФИТОВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ КВТГ-50 НА НАПРЯЖЕНИЕ ДО ± 50 КВ И ИМПУЛЬСНЫЙ ТОК АМПЛИТУДОЙ ДО ± 220 КА

Представлені основні технічні характеристики і короткий опис конструкції високовольтного трьохелектродного сильноточного повітряного коммутатора з графітовими електродами КВТГ-50 на номінальну напругу ± 50 кВ. Створений зразок коммутатора призначений для роботи в розрядному колі потужного високовольтного генератора нормованих мікророзрядних імпульсів струму штучної блискавки з амплітудою $I_m = \pm(200 \pm 20)$ кА при їх тривалості $\tau_p = (350 \pm 35)$ мкс на рівні $0,5 \cdot I_m$. Даний коммутатор каскадного типу із-за застосування графітових електродів володіє підвищеним робочим ресурсом і підвищеною стабільністю спрацювання при його використанні у складі генератора струму імітованої лінійної блискавки. Бібл. 13, рис. 3.

Ключові слова: високовольтний сильноточний повітряний трьохелектродний коммутатор, графітовий основний і керуючий електроди, генератор мікророзрядних імпульсів струму штучної лінійної блискавки.

Представлены основные технические характеристики и краткое описание конструкции высоковольтного трехэлектродного сильноточного воздушного коммутатора с графитовыми электродами КВТГ-50 на номинальное напряжение ± 50 кВ. Созданный образец коммутатора предназначен для работы в разрядной цепи мощного высоковольтного генератора нормированных микросекундных импульсов тока искусственной молнии с амплитудой $I_m = \pm(200 \pm 20)$ кА при их длительности $\tau_p = (350 \pm 35)$ мкс на уровне $0,5 \cdot I_m$. Данный коммутатор каскадного типа из-за применения графитовых электродов обладает повышенным рабочим ресурсом и повышенной стабильностью срабатывания при его использовании в составе генератора тока имитированной линейной молнии. Библ. 13, рис. 3.

Ключевые слова: высоковольтный сильноточный воздушный трехэлектродный коммутатор, графитовый основной и управляющий электроды, генератор микросекундных импульсов тока искусственной линейной молнии.

Введение. Высоковольтные сильноточные воздушные коммутаторы из-за простоты конструкции и относительно малой стоимости нашли весьма широкое практическое применение в области высоковольтной импульсной техники (ВИТ) [1-3]. Используются они, как правило, в разрядных схемах мощных емкостных и индуктивных накопителей энергии. Промышленным образом данные высоковольтные коммутирующие устройства у нас не выпускаются. Поэтому в случае необходимости (например, при создании соответствующего высоковольтного оборудования для научных и электротехнологических целей) специалистам-высоковольтикам приходится самостоятельно решать технические задачи по разработке и изготовлению подобных коммутаторов. При этом одной из актуальных задач для коммутации больших импульсных токов (БИТ) является та, которая связана с обеспечением рабочего ресурса (числа срабатываний) используемых коммутаторов, исчисляемого тысячами включений и прохождением через их электроды большого количества зарядов (в десятки Кл) и соответственно БИТ (с амплитудой тока в десятки и сотни кА). Не менее важной задачей при этом в области ВИТ остается та, которая связана с обеспечением высокой стабильности срабатывания рассматриваемых коммутаторов. Указанные задачи с особой остротой возникают при создании мощных высоковольтных генераторов, формирующих на электрической нагрузке (объекте испытаний) импульсный ток искусственной линейной молнии [4]. В [5] была описана конструкция высоковольтного трехэлектродного воздушного управляемого разрядника с графитовыми электродами типа РВГУ-50, рассчитанного на напряжение ± 50 кВ и работу в разрядной сильноточной цепи генератора импульсного тока молнии (ГИТМ). С целью дальнейшего расширения собственных техни-

ческих возможностей и обеспечения внутреннего резервирования комплектующими элементами проводимых высоковольтных работ в НИО №4 НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» перед его сотрудниками возникла техническая задача по оперативной разработке и созданию упрощенной конструкции высоковольтного сильноточного воздушного коммутатора с графитовыми электродами, предназначенного для работы в составе ГИТМ.

1. Краткое описание конструкции высоковольтного трехэлектродного воздушного коммутатора с графитовыми электродами типа КВТГ-50. На рис. 1 приведен общий вид сверху высоковольтного сильноточного коммутатора типа КВТГ-50 массой до 11 кг, а на рис. 2 – его общий вид сбоку. Из данных рис. 1 и 2 видно, что этот коммутатор, относящийся к каскадному виду высоковольтных разрядников, содержит два основных полусферических электрода и один управляющий практически сферический электрод, размещенный снизу между его основными электродами. Рабочие полусферические элементы основных электродов коммутатора выполнены из графита марки ГЭ и имеют диаметр 72 мм. Графитовые полусферические элементы основных электродов описываемого коммутатора утоплены примерно на 25 мм в круглые цилиндрические стальные фланцы наибольшим диаметром 92 мм (материал – сталь 3), и жестко закреплены в них с помощью восьми стальных винтовых соединений, равномерно распределенных по их наружному круговому периметру. Круглое сплошное основание стальных фланцев по центру приварено к одиночному стальным шпилькам диаметром 20 мм и длиной 170 мм, имеющим на всей своей длине метрическую резьбу. Стальные шпильки фланцев основных электродов коммутатора закреплены с помощью

© М.И. Баранов, С.В. Рудаков, В.Л. Цехмистро

стальных гаек М20 на массивных вертикальных изоляционных плитах (материал – СТЭФ) толщиной 30 мм, высотой 240 мм и шириной 250 мм.



Рис. 1. Общий вид сверху высоковольтного трехэлектродного воздушного коммутатора с графитовыми основными и управляющим электродами типа КВТГ-50 на номинальное напряжение ± 50 кВ и импульсный ток амплитудой до ± 220 кА микросекундного временного диапазона

Данные стеклопластиковые плиты рассматриваемого коммутатора КВТГ-50 между собой раскреплены по углам при помощи четырех круглых изоляционных тяг (материал – текстолит) диаметром 20 мм и длиной 300 мм. Тяги с указанными плитами соединены при помощи стальных винтовых соединений. Горизонтальные оси стальных шпилек, стальных фланцев и графитовых частей основных электродов расположены на высоте 175 мм над плоским изоляционным основанием толщиной 10 мм (материал – СТЭФ) этого коммутатора. Горизонтальное основание созданного коммутатора типа КВТГ-50 установлено на четырех опорных изоляторах марки BUS-BAR-SM-57 высотой 57 мм [5], расположенных по углам его плоского прямоугольного основания и закрепляемых на рабочем столе мощного генератора ГИТМ-10/350.

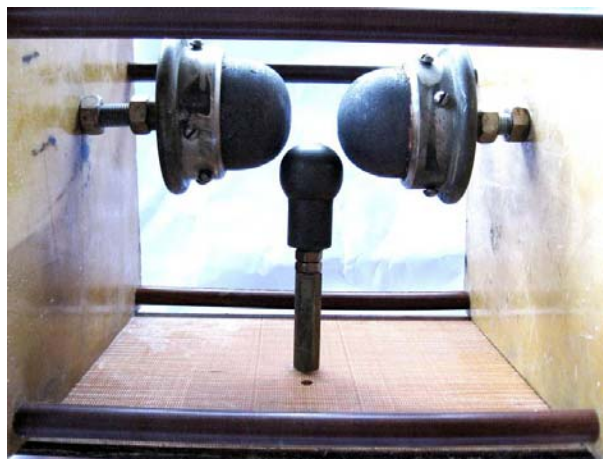


Рис. 2. Общий вид сбоку высоковольтного трехэлектродного воздушного коммутатора с графитовыми основными и управляющим электродами типа КВТГ-50 на номинальное напряжение ± 50 кВ и импульсный ток амплитудой до ± 220 кА микросекундного временного диапазона

Конструкция основных электродов рассматриваемого коммутатора КВТГ-50 позволяет изменять их

положение в горизонтальной плоскости, расположенной на высоте 175 мм над неподвижным плоским стеклопластиковым основанием коммутатора, и тем самым легко изменять расстояние между ними в пределах от нуля до 100 мм и соответственно выбирать требуемую по условиям работы генератора ГИТМ-10/350 длину l_0 его основного воздушного промежутка. Под основными электродами описываемого нами коммутатора вертикально размещен управляющий сферический электрод диаметром 43 мм, выполненный из графита марки ГЭ и фиксировано закрепленный с помощью резьбового соединения на вертикально установленной стальной шпильке диаметром 18 мм. Данная шпилька с помощью стальной гайки жестко закреплена на плоском стеклопластиковом основании коммутатора. Согласно рис. 2 коммутатор типа КВТГ-50 имеет два рабочих искровых промежутка, меньший из которых длиной l_1 примыкает к его непотенциальному основному электроду, а больший длиной l_2 – к потенциальному основному электроду, подсоединенному к потенциальной токопроводящей шине коллектора генератора ГИТМ-10/350. Длины l_1 и l_2 рабочих искровых промежутков изменяются путем соответствующего перемещения в горизонтальной плоскости основных электродов коммутатора, расположенных между стеклопластиковыми плитами, отстоящими друг от друга на расстоянии 300 мм. Диапазон такого изменения величин l_1 и l_2 составляет от 1 до 20 мм. Укажем, что перед установкой в коммутатор его графитовые элементы после токарной обработки были подвергнуты нами тщательной полировке.

Одной из отличительных особенностей разработанного высоковольтного коммутатора типа КВТГ-50 является то, что графитовые элементы в нем используются практически только в локальной зоне генерирования и прохождения по воздушным промежуткам длиной l_1 и l_2 сильноточных искровых разрядов. Такое исполнение графитовых элементов его основных и управляющего электродов с удельной электропроводностью их материала около $1,25 \cdot 10^5$ (Ом·м)⁻¹ [11] приводит к уменьшению их активного сопротивления, вносимого коммутатором в низкоомную разрядную цепь генератора ГИТМ-10/350. Заметим, что собственное суммарное активное сопротивление разрядной цепи указанного генератора составляет порядка сотни миллиом. Выполненная расчетная оценка активного сопротивления применяемых в коммутаторе КВТГ-50 графитовых элементов его электродов показывает, что оно может достигать лишь порядка единицы миллиом. Поэтому данные графитовые элементы электродов коммутатора КВТГ-50 практически не будут изменять суммарное активное сопротивление высоковольтной разрядной цепи генератора ГИТМ-10/350.

Другой отличительной особенностью высоковольтного коммутатора типа КВТГ-50 является его способность к длительному поддержанию существования (горения) плазменных каналов искровых разрядов в воздушных промежутках длиной l_1 и l_2 . Для высоковольтных генераторов тока искусственной молнии, формирующих на электрической нагрузке импульсные как относительно короткие, так и длительные токовые компоненты линейной молнии длитель-

ностью от сотен микросекунд до сотен миллисекунд (в пределе до 1 с) [4-10], эта способность коммütирующих устройств их разрядных цепей имеет большое значение. С помощью коммütаторов с графитовыми электродами в разрядных цепях таких генераторов можно достаточно длительно (на время до 1000 мс) поддерживать протекание импульсного тока имитированной молнии. Применительно к коммütатору типа КВТГ-50 объясняется эта способность электрофизикой явлений, протекающих на его графитовых электродах. Как известно, с одной стороны, графит марки ГЭ при его температуре плавления около 3800 °С [11], что определяет его высокие термоэрозионные качества, имеет относительно высокое значение работы выхода свободных электронов, составляющее около $4,7 \text{ эВ} \approx 7,53 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ [12]. Это свойство графита марки ГЭ приводит к увеличению времени задержки срабатывания трехэлектродного коммütатора с основными электродами, выполненными из такого материала, после подачи на его управляющий электрод высоковольтного (с амплитудой порядка $\pm 100 \text{ кВ}$) микросекундного импульса напряжения поджига и возникновения на них (этих электродах) из-за ударной ионизации газовой среды разрядных искровых промежутков коммütатора пробивного напряжения. С другой стороны, графит марки ГЭ, по сравнению с основными проводниковыми металлами (например, медью и сталью 3) и их сплавами (например, латунью Л62), обладает наиболее низким действующим значением критического тока I_k (для промышленной частоты 50 Гц оно составляет около 2 А [13]), ниже (меньше) которого нагретое основание плазменного канала как дугового, так и импульсного искрового разряда на поверхности электрода практически мгновенно (за время около 1 мкс [13]) охлаждается. Для сравнения приведенных данных по уровню тока I_k для графита марки ГЭ с аналогичными параметрами для иных материалов заметим, что для медных электродов коммütатора критический ток I_k численно составляет около 165 А [13]. Охлаждение указанного круглого основания («пятна») канала разряда на поверхности того или иного электрода коммütатора приводит к прекращению термоэмиссии свободных электронов с поверхности проводящего электрода в зону газового (воздушного) промежутка коммütатора. По этой причине при разрядном токе, протекающем в коммütаторе, меньше критического значения I_k в нем (коммütаторе) будет происходить скачкообразное восстановление электрической прочности его газоразрядного промежутка, вызывающее погасание канала импульсного разряда и соответственно прерывание разрядного тока в силовоточной цепи высоковольтного генератора.

2. Результаты экспериментальной апробации высоковольтного трехэлектродного воздушного коммütатора с графитовыми электродами типа КВТГ-50. Созданный высоковольтный коммütатор типа КВТГ-50 прошел опытную проверку своей работоспособности в силовоточной разрядной цепи мощного генератора ГИТМ-10/350 [5], формирующего на низкоомной активно-индуктивной нагрузке ($R_H \approx 0,1 \text{ Ом}$; $L_H \approx 1,5 \text{ мкГн}$) нормированные аperiodические импульсы тока искусственной молнии временной

формы $\tau/\tau_p = 10 \text{ мкс}/350 \text{ мкс}$, где τ , τ_p – соответственно длительность фронта (с допуском $\pm 20 \%$) и длительность импульса тока на уровне $0,5 \cdot I_m$ (с допуском $\pm 10 \%$), с амплитудой $I_m = \pm(100-200) \text{ кА}$ (с допуском $\pm 10 \%$) [6-10]. При зарядном напряжении $U_{31-3} = -15 \text{ кВ}$ трех параллельно работающих на указанную общую активно-индуктивную нагрузку генераторов импульсных токов (ГИТ), собранных на основе 175 шт. высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИК-50-3 и входящих в состав генератора импульсного тока искусственной молнии типа ГИТМ-10/350, коммütатор КВТГ-50 обеспечивал коммütацию аperiodического импульса тока временной формы 15 мкс/325 мкс с амплитудой $I_m \approx -98,2 \text{ кА}$, соответствующей времени $t_m = 24 \text{ мкс}$. При этом зарядное напряжение четвертого ГИТ, содержащего 288 шт. последовательно-параллельно включенных высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИМ2-5-140 и формирующего спад данного токового импульса, составляло $U_{34} = -2,25 \text{ кВ}$. На рис. 3 приведена осциллограмма полученного в разрядной цепи генератора ГИТМ-10/350 импульса тока искусственной молнии, прошедшего через изготовленный коммütатор КВТГ-50.

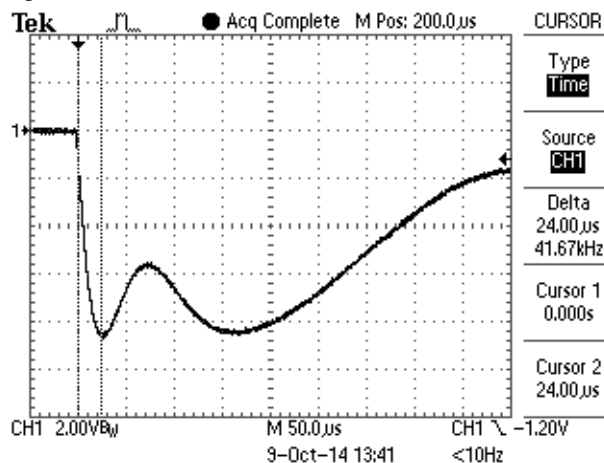


Рис. 3. Осциллограмма аperiodического импульса тока искусственной молнии временной формы 15 мкс/325 мкс с амплитудой $I_m \approx -98,2 \text{ кА}$ в разрядной цепи мощного генератора ГИТМ-10/350 на стадии его пуско-наладки, содержащего высоковольтный силовоточный коммütатор типа КВТГ-50 ($U_{31-3} = -15 \text{ кВ}$; $U_{34} = -2,25 \text{ кВ}$; $t_m = 24 \text{ мкс}$; масштаб по вертикали – 22,52 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

При получении импульсного тока в разрядной цепи генератора ГИТМ-10/350, осциллограмма которого приведена на рис. 3, разряд четвертого ГИТ с 288 шт. высоковольтными импульсными конденсаторами типа ИМ2-5-140 на указанную активно-индуктивную нагрузку осуществлялся посредством высоковольтного двухэлектродного воздушного коммütатора типа КВДГ-10 на номинальное напряжение $\pm 10 \text{ кВ}$, выполненного также с графитовыми электродами и запускаемого в работу одновременно с коммütатором КВТГ-50 с помощью существующего генератора высоковольтных поджигающих импульсов типа ГВПИ-100 на выходное импульсное напряжение амплитудой до $\pm 100 \text{ кВ}$ микросекундной длительности [3, 4]. Для полноты приведенных выше исходных технических

данных укажем, что при формировании апериодического импульса тока временной формы 15 мкс/325 мкс параллельный разряд четырех высоковольтных ГИТ мощного генератора ГИТМ-10/350 на выбранную общую электрическую RL -нагрузку выполнялся с использованием встроенной в его силовую цепь разрядную цепь взрывающейся тонкой медной проволоки диаметром 0,2 мм и длиной 50 мм, размещенной в зоне рабочего стола генератора. Отметим, что амплитудно-временные параметры апериодического импульса тока искусственной молнии отрицательной полярности, приведенного на рис. 3, были зарегистрированы нами с помощью включенного в непотенциальную («заземленную») силовую цепь разрядную цепь мощного генератора ГИТМ-10/350 измерительного коаксиального шунта типа ШК-300 с коэффициентами преобразования $11,26 \cdot 10^3$ А/В [3, 4] и цифрового запоминающего осциллографа типа Tektronix TDS 1012, прошедших в сентябре 2014 года государственную метрологическую поверку. Результаты визуального обследования электродной системы коммутатора типа КВТГ-50 при $l_1 \approx 2$ мм и $l_2 \approx 5$ мм после прохождения через него в силовой цепи разрядной цепи мощного генератора ГИТМ-10/350 не менее десяти апериодических импульсов тока временной формы 15 мкс/325 мкс с модулем амплитуды I_m до 100 кА ($U_{31-3} = -15$ кВ; $U_{34} = -2,25$ кВ) и переносимым электрическим зарядом до 47 Кл за один токовый импульс показали отсутствие каких-либо видимых повреждений на рабочих поверхностях его графитовых электродов и изоляционных элементов. Срабатывание данного коммутатора от генератора пусковых импульсов высокого напряжения типа ГВПИ-100 [3, 4] характеризовалось высокой стабильностью – 100 % включением. Экспериментальная апробация разработанного высоковольтного трехэлектродного воздушного коммутатора типа КВТГ-50 с графитовыми электродами в составе силовой цепи разрядной цепи мощного генератора ГИТМ-10/350 подтвердила его работоспособность и возможность дальнейшего практического использования предложенной конструкции коммутатора при сертификационных испытаниях по [6-10] различных объектов электроэнергетики и технических сооружений на молниестойкость и пожаровзрывобезопасность при прямых ударах в них грозových разрядов.

