

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Проблеми
удосконалювання
електричних машин
і апаратів. Теорія
і практика**

**Bulletin of the National
Technical University
"KhPI". Series:
Problems of electrical
machines and apparatus
perfection. Theory
and practice**

№ 32 (1308) 2018

No 32 (1308) 2018

Збірник наукових праць

Collection of Scientific papers

Видання засноване у 1961 р.

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2018

Kharkiv
NTU «KhPI», 2018

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Problems of electrical machines and apparatus perfection. Theory and practice : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 32 (1308) 2018. – 105 с. – ISSN 2079-3944.

Державне видання
Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України
КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

***Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика** внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, від 15 грудня 2015 р. Наказ № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015 р.*

Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика», індексується в наукометричних базах Index Copernicus, Российский Индекс Научного Цитирования – РИНЦ, WorldCat і Google Scholar і включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <http://pema.khpi.edu.ua/>

Засновник

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Головний редактор

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ «ХПІ», Україна

Заст. головного редактора

Марченко А. П., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Секретар

Горбунов К. О., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Редакційна колегія серії

Відповідальний редактор:

Клименко Б. В., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний секретар:

Варшамова І. С., ст. викладач, НТУ «ХПІ», Україна

Члени редколегії:

Болюх В. Ф., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
Dolezel Ivo, Professor, University of West Bohemia. Pilsen (Czech Republic);

Клепиков В. Б., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
Кравченко В. І., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
Мілих В. І., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
Mouloud Feliachi, Professor, Lab. IRENA (Research Institute in Electrical Energy of "Nantes Atlantique"), Technological Institute of Saint-Nazaire, University of Nantes (France)
Biro Oszkar, Professor, Biro Oszkar, Professor, Institute for Fundamentals and Theory in Electrical Engineering, Graz (Austria)

Сучков Г. М., д.т.н., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Zgraja Jersy, Professor, Dr. Sc. (Eng.), Professor PL Institute of Applied Computer Science, Lodz University of Technology (Poland)

Founder

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Editor-in-chief

Sokol E. I., dr. tech. sc., member-cor. of National Academy of Sciences of Ukraine, NTU "KhPI", Ukraine

Deputy editor-in-chief

Marchenko A. P., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Секретар

Gorbunov K. O., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff

Associate editor:

Klymenko B. V., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Executive secretary:

Varshamova I. S., NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff members:

Bolyukh V. F., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Dolezel Ivo, Professor, University of West Bohemia. Pilsen (Czech Republic);

Klepikov V. B., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Kravchenko V. I., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Milykh V. I., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Mouloud Feliachi, Professor, Lab. IRENA (Research Institute in Electrical Energy of "Nantes Atlantique"), Technological Institute of Saint-Nazaire, University of Nantes (France)
Biro Oszkar, Professor, Biro Oszkar, Professor, Institute for Fundamentals and Theory in Electrical Engineering, Graz (Austria)

Suchkov G. M., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Zgraja Jersy, Professor, Dr. Sc. (Eng.), Professor PL Institute of Applied Computer Science, Lodz University of Technology (Poland)

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».
Протокол № 8 від 02.11.2018 р.

О. Г. ВОЛКОВА, Л. Б. ЖОРНЯК, И. В. ЛЕВЕНКОВ

ДИАГНОСТИКА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛИТЕЛЬНОЕ ВРЕМЯ НАХОДЯЩИХСЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

В статье рассмотрены вопросы совершенствования диагностики состояния силовых трансформаторов длительное время находящихся в эксплуатации. Приведены результаты и анализ наблюдений показывающие, что существующие методы диагностики силовых трансформаторов в рабочем состоянии не способны в полной мере выявить дефекты накопительного характера, возникающие в изоляции за период длительной эксплуатации. Предложено наряду с существующими методами диагностики силовых трансформаторов совершенствовать оценку их состояния с помощью метода регистрации частичных разрядов, позволяющем выявлять дефекты изоляции на ранних стадиях развития.

Ключевые слова: диагностика, силовые трансформаторы, изоляция, высоковольтные вводы, частичные разряды (ЧР).

О. Г. ВОЛКОВА, Л. Б. ЖОРНЯК, І. В. ЛЕВЕНКОВ

ДІАГНОСТИКА СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ЩО ТРИВАЛИЙ ЧАС ЗНАХОДЯТЬСЯ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ

У статті розглянуті питання вдосконалення діагностики стану силових трансформаторів, які тривалий час знаходяться в експлуатації. Наведено результати і аналіз спостережень показуючих, що існуючі методи діагностики силових трансформаторів в робочому стані не здатні в повній мірі виявити дефекти накопичувального характеру, які виникають в ізоляції за період тривалої експлуатації. Запропоновано поряд з існуючими методами діагностики силових трансформаторів удосконалювати оцінку їх стану за допомогою методу реєстрації часткових розрядів, це дозволяє виявляти дефекти ізоляції на ранніх стадіях розвитку.

Ключові слова: діагностика, силові трансформатори, ізоляція, високовольтні вводи, часткові розряди.

O. G. VOLKOVA, L. B. ZHORNIAK, I. V. LYEVYENKOV

DIAGNOSTIC OF POWER TRANSFORMERS ARE IN SERVICE LONG TIME

Purpose. Improvement of power transformer condition diagnostic being in service long time. **Methodology.** The theoretical aspects of the paper are based on theory fundamental statements of electrical apparatus and material engineering. Experimental investigations were realized by monitoring data incisive analysis of capacitor (C) and approximate power factor (tgδ) of autotransformer bushing 550 kV on operating equipment. **Results.** Results and observational analysis are given. They show that power transformer diagnostic recommended methods in operation do not be able to in full detect defects with accumulative character appearing during a continuous exploitation period. **Originality.** In addition to the existing methods of power transformers diagnostic to use a technique based on the registration of partial discharges is proposed. It allows detecting insulation defects at early stages of development. Due to the fact that current value of particle discharges is not large especially in the initial stages, it make sense for studying of partial discharges in transformer insulation to fix electrical field and acoustic signals generating partial discharges. **Practical value.** Practical value for electrotechnical branch is improvement diagnostic and enhancement of safety of substation equipments exploitation.

Key words: diagnostic, power transformer, insulation, high voltage bushing, partial discharge.

Введение и постановка задачи. Проводимый мониторинг работы систем электроснабжения, как в Украине, так и за рубежом показывает общие тенденции использования подстанционного оборудования отработавшего свой нормативный срок службы или близких к этому. Так, по данным Института электроэнергетики США, в стране эксплуатируется не менее 60 % силовых трансформаторов, отработавших 30 и более лет. Подобная картина наблюдается и в таких крупных странах как Германия, Франция, Канада и др. По данным РАО ЕЭС России, доля электрооборудования подстанций на 110/220 кВ, которые прослужили 25 лет и более, составляет не менее 40 %.

Дальнейшее продление эксплуатации этой техники связано с риском техногенных аварий, как на производстве, так и системе жизнеобеспечения. Кроме прямых потерь эти риски приводят к затратам на предотвращения аварийных ситуаций и содержания резервного оборудования. По этой причине продление эксплуатации силового оборудования систем электроснабжения должна сопровождаться регламентными

работами и освидетельствованием состояния длительно находящейся в эксплуатации техники. В первую очередь это вызывает необходимость диагностики эксплуатируемого оборудования.

Примерный анализ причин и условий возникновения повреждений силовых трансформаторов на подстанциях представлен в табл. 1. [1]*

Таблица 1– Распределение повреждений силовых трансформаторов по основным узлам

Узел	Распределение повреждений, %			
	10 лет	10-20 лет	20-30 лет	более 30 лет
Обмотка	14,7	15,9	14,7	18
Магнитопровод	3,6	0	0	0
Система охлаждения	1,2	9	8	0
РПН	7,5	18	13,5	6
Течь масла	7,8	10,2	12	6,9
Высоковольтные вводы	9,6	23,4	24	19,8

*Оборудование и условия эксплуатации аналогичны условиям работы на подстанциях Украины, где подобные анализы последнее время не проводятся.

© О. Г. Волкова, Л. Б. Жорняк, И. В. Левенков, 2018

Общий анализ типовых дефектов силовых трансформаторов, как основного подстанционного оборудования показал, что главные причины дефектов с ростом срока эксплуатации, вызваны общим ухудшением состояния изоляции вызванных комплексом причин:

- увлажнение изоляции в процессе длительной эксплуатации из-за недостаточной герметичности и течей масла в баке;
- витковые замыкания в обмотке, по причине дефектов изготовления и ремонта, а также внешними воздействиями;
- ослабленная изоляция обмоток;
- дефектность прокладок на осушающих фильтрах.

Как правило, через 10...15 лет влагосодержание твердой изоляции достигает значений 4...6 %, при котором уже при рабочем напряжении наблюдаются ЧР критической интенсивности.

Как видно из табл. 1 в период работы трансформаторов до 10 лет, наибольшее число повреждений происходит по причине нарушения работы обмотки и высоковольтных вводов (14,7% и 9,6 % соответственно). Для трансформаторов, отработавших более 10 лет повреждение вводов уже является основной причиной выхода из строя и составляет от 19,8 % до 23,4 %. Вводы не держат давление, требуют периодической подпитки или доливки масла. Низкая надежность герметичных вводов 110...500 кВ обусловлена увеличением $\tan \delta$ масла, старением изоляции, образованием желто-бурого полупроводящего налета на внутренней поверхности фарфоровой крышки и на изоляции остова в нижней части (рис. 1).



Рис. 1. Осадок в нижней части ввода

Срок службы отечественных вводов составляет всего 10...12 лет. Важно также то, что по статистике половина повреждений вводов приводит к пожару и выходу из строя всего трансформатора. Поэтому внедрение и развитие средств диагностики состояния внутренней изоляции для длительно работающего оборудования является весьма актуальной задачей.

Существующие методы контроля состояния внутренней изоляции. Значительная часть научных исследований состояния внутренней изоляции сило-

вых трансформаторов проводится в направлении развития следующих методов:

- Измерения сопротивления изоляции мегомметром (применением для диагностики грубых дефектов: сквозной прогар изоляции, сильное и в большом объеме увлажнение и др).
- Измерение тока утечки на выпрямленном напряжении (в отличие от предыдущего, позволяет определить степень загрязнения внутренней поверхности вводов).
- Испытания повышенным напряжением промышленной частоты (способен создать опасность пробоя состаренной изоляции).
- Хроматографический анализ (обладает слабой чувствительностью к локальным дефектам и ранним стадиям их развития).
- Оценка влажности твердой изоляции (сложность доступа к образцам изоляции внутри бака).
- Оценка степени полимеризации бумажной изоляции (возможность провести только при капитальном ремонте обмотки).
- Тепловизионное обследование (позволяет провести только качественный анализ).

На практике распространенной методикой контроля является мостовой метод [2]. Он основан на измерении емкости (C) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\tan \delta$) посредством моста переменного тока. Суть метода состоит в сравнительном анализе параметров реального объекта с эталонным.

Также широко использованной методикой является векторное сравнение, в котором разность начальных фаз первых гармоник и тангенс угла диэлектрических потерь вычисляется из синхронных записей токов эталонного и контролируемого объекта. Однако, отмечалось, что обе методики допускают погрешности, вызванные температурным режимом эксплуатации, оборудованием, состоянием рабочей среды и выбором опорного объекта. Кроме того, включение в цепь дополнительных элементов (конденсаторов, сигнальных линий и др.) сказывается на точности измерения.

Типичным примером этому может служить анализ повреждения ввода автотрансформатора на 500 кВ (производства ABB) зафиксированные на подстанции фирмой ZTZ Services (рис. 2) [3].

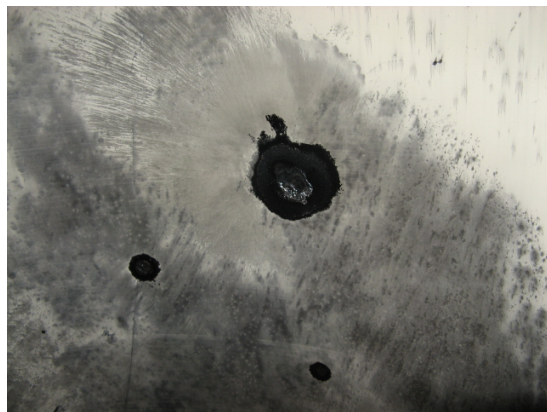
Перед выходом из строя ввода проводился мониторинг его состояния на протяжении 12 лет, результаты которого представлены в табл. 2. Схема установки регистрирующих датчиков показана на рис. 3.

Таблица 2 – Данные мониторинга высоковольтного ввода

Параметры	12/04/1996	05/01/1999	11/04/2001	21/03/2002	13/01/2005	14/02/2008	28/05/2008
$C1$, пФ	422.1	421	421.2	420.7	415.5	421.8	8.689
$\tan \delta 1$, %	0.27	0.24	0.25	0.26	1.10	0.26	2.29
$C2$, пФ	6356	6353	6361	6350	6420	6288	49.110
$\tan \delta 2$, %	0.25	0.25	0.28	0.25	0.71	0.28	7.80



а



б

Рис. 2. Снимки высоковольтного ввода со следами дугового повреждения: а – возле верхнего фланца; б – на корпус.

Из результатов табл. 2 видно, что на протяжении длительного периода незначительные колебания показателя (C) не указывало на опасность дальнейшей эксплуатации трансформатора, пока емкость скачкообразно не изменяется до предельного значения. Очевидно, что результатом послужил пробой одного или более слоев изоляции, при котором решение о дальнейшей эксплуатации пришлось приниматься оперативно в зависимости от скачка C . Фирма изготовитель данного ввода (ABB) для исключения подобных случаев рекомендует проводить соответствующие измерения с интервалом в 6 месяцев [4], хотя, как видно из мониторинга отказ произошел в интервале 3 месяцев, что говорит о несостоятельности рекомендаций и необходимости внедрять дополнительные методы контроля.

Например, такими средствами диагностики могут выступить методики локализации частичных разрядов высоковольтных вводах в режиме on-line.

В последнее время эти методики в диагностике высоковольтного оборудования нашли применение и могут считаться достаточно перспективными для оценки состояния изоляции обмоток и вводов силовых трансформаторов. Однако, следует отметить, что до настоящего времени такие работы чаще относят к категории заводских приемо-сдаточных или лабораторных испытаний. [5]. В таких испытаниях метод ЧР в настоящее время зарекомендовал себя, как самый чувствительный к различного рода локальным дефектам конструкций и нарушениям в технологии изготовления.

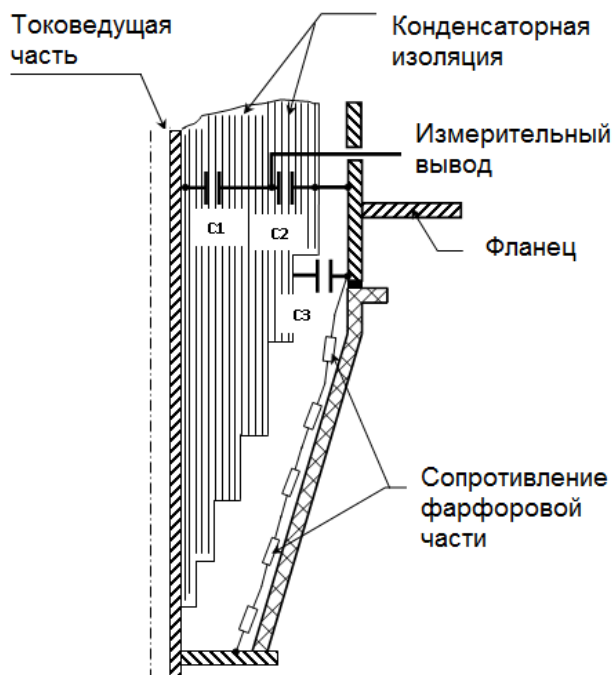


Рис. 3. Схема установки диагностического оборудования фирмы ZTZ Services

Возможности диагностики с применением методов оценки частичных разрядов. Авторы большинства работ посвященных исследованиям ЧР, во многом противоречиво оценивали процессы, происходящие в диэлектрической среде. Это указывает на неполное представление о механизме влияния ЧР на диэлектрик. Важность этих вопросов состоит в том, что в зависимости от механизма ЧР изменяется оценка энергетического баланса, удельное энерговыделение, время воздействия ЧР на диэлектрик и т.д. Однако общее представление, что ЧР как правило, приводят к повреждению твердой изоляции и образованию в ее теле устойчивых проводящих следов сформировалось. В зоне этих следов при воздействии перенапряжений или просто рабочего напряжения могут возникнуть условия для непрерывного развития электрических разрядов, которые завершаются полным пробоем изоляции.



Рис. 4. Следы пробоя ввода

Таким образом, ЧР в большинстве случаев являются не только сигналом наличия дефектов в изоляции, но и их первопричиной. Как показывают косвенные результаты, при отсутствии экстремальных воздействий (типа перенапряжений), процесс развития дефектов в изоляции до полного пробоя может длиться от нескольких месяцев до нескольких лет. Таким образом, появление ЧР свидетельствует о наличии дефектов изоляции уже на ранней стадии. А характер проявления ЧР должен свидетельствовать о степени развития дефектов.

Параметры оценки ЧР могут быть разделены на две группы: характеристики индивидуального разряда и параметры, характеризующие разрядную активность. К первой группе относятся амплитуда ЧР, его фаза, "кажущийся заряд". Вторая группа параметров характеризует интенсивность ЧР и может быть получена в результате вычислений на основе полученных замеров. К ней относятся, количество ЧР в единицу времени, средний ток и др. ЧР не оцениваются по какому-либо одному показателю. Все имеющиеся в мире стандарты по ЧР определяются набором некоторых комплексных величин, полученных в результате измерения или расчета. Это нашло отражение в ряде нормативных документов (ИЕС-270, ГОСТ 20074 и др.) [6-8].

Поскольку сила тока электрических разрядов имеет не большие значения, есть смысл фиксировать не сами разряды, а электрическое поле или акустические сигналы, вызванные электрическим разрядом, что широко используется при изучении ЧР.

Опыт анализа ЧР на вводах силовых трансформаторов и его перспективы в оценке их состояния. Для диэлектриков, разрушаемых ЧР, существуют две существенно отличающихся фазы разрядов – начальная и критическая.

Начальная фаза сопровождается разрядами малой интенсивности и не приводит к существенному разрушению изоляции, происходит лишь постепенное разрушение твердого или жидкого диэлектрика (трансформаторного масла). Критическая фаза такого разрушения наблюдается после продолжительной работы вводов (15 лет и более) и характеризуется изменением структуры диэлектрика. Например, в масле образуются частицы его разложения и другие включения (вода, воздух и др.) Это приводит к увеличению напряженности электрического поля и возникновению ЧР. Уровень этих разрядов в пределах 10 пКл, что соответствует, например, нормальной работе ввода и может быть зарегистрирован с помощью высокоточной измерительной аппаратуры. При возникновении ЧР, масло продолжает разлагаться и в свою очередь приводит к появлению новых ЧР. Интенсивность процесса возрастает. При значительном накоплении продуктов разложения в масле, образуется осадок на поверхности твердого диэлектрика (например, фарфора). Наличие осадка приводит к усилению ЧР, уровень которых может превышать несколько сотен пКл. Такие ЧР легко фиксирует измерительная аппаратура. Дальнейшее развитие разрядов носит экспоненциальный характер и часто приводит к непредсказуемому

повреждению изоляции. Это связано, в частности, с тем, что в основном исследовались только электрические сигналы ЧР, а более чувствительной регистрацией ЧР путем локации излучения (электромагнитное, оптическое, акустическое) не уделялось достаточного внимания. Анализируя результаты работ, можно сделать вывод о необходимости повышения технической оснащенности для исследования физической картины ЧР. Прежде всего, это касается быстродействия, чувствительности и пространственно-временной разрешающей способности аппаратуры.

Выводы.

1. Проанализировав современные методы диагностики высоковольтного оборудования можно отметить, что методика оценки ЧР не нашла широкого применения для исследования состояния изоляции длительное время находящихся в эксплуатации силовых трансформаторов и требует дальнейшей экспериментальной проверки.

2. Необходимо подчеркнуть, что точность диагностики методом ЧР требует мониторинга исследуемых объектов и не должна полагаться на отдельные несистемные результаты.

3. В связи с изложенным, стоит задача анализа ЧР-тестов путем их регистрации и создании базы данных содержащих информацию о каждом обследуемом объекте.

4. Поскольку сила тока электрических разрядов особенно в начальных стадиях имеет не большие значения, есть смысл для изучения ЧР в изоляции трансформаторов фиксировать не сами разряды, а электрическое поле или акустические сигналы, ими генерируемые.

Список литературы

1. Контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, О.И. Карандаева, С.Е. Мостовой, А.А. Чертухов // Вестник ЮУрГУ. – 2008. – № 28. – С. 26-31.
2. Анализ методов непрерывного контроля характеристик изоляции трансформаторов тока и вводов на подстанциях 30-750 кВ / А.Н. Рассальский, А.А. Сахно, С.П. Конограй, А.Г. Спица, А.А. Гук // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2009. – Вип. 3 (56). – С. 67-70.
3. Prykhodko V. Final investigation report of 500 kV bushing failure at FPL Conservation substation. ZTZ Services International Report. – Электрон. дан. – Майами, США, 2008.
4. Богданов В. Компоненты трансформаторов: вводы, РПН и др. Режим доступу: <http://new.abb.com/products/transformers/ru/eksperti-abb-otvechaut-na-voprosi/visokoltnie-vvody>.
5. Бажанов С.А. Техническое обслуживание и ремонт вводов и изоляторов высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
6. IEEE C57.19.00 – 2004 Standard General Requirements and Test Procedure for Power Apparatus Bushings. Режим доступу: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/C57.19.00-2004.html>.
7. IEEE C57.113 – 2010 Recommended Practice for Partial Discharge Measurement in Liquid-Filled Power Transformers and Shunt Reactors. Режим доступу: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5557722/?reload=true>.
8. IEEE C57.127 – 2007 Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors. Режим доступу: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/C57.127-2007.html>.

References (transliterated)

1. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Karandaeva O.I., Mostovoy S.E., Chertousov A.A. Technical position control of power transformers with an acoustic diagnosis method. *Bulletin of YuUrGu*, 2008, no. 28, pp. 26-31. (Rus).
2. Rassalskiy A.N., Sahno A.A., Konogray S.P., Spitsa A.G., Guk A.A. Analysis of isolation characteristic continuous monitoring methods of current transformers and bushings on the electric substation 30-750 kV. *Bulletin of Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State University*, 2009, no. 3(56), pp. 67-70. (Rus).
3. Prykhodko V. Final investigation report of 500 kV bushing failure at FPL Conservation substation. ZTZ Services International Report. *Electronic data*, Miami, USA, 2008.
4. Bogdanov V. Components of transformers: bushings, OLTC and etc. Available at: <http://new.abb.com/products/transformers/ru/esperti-abb-otvechaut-na-voprosi/visokoltne-vvody>. (Rus).
5. Bazhanov S.A. *Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont vvodov i izolyatorov vysokogo napryazheniya* [Maintenance operations and repair process of bushings and high voltage insulators]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 240 p. (Rus).
6. IEEE C57.19.00 – 2004 Standard General Requirements and Test Procedure for Power Apparatus Bushings. Available at: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/C57.19.00-2004.html>.
7. IEEE C57.113 – 2010 Recommended Practice for Partial Discharge Measurement in Liquid-Filled Power Transformers and Shunt Reactors. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5557722/?reload=true>.
8. IEEE C57.127 – 2007 Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors. Available at: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/C57.127-2007.html>.

Надійшла (received) 14.11.2017

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Волкова Ольга Григорівна (Волкова Ольга Григорьевна, Olga Volkova) – доцент, кафедра теоретичної і загальної електротехніки ЗНТУ, Запоріжжя, Україна; e-mail: volkova@zntu.edu.ua.

Жорняк Людмила Борисівна (Жорняк Людмила Борисовна, Liudmila Zhorniak) – доцент, кафедра електричних та електронних апаратів ЗНТУ, Запоріжжя, Україна; e-mail: zporoton@zntu.edu.ua.

Левенков Ігор Володимирович (Левенков Игорь Владимирович, Ihor Lyevyukov) – аспірант, кафедра електричних та електронних апаратів ЗНТУ, Запоріжжя, Україна.

А. М. ГРЕЧКО, И. С. ВАРШАМОВА

ОБЗОР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ СИСТЕМЫ РАЗЪЕМНОГО МОНТАЖА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ SMISSLINE ОТ ABB

Введение. Актуальными задачами при проектировании новых подстанций или модернизации устаревшего оборудования в сетях низкого напряжения являются уменьшение времени проведения монтажных работ; рациональное использование монтажного пространства; безопасность и простота выполнения работ. Решение перечисленных задач возможно за счет применения системы Smissline от компании ABB. **Методы.** Представлен аналитический обзор системы разъемного монтажа электрооборудования Smissline производства концерна ABB. Рассмотрены особенности конструкции составляющих системы – шасси, шины, терминалы, электрические аппараты, модули контактов. **Результаты.** Проанализированы особенности подключения и эксплуатации составляющих системы Smissline, показаны их преимущества по сравнению с уже используемыми традиционными системами монтажа электрооборудования низкого напряжения. **Обсуждение.** Работа ставит перед собой цель ознакомить отечественных проектантов, специалистов в области электрооборудования низкого напряжения к новому поколению системы разъемного монтажа электрооборудования. Материалы статьи могут быть рекомендованы при проектировании новых или модернизации старых систем энергоснабжения, например, при энергоснабжении информационных систем, в системах бесперебойного питания, на электротранспорте или в других системах энергоснабжения непрерывных промышленных и технологических процессов.

Ключевые слова: системы монтажа электрооборудования низкого напряжения, система Smissline, безопасность монтажа электрооборудования, модернизация электрооборудования.

О. М. ГРЕЧКО, І. С. ВАРШАМОВА

ОГЛЯД НОВОГО ПОКОЛІННЯ СИСТЕМИ РОЗ'ЄМНОГО МОНТАЖА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ SMISSLINE ВІД ABB

Вступ. Актуальними завданнями при проектуванні нових підстанцій або модернізації застарілого обладнання в мережах низької напруги є зменшення часу проведення монтажних робіт; раціональне використання монтажного простору; безпека і простота виконання робіт. Рішення перерахованих завдань можливе за рахунок застосування системи Smissline від компанії ABB. **Методи.** Представлений аналітичний огляд системи роз'ємного монтажу електрообладнання Smissline виробництва концерну ABB. Розглянуто особливості конструкції складових системи – шасі, шини, термінали, електричні апарати, модулі контактів. **Результати.** Проаналізовано особливості підключення і експлуатації складових системи Smissline, показані їх переваги в порівнянні з вже використовуваними традиційними системами монтажу електрообладнання низької напруги. **Обговорення.** Робота ставить перед собою мету ознайомити вітчизняних проектантів, фахівців в області електрообладнання низької напруги до нового покоління системи роз'ємного монтажу електрообладнання. Матеріали статті можуть бути рекомендовані при проектуванні нових або модернізації старих систем енергопостачання, наприклад, при енергопостачанні інформаційних систем, в системах безперебійного живлення, на електротранспорті або в інших системах енергопостачання безперервних промислових і технологічних процесів.

Ключові слова: системи монтажу електрообладнання низької напруги, система Smissline, безпека монтажу електрообладнання, модернізація електрообладнання.

О. М. GRECHKO, I. S. VARSHAMOVA

REVIEW OF NEW GENERATION OF THE SYSTEM OF CONNECTOR MOUNTING OF ELECTRICAL EQUIPMENT SMISSLINE FROM ABB

Introduction. Actual tasks in the design of new substations or modernization of outdated equipment in low voltage networks are reducing the time for installation works; rational use of installation space; safety and ease of execution. The solution of these problems is possible through the use of the Smissline system from ABB. **Methods.** An analytical review of the Smissline electrical installation system of the ABB concern has been presented. The design features of the components of the system – chassis, tires, terminals, electrical devices, contact modules. **Results.** The features of connection and operation of components of the Smissline system are analyzed, their advantages compared to the traditional low-voltage electrical installation systems already used are shown. **Discussion.** The work aims to acquaint domestic designers, specialists in the field of low-voltage electrical equipment to a new generation of a system of detachable electrical installation. Article materials can be recommended when designing new or upgrading old power supply systems, for example, when supplying information systems, in uninterrupted power supply systems, on electric transport or in other power supply systems of continuous industrial and technological processes.

Key words: low voltage electrical installation systems, Smissline system, electrical installation safety, electrical equipment modernization.

Введение. При проектировании новых подстанций или модернизации устаревшего оборудования в распределительной сети 0,4 кВ перед проектными организациями встает целый ряд актуальных задач, основными из которых являются [1]:

- уменьшение времени проведения монтажных работ;
- снижение производственных затрат, особенно при реконструкции системы;
- рациональное использование предоставленного монтажного пространства;
- безопасность и простота выполнения монтажных

работ.

Решение перечисленных задач возможно путем применения системы Smissline от компании ABB [2].

Система Smissline – это принципиально новый подход при проектировании, монтаже и эксплуатации электрооборудования распределительных сетей низкого напряжения 0,4 кВ. Благодаря оригинальному принципу монтажа совместно с применением самого современного электротехнического оборудования система Smissline позволяет:

- при вводе в эксплуатацию новых объектов в кратчайшие сроки осуществить установку электро-

© А.М. Гречко, И.С. Варшамова, 2018

оборудования при минимальных трудовых затратах;

- при модернизации, реконструкции объектов установить максимальное количество единиц электрооборудования в ограниченном пространстве благодаря компактности применяемого электрооборудования;
- осуществлять простое и быстрое внесение изменений в схемные решения объектов, которые используют систему Smissline и уже находятся в эксплуатации, благодаря модульному принципу построения электрооборудования;
- производить замену установленного электрооборудования под напряжением, то есть без отключения питания у параллельных потребителей, соблюдая при этом полную защиту обслуживающего персонала от поражения электрическим током.

Перечисленные преимущества позволили системе Smissline завоевать популярность во всем мире [3].

Целью работы является ознакомление и привлечение внимания отечественных проектантов, специалистов в области электрооборудования низкого напряжения к новому поколению системы разъемного монтажа электрооборудования Smissline.

Областью применения системы Smissline являются объекты городского электротранспорта, аэропорты, вокзалы, медицинские учреждения, центры обработки данных банки, офисные и торговые центры, объекты телекоммуникации, промышленности, машиностроения.

Система Smissline является абсолютно новой системой монтажа оборудования. В отличие от традиционного монтажа устройств на монтажной DIN рейке, оборудование системы Smissline устанавливается на изоляционном основании (или шасси) с интегрированными шинами питания. Такое решение значительно упрощает процесс установки и сокращает время монтажа оборудования [2].

Обзор составляющих компонентов системы Smissline. Шасси и шины. Изоляционным основанием, на котором размещаются все элементы системы Smissline, является так называемое шасси модульного типа, состоящее из шести (108 мм) или восьми (144 мм) модульных элементов (рис. 1); толщина каждого модуля составляет 18 мм.

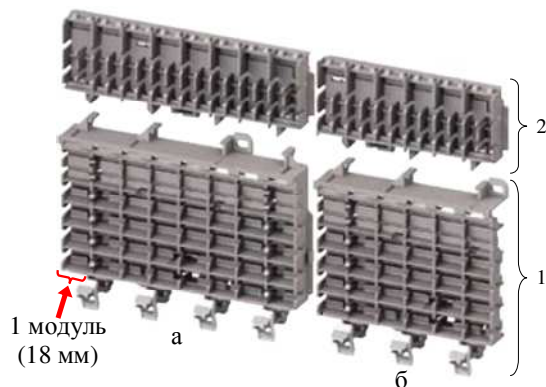


Рис. 1. Восьми (а) и шести (б) модульные шасси основной (1) и дополнительной (2) шинной системы Smissline

Существует два вида шинных систем – основная и дополнительная, соединяющиеся между собой с

помощью удобных и надежных защелок.

В основную шинную систему интегрируются фазные шины питания L1, L2, L3, основная рабочая нейтральная шина N, вспомогательные шины LA, LB (рис. 2). Надежное удержание (фиксация) шин в шасси осуществляется с помощью механических защелок. Если нет необходимости в двух вспомогательных шинах, можно установить только одну.

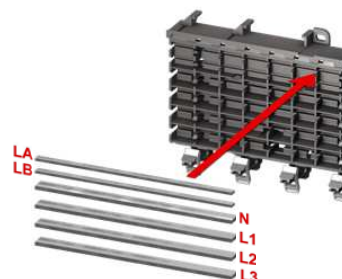


Рис. 2. Установка шин в шасси

В дополнительную шинную систему интегрируются дополнительная рабочая нейтральная шина N, защитная шина заземления PE (рис. 3). Шины обеих систем вставляются в шасси спереди.

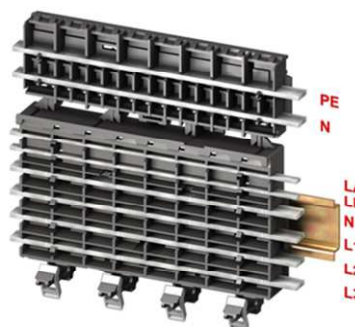


Рис. 3. Шасси системы Smissline с интегрированными шинами

Максимально возможная длина собранного шасси составляет 1979 мм. Собранный шасси может устанавливаться на монтажной панели распределительного устройства (РУ), на DIN рейке или на любой ровной поверхности, причем до окончательной фиксации элементы шасси могут сниматься или передвигаться.

Основные шины L1, L2, L3, PE, N выпускаются с поперечным сечением 10×3 мм и рассчитаны на номинальный ток до 100 А, номинальное напряжение 400/690 В.

Вспомогательные шины LA, LB выпускаются с поперечным сечением 5×2 мм и предназначены для подачи питания на вспомогательные и сигнальные контакты аппаратов; рассчитаны на номинальный ток до 40 А, номинальное напряжение 400/690 В.

За счет гальванического покрытия обоих видов шин обеспечивается надежный контакт с терминалами устанавливаемых аппаратов, обеспечивая минимальное переходное сопротивление.

С правой и левой сторон шасси устанавливаются концевые элементы (рис. 4), которые крепятся к шасси винтами. Полная ширина концевой элемента шасси составляет 2×21 мм.

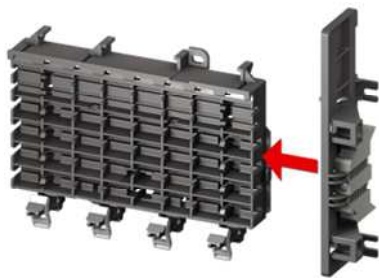


Рис. 4. Установка концевых элементов шасси

Концевые элементы используются:

- для фиксации цокольной части шасси на монтажной рейке в РУ;
- для электрического изолирования самих шин;
- для дополнительной фиксации шин в шасси;
- для защиты от механических воздействий лицевой и торцевой частей шасси.

Для монтажа шасси на DIN рейке на концевые элементы 1 устанавливаются дополнительные переходники 2 (рис. 5).

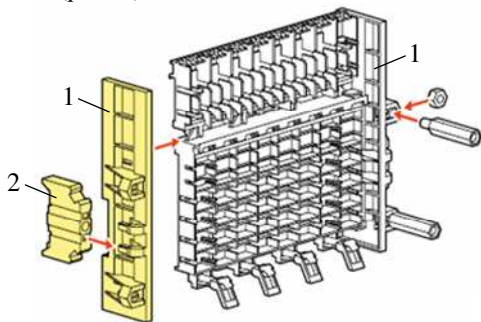


Рис. 5. Концевые элементы шасси

Вводные клеммные терминалы. Подача питания на основные и вспомогательные шины в системе Smissline возможна двумя способами:

1. Через специальные вводные клеммные терминалы различной модификации.
2. Непосредственно через защитный вводной электрический аппарат, в качестве которого могут применяться аппараты системы Smissline – модульный автоматический выключатель (МAB), устройство защитного отключения (УЗО) или выключатель нагрузки (ВН).

Стандартный вводной клеммный терминал ZLS224, ZLS225 (рис. 6) выпускается высотой 50 мм. Съемный защитный кожух 1 обеспечивает надежную защиту от случайного прикосновения к токоведущим частям и позволяет подключать провода как сверху, так и снизу, а также возможно и горизонтальное подключение. Внутри терминал оснащен четырьмя клеммами для основных шин L1, L2, L3, N и двумя дополнительными клеммами для вспомогательных шин LA и LB. Также возможна подача на основные шины и постоянного напряжения.

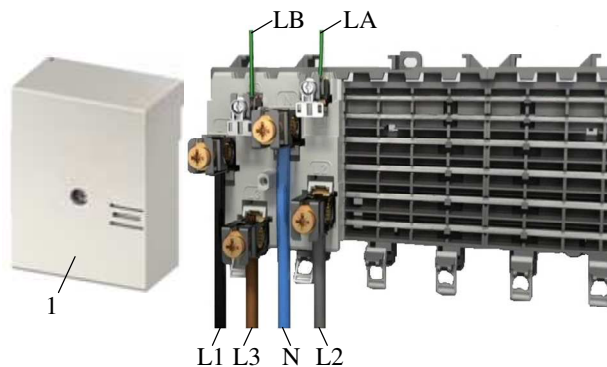


Рис. 6. Стандартный вводной клеммный терминал

Подключение проводов к дополнительным шинам (N и PE) осуществляется с помощью специальных клеммных терминалов (рис. 7).

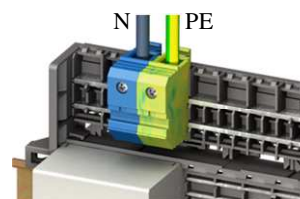


Рис. 7. Подключение к дополнительным шинам N и PE

При установке стандартного клеммного терминала слева (рис. 8,а) или справа (рис. 8,б) максимальная токовая нагрузка составляет 100 А, а при установке терминала по центру (рис. 8,в) допускается увеличение токовой нагрузки до 160 А.

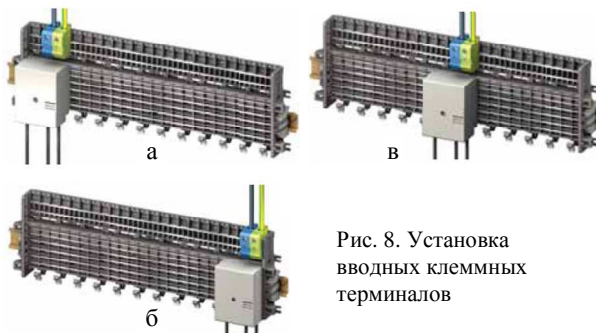


Рис. 8. Установка вводных клеммных терминалов

В систему Smissline также входят специальные вводные клеммные терминалы.

Терминалы ZLS228, ZLS229 высотой 36 мм имеют подобную конструкцию, что и терминалы ZLS224, ZLS225, с той лишь разницей, что терминалы не оснащаются клеммами для подключения к вспомогательным шинам LA и LB.

Однополюсный вводный клеммный терминал ZLS250 – ZLS255 (рис. 9) выпускается шириной 36 мм и предназначен для подвода питания только к одной из основных шин (L1, L2, L3 или N). Максимальное поперечное сечение подключаемого кабеля в таких терминалах составляет 95 мм², а максимальная токовая нагрузка – до 200 А (при установке по центру) и до 100 А (при установке в крайних положениях).

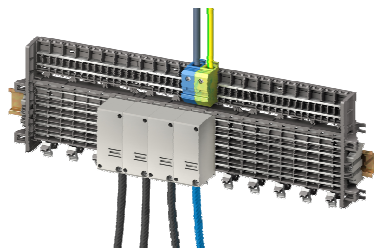


Рис. 9. Однополюсные вводные клеммные терминалы

Через защитный вводной аппарат (МВБ, УЗО (рис. 10) или же ВН) возможно подключение только к основным шинам (L1, L2, L3, N); подача же питания на вспомогательные шины (LA и LB) осуществляется через дополнительно устанавливаемые клеммные терминалы.

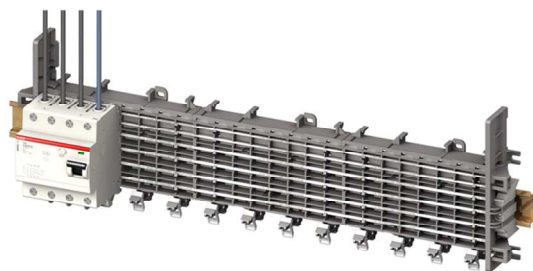


Рис. 10. Поддача питания на основные шины через верхние клеммы УЗО

В случае подачи напряжения на шинную систему с помощью УЗО (или ВН) вводной кабель может соединяться:

- с *верхними* клеммами УЗО (рис. 10) или ВН (данный вариант подвода питания обеспечивает шинам и всем последующим установленным электрическим аппаратам защиту от токов утечки);
- с *нижними* клеммами УЗО (рис. 11) или ВН (обеспечивается прямой подвод напряжения питания к шинной системе). На УЗО или ВН может подаваться ток до значения, на которое рассчитаны клеммы устройств защиты.



Рис. 11. Поддача питания на основные шины через нижние клеммы УЗО

При помощи вводных клеммных терминалов также может осуществляться подача и постоянного напряжения (рис. 12). При этом в основное шасси интегрируются всего две шины, а подключение проводов к дополнительным шинам (N и PE) осуществляется с помощью специальных клеммных терминалов красного и оранжевого цвета.

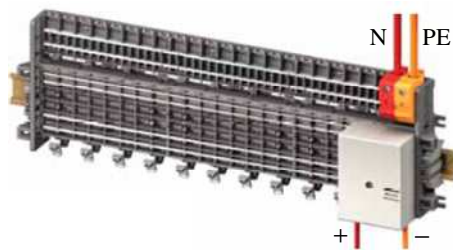


Рис. 12. Поддача постоянного напряжения

В случае если планируется размещение на одном шасси нескольких групп аппаратов, которые должны быть электрически изолированы друг относительно друга, то основные (L1, L2, L3, N, PE) и вспомогательные (LA, LB) шины необходимо лишь разрезать на фрагменты нужной длины и просто установить в шасси (рис. 13).

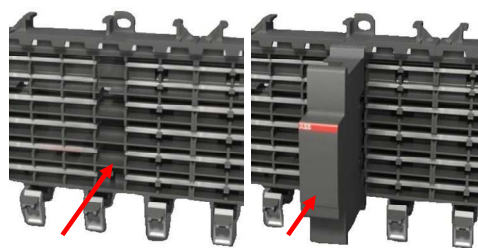


Рис. 13. Установка шинного изолятора

При этом все образующиеся промежутки в шинах должны быть закрыты шинными изоляторами (рис. 14). Шинные изоляторы ZLS238 – это модули темно-серого цвета, предназначенные для электрической изоляции разделенных участков шин и наглядного указания места разделения шин. Профиль шинных изоляторов соответствует профилю устанавливаемого оборудования и имеет ширину одного модуля (18 мм). Для изоляции шин N, PE в дополнительной шинной системе применяются специальные заглушки толщиной 9 мм.

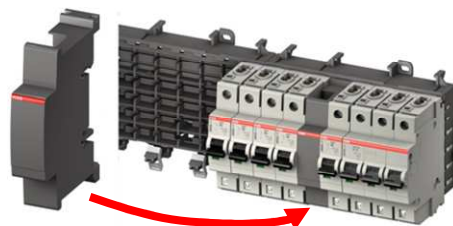


Рис. 14.

Зачастую шасси не заполняется аппаратами полностью по всей длине, что оставляет возможность расширения системы и установки дополнительного оборудования. В таком случае для защиты от случайного прикосновения к шинам всё незаполненное аппаратами пространство закрывается промежуточными элементами ZLS725 (рис. 15), которые представляют собой модули светло-серого цвета. Профиль данных элементов соответствует профилю устанавливаемого оборудования и имеет ширину одного модуля (18 мм).

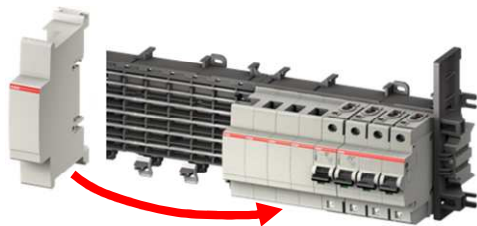


Рис. 15.

Кроме промежуточных элементов ZLS725 обеспечить защиту от случайного прикосновения к неиспользуемым участкам основных и вспомогательных шин может защитная крышка ZLS100, состоящая из 4 модулей (рис. 16). Данная крышка имеет возможность разделяться на отдельные модули, которые просто устанавливаются в шасси.

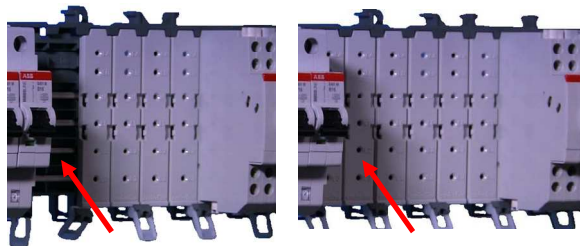


Рис. 16.

Для шин дополнительного шасси выпускается крышка 1 (рис. 17) шириной 18 мм с переходником на DIN рейку. Более длинные секции системы шин можно защищать специальным кожухом 2 с кабелепроводом длиной 144 мм. Отверстия в крышке позволяют, например, измерять напряжение на шинах, не снимая крышки.

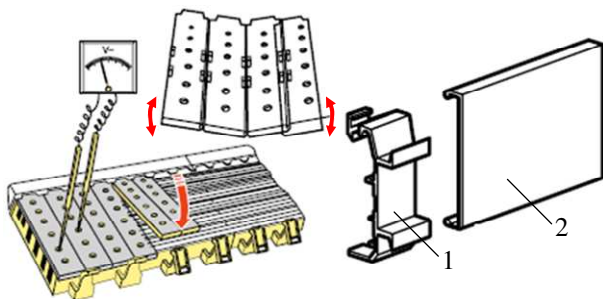


Рис. 17.

Для возможности устанавливать модульные устройства, не входящие в систему Smissline, непосредственно на шинную систему предусмотрен адаптер DIN рейки ZLS101, который вставляется в защитную крышку ZLS100 (рис. 18).



Рис. 18. Защитная крышка с адаптером DIN рейки

Обзор электрических аппаратов системы Smissline. Система Smissline включает в себя следующие электрические аппараты (рис. 19):

- автоматические выключатели S400;
- устройства защитного отключения F402 (двухполюсные) и F404 (четырёхполюсные);
- устройства защитного отключения с защитой от токов перегрузки и короткого замыкания FS401;
- ограничители импульсных перенапряжений OVR404;
- выключатель нагрузки IS404;
- автоматический выключатель для защиты электродвигателей MS325.



Рис. 19. Электрические аппараты системы Smissline

Такая широкая номенклатура электрических аппаратов позволяет спроектировать защиту объектов практически любой сложности – от небольших офисных помещений до крупных промышленных объектов.

Монтаж аппаратов системы Smissline на соответствующие шины осуществляется чрезвычайно легко и просто – достаточно завести примерно под углом в 30° корпус аппарата под выступающий профиль шасси в верхней части и зафиксировать аппарат с помощью фиксатора в нижней части шасси (рис. 20, слева).

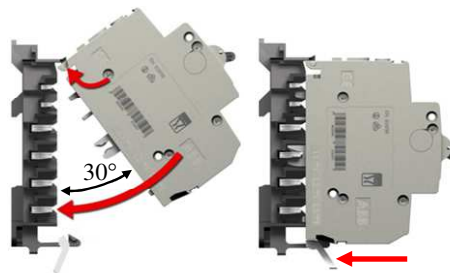


Рис. 20.

При установке подвижный терминал аппарата системы Smissline, например, автоматического выключателя S400 (рис. 21), выступающий с тыльной стороны, надежно соприкасается с шиной питания, «охватывает» её с двух сторон, и обеспечивает тем самым минимальное переходное сопротивление. Теперь достаточно подключить отходящие фидеры пи-

тания и включить аппарат. Для снятия аппарата с шасси необходимо приложить небольшое усилие, нажав на фиксатор на шасси (рис. 20, справа).

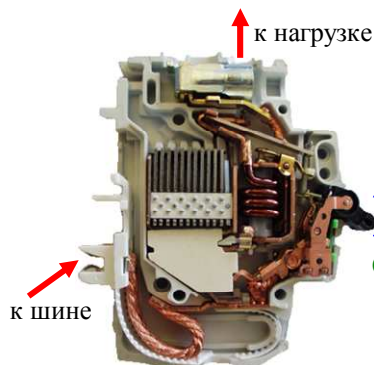


Рис. 21. Автоматический выключатель S400

В случае необходимости внесения изменений в существующую схему распределения энергии всегда остро вставала проблема в быстром проведении монтажных работ. Сегодня благодаря применению системы Smissline эта проблема довольно успешно решается – достаточно выключить аппарат, отсоединить отходящие провода, снять аппарат с шасси (либо, при отсутствии такового, снять защитные крышки, промежуточные элементы – рис. 15, 16) и поставить новый аппарат. Благодаря модульному принципу построения электрооборудования системы Smissline проведение всех операций занимает минимальный промежуток времени.

Здесь следует отметить одно из основных *преимуществ* системы Smissline. Для снятия аппарата с шасси необходимо отключить *только данный конкретный аппарат* без общего снятия напряжения с питающих шин, то есть при этом все установленные рядом устройства будут по-прежнему оставаться в рабочем положении и выполнять возложенные на них функции. Таким образом, остальные потребители электроэнергии не пострадают и не останутся без энергоснабжения ни на секунду.

При установке электрооборудования важным аспектом является обеспечение равномерного распределения нагрузки по фазам. В системе Smissline этот вопрос решается чрезвычайно просто – пользователь может самостоятельно выбирать, к какому фазовому проводнику будет подключено то или иное защитное устройство. Данная функция стала возможной благодаря тому, что в аппаратах Smissline терминал присоединения к шине (рис. 21) выполнен подвижным и имеет возможность перемещаться и надежно фиксироваться в одном из трех положений – L1, L2 или L3 (рис. 22).

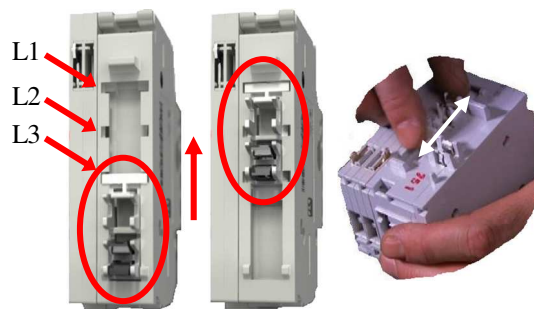


Рис. 22. Изменение положения контактов для присоединения к рабочей шине (вид с тыльной стороны)

С подвижным терминалом механически связан индикатор присоединенной (рабочей) фазы. При перемещении подвижного терминала на лицевой панели каждого полюса аппарата через специальное окошко (рис. 23) происходит индикация рабочей фазы (синий цвет информирует о подключении к нейтральной шине N). Таким образом, для проверки фазы подключения нет необходимости отключать и извлекать устройство.



Рис. 23. Индикатор рабочей фазы

Комбинированные модули Smissline. В систему Smissline также входят специальные устройства, предназначенные для объединения в едином блоке различных электрических аппаратов. Это так называемые комбинированные модули Smissline ZLS840 (рис. 24), которые позволяют применять в системе Smissline готовые схемные решения. Так, например, на одном несущем блоке можно установить автоматический выключатель для защиты электродвигателя MS325 и контактор. Такое решение позволяет, с одной стороны, упростить проведение монтажных работ, с другой – значительно сократить время для их проведения. Ширина комбинированного модуля составляет 54 мм, высота – 180 мм.



Рис. 24. Варианты комбинированных модулей Smissline

Для подключения комбинированного модуля к шинам питания используются различные адаптеры

(комбинированные и одинарные – рис. 25) с разным значением номинального тока (32 А, 63 А и 100 А), причем питающее напряжение возможно подводить как сверху, так и снизу.



Рис. 25. Адаптеры для комбинированных модулей Smissline

Модули дополнительных и сигнальных контактов. К дополнительному оборудованию системы Smissline относятся модули дополнительных НК400 и сигнальных SK400 контактов (рис. 26), которые выпускаются на номинальное напряжение 400 В и номинальный ток 6 А. Ширина каждого модуля составляет 9 мм. Модули дополнительных и сигнальных контактов подключаются к вспомогательным шинам LA и LB, как правило, с помощью контактных элементов ZLS632 (рис. 26, справа), которые имеют возможность вращаться на 180°. Так, позиция 2 контактного элемента на рис. 27 соответствует подключению модуля к вспомогательной шине LA, позиция 3 – к вспомогательной шине LB. Также возможно подключение модулей контактов через клеммные терминалы (без подключения к вспомогательным шинам) – в таком случае контактный элемент полностью утапливается в корпусе модуля (позиция 1 на рис. 27).



Рис. 26.

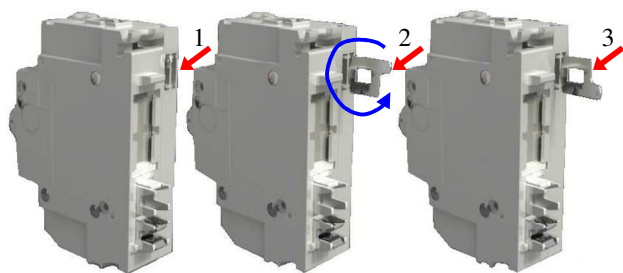


Рис. 27.

Дополнительные контакты работают синхронно с контактами основного устройства защиты. В свою очередь, сигнальные контакты срабатывают только в случае автоматического размыкания контактов аппарата (или при нажатии кнопки «Test» белого цвета на передней панели модуля – рис. 26, слева). После срабатывания сигнальные контакты должны быть возвращены в первоначальное состояние путем нажатия кнопки «Reset» оранжевого цвета. Специальные контакты модулей дополнительных и сигнальных контактов обеспечивают высокую надежность отключения даже в цепях низкого напряжения или же при малых токах.

На рис. 28, слева показана схема стандартного подключения модулей дополнительных и сигнальных контактов к вспомогательным шинам LA и LB. Также система Smissline дает возможность построения общей аварийной сигнализации через вспомогательные шины, для чего специальные сигнальные контакты SK400SA подключаются параллельно вспомогательным шинам (рис. 28, справа).

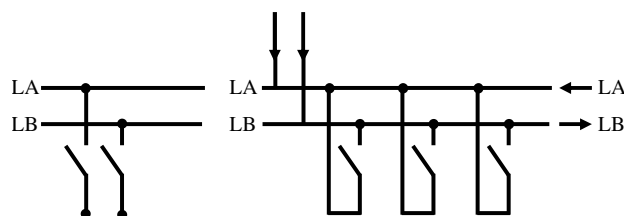


Рис. 28.

Модули дополнительных и сигнальных контактов могут устанавливаться на все аппараты системы Smissline (рис. 19), кроме ограничителей импульсных перенапряжений OVR 404.

Монтаж модулей контактов может осуществляться:

- на левую и правую грани аппарата (в случае использования MAB S400);
- только на левую грань (двухполюсные УЗО F402, FS401, и автоматический выключатель для защиты электродвигателей MS325);
- только на правую грань (четырёхполюсные УЗО F404 и выключатель нагрузки IS404).

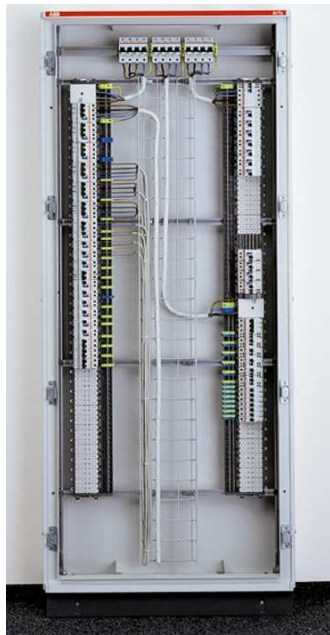
Особенности монтажа модулей контактов:

- на аппарат одновременно может быть установлен только один модуль сигнальных контактов, а также один или два модуля дополнительных контактов;
- при одновременной установке модулей дополнительных и сигнальных контактов модуль сигнальных контактов устанавливается первым;
- на выключатели нагрузки IS404 модуль сигнальных контактов не устанавливается.

Компактное размещение модулей дополнительных и сигнальных контактов на аппаратах позволяет существенно экономить монтажное пространство.

Система Smissline позволяет размещать оборудование в распределительном щите в вертикальном положении (рис. 29), что позволяет еще более экономить монтажное пространство по сравнению с традиционным размещением на монтажной DIN рейке, так как

не требуется установка дополнительных вводных и промежуточных клеммных колодок, а отходящие фидеры подключаются к аппаратам напрямую.



В заключении отметим, что на сегодняшний день современное инновационное оборудование системы Smissline установлено и успешно эксплуатируется [4]: в телекоммуникационных компаниях (Telenor, O2, British Telecom, Swisscom), в центрах обработки больших объемов критической информации финансовых и страховых структур (Credit Suisse, UBS, Shanghai Stock Exchange),

Рис. 29. Вертикальное размещение оборудования позволяет экономить монтажное пространство

при автоматизации промышленных процессов на предприятиях (BMW, Total Oil, Sweden Steel), а также в конечном оборудовании таких производителей, как Vestas Wind systems (ветрогенераторы), APC (системы бесперебойного питания), Knapp Conveyor Systems (конвейерные системы). Оборудование Smissline используется и там, где вопрос безопасности является жизненно важным, – в системах энергоснабжения аэропортов (например, в энергосистеме Франкфуртского аэропорта, одного из крупнейших в мире) и на объектах здравоохранения (в частности, его устанавливают в Германии, Швейцарии и Голландии в рамках специальных программ по реконструкции систем энергоснабжения).

Выводы. В статье проведен аналитический обзор системы разъемного монтажа электрооборудования Smissline производства концерна ABB с целью ознакомления отечественных проектантов, специали-

стов в области электрооборудования низкого напряжения к новому поколению системы разъемного монтажа электрооборудования. Рассмотрены особенности конструкции составляющих системы Smissline, а именно: шасси, шины, терминалы, электрические аппараты, модули контактов. Проанализированы особенности подключения и эксплуатации составляющих системы Smissline, показаны их преимущества по сравнению с уже используемыми традиционными системами монтажа электрооборудования низкого напряжения. Данная работа может быть рекомендована при проектировании новых или модернизации старых систем энергоснабжения, когда на первое место в шкале приоритетов выходят надежность энергоснабжения, безопасность объектов и обслуживающего персонала, например, при энергоснабжении информационных систем, в системах бесперебойного питания, на электротранспорте или в других системах энергоснабжения непрерывных промышленных и технологических процессов.

Список литературы

1. Клименко Б.В. Электричні апарати. Загальний курс: навчальний посібник (видання друге, допрацьоване та доповнене) – Харків: Вид-во «Точка», 2013. – 400 с.
2. Электронный ресурс: <https://library.e.abb.com/public/ca5caff57cb865c14825760a003aede7/2CCC451043L1101.pdf>.
3. Электронный ресурс: <https://new.abb.com/low-voltage/ru/products/modulnoe-oborudovanie/smissline-tp>.
4. ООО «АББ Индустри и строительная техника»: система разъемного монтажа Smissline // Новости электротехники. – 2008. – №2(50). Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/50/83.php>.

References (transliterated)

1. Klymenko B.V. *Elektrychni aparaty. Zahalnyi kurs : navchalnyy posibnyk* (vydannya druhe, dopracovane ta dopovnene). Kharkov: Vyd-vo «Tochka», 2013. – 400 p.
2. <https://library.e.abb.com/public/ca5caff57cb865c14825760a003aede7/2CCC451043L1101.pdf>.
3. <https://new.abb.com/low-voltage/ru/products/modulnoe-oborudovanie/smissline-tp>.
4. ООО «АББ Индустри и строительная техника»: система разъемного монтажа Smissline. *Novosti ehlektrotekhniki*. 2008. No 2(50). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/50/83.php>.

Поступила (resived) 03.09.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Гrechko Олександр Михайлович (Гrechko Александр Михайлович, Grechko Aleksandr Myhajlovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7872-8585>; e-mail: a.m.grechko@gmail.com.

Varshamova Ірина Сергіївна (Varshamova Ирина Сергеевна, Varshamova Iryna Sergeevna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7411-2302>; e-mail: varshamova.i.s@gmail.com.

Ю.С. ГРИЩУК, М.Г. ПАНТЕЛЯТ, А.К. ЄЛОЄВ

АВТОМАТИЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МУЛЬТИВАРОК

Розглянуто конструкцію мультиварки, устрій і призначення її основних елементів, електричну схему та систему керування, яка включає сенсорні елементи (датчики тиску і температури). Блок керування виконаний на базі спеціалізованого 8-бітового мікроконтролера MN15G1601 фірми PANASONIC SEMICONDUCTOR. Мікроконтролер зчитує стан кнопок клавіатури на панелі керування і по заданій програмі керує роботою мультиварки та її елементами. Запропонована структурна схема для автоматизації досліджень і випробувань мультиварок. Проведено вибір базового мікроконтролера та елементів схеми. Структурна схема включає наступні елементи: об'єкт досліджень – мультиварка з підтримкою функцій різних режимів приготування їжі під тиском; датчики Д1 – Д4 (напруги, температури дна і стінок чаші мультиварки та тиску всередині приладу); нормуючі підсилювачі П1 – П4; чотириканальний комутатор аналогових сигналів типу КР590КІ6; аналого – цифровий перетворювач (АЦП) типу К1113ПВ1; мікроконтролер 1816ВЕ51 (МК51), що містить вбудований генератор тактових сигналів, пам'ять команд, ОЗП, вбудовані 4 порти і послідовний канал зв'язку; компаратори К1 – К4 типу К554СА3, виходи яких за «АБО» об'єднані з вихідними сигналами з порту мікроконтролера; пристрої зв'язку з об'єктом ПЗО1 – ПЗО4, які через виконавчі пристрої силової установки взаємодіють з об'єктом досліджень і задають режим його випробувань або досліджень. Через послідовний інтерфейс RS232C схема з'єднана з ПЕОМ, яка може змінювати режими випробувань або досліджень, а також приймати, запам'ятовувати, відображати і документувати результати досліджень. Розроблена схема і алгоритм її роботи дозволяють автоматизувати технологічний процес дослідження режимів роботи мультиварок, скоротити терміни їх проведення, підвищити точність вимірювань та знизити їх вартість.

Ключові слова: мультиварки, система керування, мікроконтролер, автоматизація досліджень, структурна схема, мікроконтролерний стенд.

Ю.С. ГРИЩУК, М.Г. ПАНТЕЛЯТ, А.К. ЄЛОЄВ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МУЛЬТИВАРОК

Рассмотрена конструкция мультиварки, устройство и назначение ее основных элементов, электрическая схема и система управления, которая включает сенсорные элементы (датчики давления и температуры). Блок управления в ней выполнен на базе 8-битового микроконтроллера MN15G1601 фирмы PANASONIC SEMICONDUCTOR. Микроконтроллер считывает состояние кнопок клавиатуры на панели управления и по заданной программе управляет работой мультиварки и ее элементами. Предложена структурная схема для автоматизации исследований и испытаний мультиварок. Проведено выбор базового микроконтроллера и элементов схемы. Структурная схема включает следующие элементы: объект исследования – мультиварка с поддержкой функций разных режимов приготовления пищи под давлением; датчики Д1 – Д4 (напряжения, температуры дна и стенок чаши мультиварки и давления в середине устройства); нормирующие усилители П1 – П4; четырехканальный коммутатор аналоговых сигналов типа КР590КИ6; аналого-цифровой преобразователь (АЦП) типа К1113ПВ1; микроконтроллер 1816ВЕ51 (МК51), содержащий встроенный генератор тактовых сигналов, память команд, ОЗУ, встроенные 4 порта и последовательный канал связи; компараторы К1 – К4 типа К554СА3, выходы которых объединены по «ИЛИ» с выходными сигналами с порта микроконтроллера; устройств связи с объектом ПЗО1 – ПЗО4, которые через исполнительные устройства силовой установки взаимодействуют с объектом исследований и задают режим его исследований или испытаний. Через последовательный интерфейс RS232C схема соединена с ПЭОМ, которая может изменять режимы исследований или испытаний, а также принимать, сохранять, отражать и документировать результаты исследований или испытаний. Разработанная схема и алгоритм её работы позволяют автоматизировать технологический процесс исследования режимов работы мультиварок, сократить сроки их проведения, повысить точность измерений, и снизить их стоимость.

Ключевые слова: мультиварки, система управления, микроконтроллер, автоматизация исследований, структурная схема, микроконтроллерного стенд.

Yu. S. HRYSHCHUK, M.G. PANTELYAT, A.K. ELOEV

AUTOMATION OF THE RESEARCH MULTICOOKER

The multicooker design, structure and purpose of its main parts, the electrical circuit and the control system which includes sensor elements (sensors of pressure and temperature) are considered. The control unit in it is executed on the basis of 8-bit microcontroller MN15G1601 from PANASONIC SEMICONDUCTOR. The microcontroller read out a state of buttons of the keypad on the control panel and under the given program controls operation of multicooker and its elements. The structural diagram for automation of researches and tests of multicooker is offered. The choice of the basic microcontroller and circuit components is carried out. The structural diagram includes the following elements: object of research - multicooker with support of functions of different modes of cooking under pressure; the sensors D1 - D4 (pressure, temperature of the bottom and walls of a bowl of multicooker and pressure in the middle of the devices); the normalizing amplifiers P1- P4; the four-channel switchboard of analog signals of type КР590КИ6; the analog-digital converter (ADC) of type К1113ПВ1; the microcontroller 1816ВЕ51 (МК51) containing built-in clock generator, storage of commands and data, built-in 4 ports and a serial communication channel; comparators K1- K4 of type К554СА3, which outputs combine on "OR" with output signals from microcontroller port; communicating devices with object ПЗО1– ПЗО4 which, through the actuators of the power device, interact with the object of research and set the mode of its research or testing. Through serial interface RS232C the circuit is connected with a personal computer which can change modes of researches or tests, and also to accept, save, reflect and document results of researches or tests. The developed circuit and algorithm of its operation allow to automate technological process of researches of operation modes of multicookers, to reduce duration of their carrying out, to raise accuracy of measurements, and to lower their cost.

Keywords: multicooker, control system, microcontroller, research automation, block diagram, microcontroller stand.

Вступ. Мультиварка – це багатофункціональний електропобутовий прилад, призначений для приготування їжі. Як можна зрозуміти за назвою (лат. multi – багато), цей прилад призначений для приготування багатьох страв за різними програмами у різний спосіб.

Кількість програм для приготування різноманітних страв залежить від набору функцій конкретної мультиварки, що є одним з найважливіших параметрів для даного типу електропобутових приладів. Однією з функцій деяких мультиварок є можливість приготу-

© Ю.С. Грищук, М.Г. Пантелят, А.К. Єлоєв, 2018

вання їжі під тиском, наявність або відсутність якої є основою для поділу мультиварок на 2 основних типи [1–3]:

- мультиварки без функції приготування їжі під тиском, які часто називають рисоварками, від яких цей тип мультиварок і походить. У багатьох країнах такі мультиварки продаються саме під цією назвою;
- мультиварки з функцією приготування їжі під тиском, або мультиварки– скороварки.

Конструкція мультиварки наведена на рис. 1.

До складу мультиварки входять:



Рис. 1. Конструкція мультиварки

- корпус, у якому знаходиться заглиблення для встановлення чаші для приготування їжі;
- чаша для приготування їжі, що може бути виготовлена зі сталі (для мультиварки– скороварки) або алюмінію та може мати тефлонове покриття або керамічне чи мармурне напilenня, кожен тип покриття має свої плюси та мінуси;
- передня панель, на якій розташована панель керування, в якості елементів керування якої можуть використовуватися кнопки, поворотні перемикачі і сенсорні елементи. За панеллю керування прихований блок керування, який має вигляд печатної плати з встановленими на неї напівпровідниковими елементами, головним з яких є мікропроцесор;
- кришка мультиварки може блокуватися замикаючим пристроєм, що не дає відкриватися кришці при збільшенні тиску, якщо це мультиварка– скороварка і має такий пристрій. Також у разі, якщо це мультиварка– скороварка на кришці розташований паровий клапан для регулювання тиску, кришка має посилене ущільнювальне кільце та контури захисту від зайвого тиску, що є додатковими каналами для випуску пари;
- шнур живлення, частіш за все відокремлюваний, який приєднується до спеціального пазу на корпусі мультиварки, та підключений до блоку живлення та комутації всередині мультиварки, який має вигляд печатної плати з встановленими на неї напівпровідниковими елементами;
- нагрівальний елемент, який знаходиться всере-

дині мультиварки під дном заглиблення, у яке встановлюється чаша для приготування їжі. У якості нагрівального елемента може використовуватися трубчастий нагрівальний елемент з ніхромовою спіраллю, або індукційний нагрівальний елемент. Також у стінках заглиблення мультиварки та всередині кришки можуть розташовуватися додаткові нагрівальні елементи, якщо мультиварка підтримує функції двовимірного нагріву, чи 3D–нагріву;

- температурний/і датчик/и;
- датчик/и тиску.

Розглянемо призначення і принцип роботи основних електричних вузлів і ланцюгів у складі мультиварки [1, 2].

Електрична схема мультиварки наведена на рис. 2.

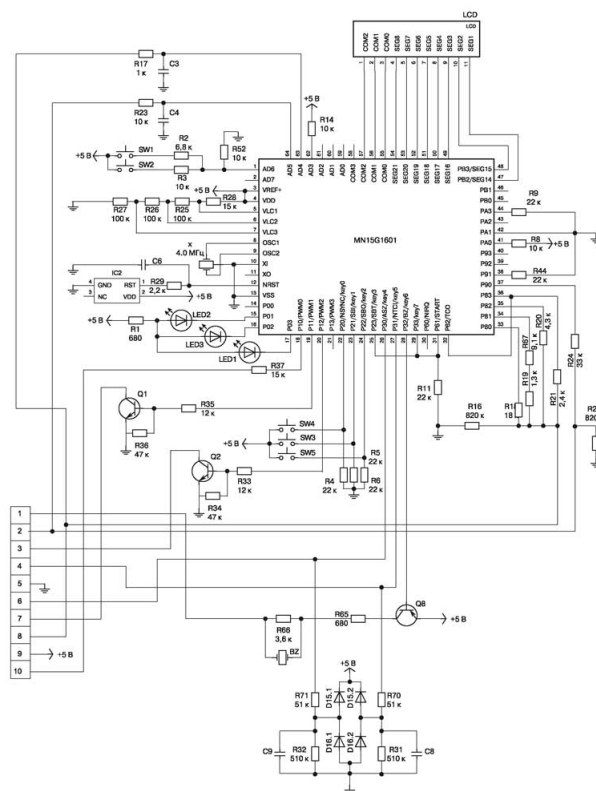


Рис. 2. Електрична схема мультиварки.

Основним вузлом пристрою, що управляє, є спеціалізований 8-бітовий мікроконтролер (МК) MN15G1601 фірми PANASONIC SEMICONDUCTOR. Мікросхема виконана в пластиковому 64– вивідному корпусі LQFP064 – P-1414 і призначена для використання в мультиварках PANASONIC і їх "клонах". МК управляє РК індикатором (4 розряди по 35 сегментів), світлодіодними індикаторами, звуковим сигналізатором і зчитує стан кнопок клавіатури. Він має 35 ліній універсальних портів введення– виведення, а також 8-канальний 10–бітовий АЦП. 16 кбіт вбудованого масочного постійного запам'ятовуючого пристрою (ПЗП) забезпечують зберігання резидентного програмного забезпечення (ПЗ). Для стабілізації частоти тактового генератора у складі МК до його виводів 8, 9 підключений кварцевий резонатор X (4 МГц). Для формування сигналу RESET до

виводу 12 МК підключений інтегральний детектор напруги IC2 (аналог KIA7042 та ін.). Ця мікросхема формує сигнал початкового скидання при поданні живлення, а також, якщо в силу різноманітних причин (аварійна ситуація), живляча напруга знизиться до рівня 4,2...4,3 В. Для забезпечення мережевої синхронізації МК на нього поступає напруга від мережі по ланцюгу: CN2 – R63, R42 – контакт 4 з'єднувачі CN7 – вив. 27 IC1.

Стосовно даної моделі мультиварки МК забезпечує:

- управління трьома ТЕНами;
- опитування стану функціональних кнопок з плати управління і індикації;
- відображення інформації на індикаторах плати управління і індикації;
- прийом аналогових сигналів з двох датчиків температури NTC;
- контроль стану ланцюгів датчиків температури (обрив/коротке замикання);
- контроль ланцюга живлення основного ТЕН (670 Вт);
- формування сигналів зміщення (VLCx) для функціонування ЖК індикатора.

Розглянемо основні ланцюги управління і контролю мультиварки.

Силові ланцюги управління ТЕН:

- НТ1 (основний ТЕН, P = 670 Вт): вив. 18 IC1 – R37 – контакт 10 CN7 – транзистор Q5 – обмотка і контактна група реле RL – з'єднувач CN3 – НТ1;
- НТ2 (додатковий ТЕН кришки для видалення конденсату, P = 40 Вт): вив. 20 IC1 – транзистор Q2 – контакт 3 CN7 – R47 – семістор TR2 – контакт 1 CN4 – контакт 1 XP2 – НТ2;
- НТ3 (додатковий ТЕН підігрівання чаші, P=73 Вт): вив. 9 IC1 – транзистор Q1 – контакт 7 CN7 – R46 – семістор TR1 – контакт 4 CN4 – НТ2.

Ланцюги індикації, управління (малопотужні навантаження) і контролю:

- ЖК дисплей: вивід 47– 57 IC1 – контакт 1– 11 LCD; вивід 5– 7 IC1 – R25 – R28 (напруга зміщення для роботи ЖК індикатора);
- Світлодіодні індикатори: вив. 15– 17 IC1 – LED1 – LED3;
- Функціональні кнопки: вив. 1 IC1 – R2, R3 – SW1, SW2; вив. 22– 24 IC1 – SW3 – SW5;
- Звуковий випромінювач: вив. 28 IC1 – Q8 – R65 – випромінювач BZ;
- Контроль живлення основного ТЕН: НТ1 – з'єднувач CN3 – R43, R64 – контакт 6 CN7 – вив. 26 IC1;
- Датчики температури: RT1 (основний) – контакт 1 CN5 – контакт 7 CN7 – вив. 63 і вив. 3336 IC1 (вимір температури з датчика і контроль ланцюга датчика на коротке замикання/обрив); RT2 (додатковий в кришці) – контакт 3 CN6 – контакт 2 CN7 – вив. 64 і вив. 27 IC1 (вимір температури з датчика і контроль ланцюга датчика на коротке замикання/обрив).

Джерело живлення (ДЖ) виконане за безтрансформаторною схемою на основі інтегрального перет-

ворювача IC3 типу MIP289 (аналог NCP1014AP) зі вбудованим силовим ключем. Він формує з мережевої напруги постійну стабілізовану напругу 5 і 12 В. Роботу перетворювача також забезпечують накопичувальний дросель L, діод D7 і ланцюг зворотного зв'язку на оптроні PC. На вхід перетворювача (виводи 2, 3, 7, 8 IC3) поступає постійна напруга (близько 300 В), яка формується випрямлячем і фільтром R76 D13 C17 C19 R72 R78. Вторинні ланцюги ИП не мають гальванічної розв'язки від первинного ланцюга. Для формування стабілізованої напруги 5 В служить каскад на транзисторі Q4 (живлення МК IC1 і детектора напруги IC2). Канал 12 У використовується для живлення ланцюгів реле RL і звукового випромінювача BZ.

Принцип дії мультиварки буде залежити від того, який саме нагрівальний елемент використовується у конкретному приладі: ТЕН чи індукційний нагрівальний елемент [2].

У першому випадку, зображеному на рис. 3а), має місце нагрів ТЕНа струмом, що проходить скрізь ніхромову спіраль, там передача теплової енергії ТЕНа назовні, у заглиблення, у якому знаходиться чаша для приготування їжі, яка виготовлена з металу (сталі чи алюмінію) с достатньою теплопровідністю.

У другому випадку, зображеному на рис. 3, б), нагрівання чаші з їжею досягається за допомогою індукційного нагрівального елемента – котушки індуктивності, що генерує електромагнітне поле, яке викликає появу вихрових струмів у електропровідних матеріалах. У разі мультиварки таким матеріалом є метал чаші для приготування їжі. Таким чином досягається висока рівномірність нагріву.

У разі наявності у мультиварці функцій двомірного нагрівання або 3d– нагрівання (рис. 3, а) і б) – 3 і 4 пункти), додаткові нагрівальні елементи розташовуються всередині бокових стінок заглиблення для чаші та (якщо це 3d– нагрівання) всередині кришки.

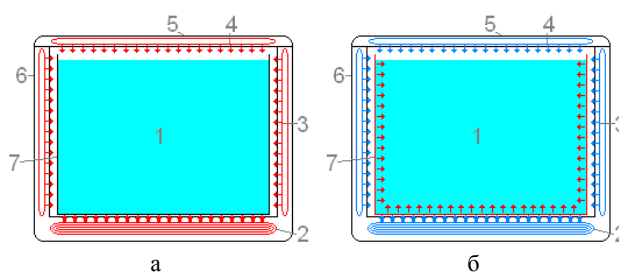


Рис. 3. Розміщення в мультиварці нагрівальних елементів у вигляді: а – ТЕНа; б – індукційного нагрівального елемента 1 – їжа, що готується у мультиварці; 2 – основний нагрівальний елемент; 3 – нагрівальний елемент боків заглиблення для чаші; 4 – нагрівальний елемент кришки; 5 – кришка мультиварки; 6 – корпус мультиварки; 7 – чаша для приготування їжі.

Мультиварка – електронний електропобутовий прилад керування яким забезпечується за допомогою мікроконтролера. Саме мікроконтролер задає приладу необхідний режим роботи в залежності від вибраної програми. Різні режими роботи полягають у необхідних температурі, тривалості приготування та тиску. В

залежності від режиму роботи, ці параметри можуть виставлятися в ручну, або автоматично, деякі режими роботи не передбачають будь-яких змін параметрів приготування їжі і повністю автоматичні. Регулювання цих параметрів залежить від роботи декількох датчиків: датчика температури в дні заглиблення, датчика температури у кришці та датчика тиску (якщо це мультиварка-скороварка, рисоварки ним не обладнані) [1].

Датчик температури має вигляд терморезистора, або термістора – напівпровідникового пристрою, що має електричний опір, який залежить від температури. Термістори поділяються на NTC– термістори та PTC–термістори, або позистори.

Датчик тиску має вигляд, що нагадує біметалічний датчик, але у цьому випадку пружина не біметалічна, а сталева, на пружині знаходиться металевий виступ, який упирається у виступ, що виступає з дна заглиблення всередині мультиварки, або до внутрішньої поверхні кришки мультиварки – при роботі приладу, накопичуваний тиск пари тисне через рухомі елементи на виступ пружини та вигинає пружину, що розмикає контакти, як біметалевий елемент біметалевого реле. На рис. 4 зображений датчик тиску і його розташування у мультиварці:



Рис. 4. Розташування датчика тиску у мультиварці

Таким чином, використання цих датчиків дозволяє мультиварці оправдувати свою назву та бути дійсно багатофункціональним приладом.

Метою даної роботи є розробка структурної схеми мікроконтролерного стенда та алгоритму його роботи для автоматизації дослідження мультиварок.

Структурна схема. Для автоматизації дослідження мультиварок розроблена структурна схема на базі мікроконтролера МК51. Восьмирозрядний мікроконтролер МК51 застосовується для керування різними технологічними процесами у виробництві, випробуваннях і дослідженнях устаткування, в пристроях керування транспортом, у службовій, комерційній, торговій і побутовій апаратурі, пристроях автоматичного керування вимірювальними приладами [4–6].

Скоротити терміни проведення досліджень мультиварки, підвищити точність вимірювань, знизити їх вартість можна, застосувавши автоматизовану систему керування технологічним процесом досліджень (АСКТПД) мультиварки із застосуванням мікроконтролера.