Выводы.

1. Разработана упрощенная конструкция и на ее основе создан действующий образец высоковольтного силовую цепь разрядную цепь трехэлектродного воздушного управляемого коммутатора с графитовыми электродами типа КВТГ-50 на номинальное напряжение ± 50 кВ и микросекундный импульсный ток искусственной молнии амплитудой до ± 220 кА, предназначенного для работы в силовой цепи разрядной цепи высоковольтного генератора имитированной линейной молнии с мощными емкостными накопителями энергии.

2. Проведена экспериментальная апробация разработанного и созданного сотрудниками НИО №6 института коммутатора типа КВТГ-50 в разрядной силовой цепи действующего мощного высоковольтного генератора импульсного тока искусственной

молнии типа ГИТМ-10/350 разработки НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», формирующего на низкоомной активно-индуктивной нагрузке нормированные апериодические токовые импульсы временной формы 10 мкс/350 мкс амплитудой $\pm(100-200)$ кА с допусками согласно требований международного стандарта IEC 62305-1-2010. Данная апробация в лабораторных условиях экспериментально-исследовательского полигона НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» подтвердила работоспособность предложенной конструкции и изготовленного опытного образца высоковольтного силовую цепь разрядную цепь трехэлектродного воздушного управляемого коммутатора типа КВТГ-50 с графитовыми основными и управляющим электродами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
2. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
3. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: «Точка», 2014. – 400 с.
4. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С., Дныщенко В.Н. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – №3. – С. 81-85.
5. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Недзельский О.С., Пличко А.В., Понуждаева Е.Г. Высоковольтный управляемый силовую цепь разрядную цепь искровой разрядник с графитовыми электродами РВГУ-50 // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – № 50(1092). – С. 28-37.
6. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning.– Part 1: General principles».
7. IEC 62305-2: 2010 «Protection against lightning.– Part 2: Risk management».
8. IEC 62305-3: 2010 «Protection against lightning.– Part 3: Physical damage to structures and life hazard».
9. IEC 62305-4: 2010 «Protection against lightning.– Part 4: Electrical and electronic systems within structures».
10. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010. «Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1: Общие принципы». – М.: Стандартинформ, 2011. – 46 с.
11. Справочник по электротехническим материалам. Т.3 / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 458 с.
12. Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. А.А. Равделя, А.М. Пономаревой. – СПб.: Изд-во «Иван Федоров», 2003. – 349 с.
13. Сухоруков С.А. Помехозащитные устройства ЗАО «ЭМСОТЕХ». – Калуга, 2014. – 72 с.

REFERENCES

1. Komel'kov V.S. *Tekhnika bol'shih impul'snyh tokov i magnitnyh polej*. [Technique large pulsed currents and magnetic fields]. Moscow, Atomizdat Publ., 1970. 472 p. (Rus).
2. Mesjac G.A. *Impul'snaja energetika i elektronika* [Pulsed power and electronics]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 704 p. (Rus).
3. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki. Tom 3: Teorija i praktika elektrofizicheskix zadach* [Selected topics of Electrophysics. Vol. 3: Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2014. 400 p. (Rus).
4. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzelskyi O.S., Dnyshchenko V.N. A current generator of the artificial lightning for full-scale tests of technical objects. *Pribory i tekhnika*

eksperimenta – Instruments and experimental techniques, 2008, no.3, pp. 81-85. (Rus).

5. Baranov M.I., Koliushko G.M., Nedzelskiy O.S., Plichko A.V., Ponuzhdaeva E.G. High-voltage-controlled high-current spark gap with graphite electrodes RVGU-50. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "KhPI"*, 2014, no.50(1092), pp. 28-37. (Rus).

6. IEC 62305-1: 2010 "Protection against lightning. Part 1: General principles".

7. IEC 62305-2: 2010 "Protection against lightning. Part 2: Risk management".

8. IEC 62305-3: 2010 "Protection against lightning. Part 3: Physical damage to structures and life hazard".

9. IEC 62305-4: 2010 "Protection against lightning. Part 4: Electrical and electronic systems within structures".

10. *Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii GOST R MEK 62305-1-2010. "Menedzhment riska. Zashhita ot molnii. Chast' 1: Obshhie principy"* [National Standard of the Russian Federation GOST R IEC 62305-1-2010. Risk management. Protection from lightning. Part 1: General principles]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 46 p. (Rus)

11. *Spravochnik po elektrotehnicheskim materialam. Tom 3. Pod red. Ju.V. Korickogo, V.V. Pasynkova, B.M. Tareeva* [Handbook of electrical materials. Vol. 3. Edited by Ju.V. Korickiy, V.V. Pasynkov, B.M. Tareev]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1988. 458 p. (Rus).

12. *Kratkij spravochnik fiziko-himicheskikh velichin. Pod red. A.A. Ravdelja, A.M. Ponomarevoy* [Brief reference book of physics and chemical variables. Edited by A.A. Ravdelja, A.M. Ponomareva]. St. Petersburg, Ivan Fedorov Publ., 2003. 349 p. (Rus).

13. Suhorukov S.A. *Pomehozashhitnye ustrojstva ZAO "EMSOTEH"* [Hindrance protective devices of CCA "EMSOTEH"]. Kaluga, 2014. 72 p. (Rus).

Поступила (received) 15.12.2014

Баранов Михаил Иванович¹, д.т.н., гл.н.с.,
Рудаков Сергей Валерьевич², к.т.н., доц.,
Цехмистро Валентин Леонтьевич¹, техник,
¹ НИПКИ «Молния»,
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
тел/phone +38 057 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua
² Национальный университет гражданской защиты Украины,
61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94,
тел/phone +38 057 7073438, e-mail: serg_73@i.ua

M.I. Baranov¹, S.V. Rudakov², V.L. Cekhistro¹

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

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

Three-electrode air switchboard with the graphite electrodes of KATG-50 on voltage to ± 50 kV and impulse current by amplitude to ± 220 kA.

Purpose. Development and creation of the simplified construction of a high-voltage heavy-current air three-electrode switchboard with graphite electrodes, intended for operation in composition the powerful generator of large impulsive current of artificial of linear lightning. **Methodology.** Electrophysics bases of technique of high-voltage and scientific and technical bases of planning of devices of high-voltage impulsive technique. **Results.** Developed and made a new construction of a high-voltage heavy-current air three-electrode switchboard with the graphite electrodes of KATG-50 on nominal voltage ± 50 kV. This construction of switchboard KATG-50 has been passed experimental approbation in composition the heavy-current bit chain of powerful high-voltage generator of the aperiodic impulses of current of artificial linear lightning rationed on operating foreign standards with amplitude of $I_m = \pm(200 \pm 20)$ kA at their duration $\tau_p = (350 \pm 35)$ μ s at level $0,5 \cdot I_m$. **Originality.** First in domestic practice of development and creation of high-voltage heavy-current switchboards for the generators of large impulse currents of artificial lightning the ground of necessity of the use for their basic and managing electrodes of electrical engineering graphite is carried out. **Practical value.** The developed and made high-voltage heavy-current switchboard of cascade-tray KATG-50 from application in its composition of graphite electrodes possesses an enhanceable working resource and enhanceable stability of wearing-out at the use of similar switchboard in the bit chain of powerful pulsed current of the imitated linear lightning. References 13, figures 3.

Key words: high-voltage heavy-current air three-electrode switchboard, graphite basic and manager electrodes, generator of microsecond pulsed current of artificial of linear lightning.

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ – ИНСТРУМЕНТЕ РИХТОВКИ АВТОМОБИЛЬНЫХ КУЗОВОВ

Из залученням розрахункових залежностей для щільності індукованих струмів і розподіленої сили тяжіння проведено аналіз процесів в експериментальних моделях індукторної системи з притягуючим екраном і зовнішнім додатковим витком. Дана чисельна оцінка впливу додаткових витків на просторово-часові розподіли основних характеристик електромагнітних процесів. Бібл. 10, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: електромагнітний процес, індуктор, притягуючий екран, додатковий виток, сили тяжіння.

С привлечением расчетных зависимостей для плотности индуцированных токов и распределенной силы притяжения проведен анализ процессов в экспериментальных моделях индукторной системы с притягивающим экраном и внешним дополнительным витком. Дана численная оценка влияния дополнительных витков на пространственно-временные распределения основных характеристик электромагнитных процессов. Библ. 10, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: электромагнитный процесс, индуктор, притягивающий экран, дополнительный виток, силы притяжения.

Введение. Постановка проблемы. Одним из перспективных направлений магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) является бесконтактная магнитно-импульсная рихтовка автомобильных кузовов [1, 2]. От конструкции и принципа действия инструмента, которым производится рихтовка, зависит эффективность и качество производимых операций. В современной технике МИОМ используется достаточно большое количество инструментов – индукторных систем (ИС) различной конфигурации. Большинство из них обладают неравномерным силовым воздействием на обрабатываемый объект, что в свою очередь не удовлетворяет потребностям эффективного процесса рихтовки [1, 3, 4]. Поэтому возникает необходимость создания ИС с высокой однородностью возбуждаемого поля и высокой концентрацией сил притяжения в рабочей зоне инструмента.

Анализ основных достижений и публикаций. Наиболее эффективными ИС являются индукторные системы с притягивающим экраном (ИСПЭ) [5]. Одним из важных моментов при выборе определенной конструкции ИСПЭ является исследование электродинамических процессов с определением возбуждаемых усилий. Характер и протекание электродинамических процессов в соответствии с конструктивными особенностями – определяют эффективность и работоспособность ИСПЭ, как универсального инструмента внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки автомобильных кузовов [6]. Ранее, в работе [7] были получены расчётные аналитические зависимости для ИСПЭ с внешним дополнительным витком, а именно, плотность токов, индуцированных в металле листовой заготовки и притягивающем экране, а также формулы для распределенной силы притяжения. Результаты, полученные авторами [7], позволят проанализировать характер процессов протекающих в рабочей зоне инструмента.

Цель работы – провести численный анализ возбуждаемых полей и токов в экспериментальных моделях индукционной ИСПЭ и дополнительным витком.

Численные оценки, основные результаты. В идеализации «предельно низких» частот действующих

полей, исходя из полученных расчётных зависимостей для плотности индуцированных токов и распределенной силы притяжения в ИСПЭ и внешним дополнительным витком, в условиях расчётной модели в цилиндрической системе координат (рис. 1) и принятых допущений полученные выражения приведём к виду, удобному в вычислениях.

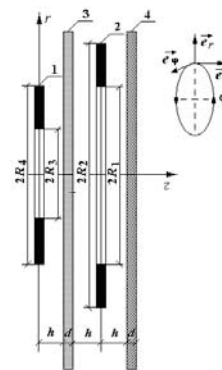


Рис. 1. Расчётная модель в цилиндрической системе координат: 1 – дополнительный виток индуктора; 2 – основной виток индуктора; 3 – экран; 4 – заготовка; R_1, R_3 и R_2, R_4 – внутренние и внешние радиусы соответственно; d и h – расстояние от основного витка индуктора до экрана и заготовки и от дополнительного витка до экрана; $\vec{e}_r, \vec{e}_\phi, \vec{e}_z$ – направляющие орты

При решении примем следующие допущения.

- Плоские витки индуктора имеют цилиндрическую форму, их толщина пренебрежимо мала, так что они не оказывают никакого влияния на протекающие электромагнитные процессы.
- Экран и заготовка есть одинаковые листовые металлы с довольно большими поперечными размерами, достаточно малой толщиной – d , электропроводностью – γ и абсолютной магнитной проницаемостью – $\mu = \mu_r \mu_0$ (μ_r – относительная магнитная проницаемость, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума), они расположены на одинаковом расстоянии от основного витка индуктора – h , расстояние от дополнительного витка до вспомогательного экрана также равно h .
- Аксиальная симметрия имеет место ($\partial/\partial\phi = 0$, ϕ – азимутальный угол).

В несобственных интегралах зависимостей для токов индуцированных в экране и заготовке введём новую переменную интегрирования $x = \lambda \cdot d$, $x \in [0; \infty)$. Кроме того, положим, что токи в витках индуктора имеют разные амплитуды, но изменяются во времени одинаково по закону экспоненциально затухающей синусоиды [2, 8]:

$$j_1(t) = j_{1m} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t) = j_{1m} \cdot e^{-\delta_0 \psi} \cdot \sin(\psi),$$

где j_{1m} – амплитуда, $\psi = \omega t$ – фаза, δ и δ_0 – абсолютный и относительный декременты затухания;

$$j_2(t) = j_{2m} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t) = j_{2m} \cdot e^{-\delta_0 \psi} \cdot \sin(\psi).$$

В терминах новой переменной формулы полученные авторами в [7] с учётом принятых допущений по токам в витках индуктора принимают следующий вид:

$$J_{\varphi}^{(3)}(\varphi, r) = -J_m \times \int_0^{\infty} \left(\left(\frac{j_{1m}}{J_m} \right) f_1(x) + \left(\frac{j_{2m}}{J_m} \right) f_2(x) \right) \frac{e^{-x \frac{h}{d}} (1 - e^{-x})}{x} J_1 \left(x \frac{r}{d} \right) dx, \quad (1)$$

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

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

$$f_1(x) = \frac{1}{x^2} \int_{x \frac{R_3}{d}}^{x \frac{R_4}{d}} y \cdot J_1(y) dy, \quad f_2(x) = \frac{1}{x^2} \int_{x \frac{R_1}{d}}^{x \frac{R_2}{d}} y \cdot J_1(y) dy,$$

$$J_{\varphi}^{(3)}(\varphi, r) = -J_m \times \int_0^{\infty} \left(\left(\frac{j_{1m}}{J_m} \right) f_1(x) e^{-x \left(\frac{3h}{d} + 1 \right)} + \left(\frac{j_{2m}}{J_m} \right) f_2(x) e^{-x \frac{h}{d}} \right) \times \frac{(1 - e^{-x})}{x} J_1 \left(x \frac{r}{d} \right) dx. \quad (2)$$

Вычисление распределённой силы притяжения проводим по формуле:

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

где $J_{\varphi}^{(3)}(t, r)$, $J_{\varphi}^{(3)}(t, r)$ – определены зависимостями (1) и (2), соответственно.

Полученные результаты проиллюстрируем численными оценками для экспериментальных моделей индукционных индукторных систем.

- Геометрия индукторных систем:

Зазоры одинаковы для всех конструкций: $h = 0,0005$ м.

Вариант №1 – ИСПЭ без дополнительного внешнего витка (первая конструкция [2, 9]): $R_1 = 0,025$ м, $R_2 = 0,03$ м, индуктивность ~ 30 нГн.

Вариант №2 – ИСПЭ с дополнительным «внешним» витком:

а) $R_1 = 0,025$ м, $R_2 = 0,03$ м, $R_3 = 0,02$ м, $R_4 = 0,025$ м, индуктивность «внешнего» витка ~ 30 нГн, «внутреннего» $\sim 22,7$ нГн, индуктивность системы $\sim 12,9$ нГн, амплитуды токов в витках индуктора распределены соответственно их индуктивностям;

б) $R_1 = 0,025$ м, $R_2 = 0,03$ м, $R_3 = 0,015$ м, $R_4 = 0,02$ м, индуктивность «внешнего» витка ~ 30 нГн, «внутреннего» $\sim 15,9$ нГн, суммарная индуктивность при параллельном соединении $\sim 10,4$ нГн, амплитуды токов в витках распределены соответственно их индуктивностям.

Вариант №3 – ИСПЭ, возбуждаемая «внешним» витком (внутренний виток отсутствует), $R_3 = 0,025$ м, $R_4 = 0,03$ м, индуктивность ~ 30 нГн.

Индуктивности вычислены по формулам для плоских цилиндрических витков. При наличии двух витков рассматривается их параллельное соединение [10].

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

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

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

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

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

Результаты вычислений для каждого из вариантов ИСПЭ приведены на рис. 2, 3.

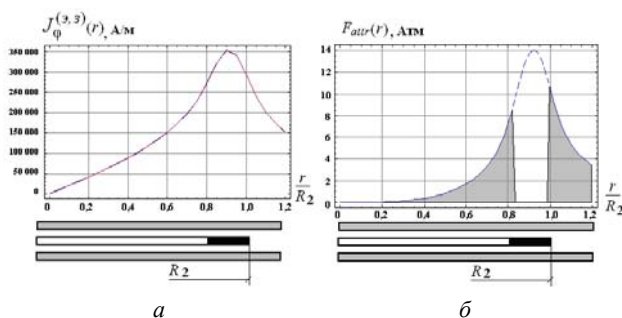


Рис. 2. Вариант №1. Радиальные распределения возбуждаемых токов и сил: а – плотности токов, индуцированных в экране и листовой заготовке – $J_{\varphi}^{(3,3)}(r)$, б – распределённая сила притяжения заготовки

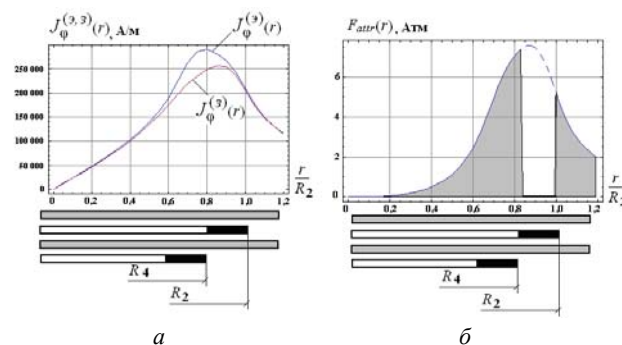


Рис. 3. Вариант №2, а. Радиальные распределения возбуждаемых токов и сил: а – плотности токов, индуцированных в экране – $J_{\varphi}^{(3)}(r)$ и заготовке – $J_{\varphi}^{(3)}(r)$, б – распределённая сила притяжения заготовки

При подаче тока на вход с амплитудой ~ 75 кА (вариант № 2,б) и распределении по виткам в отношении 3/2 (внутренний/внешний), суммарная величина силы составляет уже $\sim 106,25$ кГ при среднем значении распределённой силы $\sim 2,6$ кГ/см² (рис. 4).

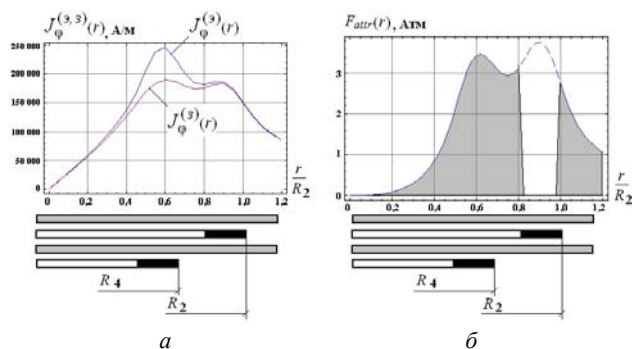


Рис. 4. Вариант №2,б. Радиальные распределения возбуждаемых токов и сил: а – плотности токов, индуцированных в экране – $J_\phi^{(3)}(r)$ и заготовке – $J_\phi^{(3)}(r)$, б – распределённая сила притяжения заготовки

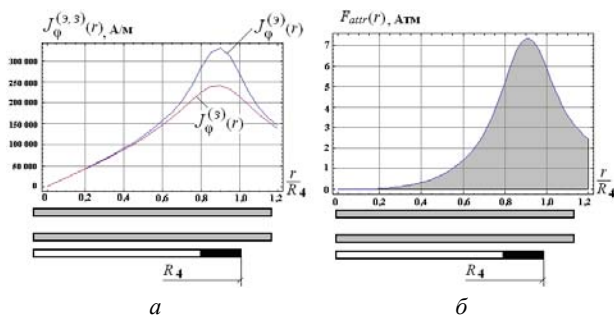


Рис. 5. Вариант №3. Радиальные распределения возбуждаемых токов и сил: а – плотности токов, индуцированных в экране – $J_\phi^{(3)}(r)$ и заготовке – $J_\phi^{(3)}(r)$, б – распределённая сила притяжения заготовки

«Незатемнённые» участки на графиках – участки, где отсутствуют силы, обусловленные наличием витка между экраном и заготовкой.