Структурна схема для автоматизованого дослідження мультиварок, яка зображена на рис. 6, включає наступні елементи:

– об'єкт досліджень – мультиварка з підтримкою функції приготування їжі під тиском;

– датчики Д1– Д4 (напруги та, температури дна чаші і кришки мультиварки та тиску в середині приладу);

– нормуючі підсилювачі П1– П4;

– чотириканальний комутатор аналогових сигналів типу КР590КІ6;

– аналого–цифровий перетворювач (АЦП) типу К 1113 ПВ1;

– мікроконтролер, що містить вбудований генератор тактових сигналів, пам'ять команд, і пам'ять даних, вбудовані 4 порти і послідовний канал зв'язку;

– компаратори К1– К4 типу К554 СА3, виходи яких за «АБО» об'єднані з вихідними сигналами керуючого мікроконтролера;

– пристрої зв'язку з об'єктом ПЗ01– ПЗ04, які взаємодіють з виконавчими пристроями силової установки, що задають режим випробувань або досліджень.

Через послідовний інтерфейс RS232C схема з'єднана з ЕОМ, яка може змінювати режими випробувань або досліджень, а також приймати, запам'ятовувати, відображати і документувати результати досліджень.

До об'єкту дослідження підключені відповідні датчики контрольованих параметрів Д1– Д4, які є первинними перетворювачами, напруги, температури дна чаші і кришки мультиварки та тиску всередині мультиварки. Нормуючі підсилювачі погоджують вихідну напругу датчиків з необхідним вхідним сигналом АЦП 0 – 10 В і забезпечують низький вихідний опір.

Комутатор аналогових сигналів перемикає один з входів на вихід залежно від керуючого коду, що поступив від мікроконтролера. Сигнал з виходу комутатора поступає на вхід АЦП – швидкодіючий десятирозрядний перетворювач вхідної напруги в паралельний двійковий код. Таке перетворення реалізовано на основі АЦП, що підключається до порту МК. Запуск перетворювача проводиться мікроконтролером, закінчення перетворення викликає сигнал готовності, який є командою для зчитування даних.

Мікропроцесор МК51 як мікропроцесорний пристрій відповідно до записаної в пам'ять програми керує процесом досліджень або випробувань шляхом опитування із заданою періодичністю датчиків Д1– Д4, згідно з алгоритмом керування. Вихідні сигнали датчиків унаслідок їх різної фізичної природи можуть потребувати посилення і проміжного перетворення на АЦП або на схемах формувача сигналів (ФС), які найчастіше виконують функції гальванічної розв'язки. Структурна схема для автоматизованого дослідження мультиварок на базі мікроконтролера зображена на рис. 5. У якості датчика температури можуть застосовуватися терморезистори. Наприклад, терморезистор NTCMF58, який здатний вимірювати температуру до 300 °С та має опір 1–100 кОм та похибку $\pm 1\%$.

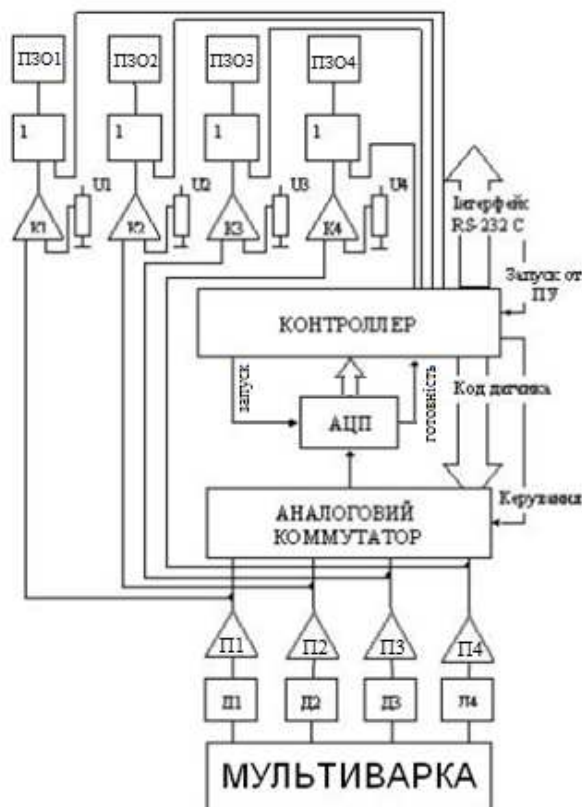


Рис. 5. Структурна схема автоматизованого дослідження мультиварок

У якості датчика тиску можна використати датчик тиску для мультиварки Redmond RMC-M110.

Компаратори К1 – К4 є паралельним апаратним контуром для захисту від аварійних режимів. ПЗО1 – ПЗО4 є підсилювачами потужності, які керують виконавчими механізмами або пристроями.

Мікропроцесор вибирається виходячи з характеру досліджуваних процесів і умов досліджень: швидкості протікання процесів; кількості досліджуваних параметрів і частоти опитування датчиків; завдань з переробки інформації та умов експлуатації і вимог щодо надійності.

Аналіз вихідних даних цього завдання показує, що його рішення може бути здійснено на базі мікроконтролера серії МК51.

Алгоритм роботи. Блок-схема алгоритму наведена на рис. 6. Для проведення досліджень на початку приводимо стенд у початковий стан. Далі занулюємо лічильник номеру датчика. Підключаємо датчик температури нагрівного елемента аналоговим комутатором до АЦП. Далі МК подає на АЦП сигнал запуску. Після перетворення сигналу з датчика в двійковий код, АЦП посилає сигнал готовності для зчитування даних. Дані прийняті мікроконтролером обробляються і передаються зовнішньому пристрою через універсальний асинхронний приймач-передавач (УАПП) персональному комп'ютеру для подальшого зберігання та обробки. Після цього по програмі аналогічно тому, як знімалися дані з датчика температури, зчитуються і обробляються дані з інших датчиків.

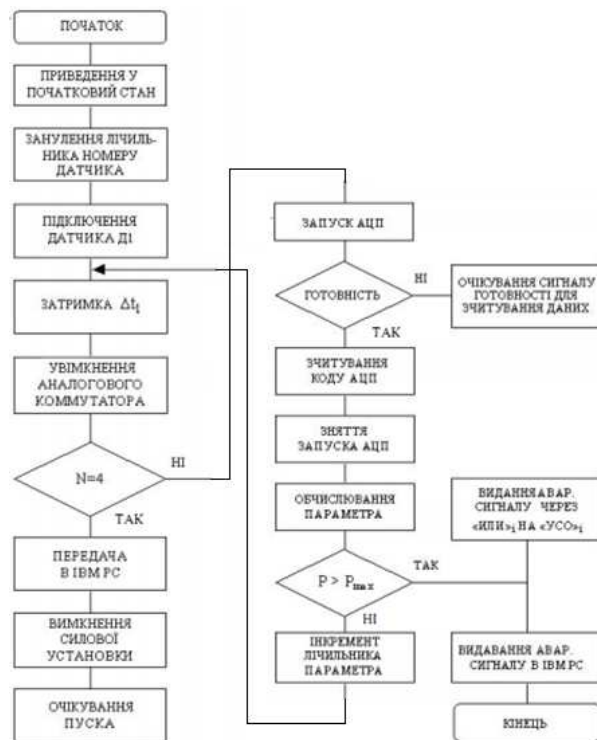


Рис. 6. Алгоритм автоматизованого дослідження мультиварок

Висновок. Розроблена структурна схема і алгоритм її роботи дозволяють автоматизувати керування процесом досліджень мультиварки, скоротити терміни і витрати на їх проведення, підвищити точність отримуваних результатів та проводити їх подальшу цифрову обробку в ЕОМ і документування.

Список літератури

1. Інтернет-сайт «Энциклопедия качества товаров и продуктов» <http://wiki.ektip.ru/Мультиварка>.
2. Інтернет-сайт «Radioradar» http://www.radioradar.net/repair_electronic_technics/repair_home_appliances/features_construction_multivarka_control_systems.html.
3. Лепаев Д.А. Бытовые электроприборы. Устройство и ремонт. Справочное пособие – горячая линия – Телеком, 2007. – 444 с.
4. Гришук Ю. С. Микропроцесорні пристрої: Навчальний посібник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 348 с.
5. Гришук, Ю.С. Застосування мікроконтролерів при дослідженнях електричних апаратів // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2016. – № 32 (1204). – С. 23-28.
6. Зарвири В. О., Гришук Ю. С. Автоматизація дослідження та випробування мікрохвильових печей // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – 2010. – № 32 (1204). – С. 23-28.

References (transliterated)

1. Enciklopediya kachestva tovarov i produktov. Available at: <http://wiki.ektip.ru/Мультиварка>.
2. Radioradar. Available at: http://www.radioradar.net/repair_electronic_technics/repair_home_appliances/features_construction_multivarka_control_systems.html.
3. Lepaev D.A. Bytovye ehlektroprybory. Ustrojstvo i remont. Spravochnoe posobie. Telekom, 2007. 444 p.
4. Gryshuk Yu. S. Mikroprocesorny prystroyi: Navchalnyj posibnyk. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2008. 348 p.

5. Grischuk Yu. S. The use of microcontrollers in studies of electric vehicles. *Bulletin NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection*. 2016. 32 (1204). pp. 23-28.
6. Zarvyro V. O., Gryshhuk Yu. S. Avtomatyzaciya doslidzhennya ta vyprovuvannya mikrovylovix pechej. *Bulletin NTU "KhPI"*.

Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. 2010. 32 (1204). pp. 23-28.

Поступила (received) 16.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гришук Юрій Степанович (Гришук Юрий Степанович, Grischuk Yuri Stepanovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7427-5419>; e-mail: grischuk-kri@ukr.net.

Пантелєят Михайло Гаррійович (Пантелєят Михаил Гарриевич, Pantelyat Mikhail Garrievich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1357-2134>; e-mail: m150462@yahoo.com.

Єлосєв Алан Казбекович (Елосєв Алан Казбекович, Elov Alan Kazbekovich) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", аспірант кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; e-mail: mauser98kar@gmail.com.

Л.Б. ЖОРНЯК, О.І. АФАНАСЬЄВ, В.М. СНИГІРЬОВ, С.В. СКОРИК, Д.В. ЧОРНИЙ, С.І. БЕЛЯЄВ

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСОБІВ ПРИМУСОВОГО ВИРІВНЮВАННЯ НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ЗОВНІШНЬОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ГАЗОНАПОВНЕНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ

Пропонується методика оцінки розподілу напруженості поля уздовж опорної ізоляційної покривки газонаповнених трансформаторів струму. Ця методика дозволяє оцінити ефективність примусового розподілу напруженості за допомогою конденсаторних обкладок шляхом зміння їх конструктивних параметрів. У запропонованому методі розглядається ізоляційна покривка, головним регулюючим елементом схеми заміщення якої обрані еквівалентні ємності окремих частини покривки з урахуванням ємності циліндричного конденсатора і ємності до центральної труби виводів. Таким чином зроблено висновок щодо можливості покращення розподілу напруги та зменшення неоднорідності електричного поля шляхом регулювання структури конденсатора.

Ключові слова: розподіл напруженості поля, ізоляційна покривка, схема заміщення, часткова та еквівалентна ємності, конденсаторні обкладки, циліндричний конденсатор.

Л.Б. ЖОРНЯК, А.И. АФАНАСЬЕВ, В.М. СНИГИРЁВ, С.В. СКОРИК, Д.В. ЧОРНЫЙ, С.И. БЕЛЯЕВ

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СПОСОБОВ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ВЫРАВНИВАНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВНЕШНЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Предлагаются методика оценки распределения напряженности поля вдоль опорной изоляционной покрывки газонаполненных трансформаторов тока. Эта методика позволяет оценить эффективность принудительного распределения напряженности с помощью конденсаторных обкладок путем изменения их конструктивных параметров. В предложенном методе рассматривается изоляционная покрывка, главным регулирующим элементом которой выбраны эквивалентные емкости отдельных частей покрывки с учетом емкости цилиндрического конденсатора и емкости к центральной трубе выводов. Таким образом сделан вывод о возможности улучшения распределения напряжения и уменьшения неоднородности электрического поля путем регулирования структуры конденсатора.

Ключевые слова: распределение напряженности поля, изоляционная покрывка, схема замещения, частичная и эквивалентная емкости, конденсаторные обкладки, цилиндрический конденсатор.

L.B. ZHORNIAK, A.I. AFANASIEV, V.M. SNIGIREV, S.V. SKORYK, D.V. CHORNYI, S.I. BIELIAIEV

POSSIBILITY OF ELECTRIC FIELD COMPENSATION OF EXTERNAL ISOLATION OF HIGH-VOLTAGE GAS-INSULATED CURRENT TRANSFORMERS

There have been proposed methods of intensity distribution regulation along external isolator of gas-filled current transformers. This method allows us to estimate the efficiency of the distribution of forced voltage using capacitor plates by changing their design parameters. On the structure of the tire there is a cavity, where the internal passage of the current carrying the particles and grounded elements of the design of the transformer current. Such a constructive solution enhances the distortion of the electric field and forms a sharp uneven voltage distribution and field strength along the insulation structure. In the offered methods the column from sequentially connected insulators is considered, the principal circuit elements of substitution selected a certain capacity of a separate part of the reference isolation center and its partial capacities on the earth and conductive elements. Thus, we can say that to improve the voltage distribution and reduce the heterogeneity of the electric field by controlling the structure of the capacitor. Different variants of constructive decisions for forced equalization of voltage distribution are analyzed, especially in the upper part of the tire near a powerful electrode. The structure analysis showed that the following structural parameters influence on the distribution of capacitance and field strength along the capacitor height: the length of the overlap of the capacitor plates, the length of the capacitor plates and the distance between the individual capacitor plates. The results of the preliminary estimation of the field intensity distribution are shown in the figure. On the basis of this methodology, software was developed that allows us to estimate the strength of the field at individual points along the height of the cylindrical condenser. Thus, it was concluded a possibility of improving of intensity distribution regulation and reduction of non-uniformity of an electric field.

Keywords: intensity distribution, external isolator, semiconductor covering, screen, capacity.

Вступ. В апаратах зверх високої напруги найважливішим елементом конструкції є електрична ізоляція, яка впливає як на конструкцію, так і на експлуатаційну надійність. В цих умовах має місце нерівномірний розподіл електричного навантаження на опорну ізоляційну конструкцію, функцію якої у газонаповнених трансформаторах струму виконує ізоляційна покривка [1, 2]. Особливість структури покривки така, що вона виконується пустотілою, де всередині проходять струмоведучі частини та заземлені елементи конструкції трансформатора струму. Таке конструктивне рішення підсилює спотворення електричного поля і утворює різку нерівномірність розподілу напруги та напруженості поля уздовж ізоляційної конструкції, як показано на рис. 1. Це особливо виникає в зоні електрода з високим потен-

ціалом, роль якого виконує сталевий бак, в середині якого розміщується активна частина трансформатора в середовищі електричного газу з надлишковим тиском.

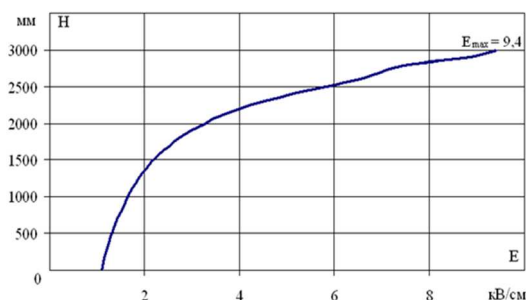


Рис. 1. Розподіл напруженості електричного поля уздовж поверхні ізоляційної покривки без застосування способів вирівнювання електричного поля

Мета роботи. З метою зниження енергоспоживання при виготовленні сучасні газонаповнені трансформатори струму мають ізоляційну покришку у вигляді комбінованого ізолятора, який складається з ізоляційного циліндра, армованого склопластиком з наплавленими силіконовими ребрами. Головним недоліком такої конструкції є знижена в зрівнянні з фарфором робоча напруженість поля, яка не повинна перевищувати (6...7) кВ/см [1]. Крім того, в умовах дії комутаційних та атмосферних перенапруг напруженість поля може тимчасово суттєво перевищувати припустиме значення з виникаючими з цього негативними наслідками [4].

В такому випадку удосконалення системи примусового вирівнювання розподілу напруги та напруженості поля грає важливу роль для подальшого підвищення експлуатаційної надійності як самої ізоляційної конструкції, так і трансформатора струму в цілому [3].

В ізоляційній покришці, що розглядається, примусове вирівнювання розподілу напруженості по висоті здійснюється за допомогою внутрішніх конденсаторних обкладок [5, 6], які конструктивно утворюють так званий конденсатор. Дослідження, що проведені в [5] показали, що для оцінки розподілу напруженості поля уздовж ізоляційної покришки газонаповнених трансформаторів струму такої структури складається схема заміщення, що показана на рис. 2, де використовують такі позначення:

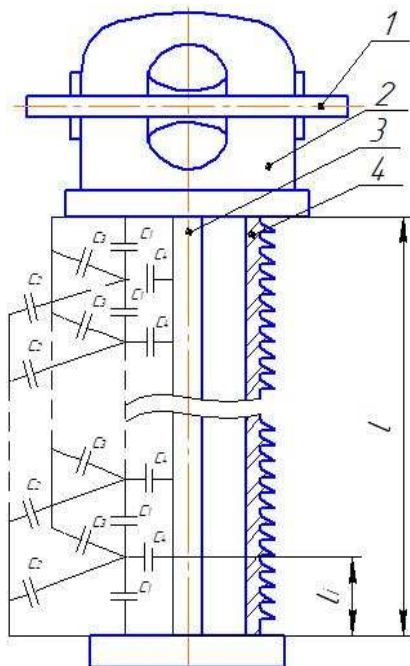


Рис. 2. Еквівалентна ємнісна схема заміщення ізоляційної покришки трансформатора струму

C_1 – особиста ємність елемента покришки, на якій умовно поділяється вся ізоляційна конструкція. Її числове значення можливо уявити як ємність циліндричного конденсатора за умовою [4]

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon l_i}{\ln \frac{R_3}{R_b}}, \quad (1)$$

де ϵ – відносна діелектрична проникність матеріалу діелектрика;

l_i – висота елемента ізоляційної покришки;

R_3, R_b – відповідно зовнішній та внутрішній радіуси циліндричної покришки;

C_2 – ємність елемента покришки по відношенню до землі;

C_3 – ємність елемента покришки по відношенню до частин конструкції, що знаходяться під напругою;

C_4 – ємність елемента по відношенню до центральної труби, в якій розміщені виводи низької напруги. Її величина визначається як еквівалентна ємність з урахуванням ємності циліндричного конденсатора на основі умови (1).

Оскільки ємності $C_1...C_3$ у конкретній конструкції трансформатора струму відносно стабільні, то подальше примусове вирівнювання розподілу напруженості поля уздовж ізоляційної покришки можливо отримати за рахунок регулювання ємності C_4 . Цього можливо досягнути шляхом змінення конструктивних параметрів та структури циліндричного конденсатора. У загальному вигляді розрахунок регулювання поля за допомогою конденсаторних обкладок здійснюється на основі методики [4]. Необхідна ємність конденсатора C_4 може бути визначена за умовою

$$C = \frac{i_c}{2\pi f U_{роз}} \quad (2)$$

$$U_{роз} = U_p K_3 K_n$$

де K_3 – коефіцієнт запасу, що дорівнює 1,1 [4];

K_n – коефіцієнт, що враховує перенапруги, дорівнює 1,1;

i_c – ємнісний струм у конденсаторі, величина якого обирається 0,01 А.

Для зменшення геометричних розмірів і витрат матеріалів конденсаторні обкладки виконуються у вигляді зигзагу, який розбивається на чотири зони, в кожній знаходиться рівна кількість елементів з трьома переходами напрямку зигзагу, як показано на рис. 3.

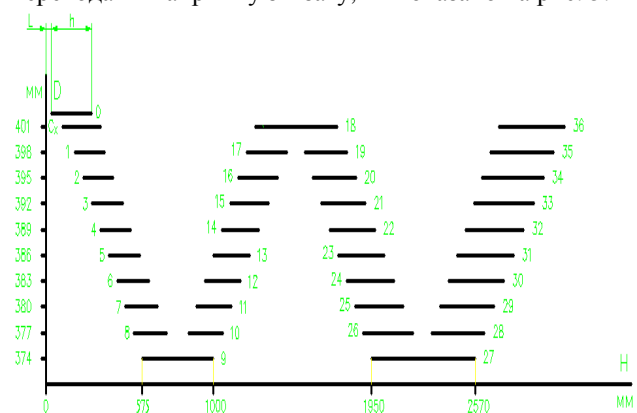


Рис. 3 Структура накладення конденсаторних обкладок на ізоляційний циліндр за схемою зигзаг

Середня ємність елемента конденсатора визначається з урахування приймаємого припущення, що взаємний вплив ємностей відсутній

$$C_{\text{ср}} = nC,$$

де n – кількість конденсаторних обкладок у структурі конденсатора.

Намотування конденсаторів здійснюється на склопластиковий циліндр, розміри якого визначаються типом трансформатора струму. Наприклад, для трансформатора типу ТОГ-362 його зовнішній діаметр $D_{\text{зц}}$ складає 70 мм і конструкційна довжина $l_{\text{ц}}$ складає 3000 мм. Величина перекриття між нульовою та першою обкладками складає

$$l_x = \frac{U_{\text{нр}} C \ln \frac{R_0}{R_1}}{U_x 2\pi\epsilon},$$

$$R_0 = \frac{D_{\text{зц}}}{2} + t_{\text{із}} \frac{n}{4},$$

$$R_1 = \frac{D_{\text{зц}}}{2} + t_{\text{із}} \left(\frac{n}{4} - 1 \right),$$

де $t_{\text{із}}$ – товщина ізоляції між обкладками, мм;

U_x – напруга на обкладці, кВ;

ϵ – діелектрична проникність ізоляційного матеріалу, що використовується для виготовлення конденсатора.

Для проведення подальших досліджень розподілу напруженості поля в якості першого наближення обирається умова, щоб ємність зростала від нульової обкладки до останньої за експоненціальним законом. В цьому випадку повинна виконуватися умова

$$L_{n-1,n} = l_1 e$$

Відстань між обкладками одного діаметру в місці переходу зигзагу обирається з умови, щоб допустима напруженість поля у продольному напрямку не перевищувала 1,2 кВ/м.

Ширина перекриття рядом розташованих обкладок визначається з умови

$$l_{x,x-1} = L_{x-1} + H_{\text{об.х}} - L_x,$$

де L_{x-1} – відстань від бази до початку попередньої обкладки;

$H_{\text{об.х}}$ – ширина попередньої обкладки;

L_x – відстань від бази до початку подальшої обкладки.

Величина ємності між обкладками

$$C_x^{x-1} = \frac{2\pi\epsilon l_{x,x-1}}{\ln \frac{R_x}{R_{x+1}}},$$

де R_{x+1} , R_x – відповідно радіуси перед неї та подальшої конденсаторних обкладок.

Падіння напруги між обкладками визначається

$$\Delta U_{x,x-1} = \frac{U_{\text{нр}} C_{\Sigma}}{C_x^{x-1}}$$

Величина C_{Σ} обирається за умовою

$$\frac{1}{C_{\Sigma}} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{C_i^{x-1}}$$

Напруженість поля між обкладками

$$E_x^{x-1} = \frac{\Delta U_{x,x-1}}{R_{x-1} \ln \frac{R_x}{R_{x-1}}}$$

Величина ємнісного струму в конденсаторі визначиться з умови

$$i_c = U_{\text{н}} 2\pi f C_{\Sigma}$$

На основі вище приведеної методики розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє оцінити напруженість поля в окремих точках по висоті циліндричного конденсатора з урахуванням впливу геометричних розмірів окремих елементів, що утворюють структуру цього конденсатора. Результати попередньої оцінки розподілу напруженості поля з урахуванням схеми заміщення рис. 2 та впливу конденсатора, який встановлюється в конструкції трансформатора типу ТОГ-362 виробництва КО Запорізький завод високовольтної апаратури [16] показані на рис. 4.

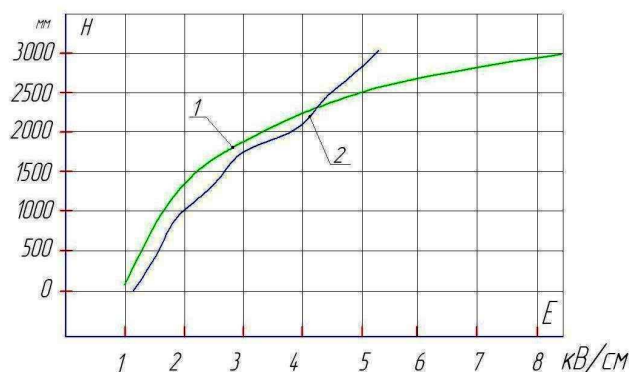
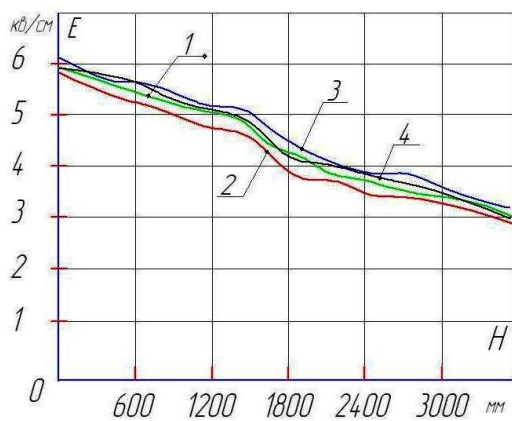


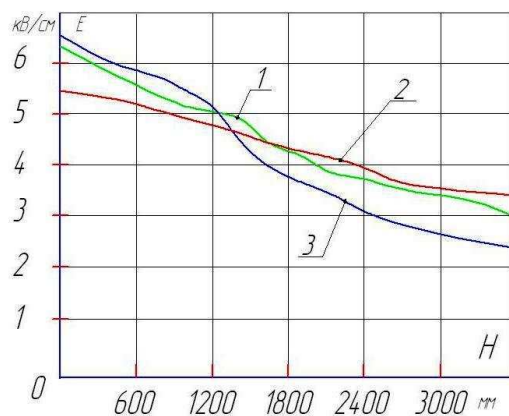
Рис. 4. Ефективність використання конденсатора зі стандартними параметрами

Як показують дані рис. 4, використання конденсаторних обкладок для примусового вирівнювання розподілу напруженості поля дозволяє отримати суттєвий ефект по зниженню напруженості поля і електричного навантаження на покриття в зоні електрода з високим потенціалом. Подальшого вирівнювання напруженості можливо досягнути за рахунок оптимізації конструкції самого конденсатора. Крім того, при зростанні номінальної напруги, наприклад у трансформаторі типу ТОГ-525, структура конденсатора суттєво ускладнюється і оптимізаційні розрахунки в цих умовах є вельми актуальні.

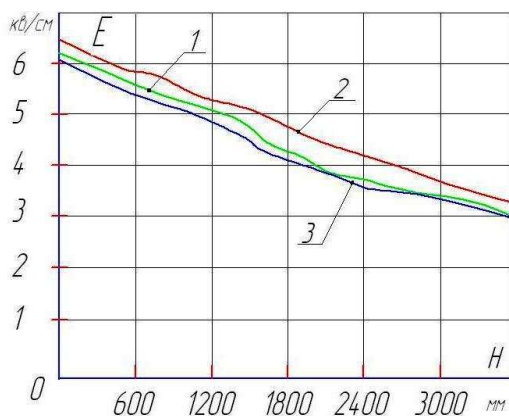
Як показує аналіз структури конденсатора, на розподіл ємності та напруженості поля уздовж його висоти оказують вплив такі конструктивні параметри, як довжина перекриття конденсаторних обкладок, довжина конденсаторних обкладок, а також відстань між окремими конденсаторними обкладками (див. рис. 3). Результати розрахунків по оцінці впливу цих параметрів на розподіл напруженості, які здійснені на основі вище приведеної методики, показано на рис. 5. Згідно проведених розрахунків найбільш неоднорідний розподіл напруженості має місце в зоні верхнього електрода, яким є бак трансформатора. Тому подальший аналіз буде здійснюватися для верхньої частини поверхні покриття. Аналіз графіків рис. 5,а показує, що змінням довжини перекриття конденсаторних обкладок не оказує суттєвого впливу на зниження електричного навантаження.



а



б



в

Рис. 5. Вплив окремих конструктивних параметрів конденсатора на розподіл напруженості поля уздовж покриття у трансформаторі струму типу ТОГ-363: а – вплив довжини перекриття обкладок; б – вплив кількості обкладок; в – вплив відстані між обкладками.

Але його реалізація не потребує суттєвих додаткових витрат матеріалів. Тому його можливо використовувати як додатковий засіб по зниженню напруженості поля.

Аналіз впливу кількості обкладок рис. 5, б показує, що підвищення кількості обкладок може суттєво впливати на зниження напруженості поля. Для зменшення витрат матеріалів можливо

виготовляти конденсатор не монолітним, а таким що складається з двох частин, що актуально в умовах більш високих номінальних напруг.

Вплив відстані між обкладками рис. 5, в показує, що цей засіб регулювання напруженості поля менш ефективний і його можливо використовувати як додатковий з урахуванням конструктивних особливостей. Наприклад матеріалоемності і електричного навантаження ізоляції між обкладками.

Висновки. Попередній аналіз та результати проведених розрахунків дають можливість стверджувати, що для конкретної конструкції газонаповненого трансформатора струму величини часткових еквівалентних ємностей $C_1...C_3$ для ізоляційної покриття відносно стабільні та їх регулювання потребує суттєвих конструктивних рішень. Більшого ефекту що до зменшення нерівномірності розподілу напруги можливо досягнути змінюючи величину часткової ємності C_4 , яку в основному формує циліндричний конденсатор. Зміненням його конструктивних параметрів можливо в достатньо широких межах регулювати розподіл напруженості уздовж ізоляційної покриття. Для проведення необхідних розрахунків розроблено алгоритм та необхідне для його реалізації програмне забезпечення, яке дає можливість спроектувати конденсатори для трансформаторів на більш високі класи напруги.

Ефективність впливу конструктивних чинників можна показати на рис. 6 при умові змінення ємності окремих елементів покриття у верхній її частині, де має місце найбільш неоднорідний розподіл напруги. Дані досліджень показують, що найбільший ефект можливо отримати при оптимальній структурі конденсатора як показує крива 5, що дозволяє знизити напруженість поля до 20%.

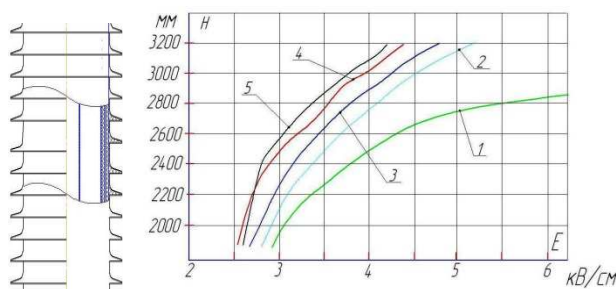


Рис. 6. Ефективність впливу змінення параметрів конденсатора на розподіл напруженості уздовж ізоляційної покриття: 1 – без використання конденсатора; 2 – зі стандартним конденсатором; 3 – змінення перекриття обкладок; 4 – зміненням кількості обкладок; 5 – оптимальній кількості обкладок і перекриття

Більш точного визначення впливу вищезазначених методів регулювання розподілу напруги можна досягти проведенням додаткової серії розрахунків та експериментальних випробувань.

Список літератури

1. Александров, Г.Н. Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения: учеб. / Г. Н. Александров, В.Л. Иванов. – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
2. Афанасьев, В.В. Трансформаторы тока: учеб. / В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, В.М. Кибель. – Л. : Энергоатомиздат, 1989. – 416 с.
3. Жорняк, Л.Б. К вопросу об улучшении качества внутренней изоляции высоковольтных измерительных трансформаторов [Текст] / Л.Б. Жорняк, О.Г. Волкова, М.А. Макогон // Вісник Національного технічного університету ХПИ, 2017 - №34(1256) – с. 19-25.
4. Базуткин, В. В. Техника высоких напряжений / В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 446 с.
5. Дмитриевский, В.С. Расчет и конструирование электрической изоляции: учеб. / В. С. Дмитриевский. – М. : Энергоиздат, 1981. – 392 с.
6. Жорняк, Л.Б. Можливості компенсації напруженості електричного поля зовнішньої ізоляції високовольтних газонаповнених трансформаторів струму [Текст] / Л.Б. Жорняк, Л. Афанасьєв, Р.С. Леонов, А.В. Карпук // Вісник Національного технічного університету «ХПИ». – 2017. – № 34 (1256) – С. 14-18.
7. Колечицкий, Е. С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения / Е. С. Колечицкий. – М. Энергоиздат, 1983. – 168 с.
8. Кучинский, Г. С. Изоляция установок высокого напряжения: учеб. / Г. С. Кучинский, В. Е. Кизеветтер, Ю. С. Пинталь. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.
9. Полтев, А. И. Конструкции и расчет элегазовых аппаратов высокого напряжения: учеб. / А. И. Полтев. – Л. : Энергия, 1979. – 240 с.
10. Полтев, А. И. Элегазовые аппараты: учеб. / А. И. Полтев. – Л. : Энергия, 1978. – 240 с.
11. Ушаков, В. Я. Изоляция установок высокого напряжения / В. Я. Ушаков. – М. : Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.
12. ГОСТ 1516.3-96 Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. – Введ. 1997-04-12. – М. : Издательство стандартов, 1997. – 50 с.
13. ГОСТ 7746-2001 Трансформаторы тока. Общие технические условия. – Введ. 2002-03-13. – М. : Издательство стандартов, 2002. – 33 с.
14. ОАО ВО «Электроаппарат» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ea.spb.ru>
15. Trenchcompany [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.trenchgroup.com/en>
16. КО «Запорожский завод высоковольтной аппаратуры» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.zva.zp.ua>.

References (transliterated)

1. Aleksandrov G.N., Ivanov V.L. Insulation of high-voltage electric apparatus: Proc. L.: Energoatomizdat, 1984. 208 p.
2. Afanasyev V.V., Adoniev N.M., Cibiel V.M. Current transformers: Proc. L.: Energoatomizdat, 1989. – 416 p.
3. Zhorniak L.B., Volkova O.G., Makohon M.A. To the question of improving the quality of internal insulation of high-voltage measurement transformers. Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. No. 34 (1256). P. 19–25.
4. Bazutkin V.V., Larionov V.P., Pintal Y.S. Technique of high stresses. Moscow: Energoatomizdat, 1986. – 446 p.
5. Dmitrevsky V.S. Calculation and design of electrical insulation: Proc. Moscow: Energoizdat, 1981. 392 p.
6. Zhorniak L.B., Afanasiev A.I., Leonov R.S., Karpuk A.V. The possibilities of compensating the electric field strength of external insulation of high-voltage gas-filled current transformers [Tekst]. Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KHPI». 2017. No 34 (1256). Pp. 14 - 18.
7. Kolechitsky E.S. Calculation of electric fields of high-voltage devices. Moscow. Energoizdat, 1983. 168 p.
8. Kuchinsky G.S., Kizevetter V.E., Pintal Y.S. Insulation of high voltage installations: Proc. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 368 p.
9. Poltev A.I. Designs and calculation of high-voltage SF6 apparatus: Proc. – L.: Energy, 1979. – 240 p.
10. Poltev A.I. Elegazoapparaty: training. L.: Energy, 1978. 240 p.
11. Ushakov V.Y. Insulation of high voltage installations. Moscow: Energoatomizdat, 1994. 496 p.
12. GOST 1516.3-96 AC electrical equipment for voltage from 1 to 750 kV. Enter. 1997-04-12. Moscow: Publishing house of standards, 1997. 50 p.
13. GOST 7746-2001 Current transformers. General specifications. Enter. 2002-03-13. Moscow: Publishing house of standards, 2002. 33 p.
14. JSC VO "Electroapparat" [Electronic resource]. Access mode: <http://www.ea.spb.ru>
15. Trenchcompany [Electronic resource]. Access mode: <http://www.trenchgroup.com/en>
16. KO "Zaporozhye plant of high-voltage equipment" [Electronic resource]. Access mode: <http://www.zva.zp.ua>.

Надійшла (received) 05.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Жорняк Людмила Борисівна (Жорняк Людмила Борисовна, Zhorniak Liudmyla) – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри електричних та електронних апаратів, м. Запоріжжя, Україна; e-mail: zporoton@zntu.edu.ua.

Афанасьєв Олексій Іванович (Афанасьєв Алексей Иванович, Afanasiev Alexej) – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри електричних та електронних апаратів, м. Запоріжжя, Україна.

Снігірьов Віталій Максимович (Снигирёв Виталий Максимович, Snigirev Vitalii) – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри електричних та електронних апаратів, м. Запоріжжя, Україна.

Скорик Світлана Володимирівна (Скорик Светлана Владимировна, Skoryk Svetlana) – Запорізький національний технічний університет, студентка кафедри електричних та електронних апаратів, м. Запоріжжя, Україна.

Чорний Денис Вадимович (Чорный Денис Вадимович, Chorny Denys) – Запорізький національний технічний університет, студент кафедри електричних та електронних апаратів, м. Запоріжжя, Україна.

Беляєв Сергій Іванович (Беляев Сергей Иванович, Bieljaiev Serhii) – Запорізький національний технічний університет, студент кафедри електричних та електронних апаратів, м. Запоріжжя, Україна.

Б.В. КЛИМЕНКО, М.А. ЛЕЛЮК, В.М. БУГАЙЧУК, Я.Б. ФОРКУН

ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ АКТУАТОР ДЛЯ ВАКУУМНОГО КОНТАКТОРА СЕРЕДНІХ НАПРУГ

Представлено огляд застосування моно- та бістабільних неполяризованих та поляризованих актуаторів у контакторах середніх напруг. Проведено аналіз конструктивних особливостей електромагнітних актуаторів та розроблено рекомендацій щодо їх удосконалення. Розглянута нова конструкція бістабільного актуатора на базі поляризованого моностабільного електромагніта з поворотною пружиною, його принцип дії. За рахунок використання кільцеподібного елемента з немагнітного матеріалу між корпусом та сердечником електромагніта вдалося зменшити ефект шунтування не збільшуючи осьовий розмір електромагніта. Для дослідного зразка розраховані магнітні поля у відключеному положенні, при зазорі 12 мм між якорем і нерухомою частиною магнітопроводу та у включеному, при притиснутому якорі. Встановлено вплив кільцевого феромагнітного шунта на тягову силу при відпущеному та притиснутому якорі. Розроблена електромеханічна система керування бістабільним актуатором з однією котушкою. Проведені експериментальні дослідження нового бістабільного актуатора на базі поляризованого моностабільного електромагніта з поворотною пружиною. Встановлено час вмикання та вимикання нового вакуумного контактора.

Ключові слова: вакуумний контактор, моностабільний та бістабільний електромагніт, актуатор, постійний магніт.

Б.В. КЛИМЕНКО, Н.А. ЛЕЛЮК, В.М. БУГАЙЧУК, Я.Б. ФОРКУН

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ АКТУАТОР ДЛЯ ВАКУУМНОГО КОНТАКТОРА СРЕДНИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Представлен обзор применения моно- и бистабильных неполяризованных и поляризованных электромагнитов в контакторах средних напряжений. Проведен анализ конструктивных особенностей электромагнитных актуаторов и разработаны рекомендации по их усовершенствованию. Рассмотрена новая конструкция бистабильного актуатора на базе поляризованного моностабильного электромагнита с возвратной пружиной, его принцип действия. За счет использования кольцеобразного элемента из немагнитного материала между корпусом и сердечником электромагнита удалось уменьшить эффект шунтирования не увеличивая осевой размер электромагнита. Для опытного образца рассчитаны магнитные поля в отключенном положении, при зазоре 12 мм между якорем и неподвижной частью магнітопровода и во включенном, при прижатом якорі. Установлено влияние кольцевого ферромагнитного шунта на тяговую силу при отпущенном и притянутом якорі. Разработана электромеханическая система управления бистабильным актуатором с одной катушкой. Проведены экспериментальные исследования бистабильного актуатора на базе поляризованного моностабильного электромагнита с возвратной пружиной. Установлено время включения и выключения нового вакуумного контактора.

Ключевые слова: вакуумный контактор, моностабильный и бистабильный электромагнит, актуатор, постоянный магнит.