Силы притяжения найдены интегрированием распределённых сил притяжения по площадям соответствующих участков $\{r \leq 1,2 \cdot R_2 = 0,036 \text{ м}, \varphi \in [0; 2\pi]\}$.

Графики на (рис. 2 – 5) можно дополнить расчётными данными, сведенными в табл. 1.

Таблица 1

Результаты исследований

№ п/п	Вариант конструкции в расчётах	L системы, нГн	Сила притяжения, кГ	Среднее значение распределённой силы притяжения, кГ/см ²
1	Вариант №1	30	91,87 (166)	2,25 (4,1)
2	Вариант №2,а	12,9	72,43 (114)	1,77 (2,88)
3	Вариант №2,б	10,4	47 (68,8)	1,34 (1,7)
4	Вариант №3	30	140,25	3,4

В скобках (табл. 1) даны величины, вычисленные в предположении, что наличие витка не влияет на радиальное распределение сил притяжения, площадь рассматриваемого участка 40,72 см².

Как видно из результатов исследования введение дополнительного витка, размещённого поверх вспомогательного экрана позволяет сконцентрировать силы притяжения в центральной части рабочей зоны индукторной системы. Для большей концентрации сил в центре рабочей зоны при сохранении или даже увеличении амплитуд возбуждаемых сил притяжения следует применять соответствующую схему питания индукторной системы, позволяющую регулировать амплитуды и распределение токов по виткам.

Выводы.

1. Проведен численный анализ полей и токов в экспериментальных моделях индукторных систем с притягивающим экраном (ИСПЭ) и дополнительным витком, предназначенных для выравнивания металлических покрытий автотранспорта.

2. Показано, что введение в ИСПЭ дополнительного витка, размещенного поверх вспомогательного экрана, существенно повышает амплитуды возбуждаемых сил притяжения.

3. Показано, что параллельное соединение основного и дополнительного витков в ИСПЭ позволяет сконцентрировать силы притяжения в центре рабочей зоны инструмента рихтовки автомобильных кузовов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гнатов А.В., Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Магнитно-импульсные технологии бесконтактной рихтовки кузовных элементов автомобиля: монография. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012 – 242 с.
- Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т.3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монография. – Х.: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
- Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю., Чаплыгин Е.А. Электродинамические процессы в цилиндрической индукционной индукторной системе для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2007. – № 11/47. – С. 109-117.
- Пат. 70734 Україна, МПК В 21 Д 26/14 Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих об'єктів двовитковою круговою індукторною системою з тонким екраном / Батигін Ю.В., Гнатов А.В., Щіголева С.О., Чаплигін Є.О., Гопко А.В., Дробинін О.М.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u2011 14018; заявл. 28.11.2011; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.
- Пат. 77579 Україна, В21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих заготовок одновитковим круговим індуктором, розташованим над допоміжним екраном / Батигін Ю.В., Гнатов А.В., Чаплигін Є.О., Трунова І.С., Гопко А.В., Сабокар О.С.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u2012 07542 заявл. 22.06.2012; опубл. 25.02.2013, Бюл. № 4.
- Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Аргун Ш.В., Еремина Е.Ф. Электромагнитные процессы в симметричных индукционных системах с идентичными ферромагнитными тонкостенными экраном и листовой заготовкой // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2012. – № 4. – С. 50-53.
- Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Шиндерук С.А. Расчет полей и токов в индукторной системе с притягивающим экраном и дополнительным витком как инструмента рихтовки // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – № 1. – С. 57-62.

8. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Х.: Вища школа, 1977. – 189 с.
9. Пат. 74909 Україна, МПК В 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Батигін Ю.В., Лавінський В.І., Хавін В.Л.; заявник та патентовласник НТУ «ХПІ». – № 2004 010542 ; заявл. 26.01.2004; опубл. 15.02.2006, Бюл. № 2.
10. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. В 2-х томах. Том 2. – Л.: Энергия, 1967. – 340 с.

REFERENCES

1. Gnatov A.V., Batygin Yu.V., Chaplygin E.A. *Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnykh tekhnologiy. Magnitno-impul'snye tekhnologii beskontaktnoy rihtovki kuzovnykh elementov avtomobilya: monografiya* [Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Magnetic pulse contactless technology straightening car body elements. Monograph]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publ., 2012. 242 p. (Rus).
2. Turenko A.N., Batygin Yu.V., Gnatov A.V. *Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnykh tekhnologiy. Tom 3. Teoriia i eksperiment pritiasheniia tonkostennykh metallov impul'snymi magnitnymi poliami* [Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Vol. 3. Theory and experiment of thin-walled metals attraction by the pulse magnetic fields]. Kharkov, KhNAHU Publ., 2009, 240 p. (Rus).
3. Batygin Yu.V., Bondarenko A.Yu., Chaplygin E.A. Cylindrical induction inductor system for attraction of thin-walled sheet metal. *Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace Engineering and Technology*, 2007, no.11(47), pp. 109-117. (Rus).
4. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin Y.A., Gopko A.V., Shigoleva S.A., Drobinin A.M. *Sposib magnitno-impul'snogo prytyagannia metalovykh ob'ektiv dvoytkovomu krugovomu induktornomu systemu z tonkym ekranom* [The method of magnetic-pulse attraction of metal objects by double-turn circular inductor system with a thin screen]. Patent UA, no.70734, 2012. (Ukr).
5. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin E.O., Trunova I.S., Gopko A.V., Sabokar O.S. *Sposib magnitno-impul'snogo prytyagannia metalovykh zagotovok odnovitkovim krugovim induktorom, roztaшовanim nad dopomizhnim ekranom* [Method of the magnetic-pulse attraction metal workpieces single-turn circular inductor located on the auxiliary screen]. Patent UA, no.77579, 2013. (Ukr).
6. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Argun Sh.V., Yeryomina E.F. Electromagnetic processes in symmetric induction systems with identical ferromagnetic thin-walled screen and sheet blank. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.4, pp. 50-53. (Rus).
7. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A. Calculation of fields and currents in the induction system with the attractive screen and the additional coil as a tool for the straightening. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.1, pp. 57-62. (Rus).
8. Belyj I.V., Fertik S.M., Himenko L.T. *Spravochnik po magnitno-impul'snoy obrabotke metallov* [Directory of magnetic-pulse treatment of metals]. Kharkiv, Vishcha shkola Publ., 1977, 189 p. (Rus).
9. Batygin Yu.V., Lavinskij V.I., Havin V.L. *Sposib magnitno-impul'snoyi obrobki tonkostinnih metalovykh zagotovok* [Method of the magnetic-pulse processing thin metal work pieces]. Patent UA, no.74909, 2006. (Ukr).

10. Neyman L.R., Demirchyan K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. V 2-kh t. T. 2* [Theoretical bases of electrical engineering. In 2 vols. Vol. 2]. Leningrad, Energiya Publ., 1967, p. 340. (Rus).

Поступила (received) 10.12.2014

Батыгин Юрий Викторович¹, д.т.н., проф.,
Чаплыгин Евгений Александрович¹, к.т.н., доцент,
Шиндерук Светлана Александровна¹, аспирант,
¹ Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,
61002, Харьков, ул. Петровского, 25,
тел/phone +38 057 7073653, e-mail: batygin48@mail.ru;
chaplygin_e_a@mail.ru; svetlana11177@rambler.ru

Yu. V. Batygin¹, E. A. Chaplygin¹, S. A. Shinderuk¹
¹ Kharkov National Automobile and Highway University,
25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

An analysis of the electromagnetic processes in the inductor system – tool of the straightening of car bodies.

Introduction. One of the promising directions of electromagnetic forming (EMF) is a contactless magnetic-pulse straightening of the automobile bodies. The efficiency and the quality of the straightening depend on design and operating principle of the straightening tool. In the modern technique of EMF a large number of the tools - inductor systems (IS) is used in different configurations with uneven distribution forces on the treatment object that in turn does not meet the needs of the effective process of straightening. There appears the urgent necessity to create IS with high uniformity of the induced field and a high concentration of attracting forces in the working area of the tool. The most effective IS are the Inductor Systems with an Attracting Screen (ISAS). One of the most important considerations when choosing a particular design ISAS is the study of the electrodynamics processes with definition of excited loads. The nature and the course of the electrodynamics processes in accordance with design features determine the effectiveness and the efficiency of the ISAS. Therefore, in ISAS an additional coil for the concentration of the attracting forces in the working area should be entered. **Purpose.** The numerical analysis of the induced fields and the currents in the experimental models of ISAS with an additional coil was made. **Methodology.** In the idealization of the «extremely low» frequencies of existing fields, there were received rated dependences for density of the induced currents and distributed attracting force in ISAS and the external additional coil, through the use of the calculated model in the cylindrical coordinate system. **Results.** Insertion of the additional coil placed over the accessory screen allows to concentrate and increase the amplitude of the attracting forces in the central part of the working area of the inductor system. **Practical value.** 1. Numerical analysis of fields and currents in experimental models of Induction Systems with Attracting Screen (ISAS) and additional coil, designed to align the metal coatings of vehicles was made. 2. It is shown that if in ISAS they insert additional coil placed over the accessory screen significantly increases the amplitude of excited forces of attraction. 3. It is shown that the parallel connection of the primary and additional coils in ISAS allows to concentrate the forces of attraction in the centre of the working area of the tool for straightening automobile bodies. References 10, table 1, figures 5
Key words: electromagnetic process, inductor, attracting screen, additional coil, attracting forces.

ПРО ГРАНИЧНІ РІШЕННЯ РІВНЯНЬ ВИСОКОВОЛЬТНОГО КАСКАДНОГО ГЕНЕРАТОРА НАПРУГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

В статті досліджене питання розрахунку режимів напруги високовольтного каскадного генератора з нелінійним навантаженням за допомогою аналітичного методу при різних умовах вибору значень його складових елементів. Особливість методу дослідження полягає в тому, що при проведенні багатоваріантних розрахунків залишаються незмінними вихідні параметри навантаження генератора. Для каскадного високовольтного джерела постійного струму знайдені умови, при яких можуть бути суттєво зменшені ємності високовольтних конденсаторів каскадного генератора. Бібл. 8, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: каскадне джерело високої напруги, аналітичний метод, амплітуда пульсацій напруги, нелінійне навантаження, граничні значення ємностей.

В статье исследован вопрос расчета режимов напряжения высоковольтного каскадного генератора с нелинейной нагрузкой с помощью аналитического метода при различных условиях выбора значений его составляющих элементов. Особенность метода исследования заключается в том, что при проведении многовариантных расчетов остаются неизменными выходные параметры нагрузки генератора. Для каскадного высоковольтного источника постоянного тока найдены условия, при которых могут быть существенно уменьшены емкости высоковольтных конденсаторов каскадного генератора. Библ. 8, табл. 2, рис. 5.

Ключевые слова: каскадный источник высокого напряжения, аналитический метод, амплитуда пульсаций напряжения, нелинейная нагрузка, предельные значения емкостей.

Вступ. Каскадний генератор постійного струму – одне з найбільш поширених джерел високої і надвисокої постійної напруги. Традиційна область використання каскадних генераторів – це живлення різної електрофізичної апаратури, зокрема, високовольтних прискорювачів різних типів. Вони успішно використовуються також для живлення електротехнічних пристроїв і для випробувань високовольтної апаратури, що працює на постійній напрузі.

Залежно від типу зв'язку між каскадами і способу живлення каскадів випрямлячів від джерела живлення розрізняють каскадні генератори з ємнісним або індуктивним зв'язком з послідовним живленням каскадів.

В даний час найбільш детально вивчені каскадні генератори з ємнісним зв'язком між каскадами і послідовним живленням від джерела. Генератори, зібрані за такою схемою, зазвичай прийнято називати генераторами Кокрофта-Уолтона [1].

Також постійну високу напругу одержують за допомогою різноманітних схем випрямлення змінної напруги, основними елементами яких є високовольтний трансформатор, конденсаторно-діодна група, фільтр вищих гармонік та струмообмежувальні резистори [2].

Характерною ознакою каскадних генераторів є наявність пульсацій напруги на виході установки. В ряді публікацій відзначають суттєвий вплив пульсацій напруги в таких генераторах [3, 4], але кінцевого рішення, за допомогою якого можна було б точно визначити значення амплітуди та форми пульсацій не було знайдено.

Дослідження режимів високовольтних каскадних установок постійного струму звичайно виконуються наближеними методами [2, 4] у допущенні незмінності їх параметрів у часі (лінійне наближення). Проте останнім часом у схемах таких установок використовують і нелінійні елементи, наприклад стабілітрони [5].

Запропоновані адекватні математичні моделі [6] для розрахунку подібного типу установок, зазвичай,

не враховують нелінійність параметрів їх складових елементів.

Разом з «класичними» схемами каскадних генераторів високої напруги [7] в останній час знайшли застосування каскадні генератори узагальненого типу [5], в яких традиційне каскадне помноження напруги доповнюється фільтром пульсацій та пристроєм їх нелінійного подавлення.

Теорія такого каскадного генератора високої напруги подана у нашій попередній публікації [8], суть якої коротко розглянемо нижче.

Функціональна схема електроживлення установки подвоєння високої напруги постійного струму у загальному випадку представлена на рис. 1. З виходу високовольтного підвищувального трансформатора ТР напруга $u_1(t) = U_m \sin(\omega \cdot t)$ через розділовий конденсатор C_1 поступає на вхід каскаду подвоєння напруги VD_1 ; VD_2 ; C_2 , і далі через фільтр R_ϕ ; C_3 – на ланку стабілітронів $ST_1 \dots ST_n$ з вихідним резистором r , паралельно якій включений омичний подільник напруги, навантаження якого можна замінити омичним опором $R_{\text{пн}}$. Уведення стабілітронів в схему установки (рис. 1) пояснюється необхідністю зменшення пульсацій та, з другого боку, підвищення точності вимірювань високої напруги. Додатково до схеми установки [5] у схему на рис. 1 введені навантаження R_2 , R_3 .

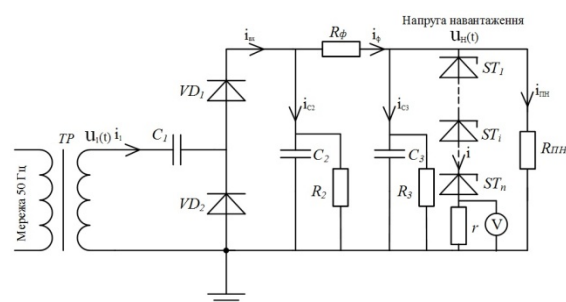


Рис. 1. Функціональна схема живлення установки високої напруги постійного струму

© В.О. Бржезицький, О.М. Десятов, В.В. Козюра

Вольт-амперна характеристика (як приклад, стабілітрона Д818Д) наведена на рис. 2. Її лінеаризований вираз запишемо в виді $u_{st}(i) = u_0 + r_0 \cdot (i - I_0)$, де r_0 – диференціальний опір стабілітрона.

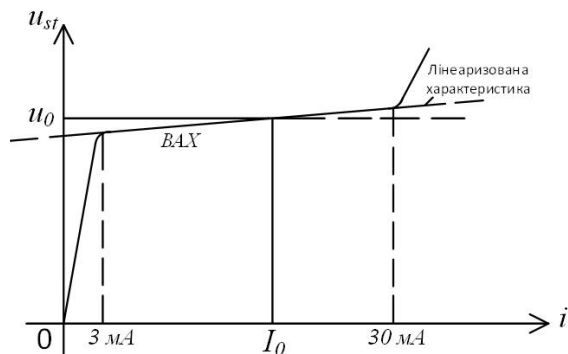


Рис. 2. Вольт-амперна характеристика стабілітрона Д818Д

Тоді для напруги навантаження (рис. 1) можна записати: $u_n = (U_0 + I_0 r) + (i - I_0)(R_0 + r)$, де U_0 – еквівалентна робоча напруга та R_0 – еквівалентний диференціальний опір ланки стабілітронів.

Виділяючи в $u_n(t)$ пульсацію напруги $\Delta u(t) = u_n(t) - U_0 - I_0 r$ та проводячи перетворення, у [8] вперше одержана система рівнянь, яка описує процес в схемі каскадного генератора узагальненого типу.

У проміжку часу $0 \leq t \leq T$, де T – період напруги $T = 2\pi/\omega$, в момент часу t_1 розпочинається зарядження (підзарядження) конденсатора C_2 , яке закінчується в момент часу t_2 , ($t_2 > t_1$) після чого в схемі рис. 1 відбувається перерозподіл напруги на протязі часу $T - \Delta t_1$, де $\Delta t = t_1 - t_2$.

Система рівнянь, яка описує усталений періодичний процес в схемі рис. 1 має вид [8]:

$$t_1 = \frac{\arcsin\left(\frac{1}{U_m} \cdot X_1 - 1\right)}{\omega}, \quad (1)$$

де

$$\begin{aligned} X_1 = & I_0 \cdot R_\phi + (U_0 + I_0 \cdot r) \cdot \left(1 + \frac{R_\phi}{R_3} + \frac{R_\phi}{R_{ПН}}\right) + \\ & + (\Delta U_{усталене} + A_3 \cdot \sin \psi + A_4 + A_5) \times \\ & \times \left(1 + \frac{R_\phi}{R_{ПН}} + \frac{R_\phi}{R_3} + \frac{R_\phi}{R_0 + r}\right) + \\ & + C_3 \cdot R_\phi \cdot (\omega \cdot A_3 \cdot \cos \psi + p_3 \cdot A_4 + p_4 \cdot A_5); \\ t_2 = & \frac{\arccos\left(\frac{X_2}{U_m \cdot \omega}\right)}{\omega}, \quad (2) \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} X_2 = & C_3 \cdot R_\phi \cdot \left[-\omega^2 \cdot A_3 \cdot \sin(\omega \cdot \Delta t + \psi) + \right. \\ & + p_3^2 \cdot A_4 \cdot e^{p_3 \cdot \Delta t} + p_4^2 \cdot A_5 \cdot e^{p_4 \cdot \Delta t} \left. + \right. \\ & + \left(1 + \frac{R_\phi}{R_{ПН}} + \frac{R_\phi}{R_3} + \frac{R_\phi}{R_0 + r}\right) \times \\ & \times \left[\omega \cdot A_3 \cdot \cos(\omega \cdot \Delta t + \psi) + p_3 \cdot A_4 \cdot e^{p_3 \cdot \Delta t} + p_4 \cdot A_5 \cdot e^{p_4 \cdot \Delta t}\right]; \end{aligned}$$

$$\Delta u_{усталене} =$$

$$\begin{aligned} & (U_0 + I_0 \cdot r) \cdot \left[\frac{1}{R_2} + \frac{R_\phi}{R_2 \cdot R_3} + \frac{R_\phi}{R_2 \cdot R_{ПН}} + \right. \\ & = - \frac{\frac{1}{R_2} + \frac{R_\phi}{R_2 \cdot R_3} + \frac{R_\phi}{R_2 \cdot R_{ПН}} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{ПН}} + \left. \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{ПН}}\right] + I_0 \cdot \left(1 + \frac{R_\phi}{R_2}\right) \\ & + \frac{1}{R_0 + r} \cdot \left(1 + \frac{R_\phi}{R_2}\right). \quad (3) \end{aligned}$$

При цьому в період зарядження $t_1 \leq t \leq t_2$ $\Delta u(t)$ має вигляд

$$\begin{aligned} \Delta u_3(t) = & A_3 \cdot \sin(\omega(t - t_1) + \psi) + A_4 \cdot e^{p_3 \cdot (t - t_1)} + \\ & + A_5 \cdot e^{p_4 \cdot (t - t_1)} + \Delta u_{усталене}, \quad (4) \end{aligned}$$

а в період перерозподілу напруги при $t \geq t_2$

$$\Delta u_{ПН}(t) = A_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{p_2 \cdot t} + \Delta u_{усталене}, \quad (5)$$

$$A_3 = \frac{C_1 \cdot \omega \cdot U_m}{R_\phi \cdot C_3 \cdot (C_1 + C_2)} \cdot \left[b_1^2 \cdot \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2\right]^{-1/2},$$

$$\psi = \arctg \frac{b_2 - \omega^2}{b_1 \cdot \omega},$$

де коефіцієнти b_1 ; b_2 ; p_1 ; p_2 ; p_3 ; p_4 визначаються розрахунком з характеристичних рівнянь [8], а U_m ; A_1 ; A_2 ; A_4 ; A_5 визначаються рішенням системи рівнянь:

$$A_3 \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot \Delta t + \psi) + p_3 \cdot A_4 \cdot e^{p_3 \cdot \Delta t} + \quad (6)$$

$$+ p_4 \cdot A_5 \cdot e^{p_4 \cdot \Delta t} = p_1 \cdot A_1 + p_2 \cdot A_2,$$

$$\begin{aligned} A_3 \cdot \omega \cdot \cos \psi + p_3 \cdot A_4 + p_4 \cdot A_5 = \\ = p_1 \cdot A_1 \cdot e^{p_1 \cdot [T - \Delta t]} + p_2 \cdot A_2 \cdot e^{p_2 \cdot [T - \Delta t]}, \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_3 \cdot \sin \psi + A_4 + A_5 = \\ = A_1 \cdot e^{p_1 \cdot [T - \Delta t]} + A_2 \cdot e^{p_2 \cdot [T - \Delta t]}, \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_3 \cdot \sin(\omega \cdot \Delta t + \psi) + A_4 \cdot e^{p_3 \cdot \Delta t} + A_5 \cdot e^{p_4 \cdot \Delta t} = \\ = A_1 + A_2, \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{C_1 \cdot U_m}{R_\phi \cdot C_3 \cdot (C_1 + C_2)} \cdot \left[b_1^2 \cdot \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2\right]^{-1/2} \times \\ & \times [\cos \psi - \cos(\omega \cdot \Delta t + \psi)] = -\frac{A_4}{p_3} \cdot (e^{p_3 \cdot \Delta t} - 1) - \\ & - \frac{A_5}{p_4} \cdot (e^{p_4 \cdot \Delta t} - 1) - \frac{A_1}{p_1} \cdot (e^{p_1 \cdot (T - \Delta t)} - 1) - \\ & - \frac{A_2}{p_2} \cdot (e^{p_2 \cdot (T - \Delta t)} - 1) - \Delta u_{усталене} \cdot T. \quad (10) \end{aligned}$$

В цілому, одержуємо систему 7 рівнянь з 7 невідомими: U_m ; A_1 ; A_2 ; A_4 ; A_5 ; t_1 ; t_2 , яка має 1 рішення в множині дійсних чисел для умов номінального режиму, параметри якого визначені в [8].

Унікальність побудови та рішення системи рівнянь високочастотного каскадного генератора узагальненого типу [8] полягає в тому, що за їх допомогою пошук його режимів іде у зворотному порядку – не від первинного джерела напруги, а від кінцевого результату його роботи – параметрів U_0 , I_0 з урахуванням

значень параметрів елементів схеми, при цьому необхідне значення первинної напруги знаходиться в кінці розрахунку. Дана обставина дозволяє «синтезувати» режими каскадного генератора в залежності від необхідного кінцевого результату його роботи.

Метою роботи є пошук області граничних рішень системи рівнянь каскадного генератора високої напруги постійного струму, визначення умов при яких ще можлива робота каскадного генератора на заданих параметрах навантаження.

Об'єкт дослідження – високовольтний каскадний генератор живлення установки постійного струму з нелінійним навантаженням.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Дослідити, при яких мінімальних значеннях ємності розділового конденсатора C_1 можлива робота каскадного генератора на задані номінальні параметри вихідної напруги.

2. Визначити при яких мінімальних значеннях ємності конденсаторів $C_2 = C_3$ також можлива робота каскадного генератора на заданих параметрах вихідної напруги.

В роботі [5] визначені номінальні параметри навантаження каскадного генератора для високовольтної установки постійного струму еталонного типу: $I_0 = 5$ мА, $\bar{U}_n = 1$ кВ; 2 кВ; 3 кВ; 4 кВ; 5 кВ; 6 кВ; 7 кВ; 8 кВ; 9 кВ; 10 кВ; 20 кВ; 30 кВ; 40 кВ; 50 кВ; 60 кВ; 70 кВ; 80 кВ; 90 кВ; 100 кВ; 110 кВ; 120 кВ; 130 кВ; 140 кВ; 150 кВ; 160 кВ; 170 кВ; 180 кВ (27 номінальних режимів). Подільник напруги ПН має чотири значення вхідних номінальних напруг $U_{вх.ном.ПН} = 180$ кВ; 90 кВ; 60 кВ; 30 кВ, для яких струм подільника напруги приймається рівним $I_{ПН} = 2,5$ мА. Для інших 23 вхідних напруг подільника напруги його струм зменшується пропорційно вхідній напрузі. Конденсатор C_1 має номінальну ємність 0,1 мкФ, конденсатори $C_2 = C_3 = 0,072$ мкФ, опір фільтра $R_\phi = 1,78$ МОм. В якості стабілітронів $ST_1 \dots ST_i \dots ST_n$ використовуються стабілітрони Д818Д із значенням $r_o = 22$ Ом; при цьому значення параметра $r = 10$ кОм приймалось для режимів $\bar{U}_n = 1 \dots 10$ кВ та $r = 60$ кОм для режимів $\bar{U}_n = 20 \dots 180$ кВ, $R_o = n \cdot r_o$, де n – кількість стабілітронів, відповідна кожному режиму $\bar{U}_n$ виходячи із середнього значення напруги стабілізації Д818Д $u_0 = 9$ В.

В роботі [8] окрім виведення теорії каскадного генератора узагальненого типу на основі рівнянь (1, 2), (6 – 10), проведені розрахунки 27 номінальних режимів установки ДЕТУ 08–04–99 [5], зокрема пульсацій її вихідної напруги та визначена напруга U_m джерела живлення необхідна для реалізації цих режимів, побудовані відповідні залежності. Показаний вплив додаткового навантаження схеми активними опорами конденсаторів C_2 , C_3 , який призводить до збільшення пульсацій вихідної напруги установки.

В даній роботі вперше досліджене питання граничних рішень системи рівнянь високовольтного каскадного генератора при варіюванні значень параметрів його складових елементів. Зокрема, поставлене питання, наскільки може бути зменшена ємність C_1 (при зберіганні номінального значення ємностей C_2 , C_3 та незмінних параметрах навантаження установки

$\bar{U}_n, I_0$). Питання є актуальним, оскільки вартість високовольтних конденсаторів є високою та, в певній мірі, пропорційною їх ємності (при рівних значеннях робочої напруги).

Дослідження впливу значення ємності конденсатора C_1 на характеристики високовольтного каскадного генератора. Для всіх 27 режимів високовольтного каскадного генератора при збереженні номінальних значень ємностей $C_2 = C_3 = 0,072$ мкФ проводився (на основі багатоваріантних розрахунків) пошук мінімальних значень ємності C_1 , при яких рішення системи рівнянь (1, 2), (6 – 10) ще відповідає умові задачі $t_1 > 0$. В табл. 1 наведені розрахункові параметри 27 режимів каскадного генератора при граничному значенні ємності C_1 .

Таблиця 1

Розрахункові параметри 27 режимів каскадного генератора при граничних значеннях ємності C_1

$\bar{U}_n$, кВ	C_1 , мкФ	C_1/C_2	U_m , В	Δ_n , %	Δt , мс
1	0,0119	0,1653	9531	0,334	5,05
2	0,0108	0,15	10647	0,193	5,001
3	0,00979	0,136	11809	0,149	5,06
4	0,00908	0,1261	12860	0,126	5,03
5	0,00839	0,1165	14043	0,112	5,04
6	0,00788	0,1094	15109	0,102	5,015
7	0,00738	0,1025	16298	0,0950	5,026
8	0,00697	0,0968	17445	0,0891	5,021
9	0,00659	0,0915	18627	0,0841	5,0414
10	0,00629	0,0874	19769	0,0806	5,04
20	0,00445	0,0618	31459	0,0673	5,03
30	0,00368	0,0511	42455	0,0515	5,001
40	0,00269	0,0374	51045	0,0346	4,98
50	0,00237	0,0329	61372	0,0297	4,93
60	0,00219	0,0304	70226	0,0264	4,88
70	0,00178	0,0247	79630	0,0211	4,88
80	0,00159	0,0221	91880	0,0192	4,995
90	0,00149	0,0207	102338	0,0178	5
100	0,00117	0,0163	110608	0,0137	4,99
110	0,00109	0,0151	120120	0,0127	4,98
120	0,00103	0,0143	130913	0,0119	4,995
130	0,000979	0,0136	140531	0,0113	4,98
140	0,000928	0,0129	151197	0,0107	4,985
150	0,000889	0,0123	160922	0,0102	4,98
160	0,000849	0,0118	171731	0,00973	4,991
170	0,000814	0,0113	182490	0,00934	5
180	0,000785	0,0109	192743	0,00899	5,005

В першій колонці табл. 1 наведені усереднені значення напруги навантаження генератора [кВ] від 1 до 180. В другій колонці наведені мінімальні розрахункові значення ємності C_1 каскадного генератора [мкФ]. В третій колонці представлені відношення

визначених значень ємності C_1 до значення ємності $C_2 = C_3 = 0,072$ мкФ. Також представлені розрахункові значення напруги джерела живлення U_m , коефіцієнта амплітуди пульсацій Δ_n [8] та розрахункове значення часу $\Delta t = t_2 - t_1$.

Порівнюючи одержані дані (табл. 1) з аналогічними даними розрахунків номінального режиму установки [8], слід відмітити значне зростання значення напруги джерела живлення U_m та проміжку часу $\Delta t = t_2 - t_1$, при майже рівних значеннях коефіцієнта амплітуди пульсацій Δ_n (див. рис. 3 – 5).

Аналогічно були проведені дослідження впливу граничних значень ємностей C_2, C_3 при номінальному значенні ємності $C_1 = 0,1$ мкФ (див. нижче).

Дослідження впливу значення ємностей конденсаторів C_2, C_3 на характеристики високовольтного каскадного генератора. Для всіх 27 режимів високовольтного каскадного генератора при збереженні номінального значення ємності C_1 проводиться пошук мінімальних значень ємностей C_2, C_3 (які між собою рівні), при яких рішення системи рівнянь (1, 2), (6 – 10) ще відповідає умові задачі $t_1 > 0$.

В табл. 2 наведені розрахункові параметри 27 режимів каскадного генератора при граничних значеннях ємностей $C_2 = C_3$.

Таблиця 2

Розрахункові параметри 27 режимів каскадного генератора при граничному значенні ємності C_2

$\bar{U}_n$, кВ	C_2 , мкФ	C_2/C_1	U_m , В	Δ_n , %	Δt , мс
1	0,0118	0,118	7050	2,035	5,75
2	0,0106	0,106	7853	1,463	5,58
3	0,00976	0,0976	8656	1,273	5,53
4	0,00904	0,0904	9458	1,178	5,1
5	0,00836	0,0836	10261	1,120	5,04
6	0,00784	0,0784	11074	1,158	5,02
7	0,00735	0,0735	11887	1,185	5,03
8	0,00696	0,0696	12700	1,206	5,02
9	0,00654	0,0654	13512	1,221	5,04
10	0,00591	0,0591	14325	1,234	5,4
20	0,00401	0,0401	22987	2,977	5,1
30	0,00301	0,0301	31649	3,558	5,1
40	0,00141	0,0141	40311	3,849	5,7
50	0,000711	0,00711	48973	4,023	6,4
60	0,000317	0,00317	56969	3,780	6,5
70	0,000148	0,00148	66964	3,606	4,88
80	0,0000783	0,000783	77959	3,476	5
90	0,0000376	0,000376	85954	3,375	5
100	0,0000162	0,000162	95949	3,294	4,99
110	0,0000112	0,000112	103944	3,227	4,98
120	0,0000854	0,000854	112940	3,172	5
130	0,0000535	0,000535	122935	3,125	4,98
140	0,0000323	0,000323	129930	3,085	4,99
150	0,0000103	0,000103	139925	3,050	4,98
160	0,00000673	0,0000673	148920	3,020	4,99
170	0,00000414	0,0000414	157916	2,993	5
180	0,00000235	0,0000235	165911	2,969	4,99

В першій колонці табл. 2 наведені усереднені значення напруги навантаження генератора [кВ] від 1 до 180. В другій колонці наведені мінімальні розрахункові значення ємності C_2 (C_3) каскадного генератора [мкФ]. В третій колонці представлені відношення визначених значень ємності $C_2 = C_3$ до значення ємності $C_1 = 0,1$ мкФ. Також представлені розрахункові значення напруги джерела живлення U_m , коефіцієнта амплітуди пульсацій Δ_n [8] та розрахункове значення часу $\Delta t = t_2 - t_1$.

Порівнюючи одержані дані (табл. 2) з аналогічними даними розрахунків номінального режиму установки [8], слід відмітити також значне зростання значення напруги джерела живлення U_m та проміжку часу $\Delta t = t_2 - t_1$, при значному зростанні (в десятки разів) значення коефіцієнта амплітуди пульсацій Δ_n . Дані табл. 1, 2 представлені далі на рис. 3 – 5.

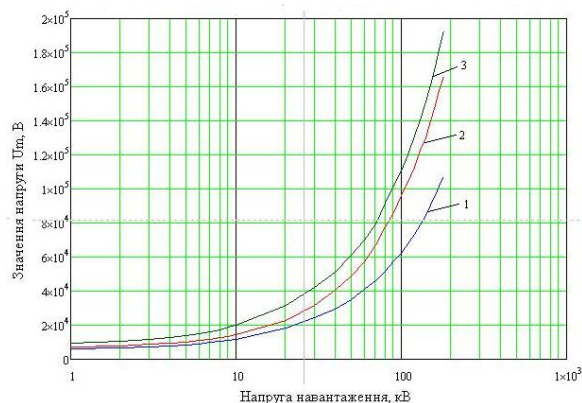


Рис. 3. Залежність напруги U_m джерела живлення від напруги навантаження $\bar{U}_n$ в діапазоні 1...180 кВ, при розрахункових значеннях: 1 – номінальні значення ємностей C_1, C_2, C_3 ; 2 – граничні значення ємностей C_2, C_3 ; 3 – граничні значення ємності C_1

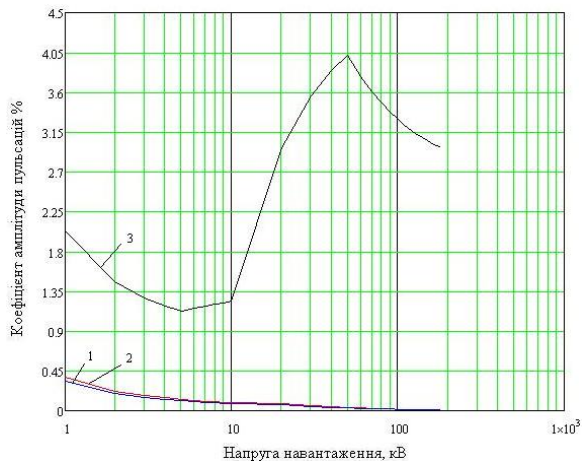


Рис. 4. Залежність коефіцієнта амплітуди пульсацій Δ_n від напруги навантаження $\bar{U}_n$ в діапазоні 1...180 кВ при умовах: 1 – граничні значення ємності C_1 ; 2 – номінальні значення ємностей C_1, C_2, C_3 ; 3 – граничні значення ємностей C_2, C_3

Залежності, наведені на рис. 3 показують, що при граничних значеннях ємностей C_1, C_2 (C_3) значення напруги U_m джерела живлення значно зростає. В режимі $\bar{U}_n = 1$ кВ значення напруги $U_m = 7050$ В (крива 2) та $U_m = 9531$ В (крива 3), що більше фактично на 15 % та 40 % відповідно, в порівнянні зі значенням U_m при но-

мінальних ємностях C_1 , C_2 , C_3 . В режимі $\bar{U}_n = 180$ кВ зазначене зростання складає відповідно 35 % та 45 %.

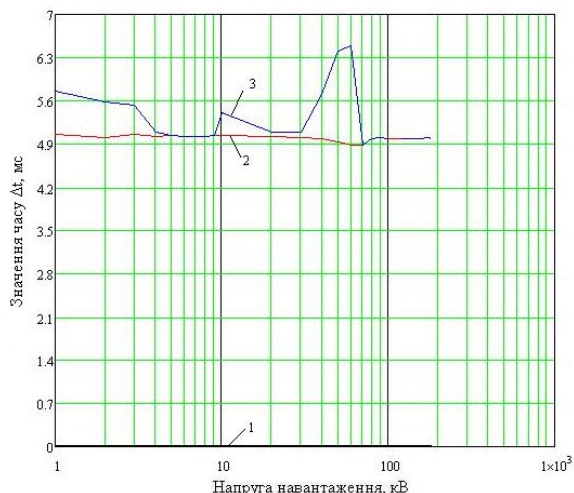


Рис. 5. Залежність часу Δt від напруги навантаження $\bar{U}_n$ в діапазоні 1...180 кВ при умовах:
1 – номінальні значення ємностей C_1 , C_2 , C_3 ;
2 – граничні значення ємності C_1 ;
3 – граничні значення ємностей C_2 , C_3

Дані представлені на рис. 4 показують, що при граничних значеннях ємності C_1 (крива 1) коефіцієнт амплітуди пульсацій Δ_n фактично не змінюється в порівнянні з номінальними значеннями ємностей C_1 , C_2 , C_3 . Але, при граничних значеннях ємностей C_2 , C_3 (крива 2) коефіцієнт амплітуди пульсацій Δ_n значно зростає (десятки разів) в порівнянні з номінальними значеннями ємностей C_1 , C_2 , C_3 . Дана поведінка кривих (рис. 4) пояснюється тим, що ємності C_2 , C_3 фактично утворюють разом з активним опором R_ϕ фільтр пульсацій. Тому при зменшенні C_2 , C_3 амплітуда пульсацій різко зростає.