B. V. KLIMENKO, M. A. LELIUK, V. M. BUGAICHUK, Y. B. FORKUN

AN ELECTROMAGNETIC ACTUATOR FOR THE MEDIUM VOLTAGE VACUUM CONTACTOR

A review of the use of mono- and bistable unpolarized and polarized electromagnets in medium voltage contactors is presented. The analysis of the design features of electromagnetic actuators is carried out and recommendations for their improvement are developed. A new design of a bistable actuator based on a polarized monostable electromagnet with a return spring, its principle of operation are considered. Due to the use of a ring-shaped element of a non-magnetic material between the case and the core of the electromagnet, it is possible to reduce the effect of shunting without increasing the axial size of the electromagnet. For the prototype, the magnetic fields are calculated in the off position, with a gap of 12 mm between the armature and the fixed part of the magnetic core and in the on position, with the armature pressed. The effect of a ring ferromagnetic shunt on the traction force at the released and pressed armature is determined. The electromechanical control system of a single-coil bistable actuator is developed. Experimental investigations of a bistable actuator based on a polarized monostable electromagnet with a return spring are carried out. The time for switching on and off of the new vacuum contactor is set.

Key words: vacuum contactor, monostable and bistable electromagnets, actuator, permanent magnet.

Вступ. Керування навантагами в мережах середніх напруг зазвичай здійснюється контакторами з комутацією у середовищі шестифтористої сірки (елегазу, SF₆) та вакууму [1]. Тенденції останніх десятиліть свідчать про домінування вакуумних контакторів за рахунок надійності, високої швидкодії, простоти експлуатації та екологічної безпеки. Саме останнє суттєво скоротило використання елегазових контакторів [2].

Комутація головних кіл у вакуумних контакторах здійснюється вакуумними переривниками, які, через механічну систему, керуються електромагнітними актуаторами. В моделях контакторів, що випускаються іно-

земними виробниками, існує два типи актуаторів: з форованим неполяризованим моностабільним двохстрижневим електромагнітним актуатором (електромагнітом з поворотною пружиною) [3-7] та поляризованим бістабільним електромагнітним актуатором [8].

Аналіз цих конструктивних рішень виявив ряд недоліків, а саме для підтримання контактора з неполяризованим моностабільним двохстрижневим електромагнітним актуатором в увімкненому стані необхідно постійне живлення котушок, що призводить до додаткових витрат електроенергії, а використання механічної заціпки ускладнює конструкцію апарата

© Б.В. Клименко, М.А. Лелюк, В.М. Бугайчук, Я.Б. Форкун, 2018

[9] та знижує його надійність. Використання висококоерцетивних постійних магнітів, в контакторі з поляризованим бістабільним електромагнітним актуатором та однообмоточною котушкою вмикання і вимикання, усуває ці недоліки, але при цьому призводить до збільшення габаритних розмірів приводу та контактора в цілому.

Удосконалення вакуумних контакторів з неполяризованими моностабільними двохстрижневими електромагнітними актуаторами відбувається за рахунок введення додаткових деталей, які підвищують зручність його обслуговування (наприклад, деталей, центруючих поворотну пружину або додаткового важеля, необхідно для зниження швидкості руху кнопки блоку допоміжних контактів) [10, 11], або за рахунок заміни поворотного приводу на прямоходовий привід прямої дії у вигляді паралелепіпеда, котушка якого залита компаундом [12]. При цьому незмінним залишається спосіб керування актуаторами та їх значні габаритні розміри. Застосування таких актуаторів може бути проблематично.

Перспективним напрямом удосконалення актуаторів контакторів є розробка нових або удосконалення існуючих конструкцій електромагнітів на основі використання постійних магнітів. Це дає змогу зменшити енергоспоживання актуаторів, їх габаритні розміри та вагу, при цьому досягаючи значних сил утримання. Роботи в цьому напрямку проводяться як для поворотних так і прямоходових актуаторів.

В неполяризованому моностабільному двохстрижневому електромагнітному актуаторі розташування постійного магніта NdFeB на кожному стрижні робить його поляризованим бістабільним актуатором [13], однак при цьому незмінними залишаються його габаритні розміри.

Більше робіт присвячено удосконаленню та розробці актуаторів прямоходового типу. В роботах [14-18] розглядаються прямоходові поляризовані бістабільні актуатори без поворотних пружин з прямокутною або циліндричною формою корпусу. Виконання операцій вмикання і вимикання забезпечується окремими однообмоточними котушками, а фіксація у цих положеннях відбувається за рахунок постійних магнітів NdFeB при знеструмлених обмотках. Постійні магніти розміщуються між котушкою вмикання та вимикання або тільки між котушкою вмикання. Оптимізація розмірів сердечника актуатора [14] або розташування постійних магнітів зверху та знизу котушки вмикання [15] збільшує концентрацію магнітного потоку в повітряному зазорі між якорем та сердечником, що дає змогу дещо зменшити об'єм постійних магнітів і, відповідно, габаритні розміри актуатора, залишаючи незмінними силу утримання якоря у включеному положенні.

Виконання корпусів циліндричної форми дає змогу зменшити габаритні розміри актуаторів [16] та, за рахунок двох повітряних зазорів між якорем та сердечником та між якорем та корпусом, збільшити силу утримання якоря в притягнутому стані.

В роботі [17, 18] розглядається можливість виконання рухомої та нерухомої частини актуатора з магнітотвердого матеріалу.

В роботі [17] розглядається можливість виконання корпусу електромагніта, з однообмоточною котушкою вмикання та вимикання, або його рухомої частини (якоря) [18] з магнітотвердого матеріалу.

Розглянуті електромагнітні актуатори мають дві котушки, що розташовані одна над одною, але це збільшує осьовий розмір актуатора, а відтак і контактора в цілому. Для зменшення розмірів актуаторів розглядається можливість використання бістабільного поляризованого актуатора, що є поєднанням поляризованого моностабільного електромагніта з однією котушкою і поворотною пружиною. Поворотна пружина може встановлюватися або, безпосередньо, всередині актуатора [19, 20] або входити до складу механічної системи контактора [21-23], наприклад, з розташуванням на привідному важелі.

В розглянутих електромагнітних актуаторах використовуються висококоерцетивні постійні магніти на основі композитних матеріалів, наприклад рідкоземельного металу NdFeB або SmCo. Це обумовлено більшими значеннями залишкової магнітної індукції (Br) та коерцитивної сили (Hc) у порівнянні з іншими магнітотвердими матеріалами [24], що збільшує силу, яку необхідно прикласти до рухомої частини магнітопроводу (наприклад, якоря), щоб його «відірвати» від нерухомої частини (наприклад, корпусу або сердечника електромагніта). Однак такі актуатори небажано кріпити на плоскій сталевій деталі (наприклад, на корпусі контактора), оскільки за рахунок шунтуючої дії зазначеної сталеві деталі, значно зменшиться магнітний потік між якорем і нерухомою частиною магнітопроводу і, відповідно, зменшиться тягова сила електромагніту. Для зменшення ефекту шунтування між актуатором і сталеві деталлю, на який він кріпиться, необхідно встановлювати немагнітну прокладку, що призводить до деякого збільшення осьового розміру конструкції актуатора і контактора в цілому.

Використання постійного магніта в якості з'єднувального [13, 17] або рухомого [18] елемента конструкції, розташування його між якорем та нерухомою частиною магнітопроводу [19, 21] може призвести до втрати його магнітних властивостей або руйнування [25].

Мета роботи – аналіз конструктивних особливостей електромагнітних актуаторів вакуумних контакторів середніх напруг та розробка рекомендацій щодо їх удосконалення, втілених у новій конструкції актуатора на основі використання висококоерцетивних постійних магнітів.

Бістабільний електромагнітний актуатор на базі поляризованого моностабільного електромагніта з поворотною пружиною. Враховуючи недоліки розглянутих актуаторів у вакуумних контакторах середніх напруг пропонується використання бістабільного електромагнітного актуатора на базі поляризованого моностабільного електромагніта з поворотною пружиною та можливістю його закріплення безпосередньо на

корпус контактора, на його нижню або задню стінку. Нова конструкція електромагніта з кільцеподібним елементом з немагнітного матеріалу, розташованого між корпусом і сердечником [26] представлена на рис. 1. За рахунок використання кільцеподібного елемента з немагнітного матеріалу між корпусом та сердечником електромагніта вдалося зменшити ефект шунтування між корпусом контактора та електромагнітом не збільшуючи осьовий розмір останнього.

Електромагніт містить нерухому і рухому частини магнітопроводу. Нерухома частина магнітопроводу складається з корпусу 1 кільцеподібної форми, фланця 2, сердечника 3 циліндрової ступінчастої форми, котушки 4, постійного магніту 5 і кільцеподібного елемента 6, розташованих усередині корпусу 1. Рухома частина магнітопроводу складається з якоря 7, закріпленого на штоку 8. Шток 8 на його вільній торцевій частині, протилежній торцю із закріпленням якорем 7, містить виступ 9, який дозволяє забезпечити стабільність величини його ходу при виконанні операції вмикання контактора.

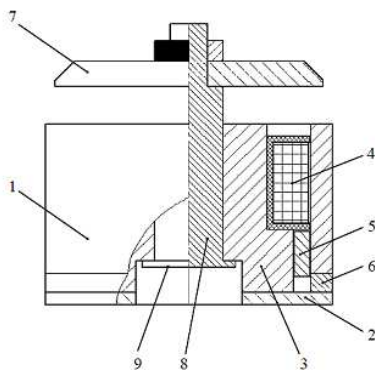


Рис. 1 Електромагніт з кільцеподібним елементом з немагнітного матеріалу, розташованого між корпусом і фланцем

Корпус 1, фланець 2, сердечник 3 і якорь 7 виконані з магнітм'якого матеріалу. Шток 8 і кільцеподібний елемент 6 виконані з немагнітного матеріалу. Постійний магніт 5 намагнічений в радіальному напрямі і виконаний з висококоерцитивного магнітотвердого матеріалу NdFeB. Фланець 2 та сердечник 3 можна виконати у вигляді однієї деталі.

Електромагніт закріплюється в корпусі вакуумного контактора, і шток 8 з'єднується з контактами вказаного контактора за допомогою зовнішнього пристрою з поворотною пружиною. Саме поворотна пружина забезпечує одно з двох стабільних положень електромагнітного актуатора при знеструмленій котушці 4, коли головні контакти вакуумного контактора розімкнені.

Для дослідного зразка (рис. 1), в пакеті FEMM були розраховані магнітні поля у відкритому положенні, при зазорі 12 мм між якорем і нерухомою частиною магнітопроводу та у включеному, при притиснутому якорі (рис. 2). За відсутності струму в обмотці розрахункові значення сили тяжіння якоря до нерухомої частини магнітопроводу при зазорі 12 мм становить всього 6,3 Н, а у притиснутому стані, сила стає

рівною 2570 Н, що цілком достатньо для підтримання контактора у включеному положенні.

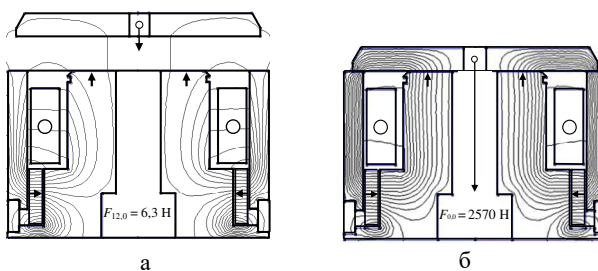


Рис. 2. Розрахункові картини магнітного поля в дослідному зразку при MPC $F_m = 0$: а – при відпущеному якорі; б – притиснутому якорі

Використання кільцевого феромагнітного шунта збільшує тягову силу при відпущеному якорі [27], але при цьому, зменшує силу утримання якоря у притиснутому стані (рис. 3).

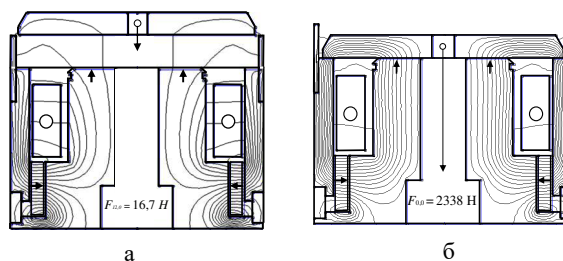


Рис. 3 Розрахункові картини магнітного поля в дослідному зразку з кільцевим феромагнітним шунтом при відпущеному (а) та притиснутому (б) якорі при MPC $F_m = 0$

Сила притискання якоря до нерухомої частини магнітопроводу в дослідному зразку при різних значеннях зазору між якорем і нерухомою частиною магнітопроводу без та з кільцевим феромагнітним шунтом представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Сила притискання якоря до нерухомої частини магнітопроводу

δ , мм	Сила притискання якоря, Н	
	без шунта	з шунтом
0	2570	2338
2	164,8	164,8
4	57,1	66,1
6	28,2	37,2
8	15,9	25,2
10	9,8	21,7
12	6,3	16,7

Збільшення величини сили притискання якоря до нерухомої частини магнітопроводу у відпущеному положенні дає змогу зменшити струм, при якому якорь почне свій рух під час вмикання контактора та відповідно загальний час його вмикання.

Замикання головних контактів вакуумного контактора здійснюють за допомогою керуючого пристрою з чотирма силовими комутаційними пристроями, в якості яких можуть використовуватися або контакти механічних комутаційних апаратів (в електро-механічних системах управління), або транзистори або гібридні системи [28] (в мікропроцесорних систе-

мах управління). Струм подається на котушку електромагніта 4, внаслідок чого в нерухомій частині магнітопроводу індукуються магнітний потік, співпадаючий по напрямку з магнітним потоком постійного магніта 5 (рис. 4, а).

Під дією сил, створюваних магнітними потоками, ярмір 7 переміщується до корпусу 1 і сердечника 3 і щільно притискається до їх торців. Одночасно з ярміром 7 переміщується шток 8 на величину його ходу, яка становить 12 мм, і за допомогою зовнішнього пристрою замикає головні контакти вакуумного контактора. Після замикання контактів керуючий пристрій відключає подачу струму на котушку 4, а замкнений стан магнітної системи забезпечує сила магнітного потоку, що індукована постійним магнітом 5 (перше стабільне положення), яка повинна перевищувати силу, створювану поворотною пружиною зовнішнього пристрою.

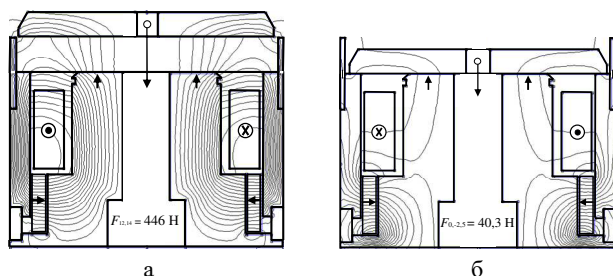


Рис. 4 Розрахункові картини магнітного поля в дослідному зразку з кільцевим феромагнітним шунтом при виконанні операції замикання (а) та розмикання (б) головних контактів при різних значеннях МРС F_m : а – $F_m = 14$ кА; б – $F_m = -2$ кА

Для розмикання головних контактів вакуумного контактора на котушку електромагніту 4 необхідно подати струм у зворотному напрямі, внаслідок чого в нерухомій частині магнітопроводу індукуються магнітний потік, не співпадаючий по напрямку з магнітним потоком постійного магніту 5 (рис. 4, б). При цьому сила утримання ярміра 7 постійним магнітом 5 зменшується і під дією поворотної пружини він переміщується у зворотному напрямі на величину ходу штока 8, головні контакти розмикаються. Після розмикання контактів керуючий пристрій відключає подачу струму на котушку 4 і за рахунок поворотної пружини зовнішнього пристрою ярмір 7 знаходиться у другому стабільному положенні.

Експериментальні дослідження бістабільного електромагнітного актуатора на базі поляризованого моностабільного електромагніта з поворотною пружиною були виконані з метою підтвердження теоретичних розрахунків. Для цього на кафедрі «Електричні апарати» НТУ «ХПІ» було розроблено та виготовлено електромагнітний актуатор, зовнішній вигляд електромагніта якого представлено на рис. 5.

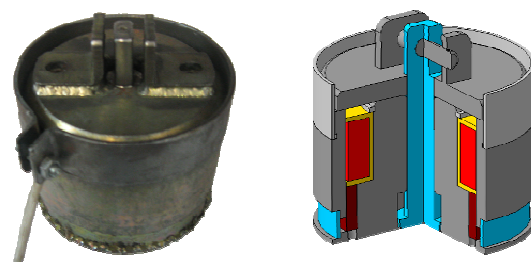


Рис. 5 Поляризований моностабільний електромагніт

Перевірка сили притискання ярміра до нерухомої частини магнітопроводу проводилась на експериментальному стенді (рис. 6). Електромагніт 1 у включеному положенні, коли ярмір притиснутий до нерухомої частини магнітопроводу, закріплювався на підставці 2, яка встановлена як показано на рисунку. Між рухомою 3 та нерухомою 4 частинами стенда встановлено динамометр 5 ДПУ-0,5-2, причому, в якості з'єднувального елемента між динамометром 5 та нерухомою частиною стенда 4 використовується шпилька 6. Стрижень 7 встановлювався співвісно зі штоком електромагніта 1 та його вільною частиною ставився на упор відносно виступу штока. Обертання ручки стенда 8 проти годинникової стрілки змушує шпильку 6 вкручуватися, створюючи силу напрям дії якої вказано на рисунку. Через стрижень 3 вона прикладається до штоку, який в свою чергу, з'єднаний ярміром електромагніта. При значенні сили, яка перевищує силу утримання ярміра постійними магнітами, ярмір «відривається» від нерухомої частини магнітопроводу. Це значення фіксується динамометром 5.

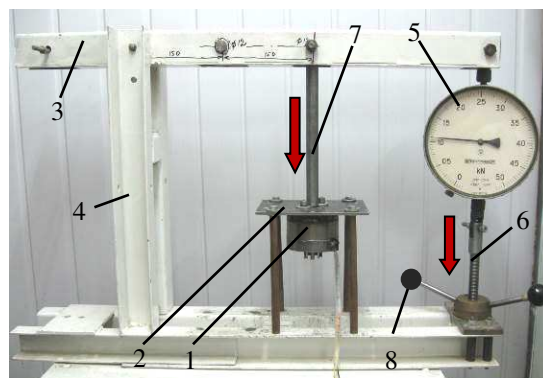


Рис. 6 Стенд для визначення сили притискання ярміра до нерухомої частини магнітопроводу

Враховуючи можливість встановлення стрижня 3 не соосно штоку електромагніту 1 експеримент проводився кілька разів. Кінцеве значення сили притискання ярміра до нерухомої частини магнітопроводу було результатом усереднення отриманих значень та становить 2200 Н (відносна похибка від результатів теоретичних розрахунків склала 5,9 %).

Для перевірки динамічних характеристик електромагнітного актуатора був спроектований та розроблений контактор у новому дизайні, який передбачає можливість встановлення електромагніта розглянутої конструкції безпосередньо на задню стінку корпусу привідного модуля (рис. 7).

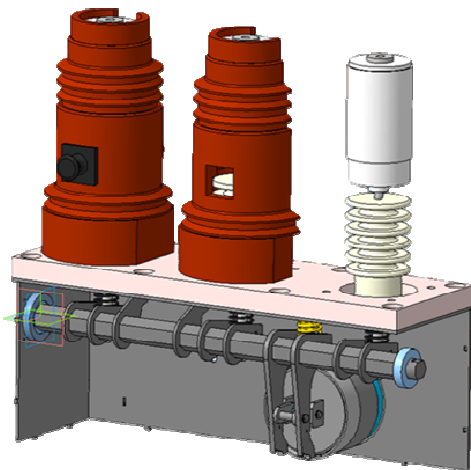


Рис. 7 Новий дизайн вакуумного контактора для мереж середніх напруг

Привідний механізм та механічна система контактора спроектовані у відповідності з вимогами виробників вакуумних переривників [29].

Керування актуатором здійснюється електро-механічною системою, схема якої показана на рис. 8.

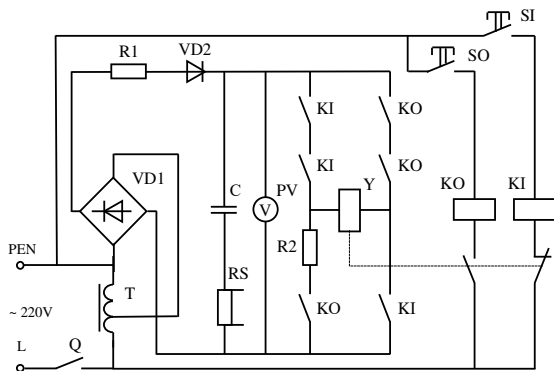


Рис. 8 Електро-механічна схема керування електромагнітним актуатором: Q – вимикач, який забезпечує захист від перевантажень і коротких замикань; T – автотрансформатор; VD1 – діодний міст; R1 – резистор, через який заряджається конденсатор C великої ємності; VD2 – захисний діод; C – електролітичний конденсатор; RS – шунт для осцилографування струму в обмотці електромагніту; PV – вольтметр (контролює напругу на конденсаторі); KI – контактор у колі вмикання електромагніту; KO – контактор у колі вимикання електромагніту; SI, SO – кнопкові вимикачі у колах контакторів KI та KO відповідно; Y – обмотка електромагніта

На рис. 9 показано фото нового вакуумного контактора для мереж середніх напруг з бістабільним електромагнітним актуатором на базі поляризованого моностабільного електромагніта з поворотною пружиною та електро-механічною системою керування, а також осцилограми струму в обмотці електромагніта під час виконання операцій вмикання та вимикання контактора.

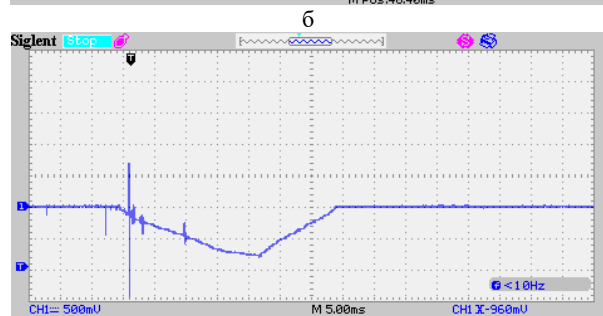
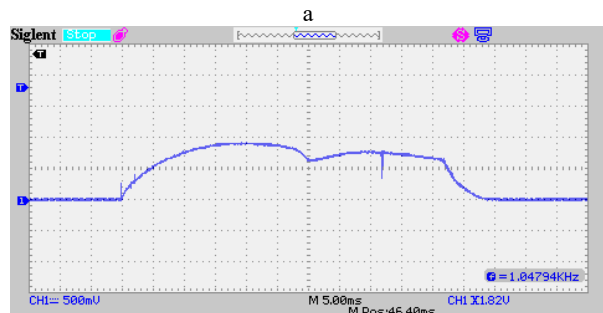


Рис. 9. Вакуумний контактор для мереж середніх напруг (а), осцилограми струму в обмотці під час операції вмикання (б) та вимикання (в) контактора

З осцилограм видно, що час вмикання контактора складає 55 мс, а вимикання 35 мс і є найменшим серед моделей вакуумних контакторів середніх напруг провідних виробників, таких як ABB (Германія), LVC (Корея), Hyundai (Корея), BMC (Індія) (наприклад, час вмикання та вимикання вакуумного контактора VSC-7 фірми ABB становить 60-90 та 40-60 мс відповідно).

Висновки.

1. Розглянута нова конструкція електромагніту з кільцеподібним елементом з немагнітного матеріалу, розташованого між корпусом і фланцем. За рахунок використання кільцеподібного елемента вдалося зменшити ефект шунтування не збільшуючи осьовий розмір електромагніта.
2. Розроблений новий корпус контактора з приводним механізмом та механічною системою, що цілком задовольняє вимогам виробників вакуумних переривників.
3. Розроблена електро-механічна система керування бістабільним актуатором з однією котушкою.
4. Проведені експериментальні дослідження нового бістабільного актуатора (поляризованого моностабільного електромагніта з поворотною пружиною) підт-

вердили теоретичні розрахунки та здатність забезпечувати спрацьовування контактора та надійне утримання контактів у замкненому стані.

Список літератури

- Клименко Б.В. Электричные аппараты. Электромеханическая аппаратура коммутации, управления та захисту. Загальний курс: навчальний посібник. – Харків: Вид-во «Точка», 2012. – 340 с.
- Евдокунин Г.А. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения / Г.А. Евдокунин, Г. Тилер. – СПб: Издательство Сизова М.П., 2000. – 114 с.
- Medium Voltage Products V-Contact Medium voltage vacuum contactors. Technical Catalogue 2009. www.abb.com.
- 3TL Vacuum Contactors Selection and Ordering Data Medium-Voltage Equipment. Catalog HG 11.21 2014. www.siemens.com/3TL.
- Medium Voltage Distribution. CPX – CLX – CBX – CVX. Vacuum contactors up to 12 kV. Fixed and withdrawable range of contactors. Catalogue 2014. www.schneider-electric.com.
- U-Series Вакуумный контактор среднего напряжения. www.hyundai-elec.com.
- Tri-MEC LS Вакуумные контакторы среднего напряжения. Электрооборудование. Catalogue 2011. eng.lsis.biz.
- Medium voltage products V-Contact VSC. Вакуумные контакторы среднего напряжения. Technical catalogue 2015. www.abb.com.
- Лелюк М.А. Структура та кінематичні схеми вакуумних контакторів середньої напруги / М.А. Лелюк // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 32. – С. 29-31.
- Толмачёв В.И., Абдулин Ю.Х., Коновалов В.П., Терентьев Г.Г. Пат. № 2367048 C1 Российская федерация МПК H01H33/666 Вакуумный контактор // № 2008124084/09; заявл. 11.06.2008; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 25. – 5 с.: 2 ил.
- Толмачёв В.И., Абдулин Ю.Х., Коновалов В.П., Терентьев Г.Г. Пат. № 2367049 C1 Российская федерация МПК H01H33/666 Вакуумный контактор // № 2008124173/09; заявл. 11.06.2008; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 25. – 7 с.: 4 ил.
- Прохоренко Е.В., Одокиенко С.И. Пат. № 2415488 C1 Российская федерация МПК H01H33/666, E21F17/04 Вакуумный контактор // № 2009125892/03; заявл. 06.07.2009; опубл. 27.03.2011, Бюл. № 9. – 8 с.: 3 ил.
- Fang S.H., Lin H.Y., Ho S.L., Wang X.B., Jin P. Characteristic investigation of permanent magnet actuator for vacuum contactors operating with anintrinsically safe low voltage. Science China Technological Sciences, (2012), vol. 55, No. 6, 1688-1694.
- Yoo Y.M., Kim D.K., Kwon B.I. Optimal design of a permanent magnetic actuator for vacuum circuit breaker using FEM. Journal of Electrical Engineering & Technology, (2006), vol. 1, No. 1, 92-97.
- Hong S.K., Ro J.S., Jung H.K. Optimal design of a novel permanent magnetic actuator using evolutionary strategy algorithm and kriging meta-model. Journal of Electrical Engineering & Technology, (2014), vol. 9, No. 2, 471-477.
- Деклараційний патент України № 70574A МПК: H01F7/08, H01F7/16 Двопозиційний електромагніт / Клименко Б.В., Бугайчук В.М. – Заявл. 09.12.2003 р.; опубл. 15.10.2004, Бюл. № 10.
- Saeed Jalilzadeh, Arash Shabani, Mehdi Zanjani New Design for Electromagnetic Actuator of the VCB and Simulation of Its Static and Dynamic Behavior. 2nd IEEE International Conference on Power and Energy –PECon 2008, Johor Baharu, Malaysia, December 2008.
- Yatche I., Hinov K., Gueorgiev V. Dynamic characteristics of a bistable linear actuator with moving permanent magnet. Serbian Journal of Electrical Engineering, (2004), vol. 1, No. 2, 207-214.
- Wang X., Lin H., Ho S.L., Fang S., Jin P. Analysis of dynamic characteristics of permanent magnet contactor with sensorless displacement profile control. IEEE Trans. Magn., (2010), vol. 46, No. 6, 1633-1636.
- Zhang J., Cai C., Wu C. Design and analysis of a new permanent magnet actuator for medium voltage vacuum circuit breakers. Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications, ISSN: 1662-7482, (2013), vol. 313-314, 20-26.
- Kim S.H., Park H.J., Ro J.S., Jung H.K. Design and analysis method for a DC magnetic contactor with a permanent magnet. Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems, (2014), vol. 3, No. 4, 481-486.
- Radulian, A., Mocioi, N. Numerical Modelling of an Electromagnetic Actuator for Vacuum Contactors. International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering – EPE 2014, Iasi, Romania, October 2014.
- Деклараційний патент України № 15210 МПК: H01H 33/42; H01F 7/00 Електромагнітний привід / Клименко Б.В., Вировець С.В., Форкун Я.Б. – Заявл. 27.12.2005 р.; опубл. 15.06.2006, Бюл. № 6.
- <http://www.magnetosgerais.com.br/magnetismo>, 2018. Magnetos Gerais - Imãs e Equipamentos Magnéticos.
- Trout S. R., Wooten G. D. Selection and Specification of Permanent Magnet Materials. In: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufaturing and Coil Winding Technology Conference (Sept. 2003: Indianapolis) Proceedings. Indianapolis, 1994. p. 20-23.
- Патент України № 117000 МПК: H01H 33/42, H01F 7/06 Електромагнітний привід / Бугайчук В.М., Клименко Б.В., Лелюк М.А. / № u201613627; заявл. 30.12.2016; опубл. 12.06.2017, Бюл. № 11. – 11 с.: 12 іл.
- Чеплюк А.А., Вировець С.В. Анализ влияния ферромагнитных шунтов в рабочем зазоре на тяговые усилия в электромагните с однопозиционной магнитной защелкой. // Електротехніка і електромеханіка. – 2008, №1. – С. 15-17.
- Клименко Б.В., Ересько А.В., Варшамова И.С., Лелюк Н.А. Исследование возможности применения интерфейсных реле в системах гибридной коммутации обмоток бистабильных актуаторов// Електротехніка і електромеханіка, 2016, № 1. – С. 21-25.
- <http://www.ecvv.com/product/2145016.html>.

References (transliterated)

- Klymenko B.V. Elektrichni aparaty. Elektromekhanichna aparatura komutatsii, keruvannia ta zakhystu. Zahalnyi kurs: navchalnyi posibnyk. Kharkiv: Vyd-vo «Tochka», 2012. 340 p.
- Evdokunin G.A., Tiler G. Sovremennaya vakuumnaya kommutatsionnaya tehnika dlya setey srednego napryazheniya. SPb: Izdatelstvo Sizova M.P., 2000. – 114 p
- Medium Voltage Products V-Contact Medium voltage vacuum contactors. Technical Catalogue 2009. www.abb.com.
- 3TL Vacuum Contactors Selection and Ordering Data Medium-Voltage Equipment. Catalog HG 11.21 2014. www.siemens.com/3TL.
- Medium Voltage Distribution. CPX – CLX – CBX – CVX. Vacuum contactors up to 12 kV. Fixed and withdrawable range of contactors. Catalogue 2014. www.schneider-electric.com.
- U-Series Vakuumnyi kontaktor srednego napryazheniya. www.hyundai-elec.com.
- Tri-MEC LS Vakuumnye kontaktory srednego napryazheniya. Elektrooborudovanie. Catalogue 2011. eng.lsis.biz.
- Medium voltage products V-Contact VSC. Vakuumnye kontaktory srednego napryazheniya. Technical catalogue 2015. www.abb.com.
- Leliuk M.A. Struktura ta kinematychni skhemy vakuumnykh kontaktoriv srednoi napruhy. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». Kharkiv: NTU «KhPI». 2016. 32. pp. 29-31.
- TolmachYov V.I., Abdulin Yu.H., Konovalov V.P., Terentev G.G. Pat. 2367048 C1 Rossiyskaya federatsiya MPK H01H33/666 Vakuumnyi kontaktor. 2008124084/09; yayavl. 11.06.2008; opubl. 10.09.2009, Byul. 25. 5 p.
- TolmachYov V.I., Abdulin Yu.H., Konovalov V.P., Terentev G.G. Pat. 2367049 C1 Rossiyskaya federatsiya MPK H01H33/666 Vakuumnyi kontaktor. 2008124173/09; yayavl. 11.06.2008; opubl. 10.09.2009, Byul. 25. 7 s.
- Prohorenko E.V., Odokienko S.I. Pat. 2415488 C1 Rossiyskaya federatsiya MPK H01H33/666, E21F17/04 Vakuumnyi kontaktor. 2009125892/03; yayavl. 06.07.2009; opubl. 27.03.2011, Byul. 9. 8 s.
- Fang S.H., Lin H.Y., Ho S.L., Wang X.B., Jin P. Characteristic investigation of permanent magnet actuator for vacuum contactors operating with anintrinsically safe low voltage. Science China

- Technological Sciences, (2012), vol. 55, No. 6, 1688-1694.
14. Yoo Y.M., Kim D.K., Kwon B.I. Optimal design of a permanent magnetic actuator for vacuum circuit breaker using FEM. Journal of Electrical Engineering & Technology, (2006), vol. 1, No. 1, 92-97.
 15. Hong S.K., Ro J.S., Jung H.K. Optimal design of a novel permanent magnetic actuator using evolutionary strategy algorithm and kriging meta-model. Journal of Electrical Engineering & Technology, (2014), vol. 9, No. 2, 471-477.
 16. Deklaratsiyni patent Ukrainy № 70574A MPK: H01F7/08, H01F7/16 Dvopozitsiyni elektromahnit. Klymenko B.V., Buhai-chuk V.M. – Zaiavl. 09.12.2003 r.; opubl. 15.10.2004, Biul. № 10.
 17. Saeed Jalilzadeh, Arash Shabani, Mehdi Zanjani New Design for Electromagnetic Actuator of the VCB and Simulation of Its Static and Dynamic Behavior. 2nd IEEE International Conference on Power and Energy – PECon 2008, Johor Baharu, Malaysia, December 2008.
 18. Yatche I., Hinov K., Gueorgiev V. Dynamic characteristics of a bistable linear actuator with moving permanent magnet. Serbian Journal of Electrical Engineering, (2004), vol. 1, No. 2, 207-214.
 19. Wang X., Lin H., Ho S.L., Fang S., Jin P. Analysis of dynamic characteristics of permanent magnet contactor with sensorless displacement profile control. IEEE Trans. Magn., (2010), vol. 46, No. 6, 1633-1636.
 20. Zhang J., Cai C., Wu C. Design and analysis of a new permanent magnet actuator for medium voltage vacuum circuit breakers. Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications, ISSN: 1662-7482, (2013), vol. 313-314, 20-26.
 21. Kim S.H., Park H.J., Ro J.S., Jung H.K. Design and analysis method for a DC magnetic contactor with a permanent mag-net. Journal of International Conference on Electrical Ma-chines and Systems, (2014), vol. 3, No. 4, 481-486.
 22. Radulian, A., Mocioi, N. Numerical Modelling of an Electromagnetic Actuator for Vacuum Contactors. International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering – EPE 2014, Iasi, Romania, October 2014.
 23. Deklaratsiyni patent Ukrainy № 15210 MPK: H01H 33/42; H01F 7/00 Elektromahnitnyi pryvid. Klymenko B.V., Vyrovets S.V., Forkun Ya.B. – Zaiavl. 27.12.2005 r.; opubl. 15.06.2006, Biul. 6.
 24. <http://www.magnetosgerais.com.br/magnetismo>, 2018. Magnetos Gerais - Imãs e Equipamentos Magnéticos.
 25. Trout S. R., Wooten G. D. Selection and Specification of Permanent Magnet Materials. In: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufac-turing and Coil Winding Technology Conference (Sept. 2003: Indianapolis) Proceed-ings. Indianapolis, 1994. p. 20-23.
 26. Patent Ukrainy № 117000 MPK: H01H 33/42, H01F 7/06 Elektromahnitnyi pryvid / Buhai-chuk V.M., Klymenko B.V., Leliuk M.A. № u201613627; zaiavl. 30.12.2016; opubl. 12.06.2017, Biul. № 11.– 11 s.: 12 il.
 27. Chepelyuk A.A., Vyrovets S.V. Analiz vliyaniya ferromagnitnykh shuntov v rabochem zazore na tyagovyye usiliya v elektromagnitnykh sistemakh gibridnoy kommutatsii obmotok bistabilnykh aktuatorov. Elektrotehnika i elektromekhanika. 2008, 1. Pp. 15-17.
 28. Klimenko B.V., Eresko A.V., Varshamova I.S., Lelyuk N.A. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya interfeysnykh rele v sistemakh gibridnoy kommutatsii obmotok bistabilnykh aktuatorov. Elektrotehnika i elektromekhanika, 2016, 1. pp. 21-25.
 29. <http://www.ecvv.com/product/2145016.html>.

Надійшла (received) 18.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах /About the Authors

Клименко Борис Володимирович (Клименко Борис Владимирович, Klimenko Boris Vladimirovich) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри електричних апарати, м. Харків, Україна;

Лелюк Микола Анатолійович (Лелюк Николай Анатольевич, Leliuk Mykola Anatoliyovych) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувач навчальної лабораторії кафедри електричних апарати, м. Харків, Україна; e-mail: lelyuk.nik@gmail.com.

Бугайчук Віктор Михайлович (Бугайчук Виктор Михайлович, Bugaichuk Viktor Mikhailovich) – голова наглядової ради ТОВ "АВМ-Ампер", м. Кременчук, Україна

Форкун Яна Борисівна (Форкун Яна Борисовна, Forkun Yana Borisovna) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, доцент кафедри теоретичної та загальної електротехніки, м. Харків, Україна

О.Г. КОРОЛЬ, Б.В. КЛИМЕНКО, О.В. ЕРЕСЬКО

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ПРИСТРОЇ ФОРСОВАНОГО КЕРУВАННЯ МОНОСТАБІЛЬНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТОМ ВАКУУМНОГО КОНТАКТОРА

Проведено огляд систем форсованого керування з пусковими і утримуючими обмотками. Виявлено, що існує велика кількість різноманітних систем форсованого керування електромагнітами. Встановлено, що у контакторах найчастіше застосовуються системи форсованого керування з пусковими та утримуючими обмотками. Розглянуті переваги та недоліки таких систем форсованого керування. Виявлено, що найбільш розповсюджений пристрій форсованого керування моностабільними електромагнітами містить дві котушки з двома обмотками: пусковою (В – buster) і утримуючою (Н – hold), та нормально-замкнений контакт блоку допоміжних контактів, а також діодний мост, діод та конденсатор. Такий пристрій широко застосовується багатьма провідними виробниками вакуумних контакторів, таких як: ABB, Siemens, Alstom (Areva), Schneider Electric, Eaton, Електродинаміка тощо. Проведено експериментальні дослідження перехідних процесів в одному з комутаційних апаратів – вакуумному контакторі, у якому застосовано даний пристрій, а саме на серійному триполюсному вакуумному контакторі КВТн-250/1,14 виробництва компанії «Електродинаміка». Було проведено дві серії дослідів: перша серія дослідів проведена для існуючої системи форсованого керування, а друга серія дослідів – для системи форсованого керування в якій було закорочено діод, анод і катод якого були з'єднані з кінцями утримуючих обмоток відповідно першої і другої котушок електромагніта. Дослідження проведені за допомогою цифрового двопроменевого осцилографа SIGLENT SDS1052. Були отримані осцилограми струму і напруги в пусковій та утримуючій обмотках при різних значеннях напруги $U = 220, 180, 150$ В та при живленні від джерела постійної напруги, а потім від джерела змінної напруги. Проведено аналіз експериментальних досліджень. Виявлені переваги та недоліки пристрою форсованого керування. Виявлено, що комутаційний апарат (вакуумний контактор КВТн-250/1,14) не спрацює при неприпустимому зниженні напруги, що призведе до перегріву котушки і вона вийде з ладу. Зроблені висновки та показані можливості вдосконалення пристрою форсованого керування моностабільними електромагнітами.

Ключові слова: вакуумний контактор, актуатор, моностабільний електромагніт, пристрій форсованого керування, пускова обмотка, утримуюча обмотка.