Залежності, наведені на рис. 5 показують, що при граничних значеннях ємностей C_1 , C_2 (C_3) значення часу Δt різко збільшується (десятки разів) в порівнянні з номінальними значеннями C_1 , C_2 , C_3 . При граничних значеннях ємності C_1 (крива 2) величина Δt коливається в проміжку від 4,98 мс до 5,06 мс, а при граничних значеннях ємностей C_2 , C_3 відповідно від 4,88 мс до 6,5 мс.

Як приклад, були проведені розрахунки для комплексного зменшення граничних значень всіх ємностей каскадного генератора C_1 , C_2 , C_3 в режимах $\bar{U}_n = 1$ кВ: $C_1 = 0,0261$ мкФ, $C_2 = C_3 = 0,0181$ мкФ, при цьому одержано $U_m = 7948$ В, $\Delta_n = 1,38$ %. Для $\bar{U}_n = 180$ кВ: $C_1 = 0,00715$ мкФ, $C_2 = C_3 = 0,000161$ мкФ одержано $U_m = 90674$ В, $\Delta_n = 7,788$ %. З аналізу одержаних результатів можна відзначити, що значення напруги U_m джерела живлення незначно зростає, а коефіцієнт амплітуди пульсацій Δ_n різко збільшується.

Висновки.

1. Знайдене в попередній публікації [8] у загальному випадку нелінійного навантаження високовольтного каскадного джерела постійного струму аналітичне рішення для його вихідної напруги та її нелінійної пульсації придатне не тільки для розрахунків номінальних режимів, але і для граничних умов вибору його структурних елементів. Це дозволяє проводити

багатоваріантні та оптимізаційні розрахунки умов роботи та характеристик високовольтних каскадних генераторів постійної напруги, при збереженні вихідних параметрів їх навантаження $\bar{U}_n$, I_0 .

2. Проведені розрахунки свідчать, що прийнятні для практичних застосувань характеристики високовольтних каскадних генераторів можуть бути досягнуті при суттєвому зменшенні значень їх складових ємностей, отже і при суттєвому зменшенні їх вартості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Cockcroft J.D., Walton E.T.S. Experiments with high velocity positive ions. (I) Further developments in the method of obtaining high velocity positive ions // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 1932. – Vol. 136. – № 830. – pp. 619-630.
2. Бржезицький В.О., Ісакова А.В., Рудаков В.В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В.О. Бржезицького, В.М. Михайлова. – Х.: Торнадо, 2005. – 930 с.
3. Кастров М.Ю. Полупроводниковые широкодиапазонные стабилизаторы напряжения переменного тока // *Электросвязь*. – 2005. – № 10. – С. 20-22.
4. Альбертинский Б.С., Свинын М.П. Каскадные генераторы. – М.: Атомиздат, 1980. – 210 с.
5. Бржезицький В.О., Вендичанський Р.В., Десятов О.М., Гаран Я.О. Обґрунтування вибору стабілітронів і режимів електроживлення еталонних установок високої напруги постійного струму // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2014. – № 1. – С. 7-13.
6. Северин В.П., Нікуліна О.М., Ахтирцев М.І. Математичне та програмне забезпечення для моделювання одноступеневого генератора імпульсів напруги // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – 2013. – № 33. – С. 19-24.
7. Воробьев А.А., Воробьев Г.А. и др. Высоковольтное испытательное оборудование и измерения. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 583 с.
8. Бржезицький В.О., Десятов О.М., Сулейманов В.М., Хомініч В.І. Аналіз пульсацій високовольтного каскадного генератора напруги постійного струму // *Технологічний аудит та резерви виробництва*. – 2015. – № 1(21). – С. 56-61.

REFERENCES

1. Cockcroft J.D., Walton E.T.S. Experiments with High Velocity Positive Ions. (I) Further Developments in the Method of Obtaining High Velocity Positive Ions. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1932, Vol. 136, no.830, pp. 619-630. doi: 10.1098/rspa.1932.0107.
2. Brzhezytskyi V.O., Isakov A.V., Rudakov V.V. *Tekhnika i elektrofizyka vysokikh napruh* [Engineering and Electrophysics high voltages]. Kharkiv, Tornado Publ., 2005. 930 p. (Ukr).
3. Castrov M.J. Semiconductor wide-range AC voltage stabilizers. *Electrosvyaz – The Electrosvyaz Magazine*, 2005, no.10, pp. 20-22. (Rus).
4. Albertinsky B.S., Svinin M.P. *Kaskadnye generatory* [Cascade generators]. Moscow, Atomizdat Publ., 1980, p. 210. (Rus).
5. Brzhezytskyi V.O., Vendychanskyi R.V., Desiatov O.M., Haran I.A. Rationale diodes and modes of supply of standard units of high voltage direct current. *Naukovi visti NTUU «KPI» – Science news of NTUU «KPI»*, 2014, no.1, pp. 7-13. (Ukr).
6. Severin V.P., Nikulina O.M., Akhtyrsev M.I. Mathematical and simulation software for single-voltage pulse generator. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2013, no.33, pp. 19-24. (Ukr).

7. Vorobyov A.A., Vorobyov G.A. *Vysokhovoltnoe ispytatel'noe oborudovanie i izmereniya* [High voltage test equipment and measuring]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1960. 583 p. (Rus).

8. Brzhezitsky V.O., Desjatov O.M., Suleimanov V.M., Hominich V.I. Analysis of high voltage cascade generator pulsations of a direct current. *Tekhnologichnii audit i rezervi virobnictva – Technology audit and production reserves*, 2015. no.1(21), pp. 56-61. (Ukr). doi: <http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372.2015.37219>.

Поступила (received) 26.01.2015

Бржезицький Володимир Олександрович¹, д.т.н., проф.,
Десятов Олег Михайлович¹, асистент,

Козюра Володимир Володимирович¹, здобувач,

¹ Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»,

03056, Київ, пр. Перемоги, 37,

тел/phone +38 044 4068235,

e-mail: brzhezitsky@mail.ru; oleg_desyatov@ukr.net

V.O. Brzhezitsky¹, O.M. Desjatov¹, V.V. Kozюра¹

¹ National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»,

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

Limit solutions of equations of a DC high-voltage cascade generator.

In the paper the issue of calculating the high voltage cascade mode oscillator with a nonlinear load using the analytical method under different conditions of selection values of its components is presented. The peculiarity of the method of the study is that during multivariate calculations output parameters load generator remain unchanged. For high-voltage cascade direct current power found conditions under which can be significantly reduced high capacity capacitors cascade generator. The calculations show that acceptable for practical applications of high-voltage characteristics of cascade generators can be achieved with substantial reduction of the volume of their constituents, and thus substantial decline in their value. References 8, table 2, figures 5.

Key words: cascade high-voltage source, an analytical method, amplitude of voltage pulsation, nonlinear loading, thresholds container.

ВОЗБУЖДАЕМЫЕ УСИЛИЯ ПРИТЯЖЕНИЯ В СИММЕТРИЧНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ – УНИВЕРСАЛЬНОМ ИНСТРУМЕНТЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РИХТОВКИ

Проведено розрахунок збуджуваних зусиль притягання в симетричній індукційній індукторній системі – універсальному інструменті магнітно-імпульсної рихтування. За отриманими аналітичними залежностями проведені чисельні оцінки з побудовою об'ємних епюр, фазових і радіальних залежностей амплітудно-просторового розподілу збуджуваних сил притягання. Визначено, що вплив магнітних властивостей екрану і заготовки проявляється в появі потужних сил магнітного притягання. Бібл. 16, рис. 5.

Ключові слова: магнітно-імпульсне рихтування, збуджувані зусилля, магнітне притягання.

Проведен расчет возбуждаемых усилий притяжения в симметричной индукционной индукторной системе – универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки. По полученным аналитическим зависимостям проведены численные оценки с построением объёмных эпюр, фазовых и радиальных зависимостей амплитудно-пространственного распределения возбуждаемых сил притяжения. Определено, что влияние магнитных свойств экрана и заготовки проявляется в появлении мощных сил магнитного притяжения. Библ. 16, рис. 5.

Ключевые слова: магнитно-импульсная рихтовка, возбуждаемые усилия, магнитное притяжение.

Введение. Постановка проблемы. С каждым годом в мире огромными темпами растет количество автомобилей. Украина занимает 65 место в общемировом рейтинге по количеству автомобилей на душу населения, имея показатель в 98 машин на 1000 населения. Но, к сожалению, вместе с ростом количества автотранспортных средств, растет и количество ДТП с их участием, в которых, в той или иной степени, но обязательно повреждаются панели кузовных элементов автомобилей. Помимо аварийных ситуаций, появление вмятин на кузовных панелях автотранспорта обусловлено и рядом других причин. Например, град, неудачная парковка, камни из-под колёс впереди идущих машин. Поэтому, операции связанные с ремонтом и реставрацией кузовных панелей автомобилей являются весьма актуальными и пользуются все большим спросом. Причем, как показывают статистические данные, до 80 % повреждений приходится на небольшие и средние повреждения. Половина из них – это вмятины, не требующие замены всего элемента и устраняемые рихтовкой. Более 50 % таких повреждений составляют зоны с затрудненным или полностью закрытым обратным доступом. В этой связи особый интерес представляют методы восстановления кузовов автомобилей, позволяющие произвести, так называемую внешнюю рихтовку без разборки кузовных элементов и нарушения существующего защитного покрытия. Наиболее яркими примерами являются новые, прогрессивные бесконтактные методы внешнего восстановления кузовных панелей автомобилей (внешняя магнитно-импульсная рихтовка) [1, 2].

Следует отметить, что при работе с металлом традиционными механическими методами (рихтовке, выдавливании, штамповки), он становится тонким и растягивается. При этом особой деформации подвергается верхний слой металла, что приводит к нарушению самой его структуры. Магнитно-импульсные методы рихтовки лишены перечисленных недостатков, так как, взаимодействие магнитного поля с индуцированным током по всей толщине обрабатываемого металла приводит к вытягиванию металла силами

притяжения, которые действуют равномерно по всей его толщине [3].

Инструменты внешней магнитно-импульсной рихтовки. Одним из наиболее важных и интересных вопросов в исследовании новых, прогрессивных методов внешней магнитно-импульсной рихтовки, является их инструменты. Особенный интерес представляют инструменты, позволяющие производить рихтовку кузовных панелей автомобилей выполненных, как из ферромагнитных так и неферромагнитных металлов (алюминий и его сплавы). Данный факт обусловлен переходом автопроизводителей к изготовлению кузовных панелей автомобилей из легких, высокопрочных металлов. К таким инструментам относятся индукционные индукторные системы (ИИС) – универсальные инструменты внешней магнитно-импульсной рихтовки [2, 4, 5].

Принцип их действия ИИС основан на законе Ампера для проводников с одинаково направленными токами [4-6]. Следует отметить, что силовое взаимодействие между плоскими проводящими листами, в металле которых возбуждаются одинаково направленные индуцированные токи, возможно лишь в режиме интенсивного проникновения поля индуктора сквозь эти листы. Только в этом случае при нулевом поле между ними возникают силы магнитного давления извне, обуславливающие их взаимное притяжение [7].

Если, например, требуется устранить вмятину в металлическом листе, её следует расположить под витком в области индуктора, которая в дальнейшем будет называться рабочей зоной системы. Тогда силовое взаимодействие индуцированных токов позволит притянуть соответствующий участок этого листа к плоскости жёсткой поверхности индуктора и устранить вмятину [2].

Анализ основных достижений и публикаций. Особое место среди мировых производителей использующих полевые технологии занимают корпорация «Boeing Company» [8] и мировые бренды, что ответились от нее: «Electroimpakt» [9], «Fluxtronic» [10] (рис. 1).

© А.В. Гнатов

Данные компании занимаются созданием магнитно-импульсных технологий для внешнего устранения вмятин в корпусах самолетов. Общими недостатками их систем являются: наличие двух источников энергии; сложность требуемой силовой электроники; необходимость в высокоточной синхронизации высокочастотного и низкочастотного сигнала; большие затраты на требуемые комплектующие; низкая надёжность в эксплуатации и высокая себестоимость конечного продукта.



Рис. 1. Оборудование для внешней рихтовки «Fluxtronic»

Совершенно новые возможности для создания устройств по внешнему устранению вмятин на корпусных (кузовных) элементах транспортных средств открывает явление, экспериментально обнаруженное профессорами Ю.В. Батыгиным, В.И. Лавинским и Л.Т. Хименко [2, 4] и зафиксированное в Национальном техническом университете «ХПИ». Его суть состоит в том, что при частотах действующих полей ниже 2 кГц имело место притяжение металлического образца к поверхности индуктора-инструмента. При увеличении частоты до 7 кГц и выше образец отталкивался согласно традиционным представлениям о процессах при магнитно-импульсной обработке металлов (МИОМ).

На основании вышеописанного явления европейский концерн «Betag Innovation» [11] предложил свою разработку «Магнитное приспособление для удаления вмятин» для практики внешней рихтовки автомобильных кузовов (в оригинале – «Magnetic Dent Remover») (рис. 2). К основным недостаткам данного оборудования следует отнести:

1) применение в качестве инструмента многovitковой катушки, которая, судя по описанию, достаточно сложна в изготовлении и, как показал весь практический опыт МИОМ, весьма недолговечна в эксплуатации;

2) возможность работы только с ферромагнетиками;

3) принцип действия основан на устаревших к настоящему времени выводах первых научно-исследовательских поисковых работ 2003-2004 гг., которые не позволяют в достаточной мере реализовать все позитивные возможности магнитно-импульсного притяжения [12, 13].

В этой связи, весьма актуальным и необходимым представляется решение вопроса, связанного с универсальными инструментами внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки. Особенно

важным вопросом является исследование процессов возбуждения в инструментах необходимых усилий притяжения, которые и обеспечивают проведение операции магнитно-импульсной рихтовки.



Рис. 2. Оборудование для внешней рихтовки «Betag Innovation»

Цель работы – определение и расчет возбуждаемых усилий притяжения в симметричной индукционной индукторной системе, как универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки.

Анализ электродинамических процессов. Для расчета возбуждаемых усилий в ИИС, примем её расчётную модель в цилиндрической системе координат, показанную на рис. 3 [14].

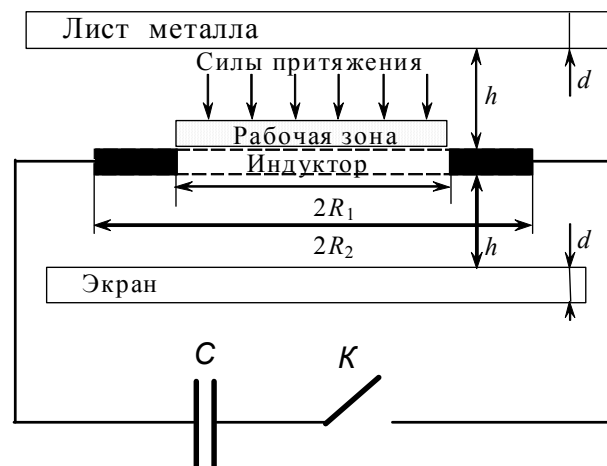


Рис. 3. Расчётная модель ИИС

Для расчётной модели, представленной на рис. 3, составляются уравнения Максвелла для возбуждаемых составляющих вектора электромагнитного поля ($E_\varphi \neq 0, H_{rz} \neq 0$):

$$\begin{cases} \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} = j_\varphi(p, r, z); \\ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r E_\varphi(p, r, z)) = -\mu_0 p H_z(p, r, z); \\ \frac{\partial E_\varphi(p, r, z)}{\partial z} = \mu_0 \cdot p \cdot H_r(p, r, z); \end{cases} \quad (1)$$

где p – параметр преобразования Лапласа;

$$\begin{aligned} E(p, r, z) &= L\{E(t, r, z)\}; \\ H_{r,z}(p, r, z) &= L\{H_{r,z}(t, r, z)\}; \\ j_{\varphi}(p, r, z) &= L\{j_{\varphi}(t, r, z)\} \end{aligned}$$

Решая составленные уравнения известными математическими методами [15, 16], во избежание громоздкости в изложении, опустим промежуточные выкладки, и запишем окончательное выражение для искомых величин возбуждаемых сил [1, 4].

Силы притяжения листовых металлов с индуцированными токами (закон Ампера) описываются соотношением [1, 4, 5, 13, 14]:

$$F_A(\varphi, r) = F_{Am}(\varphi) \cdot \left(\int_0^{\infty} \Phi_3(x) \cdot J_1\left(x \frac{r}{d}\right) \cdot dx \right)^2, \quad (2)$$

где

$$F_{Am}(\varphi) = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{r}{h} \left(j_m \cdot \frac{dj(\varphi)}{d\varphi} \cdot \frac{(\omega \cdot \tau)}{2} \right)^2,$$

$$\Phi_3(x) = \left(F(x) \cdot \left((1 - \operatorname{ch}(x)) - \frac{1}{\mu_r} \cdot \operatorname{sh}(x) \right) \right) /$$

$$\left(x^3 \left(\operatorname{sh}(x) \cdot \left[\operatorname{sh}\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} \operatorname{ch}\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} \cdot e^{x \cdot \frac{h}{d}} \cdot \operatorname{ch}(x) \right) \right),$$

$$F(x) = \int_{x \cdot \frac{R_1}{d}}^{x \cdot \frac{R_2}{d}} y \cdot J_1(y) dy \quad \text{— для равномерного радиально-$$

го распределения тока в индукторе, $J_1\left(x \frac{r}{d}\right)$ — функция Бесселя 1-го порядка.

Сила притяжения, обусловленная магнитными свойствами металла заготовки, описывается зависимостью [2, 4]:

$$\begin{aligned} F_M(\varphi, r) &= -F_{Mm}(\varphi) \times \\ &\times (\mu_r [Y_1(r) - Y_2(r)] + [Y_3(r) - Y_4(r)]), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{где } F_{Mm}(\varphi) = \frac{\mu_0}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{\mu_r}\right) \cdot j_m^2 \cdot j^2(\varphi).$$

Значения коэффициентов $Y_1(r) \dots Y_4(r)$ приведены в авторской работе [4].

Проведем численные оценки возбуждаемых усилий (рис. 4 и рис. 5). Как следует из физических соображений, в магнитных полях с напряженностями, достаточными для ощутимого силового воздействия ($\sim 10^5 \dots 10^7$ А/м), относительная магнитная проницаемость должна стремиться в величине, близкой к единице. Справедливость такого предположения обоснована авторами работы [1, 2, 4-6, 13, 14]. Для определенности примем, что $\mu_r = 2,5$.

Проведем расчёты для следующих начальных условий: $R_1 = 0,025$ м, $R_2 = 0,035$ м, $h = 0,001$ м, $f = 1150$ Гц, $\delta = 0,2$, $I_m = 50$ кА, $d = 0,00075$ м, $\gamma = 0,4 \cdot 10^7$ 1/(Ом·м).

Проводя анализ полученных результатов вычислений можно сделать следующие выводы:

- влияние магнитных свойств экрана и заготовки проявляется в появлении мощных сил магнитного притяжения;

- суперпозиция сил притяжения Ампера и сил магнитного притяжения в радиальных распределениях нивелирует «провал» силового действия на заготовку в области витка индуктора;

- в целом, притяжение ферромагнетика в рассматриваемой ИИС оказывается существенно эффективнее, чем немагнитного металла, оценки для которого были проведены в работах [1, 4]. Током индуктора с временной зависимостью в виде экспоненциально затухающей синусоиды с амплитудой ~ 37 кА возбуждаются силы притяжения порядка $35 \dots 80$ кГ/см²;

- оценка усредненных силовых показателей показала, что среднее значение суммарной силы притяжения (сила Ампера плюс сила магнитного притяжения) за время её действия может составить ~ 110 кГ/см².

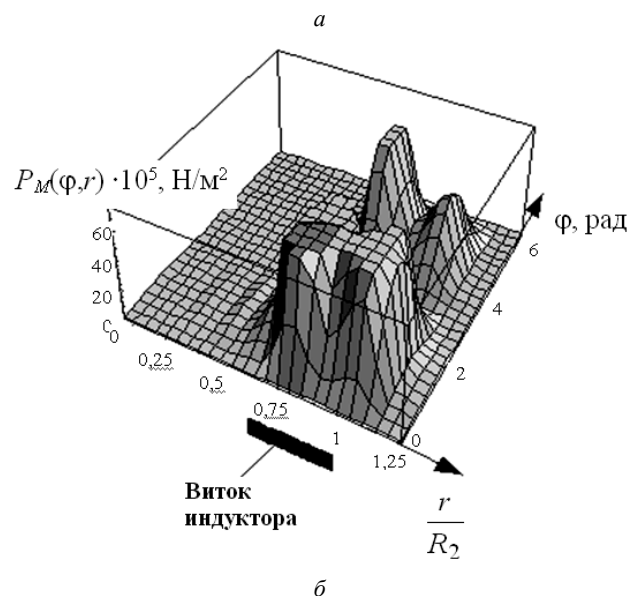
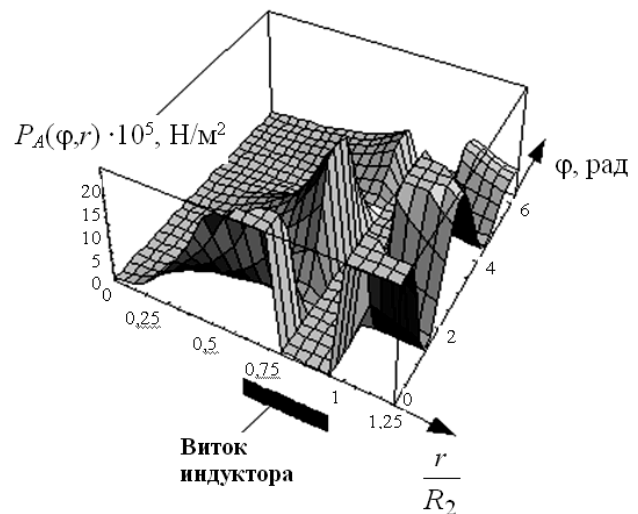


Рис. 4. Объёмные эпюры фазово-пространственного распределения временных максимумов возбуждаемых сил притяжения для магнитных металлов:

а — сила притяжения Ампера,
б — сила магнитного притяжения

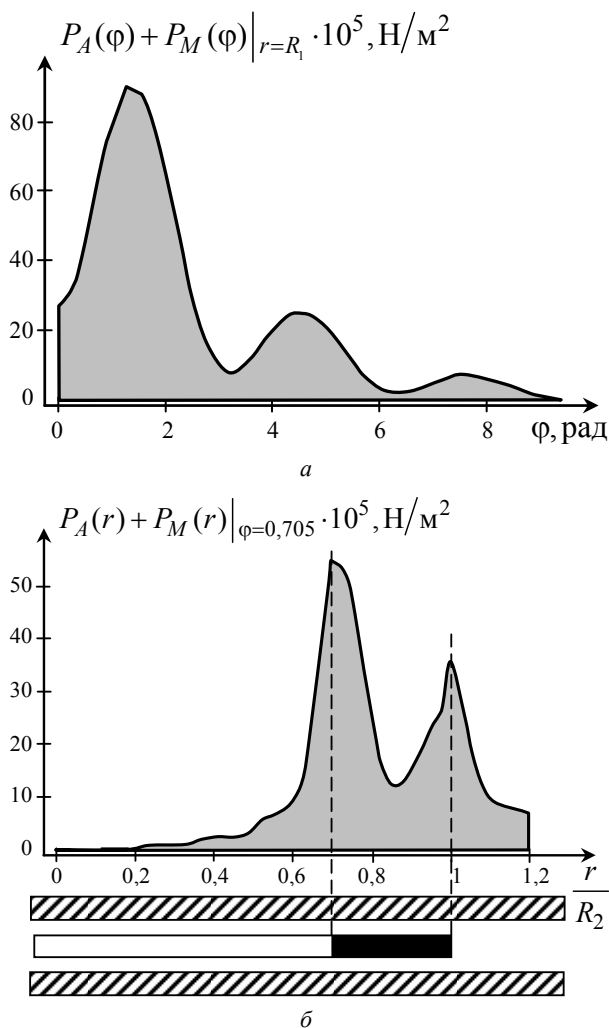


Рис. 5. Графические зависимости суммарной силы притяжения в системе с магнитным экраном и заготовкой:
 а – фазовая зависимость для $r = R_1$;
 б – радиальное распределение в момент $\varphi = 0,705$ рад

Выводы.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Проведено определение и расчет возбуждаемых усилий притяжения в симметричной индукционной индукторной системе – универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки.
2. Выполненные численные оценки показали, что влияние магнитных свойств экрана и заготовки проявляется в появлении мощных сил магнитного притяжения. Среднее значение суммарной силы притяжения может составить $\sim 110 \text{ кГ/см}^2$.
3. Универсальный инструмент внешней магнитно-импульсной рихтовки на основе симметричной индукционной индукторной системы в рассматриваемых условиях возбуждает достаточные значения усилий притяжения для эффективного выполнения операции рихтовки [1, 2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнатов А.В. Научные основы восстановления кузовных панелей автомобилей методами внешней бесконтактной рихтовки: дисс. ... докт. техн. наук : 05.22.20 / Гнатов Андрей Викторович. – Х., 2014. – 391 с.

2. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Трунова И.С. Магнитно-импульсные технологии для восстановления корпусных элементов транспортных средств. Часть 2. Оборудование для практической реализации внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2013. – № 2(9). – С. 68-82.
3. Синельников А.Ф., Штоль Ю.Л., Скрипников С.А. Кузова легковых автомобилей: обслуживание и ремонт. – М.: Транспорт, 1995. – 256 с.
4. Гнатов А.В. Анализ электродинамических процессов в цилиндрических индукторных системах – инструментах магнитно-импульсной рихтовки: монография. – Х.: ХНА-ДУ, 2013. – 292 с.
5. Batygin Yuri V., Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals // Journal of Materials Processing Technology. – Vol. 214. – Issue 2. – 2014. – pp. 390-401.
6. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Аргун Щ.В., Еремина Е.Ф. Электромагнитные процессы в симметричных индукционных системах с идентичными ферромагнитными тонкостенными экраном и листовой заготовкой // Электротехника і електро механіка. – 2012. – № 4. – С. 50-53.
7. Пат. 70055 Україна, В21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної притягання металевих об'єктів одновитковою індукторною системою з тонким екраном / Батигін Ю.В., Гнатов А.В., Чаплигін Є.О., Аргун Щ.В., Гопко А.В., Дробінін О.М.; заявник та патентовласник Харківський нац. авт.-дор. ун-т. – № у 2011 13398; заявл. 14.11.2011; опубл. 25.05.2012, Бюл. № 10.
8. Electromagnetic Dent Removal: onsite repairs in minutes [Електронний ресурс]. – Режим доступа: http://www.boeing.com/assets/pdf/commercial/aviationservices/brochures/34241_ElectDentRemoval04-05.pdf.
9. Electromagnetic Dent Removal [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.electroimpact.com/EMAGDR/overview.asp>.
10. Need an electromagnetic dent remover on hand. Fluxtronic offers the best: the Portable Flux 3 dent remover [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fluxtronic.com/product.php>.
11. Welcome to BETAG Innovation [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.betaginnovation.com>.
12. Лаборатория электромагнитных технологий [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://electromagnetic.comoj.com>.
13. Гнатов А.В., Батыгин Ю.В., Чаплигин Е.А.. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Магнитно-импульсные технологии бесконтактной рихтовки кузовных элементов автомобиля: монография. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012 – 242 с.
14. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Шиндерук С.А. Расчет электродинамических процессов в индукционной индукторной системе с немагнитными металлами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 3. – С. 169-174.
15. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 615 с.
16. Мэттьюс Дж., Уокер Р. Математические методы физики / Пер. с англ. Крайнова В.П. – М.: Атомиздат, 1972. – 399 с.

REFERENCES

1. Gnatov A.V. *Nauchnyye osnovy vosstanovleniya kuzovnykh paneley avtomobiley metodami vneshney beskontaktnoy rikhtovki*. Diss. dokt. techn. nauk [Scientific bases of restoration of body panels of cars methods external contactless straightening. Doc. tech. sci. diss.]. Kharkov, 2014. 391 p. (Rus).
2. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Trunova I.S. Magnetic-pulse technology for restoration of case elements of vehicles. Part 2. Equipment for practical realization of external contactless

magnetic-pulse straightening. *Naukoviy visnik Khersons'koj derzhavnoj mors'koj akademii – Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*, 2013, no.2(9), pp. 68-82. (Rus).

3. Sinel'nikov A.F., Shtol' Yu.L., Skripnikov S.A. *Kuzova legkovykh avtomobiley: obsluzhivaniye i remont* [Body cars: repair and service]. Moscow, Transport Publ., 1995. 256 p. (Rus).

4. Gnatov A.V. *Analiz elektrodinamicheskikh protsessov v tsilindricheskikh induktornykh sistemakh – instrumentakh magnitno-impul'snoy rikhtovki: monografiya* [Analysis of electrodynamic processes in cylindrical induction system – tools magnetic pulse straightening]. Kharkov, KHNADU Publ., 2013. 292 p. (Rus).

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

6. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Argun Sh.V., Yeryomina E.F. Electromagnetic processes in symmetric induction systems with identical ferromagnetic thin-walled screen and sheet blank. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.4, pp. 50-53. (Rus).

7. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin E.A., Argun Sh.V., Gopko A.V., Drobinin O.M. *Sposib magnitno-impul'snogo prityagannya metalivkh ob'ektiv odnovitkovoyu induktornoju sistemoyu z tonkim ekranom* [Method magnetic pulse attraction metal objects single-turn inductor system with a thin screen]. Patent UA, no.70055, 2011. (Ukr).

8. *Electromagnetic Dent Removal: onsite repairs in minutes*. Available at: http://www.boeing.com/assets/pdf/commercial/aviationservices/brochures/34241_ElectDentRemoval04-05.pdf (accessed 11 September 2014).

9. *Electromagnetic Dent Removal*. Available at: <http://www.electroimpact.com/EMAGDR/overview.asp> (accessed 25 May 2014).

10. *Need an electromagnetic dent remover on hand. Fluxtronic offers the best: the Portable Flux 3 dent remover*. Available at: <http://www.fluxtronic.com/product.php> (accessed 07 August 2014).

11. *Welcome to BETAG Innovation*. Available at: <http://www.betaginnovation.com> (accessed 16 June 2014).

12. *Laboratoriia elektromagnitnykh tekhnologii* (Laboratory of Electromagnetic Technology) Available at: <http://electromagnetic.comoj.com> (accessed 10 July 2014).

13. Gnatov A.V., Batygin Yu.V., Chaplygin E.A. *Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnykh tekhnologij. Magnitno-impul'snye tekhnologii beskontaktnoj rikhtovki kuzovnykh elementov avtomobilya: monografiya* [Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Magnetic pulse contactless technology straightening car body elements. Monograph]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publ., 2012. 242 p. (Rus).

14. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Shinderuk S.A. Calculation of electrodynamic processes in the induction system with nonmagnetic metals. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova – Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2014, no.3, pp. 169-174. (Rus).

15. Landau L.D., Lifshits Ye.M. *Elektrodinamika sploshnykh sred* [Electrodynamics of continuous media]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 615 p. (Rus).

16. Matthews J., Walker R. *Matematicheskie metody fiziki* [Mathematical methods of physics]. Moscow, Atomizdat Publ., 1972, 399 p. (Rus).

Поступила (received) 13.01.2015

Гнатов Андрей Викторович, д.т.н., доц.,

¹ Харьковський національний автомобільно-дорожній університет,
61002, Харків, ул. Петровського, 25,
тел/phone +38 057 7003852, e-mail: kalifus@yandex.ru

A.V. Gnatov

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

The excited loads of attraction in a symmetrical inductor system for the magnetic pulse removing of the body car.

Recently, repair and recovery of vehicle body operations become more and more popular. A special place here is taken by equipment that provides performance of given repair operations. The most interesting are methods for recovery of car body panels that allow the straightening without disassembling of car body panels and damaging of existing protective coating. Now, there are several technologies for repair and recovery of car body panels without their disassembly and dismantling. The most perspective is magnetic-pulse technology of external non-contact straightening. **Results.** The calculation of excited loads attractions in a symmetrical inductor system in the universal tool of magnetic-pulse straightening is provided. According to the obtained analytical dependence of the numerical evaluation of volumetric construction diagrams, phase and amplitude of the radial dependence of the spatial distribution of the excited efforts of attraction is obtained. The influence of the magnetic properties of the blank screen and manifested in the appearance of powerful magnetic attraction forces is determined. **Originality.** A new trend of research of magnetic-pulse working of thin-walled metals has been formulated and received further development, which allows to create not only new equipment, but principally new technological processes of external non-contact repair and recovery of vehicle body panels. Scientific basis of electrodynamic and magnetic attraction of thin-walled sheet metals with using the energy of high-power pulsed fields was created for the first time and proved theoretically and experimentally. Scientific and technical solutions in design of effective tools based on single-turn inductor systems of cylindrical geometry for straightening and recovery of car body panels were formulated and proved theoretically, as well as experimentally. **Practical value.** Using the results of the calculations we can create effective tools for an external magnetic pulse straightening of car body panels. References 16, figures 5.

Key words: magnetic pulse straightening, excited loads, magnetic attraction.

ФОРМИРУЮЩИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

У роботі визначені області співвідношення параметрів схеми генератора імпульсів магнітного поля, у яких можливе формування трьох характерних форм імпульсів. Отримано співвідношення й запропонована методика для вибору параметрів елементів розрядного кола генератора, при яких формуються уніполярні імпульси з монотонним наростанням і спадом значень. Бібл. 7, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: генератор імпульсів, магнітне поле, форма імпульсу, параметри елементу.

В работе определены области соотношения параметров схемы генератора импульсов магнитного поля, в которых возможно формирование трех характерных форм импульсов. Получены соотношения и предложена методика для выбора параметров элементов разрядной цепи генератора, при которых формируются униполярные импульсы с монотонным нарастанием и спадом значений. Библ. 7, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: генератор импульсов, магнитное поле, форма импульса, параметры элемента.

Введение. Постановка проблемы. В настоящее время эксплуатация различных технических средств (ТС) проводится в сложной электромагнитной обстановке, определяемой интенсификацией как природных электромагнитных явлений (в частности – грозовой деятельности), так и процессов, являющихся следствием деятельности человека. Для проверки надежности эксплуатации ТС должны подвергаться испытаниям на стойкость к воздействию соответствующих электромагнитных факторов и, в частности, воздействию импульсов магнитного поля, что, в свою очередь, требует проведения дальнейших исследований, обеспечивающих разработку и создание современного испытательного оборудования.

Анализ публикаций. При эксплуатации ТС на них могут воздействовать дестабилизирующие одно- и двух полярные импульсы магнитного поля различной формы [1-3], основными из которых являются: колебательная и аperiodическая. Формальное описание таких импульсов может быть представлено в виде [4] строки-описания формы (СОФ):

$$\text{СОФ} = (A) + (B) + (V), \quad (1)$$

где $(A) = \{1; 2\}$ – символ, определяющий полярность импульса; $(B) = \{k_e; \infty\}$ – символ, определяющий количество экстремумов, $k_e \geq 1$; $(V) = \{k_0; \infty\}$ – символ, определяющий количество переходов через «0», $k_0 \geq 0$.

По признаку «количество экстремумов» импульс может быть « k – экстремальный» – имеющий точно k_e – экстремумов (в силу ограниченности импульса во времени он всегда имеет хотя бы один экстремум), и многоэкстремальный – для которого теоретическое количество экстремумов равно ∞ или невозможно однозначно (без указания конкретных значений параметров элементов схемы) определить предельное количество экстремумов в анализируемом интервале времени. По признаку «количество переходов через «0» импульсы можно разделить на « k – переходный» – имеющий точно k_0 – переходов (значение $k_0 = 0$ соответствует однополярному импульсу) и многопереходный – для которого теоретическое количество переходов через «0» равно ∞ или невозможно однозначно (без указания конкретных значений параметров элементов схемы) определить предельное количество переходов через

«0» в анализируемом интервале времени. Для сопоставления формы импульса с параметрами схемы, при которых имеет место данная форма, используется строка-описание параметров (СОП) [4] в виде наборов: (параметр схемы) $\in$ (интервал значений).

Для формирования импульсов магнитного поля используются специальные электромагнитные системы, по которым протекают импульсы тока соответствующей формы. В нормативном документе [1] для имитации воздействия импульсов магнитного поля на ТС рекомендуется применять генератор, схема которого показана на рис. 1.

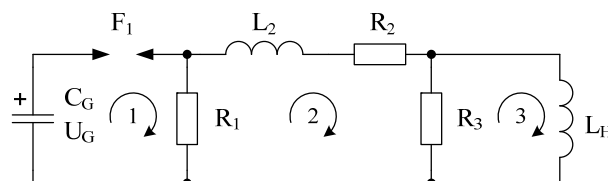


Рис. 1. Схема проведения испытаний

На схеме обозначено: U_G , C_G – напряжение зарядки и емкость генератора, F_1 – коммутатор, R_1 , R_2 , R_3 – формирующие резисторы, L_2 – формирующая индуктивность, L_H – индуктивность системы полеобразования. Как указано в [1], предложенный генератор обладает широкими возможностями регулирования контролируемых параметров формируемого импульса тока (соответственно параметров импульса магнитного поля). Однако в описании генератора, кроме общих рекомендаций, отсутствуют какие-либо соотношения, позволяющие выбрать формирующих элементов разрядной цепи, что существенно затрудняет процесс его проектирования. В связи с этим в [5] были рассмотрены формирующие возможности генератора при предельных значениях параметров ряда элементов схемы, приведенной на рис. 1. Для более полного использования возможностей данной схемы требуются дополнительные исследования.

Целью настоящей статьи является определение областей соотношения параметров элементов разрядной цепи генератора, обеспечивающих формирование импульса магнитного поля различной формы.

Материалы и результаты исследования. Предварительный анализ переходных процессов в схеме (рис. 1) показывает, что в индуктивной нагрузке L_H могут быть сформированы импульсы тока различной формы. На рис. 2 показаны характерные формы импульсов тока: колебательный слабо затухающий (рис. 2,а), колебательный сильно затухающий (рис. 2,б) и униполярный импульс с монотонным нарастанием и спадом значений (рис. 2,в).