Е. Г. КОРОЛЬ, Б.В. КЛИМЕНКО, А.В. ЕРЕСЬКО

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В УСТРОЙСТВЕ ФОРСИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ МОНОСТАБИЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТОМ ВАКУУМНОГО КОНТАКТОРА

Проведен обзор систем форсированного управления с пусковыми и удерживающими обмотками. Обнаружено, что существует большое количество различных систем форсированного управления электромагнитами. Установлено, что в контакторах чаще всего применяются системы форсированного управления с пусковыми и удерживающими обмотками. Рассмотрены преимущества и недостатки таких систем форсированного управления. Обнаружено, что наиболее распространено устройство форсированного управления моностабильными электромагнитами содержит две катушки с двумя обмотками: пусковой (В – buster) и удерживающей (Н – hold), и нормально-замкнутый контакт блока вспомогательных контактов, а также диодный мост, диод и конденсатор. Такое устройство широко применяется многими ведущими производителями вакуумных контакторов, таких как: ABB, Siemens, Alstom (Areva), Schneider Electric, Eaton, Электродинамика и другими. Проведены экспериментальные исследования переходных процессов в одном из коммутационных аппаратов – вакуумном контакторе, в котором применено данное устройство, а именно, на серийном трехполюсном вакуумном контакторе КВТн-250 / 1,14 производства компании «Электродинамика». Было проведено две серии опытов: первая серия опытов проведена для существующей системы форсированного управления, а вторая серия опытов – для системы форсированного управления, в которой был закорочен диод, анод и катод которого были соединены с концами удерживающих обмоток соответственно первой и второй катушек электромагнита. Исследования проводились с помощью цифрового двухлучевого осциллографа SIGLENT SDS1052. Были получены осциллограммы тока и напряжения в пусковой и удерживающей обмотках при различных значениях напряжения $U = 220, 180, 150$ В, при питании от источника постоянного напряжения, а затем при питании от источника переменного напряжения. Проведен анализ экспериментальных исследований. Выявлены преимущества и недостатки устройства форсированного управления. Выведено, что коммутационный аппарат (вакуумный контактор КВТн-250/1,14) не сработает при недопустимом снижении напряжения, что приведет к перегреву катушки и она выйдет из строя. Сделаны выводы и показаны возможности совершенствования устройства форсированного управления моностабильными электромагнитами.

Ключевые слова: вакуумный контактор, актуатор, моностабильный электромагнит, устройство форсированного управления, пусковая обмотка, удерживающая обмотка.

O.G. KOROL, B.V. KLIMENKO, O.V. ERESKO

INVESTIGATIONS OF TRANSIENTS IN THE DEVICE OF FORCED CONTROL OF THE VACUUM CONTACTOR MONOSTABLE ELECTROMAGNET

A review of systems of forced control with buster and holding windings is carried out. It is found that there is a large number of various systems of forced control of electromagnets. It has been established that in the contactors systems of forced control with buster and holding windings are most often used. The advantages and disadvantages of such systems of forced control are considered. It has been discovered that the most commonly used forced control device for monostable electromagnets consists of two coils with two windings: buster (B) and holding (H), and a normally closed contact of the auxiliary contact block, as well as a diode rectifier, a diode and a capacitor. Such a device is widely used by many leading manufacturers of vacuum contactors such as: ABB, Siemens, Alstom (Areva), Schneider Electric, Eaton, Electrodynamics, etc. Experimental studies of transients in one of the switching devices – the vacuum contactor in which this device is used, namely, the serial three-pole vacuum contactor КВТн-250/1,14 produced by Electrodynamics Company are carried out. Two series of experiments were conducted: the first series of experiments was conducted for the existing system of forced control, and the second series of experiments – for a forced control system in which the diode was shortened, the anode and cathode of which were connected with the ends of the retaining windings, respectively, of the first and the second coils of the electromagnet. The research was carried out using a digital two-beam oscilloscope SIGLENT SDS1052. The oscillograms of current and voltage in the buster and holding windings are obtained at various voltage values $U = 220, 180, 150$ V, and when powered from a source of constant voltage, and then from a source of alternating voltage. The analysis of experimental research is carried out. The advantages and disadvantages of the forced control device are revealed. It is revealed that the switching device (vacuum contactor КВТн-250/1,14) will not operate at an unacceptable voltage drop, which will lead to over-

© О.Г. Король, Б.В. Клименко, О.В. Ереско, 2018

heating of the coil, and it will fail. The conclusions are made and possibilities of perfection of the forced control device for monostable electromagnets are shown.

Key words: vacuum contactor, actuator, monostable electromagnet, forced control device, buster winding, holding winding.

Вступ. Електродвигуни є найбільш розповсюдженими споживачами електричної енергії, вони споживають приблизно дві третини від всієї електроенергії, що виробляється в країні [1]. Основним комутаційним апаратом, що здійснює підключення електродвигуна до мережі живлення, є контактор. Відомо, що контактор називають електромеханічний комутаційний апарат лише з одним положенням спокою, з не ручним приводом, який спроможний вмикати, проводити та вимикати струми у нормальних умовах кола, а також в умовах перевантажень [2]. Переважна більшість контакторів застосовуються у колах низької та середньої напруги здебільшого для керування електродвигунами, системами освітлення, тощо. Контакттори бувають повітряні, газові, вакуумні тощо, в залежності від середовища (повітря, газ, вакуум, тощо), в якому знаходяться головні контакти. Контакттори поділяють також у залежності від способу, яким забезпечується сила для вмикання головних контактів, на електромагнітні, пневматичні та електропневматичні, а в залежності від струму головного кола на контактори постійного та змінного струму. Електромагнітні контактори приводяться в дію за допомогою електромагнітів, а пневматичні та електропневматичні – за допомогою пневматичних приводів, зазвичай поршневих, рідше – мембранних.

С кожним роком постійно збільшується попит на вакуумні контактори, за рахунок того, що вони мають високу надійність і герметичність, оскільки всередину вакуумних переривників, які мають невеликі габаритні розміри, на контакти не потрапляє пил та інші забруднення. Вакуумні контактори – це зазвичай триполюсні контактори змінного струму, що призначені для керування асинхронними електродвигунами. Вони експлуатуються на вугільних та інших гірничодобувних підприємствах з підвищеним рівнем запиленості, в хімічній, нафтогазовій промисловості тощо, взагалі, у будь-яких умовах, де потрібна безпечна локалізація електричної дуги, що виникає на контактах при комутації потужних навантаж.

У вакуумних контакторах у якості приводів, для зменшення їхніх розмірів та споживаної потужності, а також для підвищення швидкодії, найчастіше застосовуються форсовані електромагнітні системи, що складаються з актуаторів – моностабільних електромагнітів разом з поворотними пружинами та пристроїв форсованого керування. Відомо велика кількість різноманітних систем форсованого керування електромагнітами, але саме у контакторах найчастіше застосовуються системи форсованого керування з пусковими та утримуючими обмотками [3].

Огляд систем форсованого керування з пусковими та утримуючими обмотками. Як впливає із назви, форсовані системи з пусковими і утримуючими обмотками повинні містити не менш двох неоднакових обмоток. Одну обмотку прийнято називати пусковою, а другу – утримуючою. Пускова обмотка має відносно мале число витків та намотана проводом великого поперечного перерізу, відтак вона розвиває значну МРС,

але у ній виділяється велика кількість енергії. На відміну від пускової обмотки утримуюча навпаки має велике число витків та намотана проводом малого перерізу, в ній виділяється невелика кількість енергії, а МРС цієї обмотки значно менше ніж у пускової. Втім, цього значення МРС достатньо, щоб утримувати якір в притягнутому положенні [3]. Пускова обмотка має працювати короткочасно, а утримуюча – тривало. Зазвичай обидві обмотки намотуються одна на одну в одній котушці.

На рис. 1а показана схема системи форсованого керування [4], що містить дві обмотки: пускову (В – buster) і утримуючу (Н – hold), та нормально-замкнений контакт. Ця система успішно застосовується у багатьох галузях вже багато років.

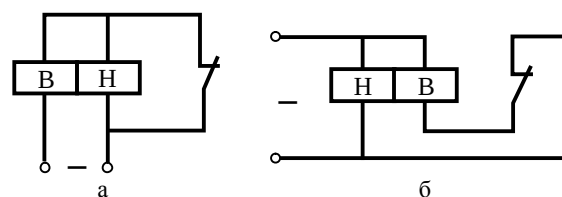


Рис. 1. Схеми систем форсованого керування:

а – з послідовним з'єднанням пускової та утримуючої обмоток;
б – паралельним з'єднанням пускової та утримуючої обмоток

В момент включення повна напруга джерела живлення прикладається до пускової обмотки, що забезпечує значну МРС. При цьому струм, що тече через пускову обмотку, спричиняє спрацювання привідного електромагніта, який розмикає допоміжний контакт, внаслідок чого послідовно з пусковою включається утримуюча обмотка, внаслідок чого струм в обмотках зменшується до допустимого значення.

Недоліками цієї системи форсованого керування є такі:

- наявність розмикального контакту, що знижує надійність роботи системи внаслідок підвищеного зносу контакту під час горіння електричної дуги;
- відносно низька швидкодія через існування в період пуску замкнутого контуру, утвореного утримуючою обмоткою і розмикальним контактом;
- недостатня експлуатаційна надійність пристрою, що обумовлена відсутністю захисту від неприпустимого зниження напруги, коли комутаційний апарат може не спрацювати і контакт не розімкнеться, внаслідок чого відбудеться збільшення пускового струму на пускових обмотках і вони можуть бути пошкоджені внаслідок перегріву.

Також широко застосовується система форсованого керування [5], що містить пускову та утримуючу обмотки. У цій системі обмотки з'єднані паралельно, а нормально-замкнений контакт, включений послідовно з пусковою обмоткою (рис. 1б).

У цій системі в момент пуску використовуються обидві обмотки, а після спрацювання електромагніта розмикається нормально-замкнений контакт і пускова обмотка вимикається.

На додаток до недоліків, притаманних системі, що зображена на рис. 1а, у цій системі МРС в режимі утримання зменшується, тому що пускова обмотка в цьому режимі не використовується, й збільшується напруга відпадання.

У комутаційних апаратах з електромагнітами, які мають два сердечника й дві котушки, може бути застосована система форсованого керування [6], схема якої показана на рис. 2. Обмотки з'єднані за схемою невірноваженого мосту, а нормально-замкнений контакт включений у його діагональ.

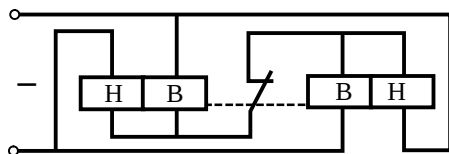


Рис. 2. Схема форсованої системи керування з двома пусковими та двома утримуючими обмотками [6]

Додатковим недоліком цього пристрою (на додаток до тих, що були вказані вище) є те, що до кожної з утримуючих обмоток після розмикання контакту прикладається майже повна напруга джерела живлення, що потребує застосування в цих обмотках дуже тонкого проводу з великою кількістю витків, а до пускових обмоток в період пуску прикладається лише половини напруги джерела живлення, що змушує застосовувати дуже товстий обмотувальний провід.

Найбільш розповсюдженою системою форсованого керування, яка застосовується провідними виробниками вакуумних контакторів, таких як ABB, Siemens, Alstom (Areva), Schneider Electric, Eaton тощо у сучасних контакторах низької та середньої напруги з моностабільними електромагнітами, є система, схема якої показана на рис. 3. Ця схема не приводиться у каталогах виробників, вказаних вище, але вона міститься у каталозі вітчизняного виробника – НПП Електродинаміка [8, 9]

Завдяки наявності діодного мосту VD1 на вхід пристрою керування може подаватися як змінна, так і постійна напруга. На вході діодного мосту VD1 для захисту від перенапруг встановлено варистор RV. В період пуску обидві пускові обмотки з'єднані послідовно, а утримуючі обмотки закорочені розмикальним контактом. Під час спрацювання контактора цих обмотках наводиться ЕРС, але діод VD2 перешкоджає проходженню зустрічного струму. При спрацюванні контактора допоміжний контакт розмикається, у цей час конденсатор С сприяє гасінню дуги на допоміжному контакті, а після гасіння дуги утримуючі обмотки виявляються приєднаними послідовно до пускових.

Як вже зазначалося, розглянута система форсованого керування широко застосовується багатьма виробниками, але нам не відомі публікації, у яких би досліджувалися процеси, що відбуваються у цій системі, аналізувалися її переваги та недоліки.

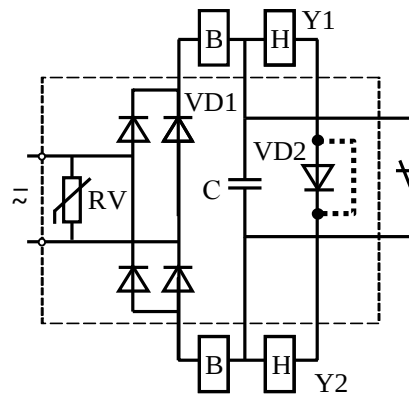


Рис. 3. Схема електромеханічної форсованої системи керування вакуумного контактора

Метою роботи є експериментальні дослідження процесів у пристрої (системі) форсованого керування моностабільним електромагнітом вакуумного контактора, який є одним з найбільш розповсюджених в комутаційних апаратах, аби виявити переваги та недоліки цього пристрою (системи), а також показати перспективи вдосконалення цієї системи.

Досліджуваний контактор. Експериментальні дослідження виконувалися на серійному триполюсному вакуумному контакторі КВТн-250/1,14 виробництва компанії «Електродинаміка» [7]. На рис. 5 наведено фото цього контактора та позначено такі його елементи: 1 – вакуумні переривники, 2 – термінали, 3 – котушки, 4 – поворотна пружина, 5 – блоки допоміжних контактів, 6 – пристрій керування, 7 – монтажні отвори.

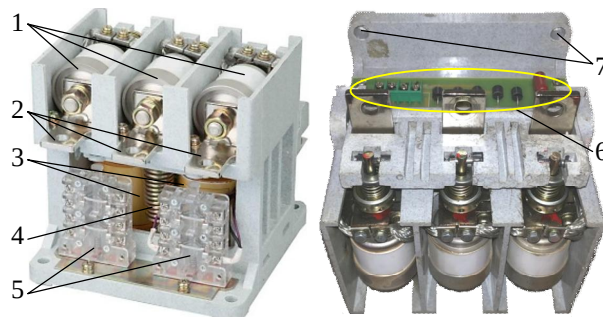


Рис. 5. Зовнішній вигляд досліджуваного контактора КВТн-250/1,14

У досліджуваному контакторі застосовано серійний пристрій керування контактора КВТн-250/1,14 (рис. 6), у якому було встановлено дві стаціонарні частини штепсельних рознімачів з штировими контактами (1 та 4) для приєднання обмоток двох котушок, до виводів яких було приєднано відповідні знімні частини рознімачів з гніздовими контактами, а також два резистори, які виконували функції вимірювальних шунтів у колах пускової обмотки однієї з котушок (3) та утримуючої обмотки цієї ж котушки (4).

Схема стенду для дослідження перехідних процесів в пристрої (системі) форсованого керування моностабільним електромагнітом шахтного контактора КВТн-250/1,14 виробництва компанії «Електродинаміка» зображена на рис. 7.

Позначення на схемі: Q1 – вимикач, який підклю-

чає джерело змінної напруги до схеми живлення стаціонарного столу; HL1 – лампочка, яка сигналізує про наявність живлення стаціонарного столу; X3 – розетка, до якої підключається за допомогою електричної вилки стенд з контактором шахтним КВТн-250/1,14 заводу «Електродинаміка»; Q2 – вимикач, який підключає джерело змінної напруги до схеми живлення стенду; HL2 – лампочка, яка сигналізує про наявність живлення схеми стенду; R1, R2, R3, R4 – резистори подільників напруги; T – автотрансформатор для регулювання величини напруги U; X1 – штекер для підключення до автотрансформатора T; PV – вольтметр; Q3 – вимикач, який підключає джерело змінної напруги до схеми керування вакуумного контактора; X2 – розетка, до якої підключається за допомогою електричної вилки осцилограф.

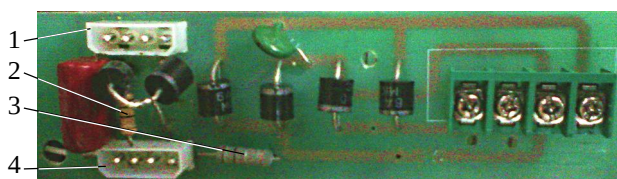


Рис. 6. Пристрій керування досліджуваного контактора

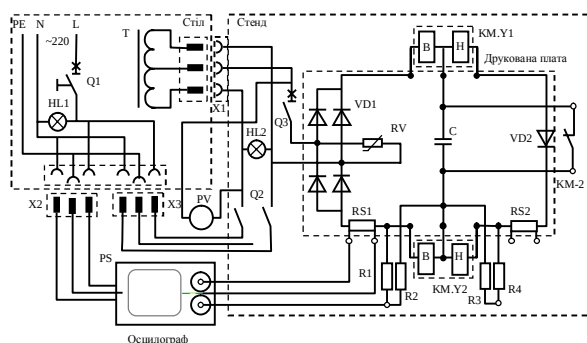


Рис. 7. Схема стенду для дослідження перехідних процесів в пристрої (системі) форсованого керування моностабільним електромагнітом досліджуваного контактора КВТн-250/1,14

Результати досліджень процесів в системі форсованого керування моностабільним електромагнітом контактора КВТн-250/1,14.

В процесі досліджень, які виконувалися із застосуванням двохпроменевого цифрового осцилографа SIGLENT SDS1052, було проведено дві серії дослідів.

Перша серія дослідів була проведена для існуючої системи форсованого керування, схема якої представлена на рис. 4. У другій серії дослідів діод VD2, анод і катод якого були з'єднані з кінцями утримуючих обмоток відповідно першої і другої котушок електромагніта, було закорочено (див. рис. 4 пунктирна лінія).

У досліді на місці діода VD2 застосовувався "штатний" діод 6А10, який відноситься до діодів загального призначення, що випростують струми в колах до 6 А з напругою 1000 В.

Отримані осцилограми струму і напруги в пусковій обмотці (рис. 8) і утримуючій обмотці (рис. 9), під час виконання операції включення, при змінній напрузі при $U = 220, 180, 150$ В для системи форсова-

ного керування, в якій є діод VD2 (рис. 4) та в якій його було закорочено (рис. 4 пунктирна лінія).

Отримані осцилограми струму і напруги в пусковій обмотці (рис. 10) і утримуючій обмотці (рис. 11), під час виконання операції включення, при постійній напрузі при $U = 220, 180, 150$ В для системи форсованого керування, в якій є діод VD2 (рис. 4) та в якій його було закорочено (рис. 4 пунктирна лінія).

Згідно отриманих осцилограм було встановлено час спрацьовування електромагніта (табл. 1).

Таблиця 1 – Час спрацьовування електромагніта

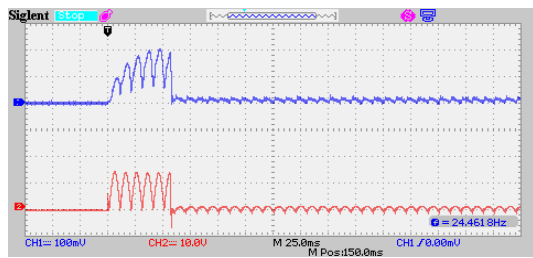
За наявності діода VD2		
~ 220 В	~ 180 В	~ 150 В
55 мс	85 мс	не спрацював
Без діода VD2		
~ 220 В	~ 180 В	~ 150 В
145 мс	не спрацював	не спрацював
За наявності діода VD2		
- 220 В	- 180 В	- 150 В
52 мс	95 мс	не спрацював
Без діода VD2		
- 220 В	- 180 В	- 150 В
115 мс	110 мс	не спрацював

Аналізуючи наведені результати експериментальних досліджень, звернімо увагу на такі моменти:

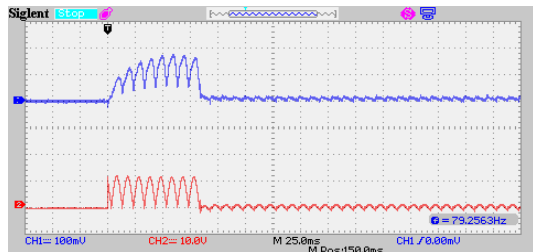
1. При живленні системи керування від джерела постійного струму, в період пуску в утримуючих обмотках струм взагалі не тече, а при живленні від джерела змінного струму, коли змінна складова ЕРС в утримуючих обмотках є додатною діод VD2 закривається і струм в утримуючих обмотках не тече, натомість, коли змінна складова ЕРС в утримуючих обмотках стає від'ємною, у цих обмотках проходить струм, але у напрямі, який співпадає з напрямом струму у пускових обмотках, що пришвидшує процес спрацьовування.

2. При живленні від джерела постійного струму U – це значення напруги на вході діодного мосту, на виході якого напруга буде меншою приблизно на 2 В меншою за рахунок падіння напруги на діодах. При живленні від джерела змінного струму U – це середньоквадратичне значення напруги на вході діодного мосту, на виході якого утворюється двонапівперіодна випростана напруга, яка має постійну та змінну складові, мінус падіння напруги на діодах. Постійна складова – це середнє значення напруги, яке приблизно в 1,11 разів менше за U , а відтак, середнє значення струму настільки ж менше значення струму при живленні від джерела постійного струму, що негативно впливає на тягову силу, а відтак, і на швидкість апарата. З іншого боку, у перехідних режимах на силу може суттєво впливати й змінна складова струму, яка може бути суттєвою у колах з відносно невеликою індуктивністю, як у пускової обмотки в період пуску, що може збільшувати тягову силу й підвищувати швидкість апарата.

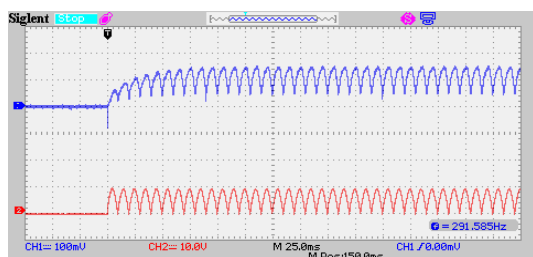
В момент підключення системи керування до джерела живлення спостерігаються значні виплески напруги на виводах утримуючої обмотки. Наприклад, в обмотках, призначених для застосування у мережах живлення з номінальною напругою 220 В значення перенапруги в одній обмотці може сягати 600 В й



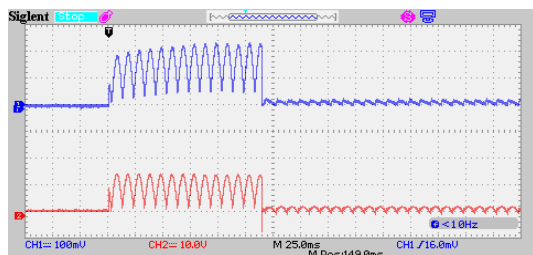
а



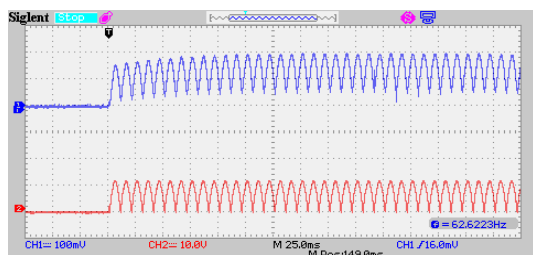
б



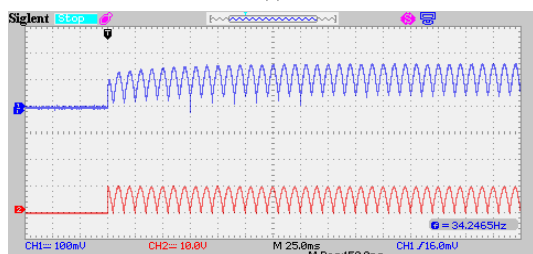
в



г

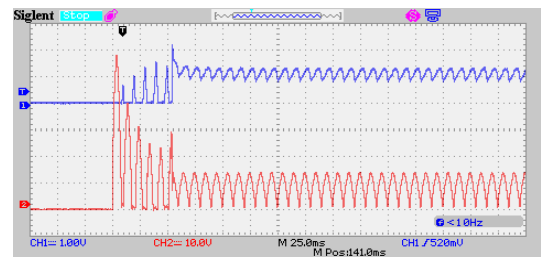


д

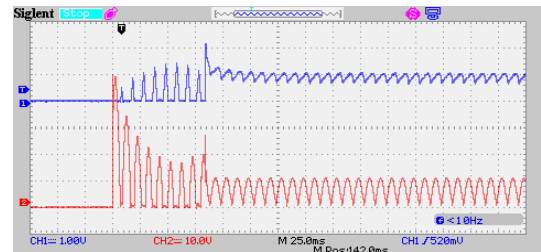


е

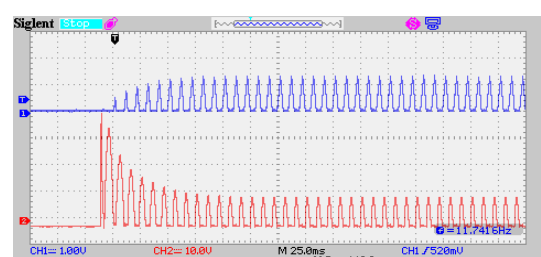
Рис. 8. Динамічні характеристики струму і напруги в пусковій обмотці при живленні від джерела змінної напруги: а – $U = 220$ В (з діодом VD2); б – $U = 180$ В (з діодом VD2); в – $U = 150$ В (з діодом VD2); г – $U = 220$ В (без діода VD2); д – $U = 180$ В (без діода VD2); е – $U = 150$ В (без діода VD2)



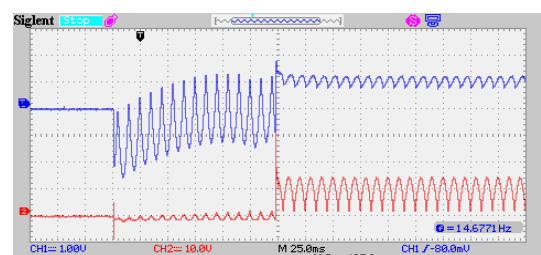
а



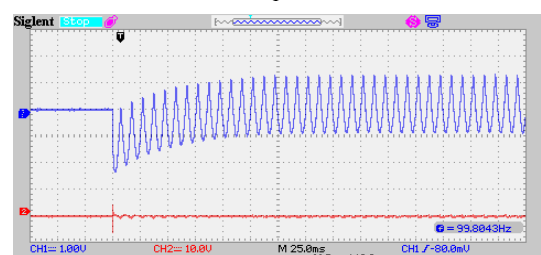
б



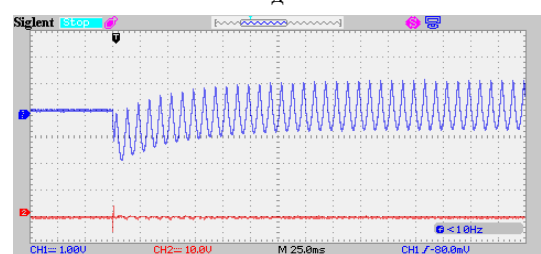
в



г

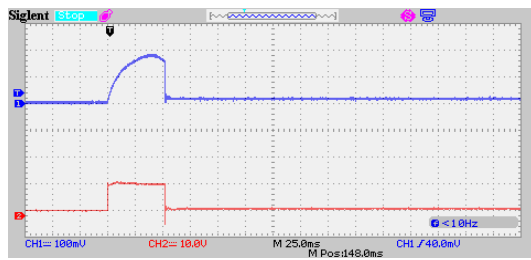


д

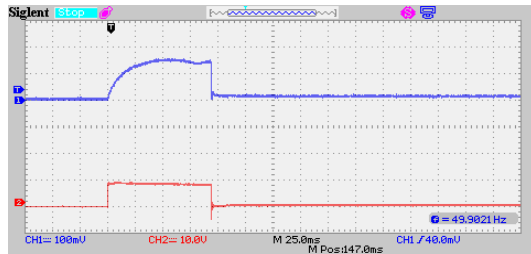


е

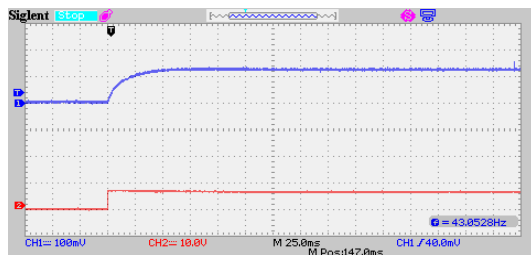
Рис. 9. Динамічні характеристики струму і напруги в утримуючій обмотці при живленні від джерела змінної напруги: а – $U = 220$ В (з діодом VD2); б – $U = 180$ В (з діодом VD2); в – $U = 150$ В (з діодом VD2); г – $U = 220$ В (без діода VD2); д – $U = 180$ В (без діода VD2); е – $U = 150$ В (без діода VD2)



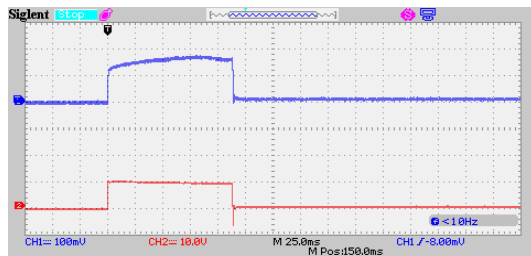
а



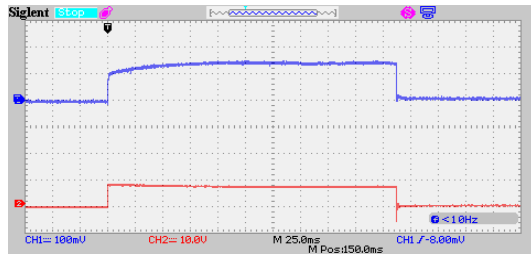
б



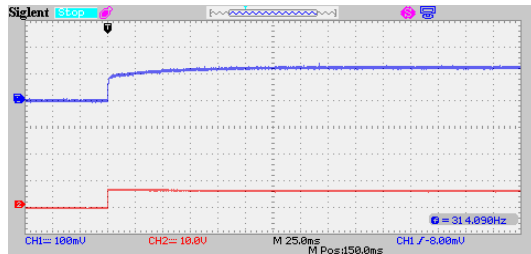
в



г

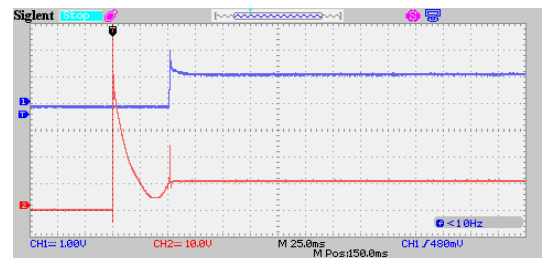


д

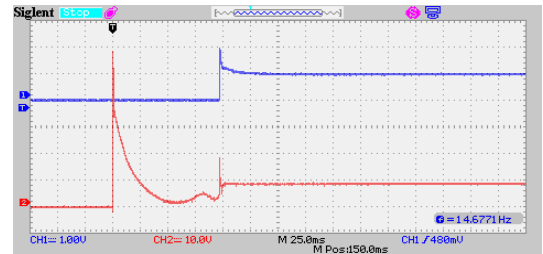


е

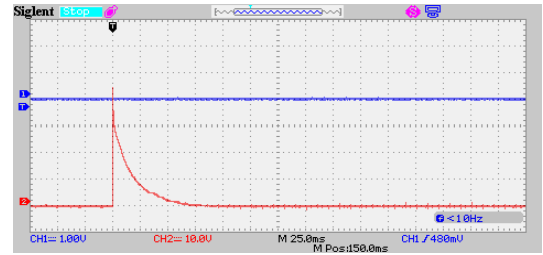
Рис. 10. Динамічні характеристики струму і напруги в пусковій обмотці при живленні від джерела постійної напруги: а – $U = 220$ В (з діодом VD2); б – $U = 180$ В (з діодом VD2); в – $U = 150$ В (з діодом VD2); г – $U = 220$ В (без діода VD2); д – $U = 180$ В (без діода VD2); е – $U = 150$ В (без діода VD2)



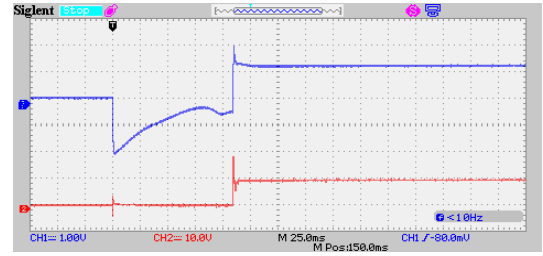
а



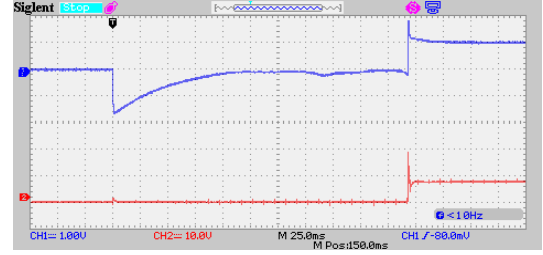
б



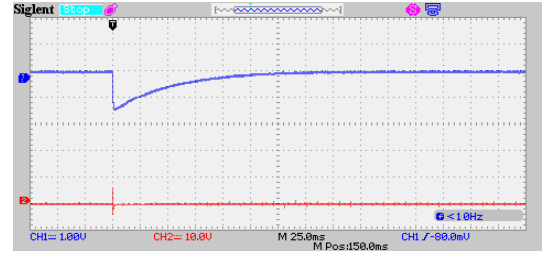
в



г



д



е

Рис. 11. Динамічні характеристики струму і напруги в утримуючій обмотці при живленні від джерела постійної напруги: а – $U = 220$ В (з діодом VD2); б – $U = 180$ В (з діодом VD2); в – $U = 150$ В (з діодом VD2); г – $U = 220$ В (без діода VD2); д – $U = 180$ В (без діода VD2); е – $U = 150$ В (без діода VD2)

разом у двох обмотках – 1200 В. Така напруга може бути небезпечною, у першу чергу для діода VD2.

На підставі проведених досліджень було встановлено, що, незважаючи на вагомості переваги, розглянута система форсованого керування моностабільним електромагнітом має такі недоліки:

- недостатня надійність пристрою при експлуатації, що обумовлена відсутністю захисту від неприпустимого зниження напруги, при якій контактор може не спрацювати і контакт не розімкнеться, внаслідок чого відбудеться збільшення пускового струму на пускових обмотках і вони можуть бути пошкоджені із-за перегріву;

- наявність нормально-замкненого контакту керування, який при виконанні операції вмикання контактора розмикає великий пусковий струм, спричиняючи появу на контакті електричної дуги, яка зношує контакт і суттєво знижує надійність роботи усього пристрою;

- наявність конденсатора, який, сприяючи зменшенню зносу при виконанні операції вмикання контактора, у той же час, оскільки після виконання операції вмикання контактора на ньому встановлюється майже повна напруга мережі живлення, при виконанні операції вимикання контактора цей конденсатор розряджається на нормально-замкнений контакт, який в цей момент замикається. Розряд конденсатора викликає знос контакта, що знижує надійність роботи контактора.

Висновки.

1. Проведено огляд систем форсованого керування з пусковими і утримуючими обмотками. Виявлено, що найбільш перспективною є система, яка містить дві котушки з двома обмотками – пусковою та утримуючою, й нормально-замкнений контакт, діодний міст, діод, конденсатор, варистор. Таку систему застосовують багато виробників вакуумних контакторів, таких як ABB, Siemens, Alstom (Areva), Schneider Electric, Eaton, тощо, але нам не відомі публікації, у яких би досліджувалися процеси, що відбуваються у цій системі, аналізувалися її переваги та недоліки.

2. Проведено дослідження такої електромеханічної системи форсованого керування. Виявлено її недоліки, серед яких слід виділити наступні: при неприпустимому зниженні напруги, комутаційний апарат не спрацює і контакт не розімкнеться, значний пусковий струм буде текти через пускову обмотку, і, якщо у системі керування не будуть передбачені захисні заходи проти зниження напруги, котушка може перегрітися й вийти з ладу, та наявність нормально-замкненого контакту керування.

3. Рекомендовано провести удосконалення при-

строю для форсованого керування моностабільним електромагнітом за рахунок заміни ненадійного комутаційного елемента напівпровідниковим комутаційним елементом, що дозволить суттєво підвищити надійність роботи пристрою в експлуатації.

Список літератури

1. http://vgolos.ua/articles/yak-znyzyty-vytraty-za-elektroenergiyu_107347.html
2. Клименко Б.В. Комутаційна апаратура, апаратура керування, запобіжники. Терміни, тлумачення, коментарі. Навчальний посібник. – Харків: Талант, 2008.
3. Клименко, Б. В. Форсированные электромагнитные системы / Б. В. Клименко. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.
4. А.с. 33230 (СССР). Реле / Г. Т. Андреев, П. В. Боровицкий, Б.Ф. Витман. Опубл. 30.11.33.
5. А.с. 133506 (СССР). Включающее устройство / П.Л. Светличный, В.В. Глушко, Б.Я. Стариков и др. Опубл. в Б.И., 1960, №22.
6. А.с. 559290 (СССР). Электромагнит постоянного тока с форсировкой / Л.Н. Елисеев, Л.И. Евдокимова. Опубл. в Б.И., 1977, №19.
7. Каталог "Контакты электромагнитные трехполюсные переменного тока серии КНТ" [Электронный ресурс] - URL: <http://www.uralelectro.ru/upload/file/KNT.doc> (27.03.2013).
8. <https://electrodinamika.com.ua/catalog/vacuum-contactors/shakhtnye-vakuumnye-kontakty/kontaktor-shakhtnyy-kvtn-250-1-1.php>
9. <https://docplayer.ru/42858351-Tekhnicheskij-pasport-kontaktor-vakuumny-reversivnyy-vk-49-r-tehnicheskoe-opisanie-kontaktor-vakuumny-vk49-tehnicheskoe-opisanie.html>

References (transliterated)

1. http://vgolos.ua/articles/yak-znyzyty-vytraty-za-elektroenergiyu_107347.html
2. Klymenko B.V. Komutatsiina aparatura, aparatura keruvannia, zapobizhnyky. Terminy, tлумachennia, komentari. Navchalnyi posibnyk. Kharkiv: Talant, 2008.
3. Klimenko, B. V. Forsirovannye jelektromagnitnye sistemy. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 160 p.
4. A. s. 33230 (SSSR). Rele / G. T. Andreev, P. V. Borovickij, B.F. Vitman. Opubl. 30.11.33.
5. A. s. 133506 (SSSR). Vkljuchajushhee ustrojstvo. P. L. Svetlichnyj, V. V. Glushko, B. Ja. Starikov i dr. Opubl. v B.I., 1960, 22.
6. A. s. 559290 (SSSR). Jelektromagnit postojannogo toka s forsirovkoj. L. N. Eliseev, L. I. Evdokimova. Opubl. v B.I., 1977, 19.
7. Katalog "Kontakty jelektromagnitnye trehpolejnye peremennogo toka serii KNT" [Elektronnyj resurs] - URL: <http://www.uralelectro.ru/upload/file/KNT.doc> (27.03.2013).
8. <https://electrodinamika.com.ua/catalog/vacuum-contactors/shakhtnye-vakuumnye-kontakty/kontaktor-shakhtnyy-kvtn-250-1-1.php>
9. <https://docplayer.ru/42858351-Tekhnicheskij-pasport-kontaktor-vakuumny-reversivnyy-vk-49-r-tehnicheskoe-opisanie-kontaktor-vakuumny-vk49-tehnicheskoe-opisanie.html>

Надійшла (received) 20.09.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Король Олена Геннадіївна (Король Елена Геннадьевна, Korol Olena Gennadiivna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; e-mail: korolelgn@gmail.com

Клименко Борис Володимирович (Клименко Борис Владимирович, Klymenko Borys Volodymyrovych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач, професор кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7393-6198>; e-mail: b.v.klymenko@gmail.com

Ересько Олександр Вячеславович (Ересько Александр Вячеславович, Eresko Oleksandr Viacheslavovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової і біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; e-mail: aerhoff@gmail.com

В.В. ЛИТВИНЕНКО**ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СПРАЦЬОВУВАННЯ ІНДУКЦІЙНО-ДИНАМІЧНОГО МЕХАНІЗМУ**

Приведено конструкцію прямоходового індукційно-динамічного механізму, що застосовується в швидкодіючих брейкерах. Розроблено принципову електричну схему лабораторного стенду з дослідження індукційно-динамічного механізму та розглянуто принцип роботи схеми. Приведено опис елементів електричної схеми. Виготовлено макетний зразок індукційно-динамічного механізму та змонтовано мобільний лабораторний стенд з необхідними апаратами, закріпленими на DIN-рейці та допоміжними аксесуарами. Допоміжні деталі для монтажу елементів стенду виготовлені за допомогою сучасного 3D принтера FLASHFORGE CREATOR PRO. Отримано осцилограми перехідних процесів при спрацьовуванні індукційно-динамічного механізму, а саме: осцилограми струму в обмотці механізму та напруги на накопичувальному конденсаторі та осцилограма переміщення рухомого диска. Лабораторний стенд використовується у навчальному процесі як складова лабораторного практикуму з дисципліни «Електричні апарати».

Ключові слова: індукційно-динамічний механізм, котушка, диск, накопичувальний конденсатор.

В.В. ЛИТВИНЕНКО**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СРАБАТЫВАНИЯ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА**

Приведена конструкция прямоходового индукционно-динамического механизма, применяемого в быстродействующих брейкерах. Разработана принципиальная электрическая схема лабораторного стенда по исследованию индукционно-динамического механизма и рассмотрен принцип работы схемы. Приведено описание элементов электрической схемы. Изготовлен макетный образец индукционно-динамического механизма и смонтирован мобильный лабораторный стенд с необходимыми аппаратами, закрепленными на DIN-рейке и вспомогательными аксессуарами. Вспомогательные детали для монтажа элементов стенда изготовлены с помощью современного 3D принтера FLASHFORGE CREATOR PRO. Получены осциллограммы переходных процессов при срабатывании индукционно-динамического механизма, а именно: осциллограммы тока в обмотке механизма и напряжения на накопительном конденсаторе и осциллограмма перемещения подвижного диска. Лабораторный стенд используется в учебном процессе как составляющая лабораторного практикума по дисциплине «Электрические аппараты».

Ключевые слова: индукционно-динамический механизм, катушка, диск, накопительный конденсатор.

V.V. LITVYNENKO**RESEARCH OF THE INDUCTION-DYNAMIC MECHANISM OPERATION CHARACTERISTICS**

The design of the linear-drive induction-dynamic mechanism used in high-speed breakers is presented. The research mechanism consists of a coil with leads and a moving disk. The coil of the mechanism is wound with copper tape, the disk is made of copper bus and mounted on the rod, which passes through the hole of the coil. A circuit diagram of a laboratory test bench for the study of the induction-dynamic mechanism has been developed and the principle of operation of the circuit has been considered. A description of the electrical circuit elements is given. A prototype model of the induction-dynamic mechanism was manufactured and a mobile laboratory stand was assembled with the necessary devices mounted on a DIN-rail and ancillary accessories. The high speed of the induction-dynamic mechanism is ensured by the presence of a storage capacitor, which discharges the stored energy to the mechanism coil in a relatively short time. Auxiliary parts for mounting the elements of the stand are made using a modern 3D printer FLASHFORGE CREATOR PRO. Oscillograms of transients are obtained when an induction-dynamic mechanism is triggered, namely: oscillograms of current in the mechanism winding and of voltage on a storage capacitor as well as oscillogram of moving disk displacement. The laboratory stand is used in the educational process as a component of the laboratory workshop on the discipline "Electrical Apparatus".

Keywords: induction-dynamic mechanism, coil, disk, storage capacitor.

Вступ. Сьогодні в енергетичних установках середньої напруги в якості комутаційних пристроїв широке поширення набули вакуумні брейкери (circuit-breaker) завдяки цілому ряду переваг: невибагливість в експлуатації, невеликі розміри, малий хід контактів, ефективність гасіння електричної дуги тощо [1]. Захист електромереж від коротких замикань визначається стабільністю характеристик та мінімальним часом спрацьовування апаратів захисту. В якості актуаторів в брейкерах застосовуються як пружинно-моторні з механічною заціпкою, так і електромагнітні актуатори різних конструкцій з механічною заціпкою [2]. Застосування індукційно-динамічних механізмів (ІДМ) в якості швидкодіючих актуаторів в електричних апаратах обумовлено простотою і надійністю конструкції цих пристроїв та їх високою швидкодією. ІДМ відносяться до електромеханічних перетворювачів індукційного типу, які широко застосовуються для створення потужних силових імпульсів, що

впливають на різні матеріальні об'єкти [3]. В цих перетворювачах при збудженні нерухомого індуктора від ємнісного накопичувача енергії в близько розташованому електропровідному якорі індукується струм, взаємодія якого з магнітним полем індуктора створює електродинамічну силу, відштовхуючу якір від індуктора. Завдяки швидкодії та простоті конструкції ІДМ може бути застосовано як пристрій для висмикування заціпки актуатора високовольтного брейкеру та зменшення часу спрацьовування апарату при відключенні аварійних струмів.

Мета роботи – розробка електричної схеми та виготовлення макетного зразку для дослідження характеристик спрацьовування індукційно-динамічного механізму.

Конструкція індукційно-динамічного механізму. Одним з найбільш поширених типів ІДМ є конструкції без магнітної системи з диском в якості рухомого елемента приведена на рис. 1. Їх основна

перевага в тому, що рухливий елемент 2 (диск) не пов'язаний з котушкою-індуктором 1. У зв'язку з цим механічна зносостійкість індукційно-динамічних механізмів може бути досить високою. Джерелом енергії ІДМ служить, як правило, накопичувальний конденсатор.

Прямоходова конструкція ІДМ застосовується в швидкодіючих брейкерах в якості розчеплювачів [4].

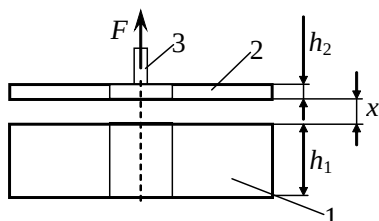


Рис. 1. Прямоходова конструкція ІДП

Обмотка 1 намотана або стрічкою, або прямокутним проводом в один або кілька шарів. Виводи обмотки приєднуються до накопичувального конденсатора через тиристорний ключ, що забезпечує в котушці напівсинусоїдальний імпульс струму.

Для підвищення ефективності схеми живлення котушки, можливі варіанти схемного рішення тиристорного ключа: з зустрічно-паралельним діодом, при цьому в котушці відбувається коливальний затухаючий процес зміни струму, або з шунтувальним котушкою діодом, в цьому випадку має місце аперіодичне згасання струму. Один тиристор практично не застосовується через неекономічність (неповний розряд конденсатора). Якір 2 виконується в формі диска з струмопровідного матеріалу. Якір пов'язаний зі штоком 3 та передає зусилля на контактну систему або заціпку пружинного приводу.

Індукційно-динамічна взаємодія використовується також в індукційно-динамічних двигунах (ІДД) [5]. ІДД застосовуються для створення потужних силових імпульсів при вирішенні різноманітних технічних завдань вібраційного впливу, деформації та перфорації оброблюваних поверхонь і об'єктів.

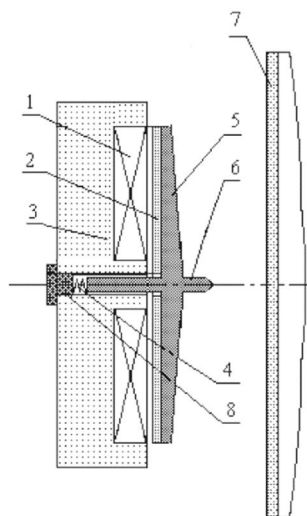


Рис. 2. Конструкція ІДД

ІДД дискової конфігурації складається з індуктора 1, укладеного в діелектричний корпус 3, і електропро-

відного якора 2, прикріпленого до ударного елемента 5 з бойком 6, спрямованим в бік поверхні 7 деформованого об'єкта. Пружина 4, яка притискає якір до індуктора і повертає його в початкове положення після завершення удару, кріпиться на патроні 8 (рис. 2).

Індукційно-динамічний актуатор в апаратах захисту працює у перехідному, динамічному режимі, тому доцільним є дослідження саме перехідних характеристик спрацювання ІДМ.

Лабораторний стенд для дослідження ІДМ.

Принципова електрична схема лабораторного стенду з дослідження ІДМ наведена на рис. 3.

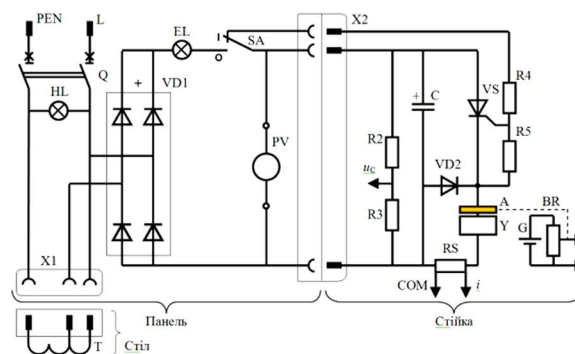


Рис. 3. Принципова електрична схема

В електричній схемі застосовано такі позначення: Т – автотрансформатор; HL – сигнальна лампа підключення стенду до мережі живлення; EL – лампа розжарювання для сигналізації закінчення процесу заряду конденсатора; VD1 – діодний міст; VD2 – силовий діод; VS – тиристор; Q – вимикач в колі змінного струму на вході макетного зразка; C – конденсатор; PV – вольтметр, який показує рівень заряду конденсатора (напругу на конденсаторі C); SA – перемикач; RS – шунт для під'єднання осцилографа; R2 – резистор на 510 кОм; R3 – резистор на 56 кОм; R4 – резистор на 1 кОм; R5 – резистор на 10 кОм; G – гальванічний елемент; A – рухомий диск ІДМ; Y – електромагніт; BR – резистивний датчик.

Висока швидкодія ІДМ забезпечується наявністю накопичувального конденсатора, який розряджає запасену енергію на котушку механізму за достатньо короткий час.

Сигнал для вимірювання напруги на конденсаторі подається з подільника напруги, утвореного резисторами R2-R3 (1:10).

При замиканні ввідного автоматичного вимикача Q загоряється сигнальна лампа HL і на вхід автотрансформатора Т поступає змінна напруга 220 В.

PEN провідник та движок автотрансформатора Т підключені до входу діодного моста VD1. Таким чином можна регулювати напругу на вході діодного моста VD1 в широких межах. Діодний міст VD1 необхідний для перетворення змінної напруги мережі у випростану напругу.

У вихідному положенні перемикач SA повинен знаходитися в положенні I. При цьому конденсатор C буде розряджений через резистори R4-R5, обмотку ІДМ та шунт.

Якщо перемикач SA перевести в положення O,

то перетворена в діодному мосту змінна напруга потрапляє на конденсатор С, який починає заряджатися через лампу EL. Лампа EL в цьому випадку виконує функцію обмежувача резистора. Заряд конденсатора С відбувається за експоненціальним законом і вольтметр PV показує плавне зростання напруги на конденсаторі. Лампа EL згасає, коли процес заряду конденсатора повністю закінчиться.

Тиристор VS є замкненим зважаючи на відсутність струму управління на його електроді управління. Якщо перемикач SA перевести в положення I з'явиться струм управління в колі тиристора VS. Відмикаючий постійний струм управління тиристора T25 дорівнює 150 мА, на електрод управління тиристора потрапляє струм приблизно 300 мА, що є більшим, ніж відмикаючий струм управління. Так як на аноді з'являється позитивний потенціал, відносно катоду, тиристор VS відкривається. В результаті відкриття тиристора VS до обмотки ІДМ прикладається практично повна напруга конденсатора С (за винятком падіння напруги на тиристорі ≈ 1 В), 335 В. Через обмотку ІДМ протікає імпульсний струм. Імпульсний струм створює в обмотці змінне магнітне поле, яке пронизує мідний диск. В результаті цього в диску наводиться електроорушійна сила (ЕРС) та виникає струм протилежний за напрямом струму в обмотці. Взаємодія двох різноспрямованих струмів створює силу, що відкидає мідний диск від нерухомої обмотки і струм починає зменшуватись від свого максимального значення. Отже і напруга на конденсаторі С зменшується.

Поки напруга на конденсаторі С більше 0 діод VD2 замкнений, тому що на його катоді позитивний потенціал. В момент, коли напруга на конденсаторі досягне 0 та спрямується до зменшення у від'ємному напрямку діод VD2 відкриється. Струм обмотки почне протікати в замкненому контурі: обмотка ІДМ – шунт RS – діод VD2. Струм у тиристорі переривається, оскільки керуючий струм відсутній і напруга на тиристорі дорівнює 0. Отже тиристор закривається. Струм в обмотці ІДМ плавно зменшується до 0. Розроблена схема дає можливість дослідним шляхом зняти перехідні характеристики спрацьовування ІДМ, а саме: отримати осцилограму струму в обмотці, напруги на накопичувальному конденсаторі та за допомогою застосування прецизійного потенціометричного датчика осцилограму переміщення диску механізму.

Основною дослідною частиною лабораторного стенду є ІДМ, який складається з котушки з виводами та рухомого диску. Котушка ІДМ має 75 витків, намотаних мідною стрічкою 30×0,1 мм.

Диск виконано з мідної шини, товщиною 2 мм і закріплено на рухомому штоку, який проходить крізь отвір котушки.

В конструкції лабораторного стенду шток ІДМ механічно пов'язаний з движком прецизійного потенціометричного датчика MEGATRON-MUNCHEN, сигнал на виході якого пропорційний переміщенню движка датчика. В реальних конструкціях апаратів шток механічно пов'язаний з контактною системою та

при спрацьовуванні ІДМ розмикає контакти апарата.

Креслення лабораторної установки приведено на рис. 4.

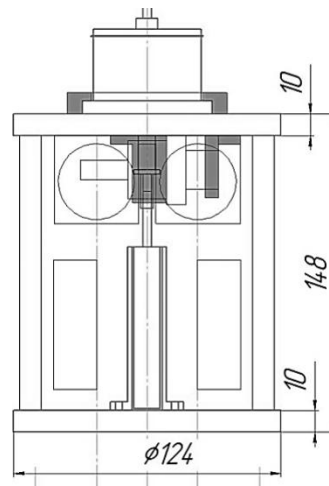


Рис. 4. Креслення установки

Макетний зразок установки представлено на рис. 5.



Рис. 5. Макетний зразок установки

Усі апарати та допоміжні аксесуари, які монтуються на DIN-рейці у лабораторному стенді кріпляться на дерев'яній основі. На ввіді дослідного стенду встановлений двохполюсний автоматичний вимикач Q. Для того, щоб перетворити змінну напругу у випростану пульсуючу в дослідній схемі використовується діодний міст. Накопичувальний конденсатор, який розряджається на котушку індукційно-динамічного механізму представляє собою два електролітичних конденсатор (680 мкФ; 400 В; 105 °C) в алюмінієвому циліндричному корпусі, з односпрямованим дрітними гнучкими виводами радіального типу (radial lead), які з'єднані паралельно. Призначення силового діоду VD2 – створення ланцюга, в якому розсіюється енергія, накопичена в котушці індуктивності ІДМ, після розряду на неї накопичувального конденсатора. Монтаж основних елементів лабораторного стенду проводився за допомогою допоміжних деталей, які

були виготовлені на сучасному 3D принтері FLASHFORGE CREATOR PRO на кафедрі «Електричні апарати».

Характеристики спрацювання ІДМ. Зняття необхідних осцилограм при дослідженні ІДМ було зроблено за допомогою сучасного двоканального цифрового осцилографу Siglent SDS1022DL. Після розряду накопичувального конденсатора на обмотку ІДМ отримано осцилограми імпульсу струму що протікає в обмотці та напруги на конденсаторі (рис. 6). Згідно з осцилограмою максимальне значення струму ≈ 650 А.

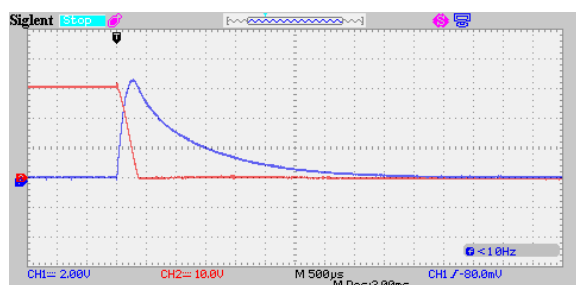


Рис. 6. Осцилограми струму в обмотці ІДМ та напруги на накопичувальному конденсаторі

Для отримання осцилограми переміщення мідного диску ІДМ, осцилограф підключається до виводів прецизійного потенціометричного датчика BR (рис. 3), сигнал на виході якого пропорційний переміщенню движка датчика, механічно пов'язаного зі штоком, що проходить крізь отвір в котушці ІДМ і до якого кріпиться рухомий мідний диск механізму. В результаті проведення дослідів було отримано осцилограму (рис. 7).

У розробленому макетному зразку ІДМ максимальний хід якоря обмежений довжиною штока та движка датчика і складає 18 мм.

Розроблений ІДМ підлягає математичному моделюванню та потребує проведення подальших досліджень з ціллю оптимізації конструкції та покращення характеристик.

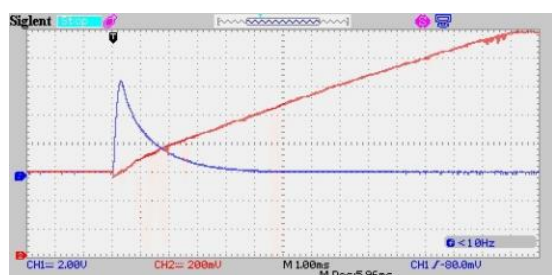


Рис. 7. Осцилограми струму в обмотці ІДМ та переміщення диску

Розрахунок ІДМ є досить складним завданням, бо повинен враховувати процеси, що відбуваються в електричному ланцюзі, механічній системі і електромагнітному полі.

Висновки. 1. Розроблено принципову електричну схему лабораторного стенду з дослідження ІДМ та розглянуто принцип роботи схеми.

2. Розроблено та виготовлено макетний зразок лабораторного стенду з дослідження ІДМ.

3. Отримано осцилограми перехідних процесів при спрацюванні ІДМ.

4. Лабораторний стенд з дослідження ІДМ використовується у навчальному процесі як складова лабораторного практикуму з дисципліни «Електричні апарати».

Список літератури

1. Клименко Б.В. Электричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник. – Харків: Вид-во «Точка», 2012. – 340 с.
2. Клименко Б.В., Бугайчук В.М., Гречко А.М. Электромагнитные приводы вакуумных выключателей средних напряжений // Вестник НТУ «ХПИ». – 2004. – No 42. – С.73–80.
3. Болух В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Рассоха М.А., Щукін І.С. Экспериментальные и теоретические исследования ударного электромеханического преобразователя индукционного типа с различными индукторами // Электротехника і Електромеханіка. 2009. №5.
4. Электрические и электронные аппараты: Учебник для вузов. / Под ред. Ю.К. Розанова. – М.: Информэлектро, 2001. – 420 с.
5. Болух В.Ф., Рассоха М.А., Щукін І.С. Применение импульсной модуляции для повышения эффективности индукционно-динамического двигателя

References (transliterated)

1. Klymenko B.V. Elektrichni aparaty. Elektromekhanichna aparatura komutatsii, keruvannia ta zakhystu. Zahalnyi kurs: navchalnyi posibnyk. Kharkiv: Vyd-vo «Tochka», 2012. 340 p.
2. Klimenko B.V., Bugajchuk V.M., Grechko A.M. Elektromagnitnye privody vakuumnykh vyklyuchatelej srednih napryazhenij//Vestnik NTU "HPI".–2004.-No 42.– s.73–80.
3. Bolyuh V.F., Markov A.M., Luchuk V.F., Rassoha M.A., Shchukin I.S. Eksperimental'nye i teoreticheskie issledovaniya udarnogo ehlektromekhanicheskogo preobrazovatelya indukcionnogo tipa s razlichnymi induktorami// Elektrotehnika i Elektromekhanika. 2009. №5.
4. Elektricheskie i elektronnye apparaty: Uchebnik dlya vuzov. / Pod red. YU.K. Rozanova. – M.: Informelektro, 2001. – 420 s.
5. Bolyuh V.F., Rassoha M.A., Shchukin I.S. Primenenie impul'snoj modulyacii dlya povysheniya ehffektivnosti indukcionno-dinamicheskogo dvigatelya.

Надійшла (received) 21.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах /About the Authors

Литвиненко Вікторія Володимирівна (Литвиненко Виктория Владимировна, Lytvynenko Victoriia Vladimirovna) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", старший викладач кафедри електричні апарати, м. Харків, Україна; e-mail: vikalitv21082@gmail.com

*А.М. ГАЛИНОВСКИЙ***ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРОВ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК МАЛОЙ МОЩНОСТИ НА БАЗЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ**

В технической литературе приведены противоречивые рекомендации по применению асинхронных машин с короткозамкнутым ротором промышленного производства в ветроэнергетических установках малой мощности при работе параллельно с сетью. Это, прежде всего, связано с несовершенством методики расчета характеристик асинхронных машин по Г-образной схеме замещения. Совершенствование автоматизированной методики расчета асинхронных машин с короткозамкнутым ротором в режимах двигателя и генератора, анализ работы асинхронных генераторов ветроэнергетических установок малой мощности на базе асинхронных двигателей промышленного производства при изменении напряжения сети, разработка рекомендации по улучшению характеристик ветроэнергетических установок является целью работы. В разработанной методике расчета характеристики асинхронной машины определяются по Т-образной схеме замещения при учете нелинейных изменений ее параметров. В алгоритме расчета при заданном скольжении независимой переменной применяется величина результирующей электродвижущей силы, которая в дальнейшем уточняется по указанной в задании величине напряжения сети, мощности турбины или мощности двигателя. По результатам исследований установлено: расчет асинхронного генератора ветроэнергетической установки при номинальном напряжении сети и неизменных параметрах схемы замещения может привести к существенной ошибке в определении расчетной мощности генератора; увеличение напряжения сети в предусмотренных стандартом пределах может привести к уменьшению мощности генератора до 50 % от номинальной мощности асинхронного двигателя. Техно-экономические показатели установки можно существенно улучшить при увеличении числа витков статорных обмоток асинхронной машины при допустимом коэффициенте заполнения паза. Разработанная методика может быть применена при проектировании асинхронных машин.

Ключевые слова: асинхронная машина, двигатель, генератор, напряжение, сеть, характеристики.

*О.М. ГАЛИНОВСЬКИЙ***ПАРАМЕТРИ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРІВ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ НА БАЗІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ**

У технічній літературі наведені суперечливі рекомендації щодо застосування асинхронних машин з короткозамкнутим ротором промислового виробництва в вітроенергетичних установках малої потужності при роботі паралельно з мережею. Це, перш за все, пов'язано з недосконалістю методики розрахунку характеристик асинхронних машин по Г-образній схемі заміщення. Удосконалення автоматизованої методики розрахунку асинхронних машин з короткозамкнутим ротором в режимах двигуна і генератора, аналіз роботи асинхронних генераторів вітроенергетичних установок малої потужності на базі асинхронних двигунів промислового виробництва при зміні напруги мережі, розробка рекомендацій щодо поліпшення характеристик вітроенергетичних установок є метою роботи. У розробленій методиці розрахунку характеристик асинхронної машини визначаються по Т-подібній схемі заміщення при обліку нелінійних змін її параметрів. В алгоритмі розрахунку при заданому ковзанні незалежної змінної застосовується величина результируючої електродвижущої сили, яка в подальшому уточнюється за вказаною в завданні величиною напруги мережі, потужності турбіни або потужності двигуна. За результатами досліджень встановлено: розрахунок асинхронного генератора вітроенергетичної установки при номінальній напрузі мережі і незмінних параметрах схеми заміщення може привести до істотної помилки у визначенні розрахункової потужності генератора; збільшення напруги мережі в передбачених стандартом межах може привести до зменшення потужності генератора до 50% від номінальної потужності асинхронного двигуна. Техніко-економічні показники установки можна істотно поліпшити при збільшенні числа витків статорних обмоток асинхронної машини при допустимому коефіцієнті заповнення паза. Розроблена методика може бути застосована при проектуванні асинхронних машин.

Ключові слова: асинхронна машина, двигун, генератор, напруга, мережа, характеристики.

*O.M. GALINOVSKIY***PARAMETERS AND CHARACTERISTICS OF LOW POWER GENERATORS FOR WIND POWER PLANTS ON THE BASIS OF ASYNCHRONOUS MOTORS WITH A SHORT CIRCUITED ROTOR**

The technical literature provides conflicting recommendations on the use of asynchronous machines with a short-circuited rotor of industrial production in wind power plants of low power when operating in parallel with the network. This is primarily due to the imperfection of the method of calculating the characteristics of asynchronous machines on the T-shaped equivalent circuit. Improving the automated method for calculating asynchronous machines with a squirrel-cage rotor in motor and generator modes, analyzing the operation of asynchronous generators of low-capacity wind turbines based on industrial-grade asynchronous motors when the network voltage changes, developing recommendations for improving the characteristics of wind turbines is the goal of the paper. In the developed method of calculation the characteristics of an asynchronous machine are determined by the T-shaped equivalent circuit taking into account the nonlinear changes in its parameters. In the calculation algorithm for a given slip, as an independent variable the value of the resulting electromotive force is applied, which is further corrected by the network voltage, turbine power or motor power specified in the task. According to the results of the research, it has been established: the calculation of an asynchronous generator of a wind power installation at nominal network voltage and constant parameters of the equivalent circuit can lead to a significant error in determining the calculated generator power; an increase in the network voltage within the limits provided for in the Standard may lead to a decrease in the generator power up to 50% of the rated power of the asynchronous motor. Technical and economic indicators of the installation can be significantly improved by increasing the number of turns of the stator windings of the asynchronous machine with the allowable fill factor of the slot. The developed technique can be applied when designing asynchronous machines.

Keywords: asynchronous machine, motor, generator, voltage, network, characteristics.

Введение. Соответственно Глобальному международному проекту «Wind Force» в 2020 году ветроэнергетические установки (ВЭУ) должны производить не менее 12% электроэнергии [4]. В настоящее время ВЭУ Украины генерируют $\approx 1\%$ от общей годовой генерации электроэнергии страны [7]. Украина существенно отстает по необходимым темпам развития ВЭУ.

В Украине выпускаются бытовые ВЭУ единичной мощностью $1 \div 25$ кВт. Они производят сравнительно дорогую электроэнергию, но часто бывают незаменимые, особенно там, где нет других источников энергии [7].

В работе [6] рассмотрены вопросы применения разных типов генераторов для ВЭУ, выделены позитивные и негативные стороны применения асинхронных генераторов (АГ) с короткозамкнутым (к.з.) ротором. АГ имеет простую конструкцию, надежность в обслуживании, малую стоимость. В качестве АГ малой мощности часто применяются серийные асинхронные двигатели (АД) с к.з. ротором.

Работа асинхронной машины с к.з. ротором (АМ) в сети считается достаточно хорошо изученной. Однако в технической литературе сравнительно мало внимания уделяется расчету характеристик АГ, в качестве которых применены серийные АД. Их применение как генераторов ВЭУ может быть не оптимальным из-за другого режима работы, другого напряжения сети. Поэтому рекомендации по применению АГ в ВЭУ малой мощности при работе в сети противоречивы [6, 7].

За номинальное напряжение электрических систем низкого напряжения принимается $U_{IN} = 400$ В, устоявшееся отклонение напряжения составляет: нормальное значение $\pm 5\%$; предельное значение $\pm 10\%$. Для электрических сетей общего назначения за номинальное напряжение (напряжение потребителя) принимается $U_{IN} = 380$ В. Поэтому АГ должен работать в сети при изменении напряжения (как минимум) от 360 В до 420 В.

В народном хозяйстве Украины широко употребляются АД серии 4А мощностью $0,06 \div 400$ кВт. Соответственно приведенной аннотации данных справочника [1] по указанной серии АД «не всегда достаточно» даже для ремонта электродвигателей. Значит, – их «не всегда достаточно» и для расчета параметров и характеристик АМ как в режимах двигателей, так и в режимах генераторов.

В работе [2] приведены методы расчета характеристик АД, которые базируются на системе уравнений токов и напряжений Г-образной схемы замещения. Расчеты проводятся в скалярной форме при ряде допущений. Поэтому неточности в определении некоторых расчетных величин могут существенно сказаться на конечных результатах расчетов.

В работе [3] приведена автоматизированная методика расчета характеристик АД с к.з. ротором на базе уточненной Т-образной схемы замещения при учете нелинейных изменений параметров схемы. Однако методика расчета имеет существенный недостаток: неточность расчетов АМ в рабочих режимах дви-

гателя и генератора в зоне малых скольжений. Отметим относительную сложность методики расчета. Поэтому актуальным является совершенствование методики расчета АМ с к.з. ротором в разных режимах работы при изменении параметров сети.

Совершенствование автоматизированной методики расчета асинхронных машин с к.з. ротором в режимах двигателя и генератора, анализ работы асинхронных генераторов ВЭУ малой мощности на базе асинхронных двигателей промышленного производства при изменении напряжения сети, разработка рекомендации по улучшению характеристик ВЭУ является целью настоящей работы.

Параметры Т-образной схемы замещения асинхронной машины. На рис. 1 показана уточненная Т-образная схема замещения асинхронной машины с к.з. ротором.

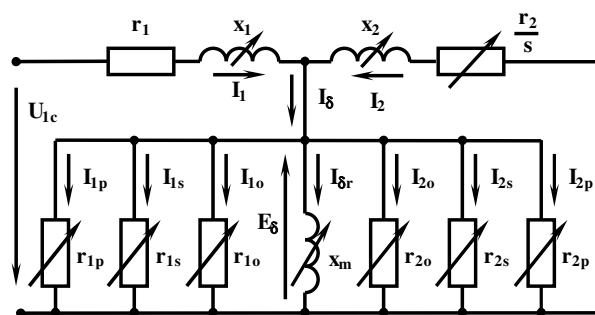


Рис. 1. Уточненная схема замещения АМ с к.з. ротором

Принятые обозначения: U_{1c} – напряжение сети; E_δ – результирующая ЭДС; I_1 , I_2 – токи обмоток статора и ротора; I_δ , $I_{\delta r}$, $I_{\delta o}$, $I_{\delta s}$, $I_{\delta p}$, I_{2o} , I_{2s} , I_{2p} – полный ток, реактивный и активные токи намагничивающего контура; r_1 , x_1 , r_2 , x_2 – активные и индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора; s – скольжение; x_m – главное индуктивное сопротивление. Параметры ротора приведены к статору. Активные сопротивления намагничивающего контура [4]:

$$r_{1o} = r_{1o50} \cdot (50/f_1)^\beta; r_{1s} = r_{1s50} \cdot (50/f_\phi)^{1.5}; r_{1p} = r_{1p50} \cdot (50/f_\phi)^2;$$

$$r_{2o} = r_{2o50} \cdot (50/f_2)^\beta; r_{2s} = r_{2s50} \cdot (50/f_\phi)^{1.5}; r_{2p} = r_{2p50} \cdot (50/f_\phi)^2.$$

Первые нижние индексы («1» и «2») присвоены величинам статора и ротора соответственно. Вторые нижние индексы присвоены величинам сопротивлений, на которых выделяются потери в стали: «o» – основные; «s» – поверхностные; «p» – пульсационные. Обозначения частот: f_1 – частота сети; f_2 – частота ротора; f_ϕ – частота вращения вала, β – показатель степени, зависящий от марки и толщины листа стали. r_{1o50} , r_{2o50} , r_{1s50} , r_{2s50} , r_{1p50} , r_{2p50} – сопротивления намагничивающего контура при частотах $f_1 = f_2 = f_\phi = 50$ Гц:

$$r_{1o50} = m \cdot E_\delta^2 / p_{1o50}; r_{1s50} = m \cdot E_\delta^2 / p_{1s50}; r_{1p50} = m \cdot E_\delta^2 / p_{1p50};$$

$$r_{2o50} = m \cdot E_\delta^2 / p_{2o50}; r_{2s50} = m \cdot E_\delta^2 / p_{2s50}; r_{2p50} = m \cdot E_\delta^2 / p_{2p50},$$

где p_{1o50} , p_{1s50} , p_{1p50} , p_{2o50} , p_{2s50} , p_{2p50} – потери в стали при $f = 50$ Гц.

Определение параметров Т-образной схемы замещения АМ проводится по известным методикам [2]. Кривые намагничивания стали и другие нелинейные зависимости, полученные в процессе расчета, могут использоваться в табличном или экспоненциальном виде. При расчете параметров АМ учитываются

вытеснение общего потока из зубца в паз, эффект вытеснения тока ротора.

Расчет асинхронных машин при заданной величине напряжения сети. На рис. 2. показан усовершенствованный алгоритм расчета характеристик АМ при заданной величине напряжения сети U_{1c} .

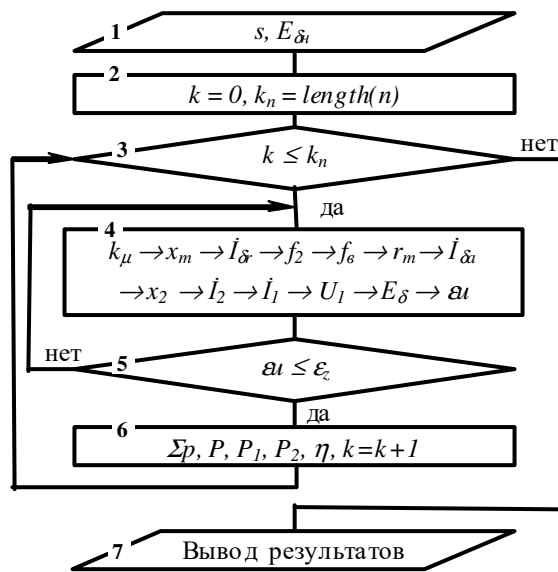


Рис. 2. Алгоритм расчета АМ

Задаемся массивом скольжения s размером k_n и начальным значением величины ЭДС E_δ . Точность задания величины E_δ . принципиального значения не имеет.

Для k -ой точки массива в блоке вычислений 4 определяем величины k_μ , x_m , $\dot{I}_\delta$, f_2 , f_6 , r_m , $\dot{I}_\delta$, x_2 , $\dot{I}_2$, $\dot{I}_1$, U_1 , E_δ , ϵ . При этом напряжение сети

$$\dot{U}_1 = -E_\delta e^{j0} + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1, \quad (1)$$

уточненное значение ЭДС

$$E_\delta = E_{\delta n} |U_{1c} / U_1|, \quad (2)$$

погрешность расчета

$$\epsilon = |1 - U_{1c} / U_1|. \quad (3)$$

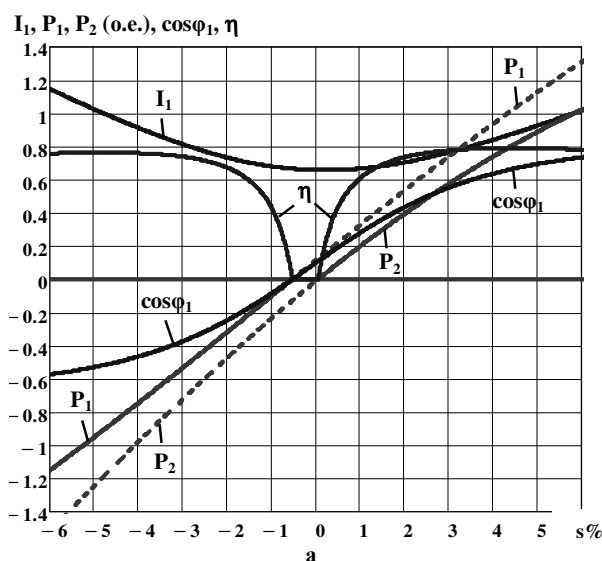


Рис. 3. Зависимости P_1 , P_2 , I_1 , $\cos \phi_1$ и η АМ типа 4А112МА8У3 от скольжения: а – $U_1 = 380$ В; б – $U_1 = 420$ В

Если погрешность ϵ больше заданной величины ϵ_z , то повторяем расчет с уточненным значением E_δ .

В блоке вычислений 6 рассчитываем суммарные потери Σp , мощности P_1 и P_2 , КПД и др. величины.

Проведены исследования параметров и характеристик АМ на базе отрезка серии АД мощностью 1.5 – 5.5 кВт. На рис. 3-5 показаны результаты исследований АМ на базе АД типа 4А112МА8У3 в рабочих режимах двигателя и генератора. Номинальные параметры АД: $P_{2N} = 2.2$ кВт; $U_{1N} = 380$ В; $P_1 = 2.81$ кВт; $\cos \phi_{1N} = 0.728$; $\eta_N = 0.783$; $I_{1N} = 5.86$ А; $s_N = 0.0583$.

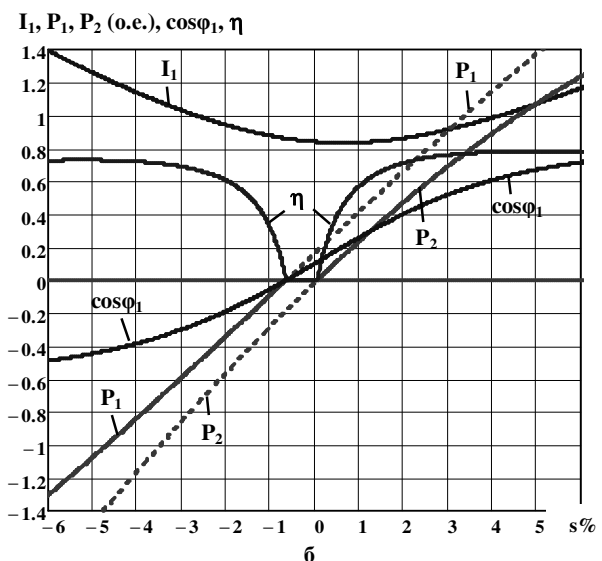
На рис. 3 показаны зависимости P_1 , I_1 , $\cos \phi_1$, P_2 и η от скольжения s при $U_1 = 380$ В (а) и $U_1 = 420$ В (б), где: P_1 – активная мощность, потребляемая из сети (или отдаваемая в сеть); P_{1G} – активная мощность, отдаваемая в сеть при работе АМ в режиме генератора; P_2 – мощность на валу АМ; P_{2D} – мощность на валу АМ в режиме двигателя; η – КПД АМ. Величины P_1 и P_2 выделены пунктирными линиями. Мощности (P_2 , P_{2D} , P_1 , P_{1G}) и ток статора (I_1) приведены в относительных единицах (о.е.). За базовые приняты величины P_{2N} и I_{1N} .

На рис. 4 показаны зависимости результирующей ЭДС воздушного зазора E_δ и максимальных значений индукций в зубцах статора и ротора (B_{z1max} и B_{z2max}) от скольжения при $U_1 = 380$ В (а) и $U_1 = 420$ В (б).

На рис. 5 показаны рабочие характеристики АГ при $U_1 = 380$ В и $U_1 = 420$ В.

В табл. 1 приведены параметры АГ на базе отрезка серии АД при номинальном токе и напряжениях сети: $U_1 = 380$ В; $U_1 = 420$ В.

Как видно из результатов расчета, при $I_1 = I_{1N} = 1$ о.е. с увеличением напряжения сети от $U_{1л} = 380$ В до $U_{1л} = 420$ В и сохранении номинального тока мощность АГ может существенно уменьшиться. У ВЭУ с АГ типа 4А112МА8У3 при $U_1 = 420$ В мощность АГ составляет всего $0.51 \cdot P_{2N}$.