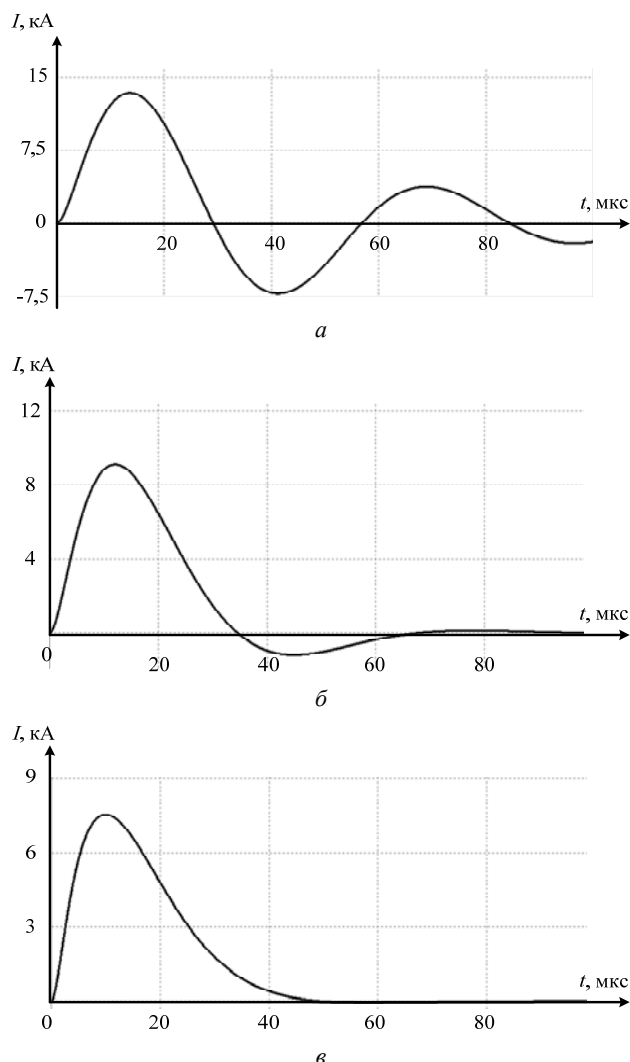


Рис. 2. Характерные импульсы тока

Для определения областей, в которых формируются характерные импульсы тока в системе полеобразования (нагрузке L_H), было проведено численное моделирование, базирующееся на использовании безразмерных величин, определяющих переходный процесс [5]: $\tau = t / \sqrt{L_H C_G}$ – безразмерный аналог времени; $r_k = R_k / \sqrt{L_H / C_G}$, $k = \overline{1, 3}$ – безразмерные аналог активные сопротивлений; $I_J = \frac{i_J}{U_G} \sqrt{\frac{L_H}{C_G}}$, $J = \overline{1, 3}$ – безразмерные аналог контурных токов; $L_{2H} = L_2 / L_H$ – безразмерный аналог индуктивности; где i_J – контурные токи; J – номер контура (направление обхода контуров показано на рис. 1).

Условия проведения численных экспериментов:

- безразмерное время исследования составляло, $0 \leq \tau \leq 100$ (данное условие определяется тем, что при $\tau = 100$ интересующие нас импульсы практически затухнут);
- импульс тока имеет экстремальное значение, если для этого значения выполняются условия наличия экстремума [6] и его абсолютное значение составляет не меньше 1 % от абсолютной величины максимального значения тока (данное условие вытекает из практической нецелесообразности учета малых значений величины магнитного поля при испытаниях);
- импульс тока имеет переход через «0», если за ним имеется экстремальное значение, определенное по правилу предыдущего условия.

Исследования, проведенные при данных условиях, позволили определить области изменения параметров L_{2H} и r_2 для характерных форм импульсов тока: колебательный слабо затухающий (рис. 3, область 1), колебательный сильно затухающий импульс (рис. 3, область 2) и униполярный импульс с монотонным нарастанием и спадом значений (рис. 3, область 3). Особое внимание при исследовании было уделено формированию униполярного импульса с монотонным нарастанием и спадом значений. На рис. 3 (кривая а) показана взаимосвязь безразмерного аналога индуктивности второго контура L_{2H} и безразмерного аналога сопротивления r_2 , которая является границей униполярности формируемого импульса.

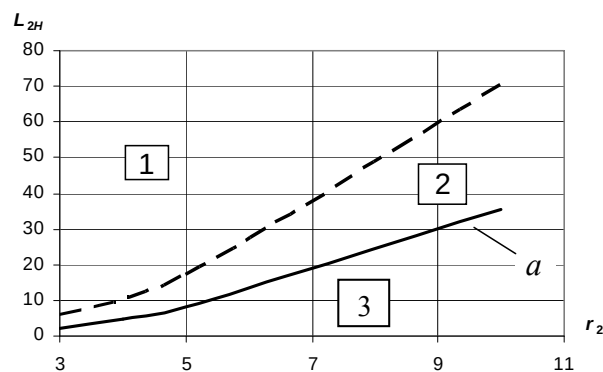


Рис. 3. Разделение областей формирования одно- и двухполярных импульсов тока

В области соотношения параметров, расположенной ниже и правее показанной на рисунке кривой формируется униполярный импульс тока с монотонным нарастанием и спадом значений, выше и левее кривой – двухполярные импульсы тока. Кривая а может быть описана следующим соотношением

$$L_{2H} = 0,3681r_2^2 - 0,0203r_2 - 1,0114, \quad (2)$$

где $3 \leq r_2 \leq 10$.

Описание формы импульсов тока в исследованных областях приведено в табл. 1.

В результате исследования получены также следующие соотношения для определения значений безразмерных параметров вдоль кривой (2) (погрешность не более 10%):

$$\tau_{H(0,1;0,9)} = (0,351r_2 + 0,4236)(-0,0549r_3 + 1,1644); \quad (3)$$

$$I_{3\max} = 0,55r_2^{-0,9}(0,024r_3 + 0,92), \quad (4)$$

где $\tau_{H(0,1; 0,9)}$ – безразмерный аналог длительность нарастания импульса между уровнями 0,9 и 0,1 от максимального значения тока в импульсе; $I_{3 \max}$ – безразмерный аналог тока в системе полеобразования (третьего контурного тока).

Таблица 1

Номер формы	СОФ импульса тока	Номер СОП	СОП элементов схемы
1	(2) + (∞) + (∞)	1.1	$r_1 = 1 \cdot 10^6; r_2 = 3; r_3 = 1; L_{2H} > 5,88$
		1.2	$r_1 = 1 \cdot 10^6; r_2 = 5; r_3 = 1; L_{2H} > 17,1$
		1.3	$r_1 = 1 \cdot 10^6; r_2 = 10; r_3 = 1; L_{2H} > 70,6$
2	(2) + (2) + (1)	2.1	$r_1 = 1 \cdot 10^6; r_2 = 3; r_3 = 1; 2,24 < L_{2H} \leq 5,88$
		2.2	$r_1 = 1 \cdot 10^6; r_2 = 5; r_3 = 1; 8,09 < L_{2H} \leq 17,1$
		2.3	$r_1 = 1 \cdot 10^6; r_2 = 10; r_3 = 1; 35,6 < L_{2H} \leq 70,6$
3	(1) + (1) + (0)	3.1	$1 \cdot 10^4 \leq r_1 < \infty; r_2 = 3 \dots 10; r_3 = 1 \dots 10; L_{2H} \leq 0,3681r_2^2 - 0,0203r_2 - 1,0114$

Выражения (2) – (4) справедливы при следующих значениях безразмерных параметров: $r_1 = 1 \cdot 10^4 \dots \infty$, $r_3 = 1 \dots 5$.

В [1] для униполярного апериодического импульса тока регламентируются следующие временные величины: длительность нарастания импульса между уровнями 0,9 и 0,1 от максимального значения тока в импульсе $T_{H(0,1; 0,9)} = 6,4$ мкс и длительность импульса по уровню 0,5 от максимального значения тока в импульсе $T_{I 0,5} = 16$ мкс. Допуск на эти временные параметры составляет 30 %. Тогда отношение временных параметров может изменяться при проведении испытаний в интервале $T_{I 0,5} / T_{H(0,1; 0,9)} = \tau_{I 0,5} / \tau_{H(0,1; 0,9)} = 1,35 \dots 4,64$ ($\tau_{I 0,5}$ – безразмерный аналог длительность импульса по уровню 0,5 от максимального значения тока в импульсе).

Анализ показал, что вдоль кривой (2) статистические характеристики отношения временных параметров имеют следующее значение: математическое ожидание $MO[\tau_{I 0,5} / \tau_{H(0,1; 0,9)}] = 3,4$; среднее квадратическое отклонение $\sigma[\tau_{I 0,5} / \tau_{H(0,1; 0,9)}] = 0,3$. Следует отметить, что при удалении от кривой (2) в область униполярности, увеличивается отношение $\tau_{I 0,5} / \tau_{H(0,1; 0,9)}$. Таким образом, в исследованном диапазоне соотношения параметров генератора могут быть сформированы испытательные импульсы магнитного поля, регламентируемые в [1], а приведенные в работе соотношения позволяют производить выбор параметров испытательной установки.

В качестве примера рассмотрим выбор значений элементов схемы испытательной установки, обеспечивающей протекание в системе полеобразования с индуктивностью $L_H = 5 \cdot 10^{-6}$ Гн импульса тока с временными параметрами, регламентируемыми [1], и максимальным значением $i_{3 \max} = 1000$ А.

В начале выбираем значения безразмерных сопротивлений из допустимых интервалов: $r_1 = 1 \cdot 10^4$; $r_2 = 5$; $r_3 = 2$. Далее, используя соотношения (2) – (4), вычисляем безразмерные параметры: $L_{2H} = 8,09$;

$\tau_{H(0,1; 0,9)} = 2,3$; $I_3 = 0,125$. Значения формирующей индуктивности и формирующих сопротивлений вычисляем, используя соотношения для определения их безразмерных аналогов $L_2 = L_{2H} L_H = 4,04 \cdot 10^{-5}$ Гн; $R_1 = r_1 (L_H / C_G)^{0,5} = 1,79 \cdot 10^4$ Ом; $R_2 = r_2 (L_H / C_G)^{0,5} = 8,97$ Ом; $R_3 = r_3 (L_H / C_G)^{0,5} = 3,59$ Ом. Параметры емкостного накопителя определяем, используя методику выбора параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных устройств, предложенную в [7]:

$$C_G = \frac{1}{L_H} \left(\frac{T_{H(0,1; 0,9)}}{\tau_{H(0,1; 0,9)}} \right)^2 = 1,55 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$U_G = L_H \frac{i_{3 \max}}{I_{3 \max}} \frac{\tau_{H(0,1; 0,9)}}{T_{H(0,1; 0,9)}} = 1,44 \cdot 10^4 \text{ В}.$$

Определенные численные значения элементов схемы технически реализуемы. Величины параметры импульса тока, рассчитанные при этих значениях элементов схемы, составляют: $T_{H(0,1; 0,9)} = 5,88$ мкс, $T_{I 0,5} = 20$ мкс, $i_{3 \max} = 1075$ А и не выходят за границы допусков, оговоренных в [1].

Выводы.

1. В работе определены области соотношения параметров элементов схемы генератора испытательных импульсов магнитного поля, в которых возможно формирование трех характерных форм импульсов: колебательного слабо затухающего, колебательного сильно затухающего и униполярного импульса с монотонным нарастанием и спадом значений.

2. Получены соотношения и предложена методика для выбора параметров элементов разрядной цепи генератора, при которых формируются униполярные импульсы с монотонным нарастанием и спадом значений.

3. Материалы статьи могут быть использованы для дальнейшего исследования формирующих свойств и оптимизации схемы генератора испытательных импульсов магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к импульсному магнитному полю. Технические требования и методы испытаний: ГОСТ 30336-95. – [Действующий от 1995-04-26]. – М.: Издательство стандартов, 2001. – 12 с. (Межгосударственный стандарт).
2. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 296 с.
3. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
4. Кравченко В.И., Колюшко Г.М., Петков А.А. Взаимосвязь структуры высоковольтных импульсных устройств и формы генерируемых импульсов // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: междунар. науч. конф., 17-21 августа 2009 г.: тезисы докл. – Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня». – 2009. – С. 119-120.
5. Петков А.А. Генерирование испытательных импульсов магнитного поля // Вісник НТУ «ХПИ». – 2006. – №37. – С. 73-78.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – СПб.: Лань, 2003. – 832 с.

7. Кравченко В.И., Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2007. – №6. – С. 70-75.

REFERENCES

1. GOST 30336-95. *Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaia. Ustoichivost' k impul'snomu magnitnomu poliu. Tekhnicheskie trebovaniia i metody ispytaniia* [State Standard 30336-95. Compatibility of technical equipment. Resistance to pulse magnetic field. Technical requirements and test methods]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 2001. 12 p. (Rus).
2. Myrova L.O. Chepizhenko A.Z. *Obespechenie stoykosti apparatury svyazi k ioniziruyushchim i elektromagnitnym izlucheniya* [Ensuring the stability of communications equipment to ionizing and electromagnetic radiation]. Moscow, Radio and communications Publ., 1988. 296 p. (Rus).
3. Kravchenko V.I. *Grozozaschita radioelektronnykh sredstv: Spravochnik* [Lightning protection of radio electronic means: Directory]. Moscow, Radio and communications Publ., 1991. 264 p. (Rus).
4. Kravchenko V.I., Koliushko G.M., Petkov A.A. Interconnection structure of high impulse device and forms generated pulses. *Fizika impulsnykh razryadov v kondensirovannykh sredakh: mezhdunar. nauch. konf., 17-21 avgusta 2009 g.: tezisy dokl.* [Physics of pulsed discharges in condensed media: Intern. scientific. Conf., 17-21 August 2009: Abstracts]. Nikolaev, 2009, pp. 119-120. (Rus).
5. Petkov A.A. The generation of test pulses of magnetic field. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "KhPI"*, 2006, no.37, pp. 73-78. (Rus).
6. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical Handbook for Scientists and Engineers]. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2003. 832 p. (Rus).
7. Kravchenko V.I., Petkov A.A. Parametrical synthesis of high-voltage pulse test devices with capacitive energy storage. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2007, no.6, pp. 70-75. (Rus).

Петков Александр Александрович, д.т.н., с.н.с.,
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт",
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 057 7076678, e-mail: apetkov@yandex.ru

A.A. Petkov

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Forming capabilities of a pulse magnetic field generator.

Purpose. Determination of areas ratio of the parameters of the discharge circuit elements of the generator, which ensure the formation of magnetic field pulses of different shapes.

Methodology. Numerical simulation using dimensionless variables that determine the nature of the transition process in the discharge circuit of the generator, and use the procedure for determining the pulse points of meeting the conditions of extremum and the transition through zero. **Results.** Obtained a description of the formation of the three specific areas of waveforms: oscillatory weakly damped oscillatory strongly damped and unipolar pulse with a monotonic rise and fall values. A relation to the choice of parameters of elements of the discharge circuit of the generator, which formed unipolar pulses with a monotonic rise and fall values. **Originality.** A completed and extended database that implements the mapping of the formal description of the pulse shape with a description of areas ratio parameters for high-voltage pulse discharge circuit test units, with respect to the pulses of current flowing in the formation of the magnetic field. **Practical value.** The relations obtained allow to select the parameters of the discharge circuit elements of the generator designed to generate test pulses of magnetic field. References 7, tables 1, figures 3.

Key words: pulses generator, magnetic field, pulse form, element parameters.

Поступила (received) 16.12.2014

И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский, Б. Инояттов, С. Насриддини

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ДОЛИ СТЕКАЮЩЕГО С ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ ПОДСТАНЦИИ ТОКА ПРИ ОДНОФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

На основі розрахунків і досліджень проведено аналіз розподілу струму однофазного короткого замикання між заземлювачем підстанції та заземлювачем системи «трос-опори», представлених схемою заміщення. Дослідження, виконані для реального діапазону змін параметрів схеми, показали, що опір заземлювача підстанції суттєво впливає на розподіл струму однофазного короткого замикання в схемі. Отримані результати рекомендовано враховувати при проектуванні заземлюючих пристроїв підстанцій. Бібл. 3, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: підстанція, електробезпека, електромагнітна сумісність, заземлюючий пристрій, схема заміщення, струм однофазного короткого замикання, розподіл, алгоритм, розрахунок, аналіз, проектування.

На основе расчетов и исследований проведен анализ распределения тока однофазного короткого замыкания между заземлителем подстанции и заземлителем системы «трос-опоры», представленных схемой замещения. Исследования, выполненные для реального диапазона изменений параметров схемы, показали, что сопротивление заземлителя подстанции существенно влияет на распределение тока однофазного короткого замыкания в схеме. Полученные результаты рекомендовано учитывать при проектировании заземляющих устройств подстанций. Библ. 3, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: подстанция, электробезопасность, электромагнитная совместимость, заземляющее устройство, схема замещения, ток однофазного короткого замыкания, распределение, алгоритм, расчет, анализ, проектирование.

Введение. Неотъемлемой частью каждой электрической подстанции является заземляющее устройство (ЗУ), которое в современных условиях должно отвечать как требованиям электробезопасности людей и животных, так и требованиям электромагнитной совместимости установленного на ней электрооборудования. Эти требования направлены на решение задач защиты от перенапряжений и помех, возникающих при импульсных токах молнии и коммутациях. Следует подчеркнуть, что в решении этих задач главную роль играют геометрические параметры и электрические характеристики заземляющих устройств подстанций. Определение и анализ указанных параметров и характеристик при проектировании позволяют свести к минимуму опасные их воздействия на микропроцессорные устройства релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи при эксплуатации.

Цель статьи. Исследовать распределение тока однофазного короткого замыкания (ОКЗ) в ЗУ подстанции.

Постановка задачи. Заземлитель подстанции, согласно ПУЭ [1], должен выполняться в виде потенциаловывравнивающей сетки из продольных и поперечных электродов, уложенной на ее территории на глубине 0,5-0,7 м. Расстояние между поперечными полосами сетки регламентируется принимать увеличивающимся от периферии к центру заземляющей сетки, причем первое и последующие расстояния, начиная от периферии, не должны превышать соответственно 4,0; 5,0; 6,0; 7,5; 9,0; 11,0; 13,5; 16,0; 20,0 м и т.д. При таком построении сетки размеры ячеек увеличиваются от периферии к центру. Целью такого расположения поперечных электродов является выравнивание потенциалов на поверхности земли на территории открытого распределительного устройства при стекании тока ОКЗ с заземлителя подстанции в землю. В случае одинаковых ячеек сетки напряжение прикосновения в центральной ячейке будет меньше, чем в угловой, которая имеет наибольшее значение напряжения прикосновения.

Заманчивым является нормирование ЗУ по допустимому напряжению прикосновения, так как оно позволяет сократить размеры ЗУ и расход металла, причем в ряде случаев существенно. Однако при этом нормировании необходимо обязательно проанализировать все возможные режимы работы сети, в которой находится подстанция. Для этого необходимо выполнить расчет сети для заданной точки ОКЗ с целью получения максимального и минимального значений токов ОКЗ. Такой расчет позволит выделить составляющие тока ОКЗ от системы и от потребителей. Полученные составляющие тока ОКЗ дают возможность проанализировать работу как основных, так и резервных защит примыкающих к подстанции воздушных линий (ВЛ) в разных режимах.