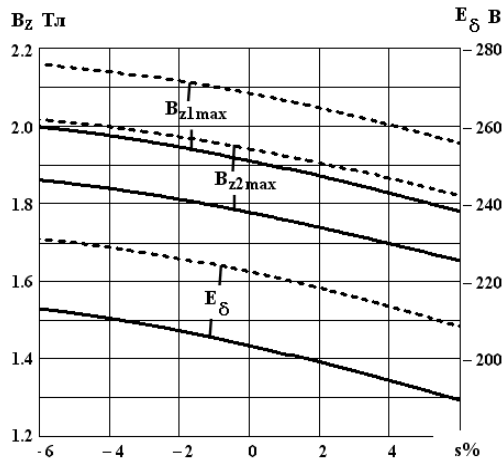


Рис. 4. Зависимости E_{δ} , B_{z1max} и B_{z2max} АМ от s :
 $U_1 = 380$ В – сплошные; $U_1 = 420$ В – пунктирные

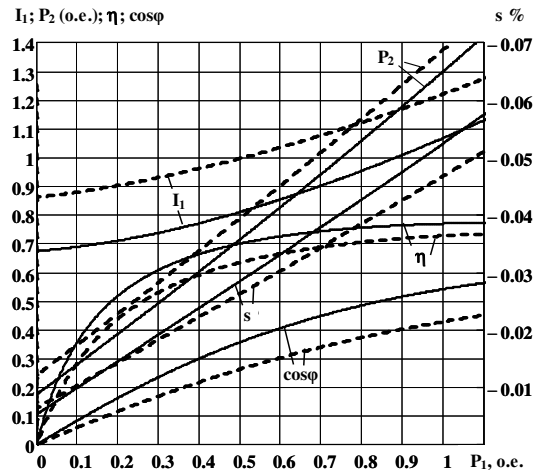


Рис. 5. Рабочие характеристики АГ:
 $U_1 = 380$ В – сплошные; $U_1 = 420$ В – пунктирные

Таблица 1 – Параметры АГ при номинальном токе и напряжениях сети $U_1 = 380$ В и $U_1 = 420$ В

№ п/п	Тип АД	P_N , Вт	U_1 , В	I_1 , о.е.	P_{1G} , о.е.	P_T , о.е.	η	$\cos\phi$
1	4A100L8Y3	1500	380	1	0.912	1.187	0.768	0.490
			420	1	0.791	1.083	0.730	0.425
2	4A112MA8Y3	2200	380	1	0.909	1.188	0.763	0.462
			420	1	0.510	0.760	0.671	0.266
3	4A112MB8Y3	3000	380	1	0.955	1.196	0.799	0.579
			420	1	0.767	1.023	0.749	0.465
4	4A132S8Y3	4000	380	1	0.952	1.174	0.811	0.567
			420	1	0.695	0.932	0.746	0.414
5	4A132M8Y3	5500	380	1	0.999	1.203	0.830	0.634
			420	1	0.959	1.178	0.814	0.551

По результатам исследований АМ без учета и с учетом изменения параметров схемы замещения при $U_1 = \text{const}$ установлено: расчет АГ с постоянными параметрами схемы замещения может привести к существенной ошибке в определении расчетной мощности генератора.

Расчетные мощности АГ на базе АД 4A100L8Y3 (определены при $U_1 = 380$ В и $I_1 = I_{1N}$):

$P_G = 1.252P_{2N}$ – при постоянных параметрах схемы замещения;

$P_G = 0.95P_{2N}$ – при учете изменения параметров схемы замещения.

Ошибка в определении расчетной мощности АГ при постоянных параметрах составляет $\approx 30\%$.

Расчет АГ при номинальных мощностях ветротурбин и разных напряжениях сети. Номинальной мощностью ветротурбины называем мощность турбины P_{TN} при напряжении сети $U_1 = 380$ В и номинальном токе статора АГ.

Таблица 2 – Параметры АГ при номинальных мощностях турбин и разных напряжениях сети

№ п/п	Тип АД	P_N , Вт	U_1 , В	I_1 , о.е.	P_1 , о.е.	P_{TN} , о.е.	η	$\cos\phi$	Σp , о.е.
1	4A100L8Y3	1500	380	1	0.963	1.252	0.758	-0.499	0.304
			420	1.042	0.932		0.745	-0.425	0.319
2	4A112MA8Y3	2200	380	1	0.907	1.188	0.764	0.517	0.281
			420	1.134	0.857		0.710	0.387	0.327
3	4A112MB8Y3	3000	380	1	0.959	1.2	0.791	-0.578	0.251
			420	1.074	0.920		0.771	-0.472	0.275
4	4A132S8Y3	4000	380	1	0.953	1.175	0.814	-0.569	0.218
			420	1.094	0.910		0.789	-0.453	0.247
5	4A132M8Y3	5500	380	1	0.999	1.187	0.826	-0.630	0.206
			420	1.004	0.967		0.822	-0.555	0.212

Отметим особенности алгоритма расчета АГ.

Задаемся массивом скольжения s размером k_n и начальным значением величины ЭДС E_{δ} .

Для k -ой точки массива в блоке вычислений 4 определяем величины k_{μ} , x_m , $\dot{I}_{\delta r}$, f_2 , f_{θ} , r_m , $\dot{I}_{\delta a}$, x_2 , $\dot{I}_2$, $\dot{I}_1$, U_1 , Σp , P_1 , P_2 , η .

Величина U_1 определяется по (1).

Уточненное значение ЭДС

$$E_{\delta} = E_{\delta N} \cdot \sqrt{P_{TN}/P_2}. \quad (4)$$

Погрешность расчета

$$\varepsilon p = |1 - P_{TN}/P_2|. \quad (5)$$

Если погрешность εp больше заданной величины ε_z , то повторяем расчет с уточненным значением E_{δ} .

В табл. 2 приведены параметры АГ при номинальных мощностях ветротурбин и напряжениях сети 380 В и 420 В.

Из результатов исследований следует: увеличение напряжения сети от 380 до 440 В приводит к существенному снижению мощности АГ, уменьшению величин КПД и $\cos\varphi$. Это, прежде всего, связано с увеличением коэффициента насыщения магнитной цепи АГ, которое приводит к увеличению реактивной составляющей тока статора. Уменьшение влияния указанного фактора возможно при увеличении числа витков статорной обмотки АГ.

Характеристики АГ с разными числами витков статорных обмоток. Увеличим число витков статорных обмоток исследуемых АМ примерно на 10% при условии: коэффициент заполнения паза $k_z < 0.75$.

В АМ 4A100L8Y3, 4A112MA8Y3, 4A112MB8Y3 и 4A132M8Y3 увеличение числа витков статорных обмоток проведено при сохранении марки провода.

В АМ 4A132S8Y3 увеличение числа витков выполнено при уменьшении площади эффективного проводника на 11 %.

В табл. 3 приведены параметры ветротурбин и АГ с разными числами витков статорных обмоток при

напряжении сети $U_1 = 400$ В. Параметры ветротурбин и АГ при увеличении чисел витков обмоток определялись при сохранении суммарных потерь (Σp) АГ.

В соответствии с данными табл. 3 увеличение числа витков статорных обмоток АГ позволяет увеличить мощности всех АГ и ветротурбин.

Увеличение числа витков статорной обмотки АМ 4A112MA8Y3 проводит к:

увеличению мощности ветротурбины на 11.2 %;
увеличению мощность АГ на 18.8 %.

При увеличении числа витков статорной обмотки АМ 4A132S8Y3 (с уменьшением площади эффективного проводника) мощность АГ увеличена на 9.5 % при увеличении мощности ветротурбины на 5.5 %.

Теперь исследуем АГ с разными числами витков статорных обмоток при номинальных мощностях ветротурбин. На рис. 6 показаны зависимости I_1 , P_1 , P_2 , Σp , η , $\cos\varphi_1$ АГ 4A112MA8Y3 от напряжения U_1 при числах витков обмотки: а – $w_1 = 39$; б – $w_1 = 43$.

Таблица 3 – Параметры ветротурбин и АГ при напряжении сети $U_1 = 400$ В, разных числах витков статорных обмоток и одинаковых суммарных потерях АГ

№ п/п	Базовый АД	P_N , Вт	Число w_1	Σp , о.е.	I_1 о.е.	P_{1G} о.е.	P_T о.е.	η	$\cos\varphi$
1	4A100L8Y3	1500	56	0.312	1.017	0.951	1.252	0.76	0.466
			61		0.999	0.983	1.252	0.785	0.527
2	4A112MA8Y3	2200	39	0.297	1.047	0.883	1.188	0.742	0.455
			43		0.955	1.049	1.321	0.794	0.593
3	4A112MB8Y3	3000	31	0.258	1.022	0.944	1.2	0.787	0.532
			34		0.945	1.032	1.261	0.818	0.628
4	4A132S8Y3	4000	27	0.225	1.028	0.936	1.175	0.797	0.513
			30		0.926	1.024	1.24	0.825	0.624
5	4A132M8Y3	5500	21	0.206	0.989	0.979	1.187	0.824	0.596
			23		0.955	1.095	1.298	0.843	0.691

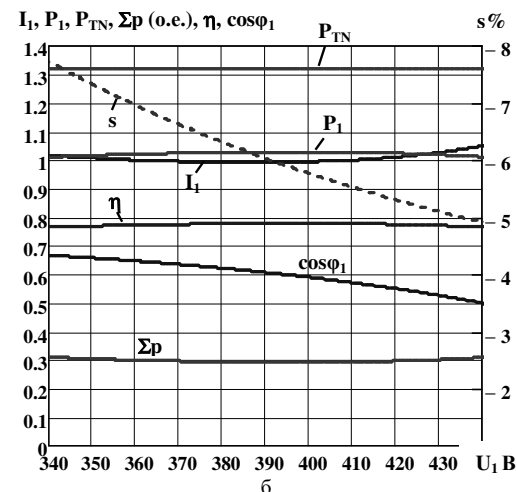
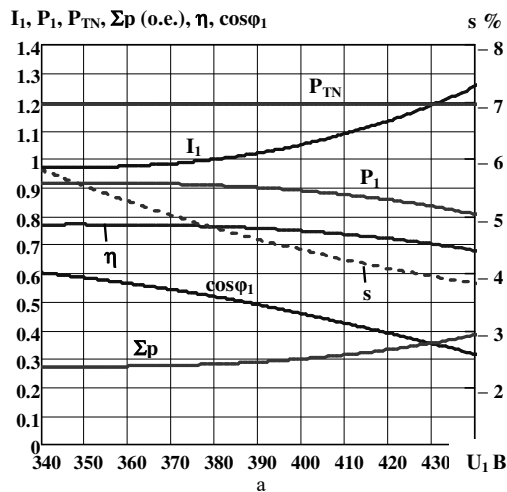


Рис. 6. Величины I_1 , P_1 , P_{TN} , Σp , η , $\cos\varphi_1$ АГ 4A112MA8Y3 в зависимости от напряжения U_1 при числах витков обмотки статора: а – $w_1 = 39$; б – $w_1 = 43$

При $w_1 = 39$ номинальная мощность ветротурбины $P_{TN} = 1.188$ о.е. (табл. 2). Изменение основных расчетных величин АГ при изменении напряжения сети от $U_1 = 380$ В до $U_1 = 440$ В (рис. 6, а):

$$I_1 = (1 \div 1.253) \cdot I_{1N};$$

$$P_1 = (0.907 \div 0.806) \cdot P_{2DN};$$

$$\eta = 0.763 \div 0.678.$$

При $w_1 = 43$ номинальная мощность ветротурбины $P_{TN} = 1.322$ о.е. Изменение основных расчетных величин АГ при изменении напряжения сети от $U_1 = 380$ В до $U_1 = 440$ В (рис. 6, б):

$$I_1 = (1 \div 1.05) \cdot I_{1N};$$

$$P_1 = (1.03 \div 1.01) \cdot P_{2DN};$$

$$\eta = 0.777 \div 0.776.$$

Как следует из результатов исследований, при увеличении числа витков статорной обмотки АГ можно существенно улучшить технико-экономические показатели ВЭУ.

Расчет АД с номинальной нагрузкой при изменении напряжения сети. Алгоритм расчета АД с номинальной нагрузкой при изменении напряжения сети подобен алгоритму расчета АГ при номинальной мощности ветротурбины.

В формулах (4) и (5) меняем величину P_{TN} на P_{2DN} .

Уточненное значение ЭДС $E_{\delta} = E_{\delta H} \sqrt{P_{2DN}/P_2}$.

Погрешность расчета $\epsilon_p = |1 - P_{2DN}/P_2|$.

Из результатов исследований отрезка серии АД малой мощности следует:

при номинальной нагрузке АД с изменением напряжения сети в пределах $0.9U_{1CN} \div 1.1U_{1C}$ остаются практически неизменными величины I_1 , Σp , P_1 , η ;

с увеличением напряжения (как и в асинхронных генераторах) уменьшаются скольжение s и $\cos\phi_1$ асинхронных двигателей.

В качестве примера на рис. 7 показаны зависимости основных расчетных величин АД типа 4А112МА8УЗ (I_1 , P_1 , P_2 , Σp , $\cos\phi_1$, η) от напряжения сети при $P_2 = P_{2DN} = 2.2 \text{ кВт} = 1 \text{ о.е.}$

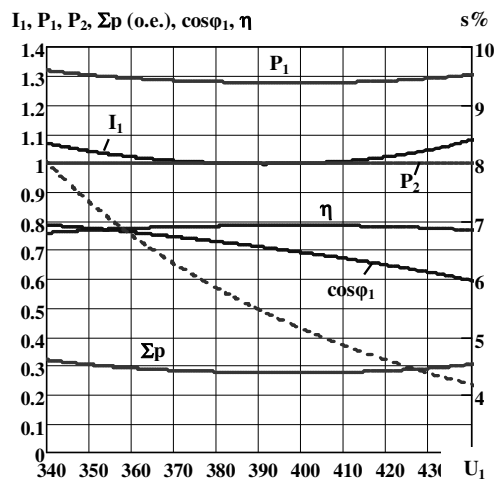


Рис. 7. Характеристики АД с номинальной нагрузкой на валу в зависимости от напряжения сети

Выводы:

1. Проведено совершенствование методики автоматизированного расчета характеристик АМ с к.з. ротором при учете нелинейных изменений параметров Т-образной схемы замещения.

2. По результатам исследований характеристик генераторов ВЭУ малой мощности на базе отрезка серии АД с к.з. ротором установлено: увеличение напряжения сети в предусмотренных стандартом пределах может привести к уменьшению мощности гене-

ратора до 50 % от номинальной мощности АД. Технико-экономические показатели ВЭУ существенно улучшаются при увеличении ($\approx$ на 10%) числа витков статорных обмоток машины.

3. Разработанная методика расчета может быть применена при проектировании асинхронных машин с к.з. ротором.

Список литературы

1. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
2. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перер. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с. – (Основы наук).
3. Галиновский А. М. Совершенствование методики расчета рабочих и пусковых характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / А. М. Галиновский, В. А. Бовер, А. Н. Давыдов, А. С. Вишневецкий // Электромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 3/2011 (15). – С. 131–133.
4. Никишин А.Ю., Казаков В.П. Современные ветроэнергетические установки на базе асинхронных машин // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6.
5. Шевченко В.В., Кулиш Я.Р. Анализ возможности использования разных типов генераторов для ветроэнергетических установок с учетом диапазона мощности // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – №65. – С. 107–117.
6. Бубенчиков А.А., Дайчман Р.А., Артамонова Е.Ю. и др. Выбор оптимального генератора для ветроустановки. Опубликовано в 2015, Выпуск Ноябрь 2015, Технические науки.
7. Українська Вітроенергетична корпорація / Відновлювана енергетика, вітрові електростанції під загальною редакцією І.В. Плачкова та А.Є. Конеченкова / лютий 2017 р. – www.uwea.com.ua

References (transliterated)

1. Asynchronous engine series 4A: Reference bookio A.E. Kravchik, M.M. Shlaf, V.I. Afonin, E.A. Sobolenskaja. Moscow: Energoisdat, 1982. 504 p.
2. Planning of electric machines: textbook for the institutes of higher. pod red. I.P. Kopilova. 4-e izd., perer. i dop. Moscow: Izdatelstvo Jurajt, 2011. 767 p.
3. Galinovskiy A. Perfection of method of calculation of workings and starting descriptions of asynchronous engine with shortcircuited rotor. Galinovskiy A., Bober V., Davydov A., Vishnevsky A. Electromechanical and energy saving systems. Quarterly research and production journal. Kremenchuk: KrNU, 2011. No 3/2011(15). pp. 131–133.
4. Nikishin A.Ju., Kazakov V.P. Sovremennye vetro-energeticheskie ustanovki na baze asinchronnih machin. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2012. No 6.
5. Shevchenko V.V., Kulish Ja.R. Analiz vozmozhnosti ispol'zo-vaniya raznyh tipov generatorov dlja vetroenergeticheskikh usta-novok s uchetom diapazona moshhnosti. V.V. Shevchenko, Ja. R. Kulish. Vestnik NTU "HPI". 2013. 65. pp.107–117.
6. Bubenchikov A.A., Dajchman R.A., Artamonova E.J. i dr. Vyb or optimalnogo generatora dlja vetroustanovri. Issue November 2015, tehnikeskije nauki.
7. Ukrainian wind energy association. Vidnovljuvana energetika, vitrovi elektrostanziji pid zahalnoju redakzijeju I.V. Plachkova ta A.E. Konechenkova. February 2017 Year. www.uwea.com.ua

Поступила (received) 09.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Галиновський Олександр Михайлович (Галиновский Александр Михайлович, Galinovskiy Oleksandr) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", доцент кафедри електромеханіки, м. Київ, Україна; e-mail: alga040@gmail.com.

*Л.П. ГАЛАЙКО***ВЫБОР УПРАВЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

В статье рассмотрен вопрос о выборе управляющих параметров для регулирования различных режимов работы вентильно-индукторного двигателя. Проведен анализ статей, изданных в течение 2005-2018 годов по вентильно-индукторным двигателям для различных приводов в Украине и за рубежом. Анализ показал, что имеется большое разнообразие в выборе управляющих параметров у разных авторов, а также у большинства авторов отсутствует анализ переходных процессов при использовании выбранных управляющих параметров. Автор статьи в предыдущих работах использовал фазовое регулирование для вентильно-индукторного двигателя рудничного электровоза мощностью 27 кВт и частотой вращения 1146 мин⁻¹. С целью выбора оптимальных управляющих параметров в данной работе для указанного двигателя в качестве управляющего параметра выбрано ШИМ напряжения. Рассмотрены переходные процессы при изменении момента нагрузки в режиме двигателя, а также от режима двигателя к режиму рекуперативного торможения при постоянной частоте вращения с помощью разработанной модели двигателя для переходных режимов в программе Simulink. При переходе от режима двигателя к режиму рекуперативного торможения изменялись углы включения и отключения. Скажности импульсов в ШИМ определялись с помощью механических характеристик, рассчитанных на модели двигателя для установившихся режимов. Результаты анализа могут быть использованы при разработке программы для микропроцессора контроллера.

Ключевые слова: модель, программа Simulink, механические характеристики, управляющие параметры, рекуперативное торможение, ШИМ напряжения.

*Л.П. ГАЛАЙКО***ВИБІР КЕРУЮЧИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГУНА**

У статті розглянуто питання про вибір керуючих параметрів для регулювання різних режимів роботи вентильно-індукторного двигуна. Проведено аналіз статей, виданих протягом 2005-2018 років щодо вентильно-індукторних двигунів для різних застосувань в Україні і за кордоном. З аналізу випливає, що є велика різноманітність у виборі керуючих параметрів у різних авторів, а також у більшості авторів відсутній аналіз перехідних процесів при використанні обраних керуючих параметрів. Автор статті в попередніх роботах використовував фазове регулювання для вентильно-індукторного двигуна рудничного електровоза потужністю 27 кВт і частотою обертання 1146 хв⁻¹. З метою вибору оптимальних керуючих параметрів в даній роботі для зазначеного двигуна в якості керуючого параметра вибрано ШІМ напруги. Розглянуто перехідні процеси при зміні моменту навантаження в режимі двигуна, а також від режиму двигуна до режиму рекуперативного гальмування при постійній частоті обертання за допомогою розробленої моделі двигуна для перехідних режимів в програмі Simulink. При переході від режиму двигуна до режиму рекуперативного гальмування змінювалися кути включення і відключення. Шпаруватості імпульсів в ШІМ визначалися за допомогою механічних характеристик, розрахованих на моделі двигуна для сталих режимів. Результати аналізу можуть бути використані при розробці програми для мікропроцесора контролера.

Ключові слова: модель, програма Simulink, механічні характеристики, керуючі параметри, рекуперативне гальмування, ШІМ напруги.

*L. P. GALAYKO***THE CHOICE OF CONTROL PARAMETERS FOR REGULATING MODES OF OPERATION OF A SWITCHED RELUCTANCE MOTOR**

The article discusses the choice of control parameters for regulating various modes of operation of a switched reluctance motor. The analysis of articles published during the 2005-2018 year a switched reluctance motors for various drives in Ukraine and abroad. The analysis showed that there is a great diversity in the choice of control parameters from different authors, and most authors do not have an analysis of transients when using selected control parameters. The author of the article in previous works used phase control for a switched reluctance motor of a mine electric locomotive with a capacity of 27 kW and a rotational speed of 1146 min⁻¹. In order to select the optimal control parameters in this work for the specified engine, the PWM voltage was chosen as the control parameter. Transients are considered when changing the load torque in the engine mode, as well as from the engine mode to the recuperative braking mode at a constant rotation speed using the developed engine model for transients in the Simulink program of the Matlab software package. When switching from engine mode to recuperative braking, the on and off angles changed. The pulse duty rates in PWM were determined using mechanical characteristics calculated on the engine models for steady-state conditions. The results of the analysis can be used in the development of a program for the microprocessor controller.

Keywords: model, Simulink program, mechanical characteristics, control parameters, recuperative braking, PWM voltage.

Введение. Вентильно-индукторные двигатели (ВИД), за рубежом Switched Reluctance Motor находят все более широкое применение в различных областях техники. Главные достоинства двигателя: простота конструкции, низкая стоимость, надежность и возможность формирования средствами управления любой механической характеристики, что позволяет применять их для любых приводов. Однако, качественное функционирование этих приводов невозможно без специального программного продукта, реализуемого в высокопроизводительных контролерах.

При разработке программы один из вопросов, которые необходимо решить, является выбор управляющих параметров для разных режимов работы.

В работе [1] для ВИД стиральной машины мощностью 90 Вт проведено сравнение трех способов управления для поддержания постоянства скорости: 1) изменением углов включения и отключения Θ_{on} , Θ_{of} (углов между полюсами статора и ротора, при которых происходит включение и отключение транзисторов, подающих питание на катушки фаз); 2) применением ШИМ напряжения; 3) релейным регулированием

ем тока (заданием I_{max} , I_{min}). Расчеты, проведенные при номинальной скорости для разных значений выходной мощности с помощью имитационной модели для установившихся режимов [2] показали, что технико-экономические показатели мало отличаются для разных управляющих параметров. Недостатком этой работы является отсутствие анализа переходных процессов из одного режима в другой.

В работах [3, 4] автора этой статьи приведены результаты моделирования переходных процессов в режиме рекуперативного торможения и при переходе из режима двигателя в режим рекуперативного торможения для ВИД рудничного электровоза мощностью 27 кВт и частотой вращения 1146 мин⁻¹ с использованием фазового регулирования. Для проведения моделирования были разработаны дополнительные субмодели для моделей двигателя в программе Simulink пакета программ Matlab для установившихся и переходных режимов [2,5]. В работе [3] рассмотрено два варианта способов изменения углов: непрерывное изменение углов по определенному закону и конечное приращение углов в определенные моменты времени. Первый способ предполагает бездатчиковое управление углами коммутации.

В работе [6] рассматривается ВИД для рудничного электровоза мощностью 7,5 кВт и номинальной скоростью 1100 мин⁻¹. Углы включения и отключения фиксированы для режима двигателя и режима рекуперативного торможения. Для задания углов используется датчик положения ротора. При низких скоростях двигателя используется ограничение тока, при

высоких скоростях и в режиме рекуперативного торможения используется ШИМ напряжения. В работе отсутствует анализ переходного процесса при изменении момента нагрузки двигателя и при переходе в режим рекуперативного торможения.

В работе [7] рассматривается ВИД мощностью 35 кВт, скоростью 2000 мин⁻¹ для привода гибридного автомобиля. Для регулирования режимов используется ограничение тока. В этой работе также как в предыдущей отсутствует анализ переходных процессов.

Цель работы. Разработать законы изменения скважности импульсов для обеспечения постоянства скорости в режиме двигателя и при переходе из режима двигателя в режим рекуперативного торможения при фиксированных значениях углов в этих режимах для вентильно-индукторного двигателя с помощью имитационной модели в программе Simulink пакета программ Matlab.

Описание эксперимента. Для двигателя мощностью 27 кВт, частотой вращения 1146 мин⁻¹, спроектированного для привода рудничного электровоза на базе двигателя постоянного тока, были рассчитаны статические механические характеристики в режиме двигателя и в режиме рекуперативного торможения при постоянных углах включения и отключения и при изменении скважности импульсов. С помощью этих характеристик определены скважности импульсов для моделирования переходных процессов и проведено моделирование. Значения средних значений моментов и скважностей импульсов занесено в таблицу 1, а результаты моделирования представлены на рис. 1–4.

Таблица 1 – Значения средних моментов для режима двигателя и режима рекуперативного торможения при изменении угловой скорости и скважности импульсов

Ω , рад/с	Режим двигателя $\Theta_{on}=30$ град, $\Theta_{of}=11$ град				Режим рекуперативного торможения $\Theta_{on}=8$ град, $\Theta_{of}=-11$ град			
	$PV=0,4$	$PV=0,6$	$PV=0,8$	$PV=1$	$PV=0,4$	$PV=0,6$	$PV=0,8$	$PV=1$
120	34,18	71,98	124,4	233,8	-14,63	-32,4	-77,81	-226,8
180	22,39	35,09	57,25	84,14	-9,693	-19,58	-37,3	-82,7
240	16,92	25,97	35,1	48,61	-7,314	-14,62	-26,65	-47,88

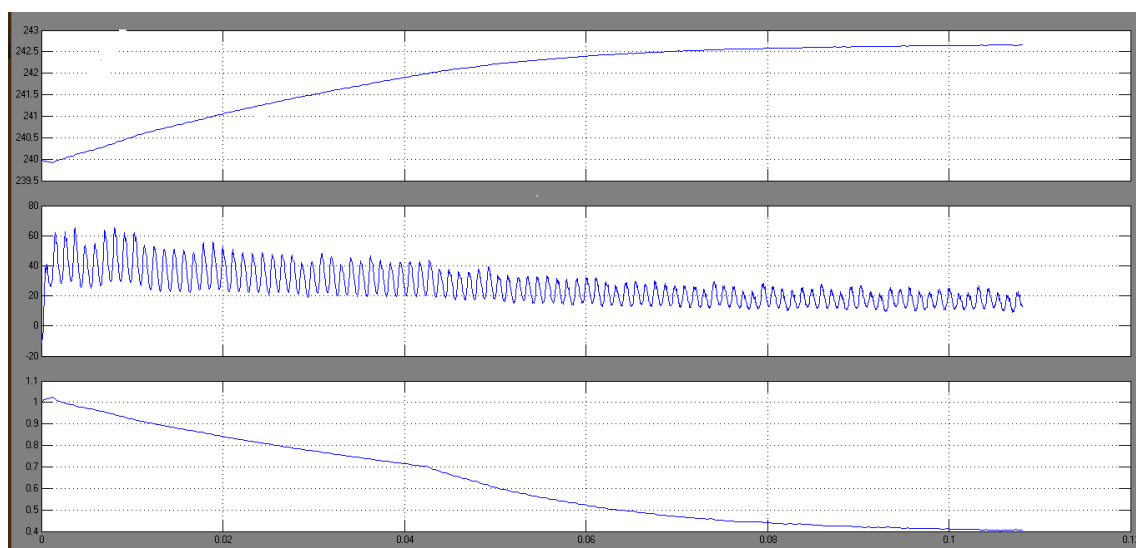


Рис. 1. Зависимости угловой скорости, мгновенного значения момента, скважности импульсов от времени при изменении момента нагрузки от значения 48,61 Н·м до значения 16,92 Н·м при значении скорости $240 + \Delta\Omega$, где $\Delta\Omega$ – погрешность регулирования при поддержании постоянства скорости (на рисунке $\Delta\Omega < 10\%$)

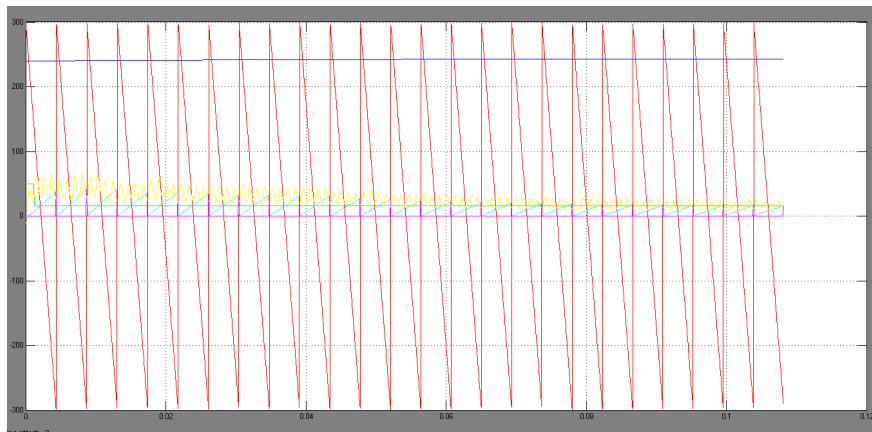


Рис. 2. Зависимости мгновенного и среднего значения результирующего момента, момента нагрузки, угла фазы А и угловой скорости от времени при изменении момента нагрузки от значения 48,61 Н·м до значения 16,92 Н·м при значении скорости $240 + \Delta\Omega$, где $\Delta\Omega$ – погрешность регулирования при поддержании постоянства скорости (на рисунке $\Delta\Omega < 10\%$)

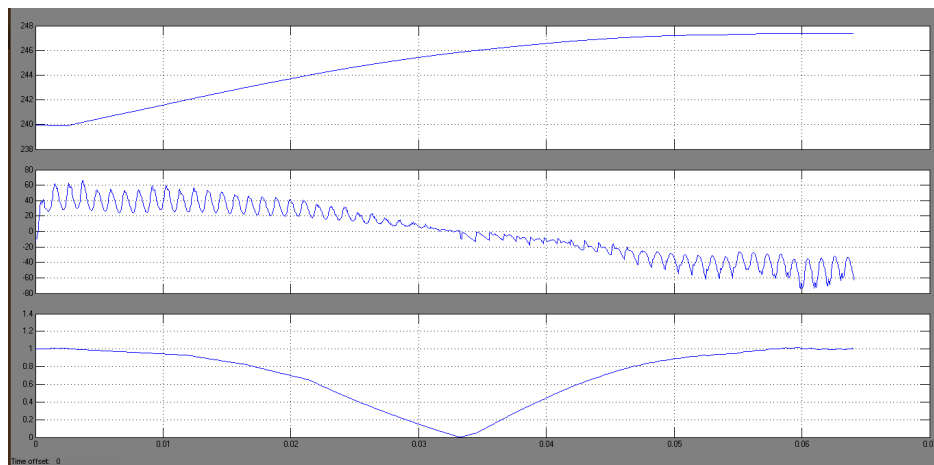


Рис.3. Зависимости угловой скорости, мгновенного значения момента, скажности импульсов от времени при изменении нагрузки от значения 48,61 Н·м до значения -47,88 Н·м при значении скорости $240 + \Delta\Omega$, где $\Delta\Omega$ – погрешность регулирования при поддержании постоянства скорости (на рисунке $\Delta\Omega < 10\%$)

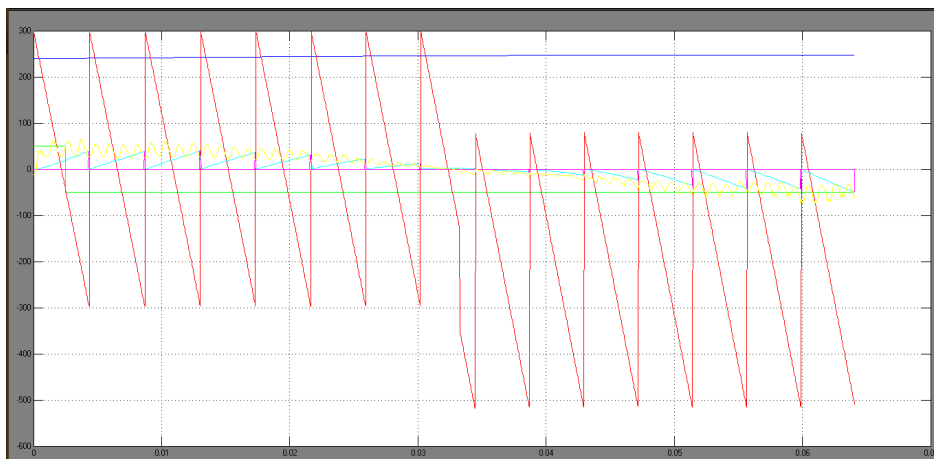


Рис. 4. Зависимости мгновенного и среднего значения результирующего момента, момента нагрузки, угла фазы А и угловой скорости от времени при изменении момента нагрузки от значения 48,61 Н·м до значения -47,88 Н·м при значении скорости $240 + \Delta\Omega$, где $\Delta\Omega$ – погрешность регулирования при поддержании постоянства скорости (на рисунке $\Delta\Omega < 10\%$)

Анализ результатов эксперимента. Рис. 1 иллюстрирует переход вентильно-индукторного двигателя в режиме двигателя от нагрузки 48,61 Н·м до нагрузки 16,92 Н·м. За время переходного процесса угловая скорость возросла до значения 242,7 рад/с, погрешность регулирования составила 1,125 %. Значения начальных и конечных скажностей импульсов

соответствуют приведенным в таблице ($PV_n=1$, $PV_k=0,4$). Рис. 2 иллюстрирует предыдущий опыт. Он показывает, что в режиме двигателя угол включения остается постоянным, равным 30 град. Средний момент постепенно уменьшается и при $t=0,108$ с становится равным моменту нагрузки 16,92 Н·м. Рис. 3 иллюстрирует переход из режима двигателя при нагруз-

ке 48,61 Н·м в режим рекуперативного торможения при нагрузке -47,88 Н·м. За время переходного процесса угловая скорость возросла до значения 247,4 рад/с, погрешность регулирования составила 3,08 %. Значения начальных и конечных скажностей импульсов соответствуют приведенным в таблице ($PV_n=1$, $PV_k=1$). Рис. 4 иллюстрирует предыдущий опыт. Он показывает, что при переходе из режима двигателя в режим рекуперативного торможения угол включения изменяется скачком от значения 30 град до значения 8 град в момент времени, при котором равен нулю средний момент двигателя ($t=0,033$ с). На рис. 3 в этот момент времени скажность равна нулю.

Выводы. Проведенное моделирование переходных процессов показало возможность качественной работы ВИД рудничного электровоза при выбранных управляющих параметрах и при разработанных законах изменения этих параметров. Для окончательного оптимального выбора управляющих параметров необходимо рассмотреть другие возможные варианты и провести сравнение по выбранным критериям.

Список литературы

1. Галайко, Л.П. Формирование механической характеристики вентильно-индукторного двигателя для стиральной машины малой мощности / Л.П. Галайко. – Материалы Международной научно-технической конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах». 24-28 сентября 2007 г. Севастополь 2007. С. 36-38.
2. Галайко, Л. П. Имитационное моделирование установившихся режимов работы вентильно-индукторного двигателя. / Л. П. Галайко. – Электротехника і електро механіка, 2005, №1, с. 24–26.
3. Галайко, Л.П. Моделирование режима рекуперативного торможения в имитационной модели вентильно-индукторно двигателя. / Л.П. Галайко// Электротехнічні і комп'ютерні системи. – 2017. Одеса. №25(101). С.146-153.
4. Галайко, Л.П. Анализ режима рекуперативного торможения вентильно-индукторного двигателя рудничного электровоза. / Л. П. Галайко. – Вестник НТУ «ХПИ», 34'2017, Харьков, 20017, с. 38-41.
5. Галайко, Л.П. Имитационное моделирование вентильно-индукторного двигателя в переходных режимах. / Л. П. Галайко. – Вестник НТУ «ХПИ», 48'2005, Харьков, 2005, с. 24–27.
6. H.Chen and G. Xie. Double 7.5-kW Three-Phase Switched Reluctance Motors Parallel Drive System for Electric Locomotive Traction. 978-1-4244-1833-6-08/\$25.00 ©2008 IEEE.
7. Minguao Ma. An Integrated Switched Reluctance Motor Drive Topology With Voltage-Boosting and On-Board Charging Capabilities for Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) / Minguao Ma, Zhongyi Chang, Yihua Hu, et al. IEEE Access, V.6, 2018, p. 1550-1559.

References (transliterated)

1. Galayko, L.P. Formirovanie mehanicheskoy harakteristiki ventilno-induktorного dvgatelya dlya stiralnoy mashini maloy moshchnosti. [Formation of the mechanical characteristics of the Switched Reluctance motor for low power washer], (2007), *Materiali Mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskoy konerentsii "Problemi vishenyja energoefektivnosti elektromkhanicheskikh preobrazovateley v elektroenergeticheskikh sistemakh"*. Sevastopol., pp. 36-38,. (In Russian).
2. Galayko, L. P. Imitatsionnoe modelirovanie ustanovivshikhsya rezhimov raboti ventil'no-induktorного dvgatelya [Simulation modeling of steady state Switched Reluctance motor], "Elektrotehnika i Elektromekhanika", (2005), №1, p.24–26.
3. Galayko, L.P. Modelirovanie rezhima rekuperativного tormozheniya v imitacionnoy modeli ventilno-induktorного dvgatelya. [Modeling of the recuperative braking working mode in imitating model of the switched reluctance motor]. *Elektrotehnicheskie i komputernie sistemi*. [Elektrik and computer system]. Odesa. 2017. №25 (101)
4. Galayko, L. P. Analiz rezhima rekuperativного tormozheniya ventil'no – induktorного dvgatelya rudnichного elektrovoza. [Analyse of the recuperative braking working mode of Switched Reluctance motor], *Vestnik NTU "HPI"*, 34'2017, Kharkiv, pp. 38-41.
5. Galayko, L. P. Imitatsionnoje modelirovanije ventil'no – induktorного dvgatelya v perekhodnikh rezhimakh. [Simulation of Switched Reluctance motor in transient conditions], *Vestnik NTU "HPI"*, 48'2005, Kharkiv, pp. 24–27.
6. H.Chen and G. Xie. Double 7.5-kW Three-Phase Switched Reluctance Motors Parallel Drive System for Electric Locomotive Traction. 978-1-4244-1833-6-08/\$25.00 C 2008 IEEE.
7. Minguao Ma. An Integrated Switched Reluctance Motor Drive Topology With Voltage-Boosting and On-Board Charging Capabilities for Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) / Minguao Ma, Zhongyi Chang, Yihua Hu, et al. IEEE Access, V.6, 2018, p. 1550-1559.

Поступила (received) 05.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Галайко Лідія Петрівна (Галайко Лидия Петровна, Galayko Lidiya Petrivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, м. Харків, Україна; e-mail: lidagalayko@gmail.com.

УДК 621.314

doi: 10.20998/2079-3944.2018.32.10

В.В. МИХАЙЛЕНКО, О.С. ЧАРНЯК**АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ДЕСЯТИЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НАПРУГИ І ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

Розроблено нові математичні моделі електромагнітних процесів у трифазних електричних колах напівпровідникових перетворювачів з багатоканальним зонним регулюванням фазних напруг без урахування енергетичних втрат у напівпровідникових комутаторах для швидкої оцінки впливу параметрів навантаження на рівень і форму вихідної напруги. У цій статті проведено аналіз електромагнітних процесів в електричних колах напівпровідниковими комутаторами. Створено математичну модель для аналізу електромагнітних процесів в напівпровідникових перетворювачах з широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги. Наведено графіки, що відображають електромагнітні процеси у електричних колах. Стаття присвячена розвитку метода багатопараметричних функцій шляхом розробки нових математичних моделей та визначення функцій і алгоритмічних рівнянь для аналізу за підсистемними складовими електромагнітних процесів у розгодулжених електричних колах з напівпровідниковими комутаторами і ланками з синусоїдальними, постійними і імпульсними напругами. Напівпровідникові комутатори можуть виконувати високочастотне зміння структури електричних кіл і широтно-імпульсну модуляцію фазних і лінійних напруг трифазної мережі електроживлення, виконуючи регулювання вихідних напруг напівпровідникових перетворювачів параметрів електричної енергії.

Ключові слова: електромагнітні процеси; вихідні напруга та струм; двигун постійного струму; метод багатопараметричних модулюючих функцій.