Вполне очевидно, что ток при ОКЗ в начале линии больше, чем при ОКЗ в конце линии, причем различие этих токов тем существеннее, чем большую протяженность имеет линия. А это значит, что первая быстродействующая ступень защиты нулевой последовательности в большинстве случаев не будет охватывать всю линию.

Следовательно, в этом случае при ОКЗ в конце линии будет действовать в качестве основной защиты последующая ступень: вторая (выдержка времени 0,6 с); третья (выдержка времени 1,1 с); и т.д. А в случае последующего действия резервной защиты время ее действия еще больше. При таком развитии событий предельно допустимые напряжения прикосновения на подстанции существенно снижаются.

Только в результате такого анализа, в том числе и после очередного обследования ЗУ [2], можем сделать вывод о том, что полученное ЗУ соответствует или не соответствует требованиям ГОСТ 12.1.038-82 [3].

В случае нормирования ЗУ подстанции по величине сопротивления заземлителя, потенциал на ЗУ определяется стекающим с него током и может превышать допустимый согласно ПУЭ потенциал.

© И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский, Б. Инояттов, С. Насриддини

В обоих случаях нормирования параметров заземляющих устройств подстанций необходимо знать долю стекающего с заземлителя подстанции тока при ОКЗ в электрической сети.

Основные результаты исследования. Рассмотрим в качестве примера подстанцию 110/35 кВ. Длину защищенного подхода на ВЛ примем равной 2 км. Грозозащитный трос защищенного подхода на каждой ВЛ обязательно присоединяется к заземлителю подстанции. Величина сопротивления ЗУ на каждой опоре в пределах защищенного подхода для всех ВЛ, примыкающих к подстанции, не должна превышать допустимых согласно ПУЭ значений.

При замыкании фазы на землю на ВЛ ток ОКЗ возвращается к источнику как через заземлитель самой подстанции, так и через ЗУ опор ВЛ, соединен-

ных тросом по всей длине защищенного подхода, которая регламентируется ПУЭ и составляет 1-4 км в зависимости от номинального напряжения ВЛ. Грозозащитный трос защищенного подхода на каждой ВЛ обязательно присоединяется к заземлителю подстанции. Величина сопротивления ЗУ на каждой опоре в пределах защищенного подхода для всех ВЛ, примыкающих к подстанции, не должна превышать допустимых согласно ПУЭ значений.

Сопротивление заземлителя системы «трос-опоры» на длине защищенного подхода определяется по схеме замещения, изображенной на рис. 1.

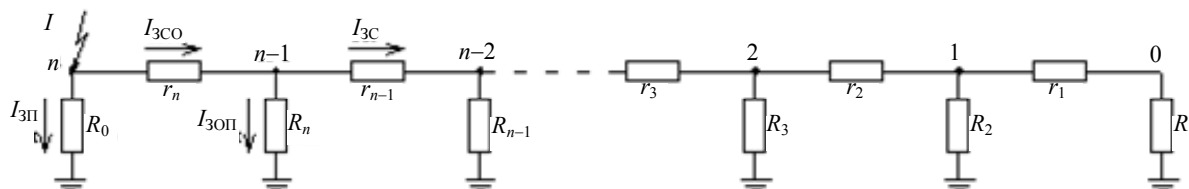


Рис. 1. Схема замещения для расчета сопротивления заземлителя системы «трос-опоры» на длине защищенного подхода: r_n – активное сопротивление троса в пролете; R_n – сопротивление ЗУ опоры; R_0 – сопротивление заземлителя подстанции

Алгоритм расчета сопротивления заземлителя системы «трос-опоры» представим в следующем виде

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{(R_1 + r_1)R_2}{R_1 + r_1 + R_2}; \\ a_2 &= \frac{(a_1 + r_2)R_3}{a_1 + r_2 + R_3}; \\ a_3 &= \frac{(a_2 + r_3)R_4}{a_2 + r_3 + R_4}; \\ &\dots\dots\dots \\ a_{n-2} &= \frac{(a_{n-3} + r_{n-2})R_{n-1}}{a_{n-3} + r_{n-2} + R_{n-1}}; \\ a_{01} &= a_{n-2} + r_{n-1}; \\ a_{n-1} &= \frac{(a_{n-2} + r_{n-1})R_n}{a_{n-2} + r_{n-1} + R_n}; \\ a_{02} &= a_{n-1} + r_n; \\ a_n &= \frac{(a_{n-1} + r_n)R_0}{a_{n-1} + r_n + R_0}, \end{aligned}$$

где n – число опор на длине защищенного подхода.

Рассмотрим характер распределения тока ОКЗ по отдельным элементам схемы, изображенной на рис. 1.

Ток ОКЗ (I) в схеме замещения стекает с заземлителя подстанции ($I_{3п}$), а оставшаяся часть тока ($I_{3со}$) стекает с заземлителя системы «трос-опоры», причем часть последнего стекает с заземлителя конечной опоры ($I_{3он}$), а оставшаяся часть тока ($I_{3с}$) стекает с оставшейся части заземлителя системы и т.д. Относительная величина этих токов рассчитывается по выражениям:

$$\begin{aligned} \frac{I_{3п}}{I} &= \frac{a_{02}}{a_{02} + R_0}; \quad \frac{I_{3со}}{I} = \frac{R_0}{a_{02} + R_0}; \\ \frac{I_{3он}}{I} &= \frac{a_{01}}{a_{01} + R_n} \cdot \frac{R_0}{a_{02} + R_0}; \quad \frac{I_{3с}}{I} = \frac{R_n}{a_{01} + R_n} \cdot \frac{R_0}{a_{02} + R_0}. \end{aligned}$$

Результаты выполненных расчетов для ряда вариантов сопротивлений и токов по вышеприведенным формулам при варьировании сопротивления заземли-

теля подстанции R_0 и сопротивления заземлителя опор R_n представлены в табл. 1.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что при сопротивлении заземлителя подстанции $R_0 = 4$ Ом увеличение сопротивления заземлителя опор R_n от 5 Ом до 30 Ом приводит к увеличению доли тока ОКЗ, стекающего с заземлителя подстанции, соответственно от 29 % до 54,5 %, т.е. наблюдается прирост на 25,5 %. При сопротивлении заземлителя подстанции $R_0 = 1$ Ом аналогичное увеличение прироста доли тока составляет 20,7 %, при $R_0 = 0,5$ Ом – 14,9 %, при $R_0 = 0,2$ Ом – 6,9 %, при $R_0 = 0,1$ Ом – 3,7 %, при $R_0 = 0,01$ Ом – 0,4 %.

Кроме того, даже при минимальном значении сопротивления заземлителя опор $R_n = 5$ Ом уменьшение сопротивления заземлителя подстанции приводит к увеличению доли тока ОКЗ, стекающего с заземлителя подстанции. Так, например, при сопротивлении заземлителя подстанции $R_0 = 4$ Ом доля тока ОКЗ, стекающего с заземлителя подстанции, составляет 29 %, а при $R_0 = 0,5$ Ом доля тока ОКЗ составляет 76,6 %. Дальнейшее снижение R_0 приводит к увеличению доли тока, стекающего с заземлителя подстанции, но при этом в рассматриваемом диапазоне изменений сопротивлений ЗУ опор R_n прирост тока уменьшается.

На рис. 2 представлены результаты исследований для случая одной примыкающей к подстанции линии, т.е. самого тяжелого случая.

Как следует из графиков (рис. 2), например, для случая, когда $R_n = 10$ Ом, а $R_0 = 0,5$ Ом, с ростом величины сопротивления заземлителя системы «трос-опоры» доля тока ОКЗ, стекающего с заземлителя подстанции, увеличивается нелинейно, а доля тока ОКЗ, стекающего с заземляющих устройств опор (сопротивление системы a_{02}), соответственно должна уменьшаться.

И, действительно, с другой стороны, если сопротивление заземлителя подстанции остается неизменным, а сопротивление системы изменяется, то кривые зависимости, как показано на рис. 3, свидетельствуют о том, что с ростом величины сопротивления заземлителя каждой опоры в системе «трос-опоры» доля стекающего с последней тока ОКЗ нелинейно уменьшается.

Таблица 1

R_0	R_{1-n}	a_{01}	a_9	a_{02}	$a_{\text{рез}}$	$I_{3П}/I$	I_{3CO}/I	$I_{30П}/I$	I_{3C}/I
4	5	2.26	1.56	1.64	1.16	0.29	0.709	0.22	0.49
	10	3.07	2.35	2.43	1.51	0.38	0.622	0.146	0.476
	15	3.747	2.998	3.082	1.741	0.435	0.565	0.113	0.452
	20	4.378	3.592	3.676	1.915	0.479	0.521	0.094	0.428
	25	4.984	4.155	4.239	2.058	0.515	0.485	0.081	0.405
	30	5.576	4.702	4.786	2.179	0.545	0.455	0.071	0.384
2	5	2.26	1.56	1.64	0.9	0.45	0.55	0.17	0.38
	10	3.065	2.346	2.43	1.097	0.549	0.451	0.106	0.346
	15	3.747	2.998	3.082	1.213	0.606	0.394	0.079	0.315
	20	4.378	3.592	3.676	1.295	0.648	0.352	0.063	0.289
	25	4.984	4.155	4.239	1.359	0.679	0.321	0.053	0.267
	30	5.576	4.702	4.786	1.41	0.705	0.295	0.046	0.249
1	5	2.26	1.56	1.64	0.62	0.62	0.379	0.118	0.261
	10	3.065	2.346	2.43	0.708	0.708	0.292	0.068	0.223
	15	3.747	2.998	3.082	0.755	0.755	0.245	0.049	0.196
	20	4.378	3.592	3.676	0.786	0.786	0.214	0.038	0.175
	25	4.984	4.155	4.239	0.809	0.809	0.191	0.032	0.159
	30	5.576	4.702	4.786	0.827	0.827	0.173	0.027	0.146
0.5	5	2.26	1.56	1.64	0.38	0.766	0.234	0.073	0.161
	10	3.065	2.346	2.43	0.415	0.829	0.171	0.04	0.131
	15	3.747	2.998	3.082	0.43	0.86	0.14	0.028	0.112
	20	4.378	3.592	3.676	0.44	0.88	0.12	0.022	0.098
	25	4.984	4.155	4.239	0.447	0.895	0.105	0.018	0.088
	30	5.576	4.702	4.786	0.453	0.905	0.095	0.015	0.08
0.2	5	2.26	1.556	1.64	0.178	0.891	0.109	0.034	0.075
	10	3.065	2.346	2.43	0.185	0.924	0.076	0.018	0.058
	15	3.747	2.998	3.082	0.188	0.939	0.061	0.012	0.049
	20	4.378	3.592	3.676	0.19	0.948	0.052	$9.27 \cdot 10^{-3}$	0.042
	25	4.984	4.155	4.239	0.191	0.955	0.045	$7.5 \cdot 10^{-3}$	0.038
	30	5.576	4.702	4.786	0.192	0.96	0.04	$6.3 \cdot 10^{-3}$	0.034
0.1	5	2.258	1.556	1.64	0.094	0.943	0.057	0.018	0.04
	10	3.065	2.346	2.43	0.096	0.96	0.04	0.0093	0.03
	15	3.747	2.998	3.082	0.097	0.969	0.031	$6.3 \cdot 10^{-3}$	0.025
	20	4.378	3.592	3.676	0.097	0.974	0.026	$4.76 \cdot 10^{-3}$	0.022
	25	4.984	4.155	4.239	0.098	0.977	0.023	$3.83 \cdot 10^{-3}$	0.019
	30	5.576	4.702	4.786	0.098	0.98	0.02	$3.2 \cdot 10^{-3}$	0.017
0.01	5	2.258	1.556	1.64	$9.95 \cdot 10^{-3}$	0.994	$6 \cdot 10^{-3}$	$1.89 \cdot 10^{-3}$	$4.178 \cdot 10^{-3}$
	10	3.065	2.346	2.43	$9.95 \cdot 10^{-3}$	0.996	$4 \cdot 10^{-3}$	$9.6 \cdot 10^{-4}$	$3.137 \cdot 10^{-3}$
	15	3.747	2.998	3.082	$9.97 \cdot 10^{-3}$	0.997	$3 \cdot 10^{-3}$	$6.47 \cdot 10^{-4}$	$2.59 \cdot 10^{-3}$
	20	4.378	3.592	3.676	$9.97 \cdot 10^{-3}$	0.997	$2.7 \cdot 10^{-3}$	$4.87 \cdot 10^{-4}$	$2.23 \cdot 10^{-3}$
	25	4.984	4.155	4.239	$9.98 \cdot 10^{-3}$	0.988	$2.4 \cdot 10^{-3}$	$3.9 \cdot 10^{-4}$	$1.96 \cdot 10^{-3}$
	30	5.576	4.702	4.786	$9.98 \cdot 10^{-3}$	0.998	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$3.3 \cdot 10^{-4}$	$1.76 \cdot 10^{-3}$

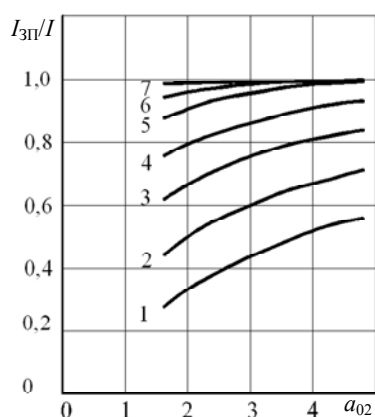


Рис. 2. Зависимость доли тока ОКЗ, стекающего с заземлителя подстанции, от величины сопротивления заземлителя системы «трос-опоры» при сопротивлении заземлителя подстанции R_0 :

1 – $R_0 = 4$ Ом; 2 – $R_0 = 2$ Ом; 3 – $R_0 = 1$ Ом; 4 – $R_0 = 0,5$ Ом;
5 – $R_0 = 0,2$ Ом; 6 – $R_0 = 0,1$ Ом; 7 – $R_0 = 0,01$ Ом

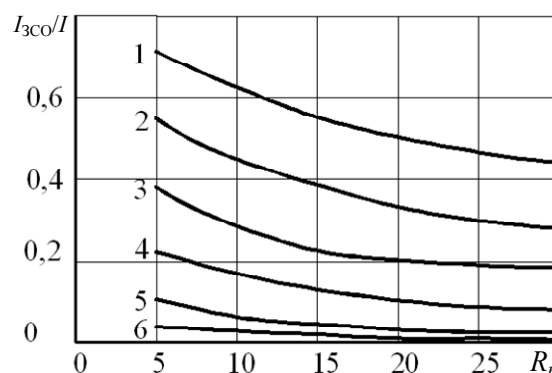


Рис. 3. Зависимость доли тока ОКЗ, стекающего с заземлителя системы «трос-опоры», от величины сопротивления заземлителя каждой опоры при сопротивлении заземлителя подстанции R_0 :

1 – $R_0 = 4$ Ом; 2 – $R_0 = 2$ Ом; 3 – $R_0 = 1$ Ом;
4 – $R_0 = 0,5$ Ом; 5 – $R_0 = 0,2$ Ом; 6 – $R_0 = 0,1$ Ом

Вывод. С использованием алгоритма расчета сопротивления заземлителя системы «трос-опоры» на основе ее схемы замещения исследовано распределение тока однофазного короткого замыкания между заземлителем подстанции и заземлителем системы «трос-опоры». Исследование выполнено для реального диапазона изменений как сопротивления заземлителя подстанции, так и сопротивления заземлителей опор воздушных линий. Полученные результаты необходимо учитывать при проектировании заземлителей подстанций.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила улаштування електроустановок. Розділ 1. Загальні правила. Глава 1.7. Заземлення і захисні заходи від ураження електричним струмом [Чинний від 29.06.2011]. – К.: Міненерговугілля України, 2011. – 72 с. – (Національний стандарт України).
2. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-19:2009 [Чинний від 29.03.2010]. – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – 54 с. – (Національний стандарт України).
3. ГОСТ 12.1.038-82. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. Часть 3. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. – С. 237-243.

REFERENCES

1. *Pravila ulashtuvannya elektroustanovok. Rozdil 1. Zagal'ni pravila. Glava 1.7. Zazemlennya i zakhisni zakhodi vid urazheniya elektrichnim strumom* [Rules of the device electroinstallations. Chapter 1. General rules. Grounding and protective measures against electric shock]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrayiny Publ., 2011. 72 p. (Ukr).
2. *Viprobuvannya ta kontrol' pristroyiv zazemlennya elektroustanovok. Tipova instruktsiya. SOU 31.2-21677681-19:2009* [Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction. SOU 31.2-21677681-19:2009]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrayiny Publ., 2010. 54 p. (Ukr).
3. *GOST 12.1.038-82. Sistema standartov bezopasnosti truda. Elektro-bezopasnost'. Predel'no dopustimye znachenija naprjzhenij prikosnovenija i tokov. Chast' 3* [State Standard 12.1.038-82. Occupational safety standards system. Electrical. Maximum allowable values of voltages of touch and currents. Part 3]. Moscow, IPK-standards Publ., 1996. pp. 237-243. (Rus).

Поступила (received) 27.12.2014

*Нижевский Илья Викторович¹, инженер,
Нижевский Виктор Ильич¹, доц., к.т.н.,
Инояттов Бехруз¹, студент,
Насриддини Саид¹, студент,*

¹Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт",
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 057 7076977, e-mail: nivich1@mail.ru

*I.V. Nizhevskiy¹, V.I. Nizhevskiy¹, B. Ynoyatov¹, S. Nasryddyny¹
¹ National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine*

Investigation and calculation of valleys of outgoing from substation grounding conductors for short-circuit in single-phase short of electrical grid.

Introduction. Earthing device electrical substation in modern conditions must meet both the requirements of electrical safety of people and animals, as well as electromagnetic compatibility requirements established her electrical equipment. These requirements are intended to address issues of protection against surges and interference caused by lightning impulse currents and switching. **Aim.** To investigate the distribution of single-phase short-circuit current in the substation grounding devices. **Task.** On the basis of the proposed design scheme of substitution substation grounding device, consisting of a substation earthing system and «cable-supported» an algorithm for calculating the resistance of the grounding device substation and distribution of single-phase short-circuit current on the circuit elements. **Method.** Mathematical modeling and calculation engine. **Results.** On the basis of calculations and studies analyzed the current distribution of single-phase short-circuit between the substation earthing system and earthing «rope-reliance». Studies carried out for the actual range of variation of the circuit parameters, showed that the earthing resistance substation substantially affects the current distribution in the one-phase short circuit fault. For example, using the graph shows that with increasing resistance grounding system of "rope-supported" the proportion of single-phase short-circuit current flowing from the substation earthing increases, while the proportion of single-phase short-circuit current flowing from the grounding device supports decreases and vice versa. In addition, when rationing grounding systems at substations for the touch voltage is necessary to analyze all the possible modes of operation of the network, which is substationed. **Conclusion.** The results obtained are recommended to take into account in the design of grounding systems at substations. References 3, tables 1, figures 3.
Key words: substation, electrical safety, electromagnetic compatibility, grounding device, equivalent circuit, single-phase short-circuit current, distribution, algorithm, calculation, analysis, design.