В.В. МИХАЙЛЕНКО, О.С. ЧАРНЯК**АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С ДЕСЯТИЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАПЯЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ**

Разработано новые математические модели электромагнитных процессов в трехфазных электрических цепях полупроводниковых преобразователей с многоканальным зонным регулированием фазных напряжений без учета потерь в полупроводниковых коммутаторах для быстрой оценки влияния параметров нагрузки на уровень и форму выходного напряжения. В этой статье проведено анализ электромагнитных процессов в электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами. Создано математическую модель для анализа электромагнитных процессов в полупроводниковых преобразователях с широтно-импульсным регулированием выходного напряжения. Приведено графики, которые отражают электромагнитные процессы в электрических цепях. При выполнении расчетов использовался метод многопараметрических функций. Математическая модель преобразователя создана для десятизонного регулирования выходного напряжения. Статья посвящена развитию метода многопараметрических модулирующих функций путем разработки новых математических моделей и определения функций и алгоритмических уравнений для анализа по подсистемным составляющим электромагнитных процессов в разветвленных электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами и звеньями с синусоидальными, постоянными и импульсными напряжениями. Полупроводниковые коммутаторы могут осуществлять высокочастотное изменение структуры электрических цепей и широтно-импульсную модуляцию фазных и линейных напряжений трехфазной сети электропитания, реализуя регулирование выходных напряжений полупроводниковых преобразователей параметров электрической энергии.

Ключевые слова: электромагнитные процессы; выходные напряжение и ток; двигатель постоянного тока; метод многопараметрических модулирующих функций.

V.V. MIHAYLENKO, O.S. CHARNYAK**ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN A CONVERTER WITH A DECONDON VOLTAGE REGULATION AND ELECTROMECHANICAL LOAD**

The new mathematical models of the electromagnetic processes is designed in three-phase electric circuit of the semiconductor converters with many-server zoned regulation phases voltages disregarding losses in semiconductor commutator for quick estimation of the influence parameter loads on level and form of the output voltage. mathematical model of the semiconductor converter is also used for study of the connecting processes in semiconductor converter with actively-inductive load. Will develop the method multivariable function, what fall into algorithmic equations of the analysis formed and connecting processes in furcated electric circuit with semiconductor commutator and reactive element, toward account of the particularities of the use phase and linear voltages to network of the power supply. Analysis of the electromagnetic processes is organized beside this article in electric circuit with semiconductor commutator. Mathematical model is created for analysis electro-magnetic processes in semiconductor converter with width pulsed regulation of the output voltage. The broughted graphs, which reflect the electromagnetic processes in electric circuit. Method much parametric functions was used when performing calculation. The mathematical model of the converter is created for twenty zoned regulations of the output voltage. Article is devoted to the development of a method of multi-parametric modulating functions by means of working out of new mathematical models and definition of functions and the algorithmic equations for the analysis on sub-system components of electromagnetic processes in electric circuits of variable structure with sinusoidal, direct and pulsing voltage. Introduction of functions with discrete parameters in the algorithmic equations for analysis of processes in circuits with semiconductor commutators simplifies modeling on subsystem components. The mathematical model of steady-state processes and transients in electric circuits of semiconductor converters of modulation type with multi-channel zonal use of phase and line voltages of a three-phase network of power supplies is developed. The mathematical model of electric circuits of thyristor shapers of electro-discharge pulses for the analysis and the matching of capacitors charging modes with decrease several times of electric resistance of technological load is also created. The obtained results have a great value for development theoretical electrical engineering in a direction of simplification of calculations of electromagnetic processes in electric circuits with semiconductor converters of the electric power. The Electromagnetic processes in electric circuit under width-pulse regulation possible to analyse with use the algorithmic equations multivariable function, which argument are a system parameters semiconductor commutator, signal of control, phases to network of the power supply and time. Introduction multivariable function with discrete parameter in algorithmic equations of the analysis formed and connecting processes in electric circuit of the variable structure allows to reflect change of this structure under system components, simplifying modeling and analysis of such processes to account of the gener-

© В.В. Михайленко, О.С. Чарняк, 2018

alization of the got equations. Except specified correlations and diagrams designed model allows to analyse forms of the output voltages and current of the separate power modules.

Key words: electromagnetic processes; the output voltage and current; the engine of the direct current; method multivariable modulating function.

Вступ. Якісне перетворення електричної енергії, дозволяє використовувати в перетворювальних установках ланку високої частоти з частотою переключення вентилів значно більшої від частоти змінної напруги промислової мережі [1-10]. У роботах [1-4] показана доцільність використання структур перетворювачів частоти (ПЧ) з однократною модуляцією при побудові систем вторинного електропостачання для комплексів діагностики електромеханічних пристроїв із різноманітним видом вхідної енергії. У даній роботі проводиться аналіз аспекту використання тієї ж структури ПЧ для електромеханічних комплексів із широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) постійної напруги при десятизонному керуванні.

Метою роботи є аналіз електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими перетворювачами і розробка математичної моделі перетворювача з електромеханічним навантаженням.

Аналіз електромагнітних процесів. Узагальнена структурна схема перетворювача показана на рис. 1. На структурній схемі позначені: СМА, СМВ, СМС – силові модулятори (СМ) фазних А, В і С відповідно, ВВ – високочастотний випрямляч, Н – навантаження; D – двигун постійного струму. Сукупність СМ, підключених до енергетичної мережі паралельно і з'єднаних по виходу послідовно, представляє собою ланку високої частоти перетворювача.

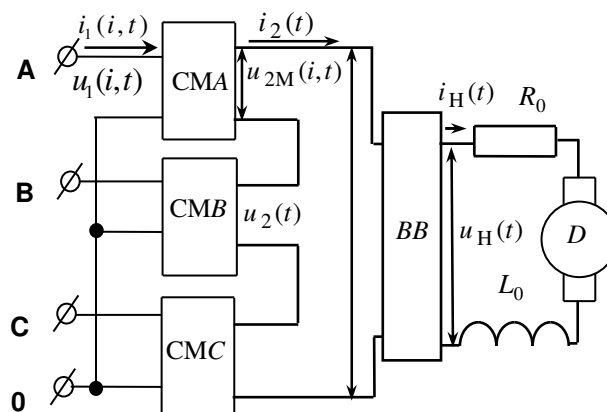


Рис. 1. Структурна схема НПП.

Дослідження техніко-економічних показників різного виду виконавчих елементів слідкуючих систем на основі високомоментних двигунів постійного струму (ДПС) серій 2П та ПВ і трифазних асинхронних двигунів серії 4А, які випускаються промисловістю серійно [4], показують, що за умови однакових показників за масою та габаритами в діапазоні потужностей від 100 Вт до 500 кВт, у слідкуючих системах доцільніше використовувати ДПС.

При складанні математичної моделі перетворювача з комп'ютерною орієнтацією її застосування використовуємо метод багатопараметричних модулюючих функцій [5], який передбачає попереднє представлення алгоритмічного рівняння перетворювача. При цьому прийемо такі припущення: вхідна енергетична мережа симетрична і її внутрішній опір дорівнює нулю, транзистори і діоди інверторів випрямленої напруги (ІВН) представляються ідеальними ключами, узгоджувальні трансформатори в кожній з зон регулювання вихідної напруги не мають втрат.

Проведення системного аналізу електромагнітних процесів у модуляційному НПП з багатозонним регулюванням вихідної напруги з навантаженням у вигляді ДПС з послідовним збудженням, з урахуванням таких ознак системного підходу до аналізу [4], як цілісність та вплив під час її руху зовнішніх і внутрішніх факторів.

Напругу на навантаженні НПП знаходимо з виразу виду

$$u_H(t) = \frac{1}{k_T} \sum_{n=1}^{N=10} \sum_{i=1}^3 u_i(i,t) \psi_B(i,t) \psi(n,N,t) \psi_{BB}(t), \quad (1)$$

де $u_i(i,t)$ – миттєві значення фазних напруг мережі, $\psi_B(i,t)$ – функції прямокутного синуса, що співпадають за часом з положенням відповідних фазних напруг;

$n = 1, 2, \dots, N=10$ – номери зон регулювання;

$\psi(n,N,t)$ – множина еквівалентних модулюючих впливів i -х інверторів СМ;

$\psi_{BB}(t)$ – функція прямокутного синуса, що співпадає за часом з положенням напруги $u_2(t)$;

k_T – коефіцієнт трансформації.

ДПС, що задає вихідний струм НПП, описується системою алгебраїчних рівнянь [4]

$$\begin{pmatrix} i_{H_k}(t) \\ n_{k+1}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_{H_k}(t) + \frac{2(c(t) - \varepsilon_{ch})}{a_1} - \frac{2\varepsilon_a}{a_1} i_{H_k}(t) - \frac{2}{a_1} \times \\ \times n_k(t) i_{H_k}(t) - \frac{2}{a_1 a_3} i_{H_k}^3(t); \\ n_k(t) + 4(c(t) - \varepsilon_{ch}) \times \\ \times i_{H_k}(t) / a_1 a_3 - \frac{2\varepsilon_M}{a_3} n_k(t) \\ + \frac{2}{a_3} i_{H_k}^2(t) - \frac{2\varepsilon_{M0}}{a_3} \\ - \frac{2}{a_1 a_3} i_{H_k}^2(t) n_k(t) - \frac{2\varepsilon_{M0}}{a_3} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де $i_{H_k}(t)$, $i_{H_{k+1}}(t)$, $n_k(t)$, $n_{k+1}(t)$ – струм якоря та кутова швидкість обертання ДПС на k -ому та $k+1$ -ому інтервалі відповідно;

ε_{ch} , ε_a – відносні падіння напруги на щітках і обмотці якоря;

ε_M , ε_{M0} – відносні моменти опору на валу;

$c(t) = \frac{u_H(t)}{E}$ – відносне значення напруги на якорі;

$u_H(t)$ та E – відповідно миттєві значення вихідної напруги НПП та проти ЕРС;

$$a_1 = \varepsilon_a + \frac{2T_{ab}}{\Delta t}, \quad a_3 = \varepsilon_M + \frac{2T_M}{\Delta t};$$

T_{ab} та T_M – електромагнітна та механічна постійні часу двигуна,

Δt – інтервали часу, за якими проводяться розрахунки.

Система (2) вирішується за допомогою методу припасовування з попереднім записом початкових умов при $t = 0$ та припущеннями відносно лінійної залежності моменту опору на валу двигуна від швидкості обертання [3] і лінеаризованої кривої намагнічування.

Діаграми струмів кола якоря ДПС для випадку десятизонного регулювання вихідної напруги НПП наведені на рис. 2. Крива 1 відображає струм кола якоря в процесі пуску ДПС під дією максимальної величини напруги (3), а крива 2 – струм кола якоря в процесі пуску ДПС під дією напруги (3) з десятизонним широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) за лінійним законом.

Вихідний струм $i_2(t)$ знаходимо з співвідношення

$$i_2(t) = i_{H_k}(t) \Psi_{BB}(t). \quad (3)$$

Вхідні струми $i_1(n, i, t)$ знаходимо з виразу

$$i_1(n, i, t) = \frac{i_2(t) \Psi_B(i, t) \Psi(n, N, t)}{k_T}, \quad (4)$$

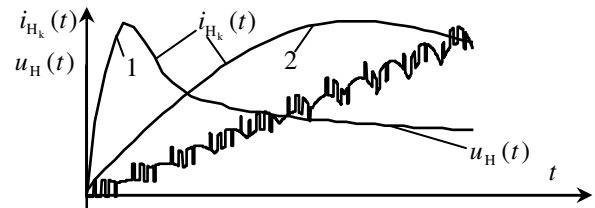


Рис. 2. Діаграми струмів кола якоря ДПС

Для визначення струмів i -х фаз мережі у всьому діапазоні регулювання вихідної напруги НПП підсумуємо вхідні струми ІВН, що беруть участь у процесі регулювання вихідної напруги в кожній з i -ї фази. Загальний вираз для струмів i -х фаз мережі подамо у вигляді

$$i_i(t) = i_1(i, t) + i_2(i, t) + \dots + i_N(i, t), \quad (5)$$

де $i_1(1, i, t)$, $i_2(2, i, t)$, $i_N(N, i, t)$ – вхідні струми інверторів i -х фаз на інтервалах першої, другої, та $N = 10$ -ї зони регулювання.

Діаграми вхідних струмів та напруг, побудовані за (5), представлені на рис. 3.

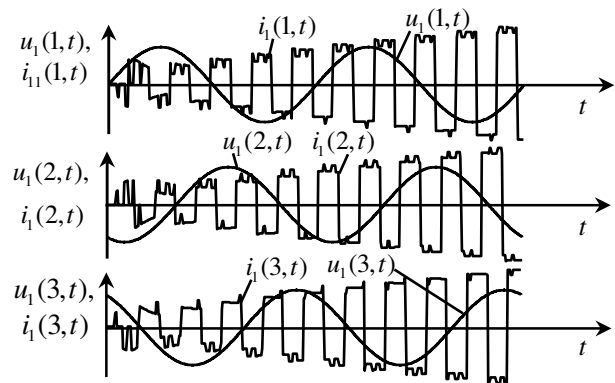


Рис. 3. Діаграми вхідних струмів i -х фаз мережі в координатах фазних напруг

Висновки за результатами дослідження. У даній роботі було виконано аналіз електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими перетворювачами. Створено нові математичні моделі напівпровідникових перетворювачів з високочастотним широтно-імпульсним регулюванням їх вихідної напруги при зміні параметрів навантаження в широких межах, які дозволили підвищити швидкодню електротехнологічних систем.

Список літератури

1. Макаренко М. П. Аналіз електромагнітних процесів у модуляційному напівпровідниковому перетворювачі напруги з електромеханічним навантаженням / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2003. – Ч. 3. – С. 21–24.
2. Макаренко М. П. Аналіз електромагнітних процесів у перетворювачах з багатозонним регулюванням вихідної напруги функціями багатопараметричного виду / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2002. – Ч. 1. – С. 19–22.

3. Макаренко Н. П. Анализ и моделирование электромагнитных процессов в силовых преобразовательных устройствах методом модулирующих функций / Н. П. Макаренко // Техн. електродинаміка. Системи електроживлення електротехнічних установок і комплексів. – Темат. вип. – 1999. – С.44–47.
4. Макаренко М. П. Деякі аспекти комп'ютерного аналізу напівпровідникових перетворювачів електроенергії з багаторозгалуженими структурами / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2004. – Ч. 1. – С. 112–115.
5. Макаренко Н. П. Математическая модель процесса формирования выходных напряжений преобразователей частоты / Н. П. Макаренко, Г. Абарка // Электроника и связь. – 1999. – №6, Т. 2. – С. 60–64.
6. Макаренко М. П. Системний аналіз електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії модуляційного типу / М. П. Макаренко, В. І. Сенько, М. М. Юрченко – К.: НАН України, ІЕД, 2005. – 241 с.
7. Макаренко Н. П. Экологические вопросы сетей вторичных систем электроснабжения промышленных предприятий / Н. П. Макаренко, Г. Абарка, Е. В. Небрат // Вісник УБЕНТЗ. – 1999. – №5. – С. 7–12.
8. Hossein Hojabri, Hossein Mokhtari and Luichen Chang. A Generalized Technique of Modeling, Analysis, and Control of a Matrix Converter Using SVD, *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, 2011, vol. 58, no. 3, pp. 949–959.
9. Hossein Hojabri, Hossein Mokhtari and Luichen Chang. Reactive power control permanent-magnet synchronous wind generator with matrix converter, *IEEE Trans. On Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 575–584.
10. Zarri, L., Mengoni, M., Toni, A. and Ojo, J.O. Range of the linear modulational in matrix converters, *IEEE Trans. On Power Electronics*, 2014, vol. 29, no. 6, pp. 3166–3178.
2. Makarenko M. P. Analiz elektromagnitnyh prosesiv u modulyatsionomu napivprovodnykovykh peretvoryuvachah z bagatozonnym reguluvannam vyhidnoi naprugi funkciamy bagatoparmetrychnogo vydu. M. P. Makarenko, V. V. Mykhailenko. *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyy vypusk "Sylova elektronika ta energoeфекtyvnist"*. 2002. P. 1. Pp. 19–22.
3. Makarenko M. P. Analiz i modelirovanie elektromagnitnyh prosesov v silovykh preobrazovatelnykh ustroystvakh metodom modeliruyushchih funkciy. *Tekhnichna elektrodynamika. Systemy elektrozgylennya elektrotekhnichnykh ustanovok i kompleksiv. Tematychnyy vypusk*. 1999. Pp. 44–47.
4. Makarenko M. P., Mykhailenko V. V. Deyaki aspekty kompyuternogo analizu napivprovodnykovykh peretvoryuvachiv elektroenerгии z bagatorozgaludgenymy strukturamy. *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyy vypusk "Sylova elektronika ta energoeфекtyvnist"*. 2004. P. 1. Pp. 112–115.
5. Makarenko M. P., Abarka G. Matematicheskaya model processa formirovaniya vyhodnykh napryazheniy preobrazovateley chastoty. *Elektronika i svyaz*. 1999. Vol. 6, P. 2. Pp. 60–64.
6. Makarenko M. P., Senko V. I., Yurchenko M. M. Systemnyy analiz elektromagnitnyh procesiv u napivprovodnykovykh peretvoryuvachah elektroenerгии modulyatsionogo typu. Kiev: NAN Ukraine, IED, 2005. 241 p.
7. Makarenko M. P., Abarka G., Nebat E. B. Ekologicheskie voprosy setey vtorichnykh system elektrosnabgeniya promyshlennykh predpriyatiy. *Bisnyk UBENTZ*. 1999. Vol. 5. Pp. 7–12.
8. Hossein Hojabri, Hossein Mokhtari and Luichen Chang. A Generalized Technique of Modeling, Analysis, and Control of a Matrix Converter Using SVD, *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, 2011, vol. 58, no. 3, pp. 949–959.
9. Hossein Hojabri, Hossein Mokhtari and Luichen Chang. Reactive power control permanent-magnet synchronous wind generator with matrix converter, *IEEE Trans. On Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 575–584.
10. Zarri, L., Mengoni, M., Toni, A. and Ojo, J.O. Range of the linear modulational in matrix converters, *IEEE Trans. On Power Electronics*, 2014, vol. 29, no. 6, pp. 3166–3178.

References (tranliterated)

Поступила (received) 05.12.2017

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Михайленко Владислав Володимирович (Михайленко Владислав Владимирович, Mihaylenko Vladislav Vladimirovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, доцент кафедри теоретичної електротехніки, м. Київ, Україна; e-mail: VladislavMihailenko@i.ua.

Чарняк Ольга Сергіївна (Чарняк Ольга Сергеевна, Charnyak Olga Sergiyvna) – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, студентка кафедри автоматизації енергосистем, м. Київ, Україна; e-mail: olka_tcharniak@ukr.net.

Ю. В. БАТЫГИН, С. А. ШИНДЕРУК, Г. С. СЕРИКОВ

ОСНОВНЫЕ РАСЧЁТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ В ДВУХКОНТУРНОМ РЕЗОНАНСНОМ УСИЛИТЕЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ

На базе трансформатора Тесла и идеализированной схемы из двух последовательных реактивно-активных индуктивно связанных контуров с нулевым активным сопротивлением вторичного контура предложена схема резонансного усилителя электрической мощности. Получены основные аналитические выражения для характеристик протекающих электромагнитных процессов в реальном варианте предлагаемого резонансного усилителя с конечными активными сопротивлениями. Найден коэффициент трансформации в виде соотношения, связывающего явление электромагнитной индукции и резонанса в функциональной зависимости от ключевых параметров предложенной схемы. С помощью предельных переходов к соответствующим аналогам в авторитетных специальных публикациях показана достоверность найденных базовых аналитических зависимостей для возбуждаемых токов и напряжений. Полученные расчётные соотношения базируются на физически «прозрачных» феноменологических положениях и строгом математическом подходе с использованием аппарата теории электрических цепей. Поскольку практический интерес представляет работа исследуемого объекта в стационарном режиме при гармонических входных сигналах, в расчётах применялся исключительно метод комплексных амплитуд без привлечения каких-либо физических гипотез о причинности резонансных явлений в их связи с фундаментальными представлениями о строении окружающего мира. Научная новизна настоящей работы состоит в предложении собственно схемы резонансного усилителя мощности гармонических сигналов, получении достоверных базовых соотношений для анализа протекающих электромагнитных процессов, численных оценок для сравнения с экспериментальными данными и, в конечном итоге, обоснования практической действенности предложенной схемы резонансного усилителя мощности. Практическая значимость: полученные аналитические зависимости для основных характеристик процессов в предложенной схеме резонансного усилителя электрической мощности представляют практический интерес для дальнейших теоретических исследований, а также для формулировки рекомендаций по изготовлению действующих образцов настоящего предложения. Пути дальнейших исследований: весьма перспективным в направлении проведенных исследований видится дальнейший анализ и экспериментальное изучение электромагнитных процессов в предложенной схеме резонансного усилителя электрической мощности.

Ключевые слова: резонансный контур, коэффициент трансформации, трансформатор Тесла, добротность, резонанс, резонансный усилитель мощности.

Ю. В. БАТИГІН, С. О. ШИНДЕРУК, Г. С. СЕРІКОВ

ОСНОВНІ РОЗРАХУНКОВІ СПІВВІДНОШЕННЯ У ДВОХКОНТУРНОМУ РЕЗОНАНСНОМУ ПІДСИЛЮВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ

На базі трансформатора Тесла і ідеалізованої схеми з двох послідовних реактивно-активних індуктивно пов'язаних контурів з нульовим активним опором вторинного контуру запропонована схема резонансного підсилювача електричної потужності. Отримано основні аналітичні вирази для характеристик електромагнітних процесів, що протікають, в реальному варіанті запропонованого резонансного підсилювача з кінцевими активними опорами. Знайдений коефіцієнт трансформації у вигляді співвідношення, що зв'язує явище електромагнітної індукції і резонансу в функціональній залежності від ключових параметрів запропонованої схеми. За допомогою граничних переходів до відповідних аналогам в авторитетних спеціальних публікаціях показана достовірність знайдених базових аналітичних залежностей для збуджувальних струмів і напруг. Отримані розрахункові співвідношення базуються на фізично «прозорих» феноменологічних положеннях і строгому математичному підході з використанням апарату теорії електричних ланцюгів. Оскільки практичний інтерес представляє робота досліджуваного об'єкта в стаціонарному режимі при гармонічних входних сигналах, в розрахунках застосовувався виключно метод комплексних амплітуд без залучення будь-яких фізичних гіпотез про причинність резонансних явищ в їх зв'язку з фундаментальними уявленнями про будову навколишнього світу. Наукова новизна цієї роботи полягає в пропозиції власне схеми резонансного підсилювача потужності гармонічних сигналів, отриманні достовірних базових співвідношень для аналізу електромагнітних процесів, що протікають, чисельних оцінок для порівняння з експериментальними даними і, в кінцевому підсумку, обґрунтування практичної дієвості запропонованої схеми резонансного підсилювача потужності. Практична значимість: отримані аналітичні залежності для основних характеристик процесів в запропонованій схемі резонансного підсилювача електричної потужності становлять практичний інтерес для подальших теоретичних досліджень, а також для формулювання рекомендацій по виготовленню діючих зразків справжнього пропозиції. Шляхи подальших досліджень: вельми перспективним в напрямку проведених досліджень є подальший аналіз і експериментальне вивчення електромагнітних процесів в запропонованій схемі резонансного підсилювача електричної потужності.

Ключові слова: резонансний контур, коефіцієнт трансформації, трансформатор Тесла, добротність, резонанс, резонансний підсилювач потужності.

YU. V. BATYGIN, S. A. SHINDERUK, G. S. SERIKOV

THE MAIN RELATIONSHIPS FOR CALCULATIONS IN TWO-CIRCUITS RESONANT AMPLIFIER OF THE ELECTRIC POWER

Based on a Tesla transformer and an idealized circuit of two consecutive reactive active inductively coupled circuits with zero active resistance of the secondary circuit, a scheme of a resonant electric power amplifier is proposed. The main analytical expressions for the characteristics of the flowing electromagnetic processes in the real version of the proposed resonant amplifier with finite resistances are obtained. The transformation coefficient in the form of a relation connecting the phenomenon of electromagnetic induction and resonance in a functional dependence on the key parameters of the proposed scheme is found. With the help of limiting transitions to the corresponding analogues in authoritative special publications, the reliability of the found basic analytical dependences for the excited currents and voltages is shown. The obtained calculated relations are based on physically “transparent” phenomenological computation and a rigorous mathematical approach using the apparatus of the theory of electrical circuits. Since it is of practical interest to work the object under study in the stationary mode with harmonic input signals, the method of complex amplitudes was used exclusively in the calculations without invoking any physical hypotheses about the causality of resonance phenomena in their connection with the fundamental ideas about the structure of the surrounding world. The scientific novelty of this work consists in proposing the actual circuit of a

resonant power amplifier of harmonic signals, obtaining reliable basic relations for analyzing the flowing electromagnetic processes, numerical estimates for comparison with experimental data and, ultimately, substantiating the practical effectiveness of proposed resonant power amplifier circuit. Practical significance: the obtained analytical dependences for the main characteristics of the processes in the proposed scheme of a resonant electric power amplifier are of practical interest for further theoretical studies, as well as for the formulation of recommendations for the manufacture of existing samples of the present proposal. **Ways to further research:** the further analysis and experimental study of electromagnetic processes in the proposed scheme of a resonant amplifier of electrical power seems very promising in the direction of the research.

Key words: resonant circuit, transformer ratio, Tesla transformer, quality factor, resonance, resonance amplifier power.

Введение. Сейчас, как никогда, перед Человечеством остро встают проблемы энергообеспечения, обусловленные, в первую очередь, истощением не возобновляемых природных ресурсов [1, 2].

Среди них особо выделяются проблемы создания современных источников электрической энергии. Их решению посвящено немало научных работ, где проанализированы, выдвинуты и обоснованы самые разнообразные предложения. Здесь известные нетрадиционные устройства, построенные на динамическом преобразовании энергии солнца и ветра, геотермальные станции и др. [3, 4]. В последнее время появились работы, направленные на создание физико-технической базы для описания энергетики окружающего мира с помощью новых физических представлений. Весьма интересными и перспективными представляются разработки систем по извлечению энергии из эфира – физической субстанции, заполняющей всё окружающее пространство [5–7].

Отвлекаясь от попыток глобального осмысления нашего Мироздания, целесообразно сконцентрировать внимание на реальных резонансных явлениях в электрических цепях, с помощью которых возможно усиление и тока, и напряжения, то есть, в конечном итоге, усиление электрической мощности.

Краткий обзор литературы. Не вдаваясь в перечисление известных реализаций, в первую очередь, особо следует выделить наиболее эффективный усилитель напряжения, запатентованный ещё в начале прошлого века и названный соответственно имени его изобретателя «трансформатором Тесла» [8, 9].

По существу, резонансный преобразователь напряжения данного типа состоит из двух индуктивно связанных активно-реактивных контуров. Первый, замкнутый (с сосредоточенными электрическими компонентами) и работающий от внешнего источника мощности, является задающим. Второй, разомкнутый и генерирующий сверхвысокое напряжение, является усилителем по отношению к входному сигналу. Электромагнитные процессы в выделенных контурах трансформатора Тесла проанализированы в работах [10, 11].

С помощью простой, но адекватной, физико-математической модели авторами [10] получены аналитические решения, иллюстрирующие действенность трансформатора при возбуждении гармоническим сигналом и переходе от коммутационных эффектов к стационарному состоянию. Было впервые показано, что усиление напряжения определяется не только индукционными, но и резонансными явлениями в электрической схеме трансформатора. Следует отметить, что этот результат согласуется с

феноменологическим выводом изобретателя, сформулированным, например, в курсе его лекций [8].

Авторами публикации [11] на основании теоретического анализа выполнены численные оценки эффективности усиления напряжения при каком-либо возможном отклонении рабочей частоты от её резонансного значения. Одной из самых значимых причин предполагаемого отклонения является «разомкнутость» высоковольтной обмотки трансформатора, что не позволяет однозначно зафиксировать ёмкость его выходного вторичного контура. Понятно, что на её величину будет влиять расположение окружающих объектов, естественные характеристики окружающей среды и др. Их влияние будет приводить к вышеупомянутому отклонению рабочей частоты от требуемого значения и, соответственно, к резкому падению эффективности усиления в целом.

Тем не менее, если трансформатор Тесла дополнить последовательным включением сосредоточенной ёмкости в цепь вторичной обмотки, то полученная схема из двух индуктивно связанных активно-реактивных контуров в резонансном режиме может представлять собой уже преобразователь не только напряжения, но, по-видимому, и тока, и электрической мощности.

Принципиальная сущность данного предложения, работающего, уже как преобразователь тока, проиллюстрирована простейшим примером авторами работы [12] и на рис. 1.

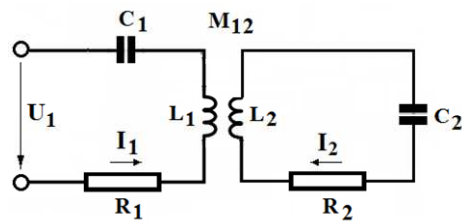


Рис. 1. Схема замещения двух индуктивно связанных контуров: $R_{1,2}$ – активные сопротивления, $L_{1,2}$ – индуктивности, $C_{1,2}$ – ёмкости, $M_{1,2}$ – взаимная индуктивность, $I_{1,2}$ – возбуждаемые токи, U_1 – источник гармонического напряжения

В идеализации, когда во втором контуре отсутствует активное сопротивление ($R_2 = 0$), система уравнений относительно комплексных токов и напряжений имеет вид [12]:

$$\begin{cases} \left(i\omega \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) + R_1 \right) \cdot I_1 + i\omega M_{12} \cdot I_2 = U_1; \\ i\omega M_{12} \cdot I_1 + i \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right) \cdot I_2 = 0. \end{cases} \quad (1)$$

При резонансе $\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right) = 0$, из

вышеприведенной системы (1) следуют выражения для возбуждаемых токов.

$$\begin{cases} I_1 = 0; \\ I_2 = -i \cdot \frac{U_1}{\omega M_{12}} \neq 0. \end{cases} \quad (2)$$

Авторами [12] соотношения из (2) интерпретируются следующим образом: при выполнении резонансных условий возбуждаемые токи $-I_1$ и I_2 устанавливаются такими, чтобы э.д.с. взаимной индукции $-i\omega M_{12} \cdot I_2$ со стороны второго контура на первый контур уравновесила напряжение источника (первое уравнение в системе (1)). Физически, по своему характеру, этот случай аналогичен резонансу токов в контуре без потерь.

Резюме: при нулевом токе в первом контуре ток во втором контуре имеет конечную величину, что означает возможность получения достаточно больших коэффициентов трансформации, но уже по току, а не напряжению.

Рассмотренная идеализация, как и трансформатор Тесла, могут быть положены в основу практического воплощения резонансного преобразователя мощности, состоящего также из двух индуктивно-связанных последовательных резонансных контуров, но с активными сопротивлениями конечной величины. Здесь «выход» генерируемой энергии может осуществляться как с индуктивности вторичного контура, так и с его ёмкости.

Цель – вывод основных аналитических зависимостей для резонансного усилителя мощности гармонических сигналов из двух индуктивно-связанных последовательных активно-реактивных контуров с обоснованием их достоверности при помощи предельных переходов к соответствующим аналогам, известным из авторитетных научных публикаций.

Научная новизна настоящей работы состоит в предложении собственно схемы резонансного усилителя мощности гармонических сигналов, получении достоверных базовых соотношений для анализа протекающих электромагнитных процессов, численных оценок для сравнения с экспериментальными данными и, в конечном итоге, обоснования практической действенности предложенной схемы резонансного усилителя мощности.

Расчётные соотношения. Сразу подчеркнём, что расчётные соотношения для теоретического обоснования действенности принимаемой схемы резонансного преобразователя мощности, аналогично работам [10, 11], базируются на физически «прозрачных» феноменологических положениях и строгом математическом подходе с использованием аппарата теории электрических цепей. Поскольку практический интерес представляет работа исследуемого объекта в стационарном режиме при гармонических входных сигналах, в расчётах применялся исключительно метод комплексных амплитуд без привлечения каких-либо физических гипотез о

причинности резонансных явлений в их связи с фундаментальными представлениями о строении окружающего мира [7–9, 12, 13].

Постановка задачи. Схема замещения предлагаемого преобразователя мощности из двух последовательных резонансных контуров с трансформатором связи между ними представлена на рис. 2. Индуктивность первичной и вторичной обмоток трансформатора – $L_{1,2}$, соответственно.

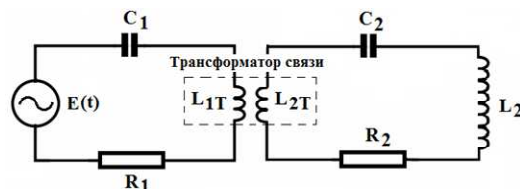


Рис. 2. Расчётная схема резонансного усилителя мощности

- Первый или «входной» контур с источником гармонического напряжения $-E(t) = E_m \sin(\omega \cdot t)$ (E_m – амплитуда, ω – частота, t – время) содержит последовательно соединённые индуктивность $-L_{1T}$, ёмкость $-C_1$, активное сопротивление соединительных проводов, внутреннего сопротивления источника напряжения и первичной обмотки трансформатора связи $-R_1$.

- Второй или «выходной» контур содержит индуктивность $-L_{2T}$, индуктивность $-L_2$, которая рассматривается как «выходной» элемент преобразователя в целом, ёмкость $-C_2$, активное сопротивление соединительных проводов и обмоток индуктивностей $-R_2$.

Примечание. Поскольку в резонансном режиме величина напряжения на реактивных элементах одинакова, в качестве «выходного» элемента преобразователя может служить и ёмкость $-C_2$.

- Частоты первого и второго контуров равны между собой, так что $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ – резонансная частота системы.

Расчётные соотношения.

Система уравнений, описывающих процессы в контурах системы, имеет вид [12, 13]:

$$\begin{cases} E = I_1 \left(i \left(\omega L_{1T} - \frac{1}{\omega C_1} \right) + R_1 \right) + i\omega M_{12} \cdot I_2; \\ -i\omega M_{12} \cdot I_1 = \left(i \left[\omega \cdot (L_{2T} + L_2) - \frac{1}{\omega C_2} \right] + R_2 \right) \cdot I_2; \end{cases} \quad (3)$$

где $I_{1,2}$ – токи в контурах, $M_{1,2} = k \cdot \sqrt{L_{1T} \cdot L_{2T}}$ – взаимная индуктивность обмоток трансформатора связи между контурами, $k \in [0,1]$ – коэффициент электромагнитной связи.

При выполнении условий резонанса $\left\{ \left(\omega \cdot (L_{2T} + L_2) - \frac{1}{\omega C_2} \right) = 0, \left(\omega L_{1T} - \frac{1}{\omega C_1} \right) = 0 \right\}$ система уравнений (3) принимает вид:

$$\begin{cases} E = I_1 \cdot R_1 + i\omega M_{12} \cdot I_2; \\ -i\omega M_{12} \cdot I_1 = R_2 \cdot I_2. \end{cases} \quad (4)$$

Из (4) получаем выражения для возбуждаемых токов.

$$\begin{cases} I_1 = E \cdot \frac{R_2}{(\omega M_{12})^2 + R_1 \cdot R_2}; \\ I_2 = -i \cdot \frac{E}{Z}. \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{где } Z = \frac{(\omega M_{12})^2 + R_1 \cdot R_2}{\omega M_{12}}.$$

Отметим, что Z имеет смысл модуля эквивалентного индуктивного сопротивления, связывающего напряжение источника мощности с резонансным током во втором контуре, поскольку, как следует из выражения для I_2 , здесь имеет место строго индуктивная связь.

Следует отметить, что при нулевом активном сопротивлении во втором контуре $I_1 = 0$, а $I_2 = -i \cdot \frac{E}{\omega M_{12}}$, что полностью согласуется с результатом (2) для идеализации, предложенной авторами [12].

Кроме того, с помощью полученных выражений (5) можно найти отношение напряжений на индуктивностях второго (исключая вторичную обмотку трансформатора связи) и первого контуров для сравнения с аналогичным показателем эффективности резонансного преобразования энергии в трансформаторе Тесла [8, 10].

Согласно определению и формул (5), находим, что

$$k = \frac{\overset{\text{def}}{U_{L_2}} = (\omega L_2 \cdot I_2)}{U_{L_{1T}} = (\omega L_{1T} \cdot I_1)} = k_{\text{тр}} \cdot Q_2, \quad (6)$$

где $U_{L_{1T,2}}$ – на индуктивностях $L_{1T,2}$,

соответственно, $k_{\text{тр}} = k_{12} \cdot \sqrt{\frac{L_{2T}}{L_{1T}}}$ – коэффициент трансформации, обусловленный явлением электромагнитной индукции, $Q_2 = \frac{\omega L_2}{R_2}$ – добротность второго контура, определяющая количественный вклад резонансных эффектов в процесс преобразования напряжений.

Отметим, что результат (6) полностью согласуется с качественной оценкой аналогичного показателя для трансформатора Тесла в работе [8] (прообраза рассматриваемого усилителя мощности), где, исходя из обобщения многочисленных экспериментальных данных, автор изобретения, делает вывод о том, что величина отношения индуктивного сопротивления вторичного контура к его активному сопротивлению определяет эффективность заявленного преобразователя напряжения. Этот вывод количественно согласуется с результатом исследований в [10]. Его также можно сформулировать и в

иных терминах, если учесть обратную пропорциональность резонансной частоты корню из произведения величин реактивных элементов. В этом случае отмеченное Н.Тесла отношение, так же как и добротность в выражении (6), будут равны отношению волнового сопротивления резонансного контура

$$- Z_2 = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \text{ к его активному сопротивлению } - R_2.$$

В заключение подчеркнём, что обоснованная достоверность полученных зависимостей имеет особую значимость, так как они являются базовыми в дальнейшей работе, конечной целью которой является обоснование практической деятельности предложенного резонансного усилителя электрической мощности.

Выводы.

1. Получены базовые аналитические выражения для анализа электромагнитных процессов в схеме предлагаемого резонансного усилителя мощности их двух последовательных реактивно-активных индуктивно связанных контуров.

2. Найден коэффициент трансформации в виде соотношения, связывающего явление электромагнитной индукции и резонанса в функциональной зависимости от ключевых параметров предложенной схемы.

3. С помощью предельных переходов к соответствующим аналогам в авторитетных специальных публикациях показана достоверность найденных базовых аналитических зависимостей для возбуждаемых токов и напряжений.

4. Дальнейшие перспективы – аналитические исследования процессов с численными оценками с последующим переходом к экспериментам для обоснования практической дееспособности предложенного резонансного усилителя электрической мощности.

Список литературы

1. Ушаков В. Я. *Современная и перспективная энергетика: технологические, социально-экономические и экологические аспекты*. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 469 с.
2. Energy Technology Perspectives: Catalysing Energy Technology Transformations. OECD/IEA. Paris, 2017. 443 p.
3. Карпенков С. Х. *Концепции современного естествознания*. Учеб. для ВУЗов. 11 изд., перераб. и доп. Москва: Кнорус, 2009. 672 с.
4. Твайделл Дж., Уэйр А. *Возобновляемые источники энергии*. Пер. с англ. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 392 с.
5. Яворский В. Энергия из ниоткуда. *Наука и жизнь*. 1998. № 10. С. 78–79.
6. Lindemann P. A. *The Free Energy Secrets of Cold Electricity*. Clear Tech Inc., 2000. 132 p.
7. Эткин В. А. *Теоретические основы бесплодной энергетике*. Altaspera Publishing & Literary Agency Inc., Canada, 2013. 159 с.
8. Тесла Н. *Лекции и статьи*. Москва: Tesla Print, 2003. 386 с.
9. Ацюковский В. А. *Трансформатор Тесла: энергия из эфира*. Жуковский: ООО Петит, 2004. 24 с.
10. Батыгин Ю. В., Чаплыгин Е. А., Шиндерук С. А., Сабокарь О. С. Резонанс во вторичном контуре трансформатора Тесла при возбуждении гармоническим напряжением. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: математичне моделювання в техніці та технологіях. № 30 (1252). 2017. С. 21–27.
11. Batygin Yu. V., Shinderuk S. A., Serikov G. S. The quantitative indices of the induction effects and the resonance phenomena in the

- Tesla transformer. *Danish Scientific Journal*, № 11–1, 2018, p. 72–79.
12. Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В., Чечурин В. Л., *Теоретические основы электротехники*. 4-е изд. Том 1. СПб: «Питер», 2003. С. 317–318.
 13. Атабеков Г. И. *Основы теории цепей*. Учебник. 3-е изд. СПб: Лань, 2009. 432 с.
 14. Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике (для научных работников и инженеров)*. Москва: Наука, 1973. 832 с.
 8. Tesla N. *Leksii i stat'* [Lectures and articles]. Moscow, Tesla Print Publ., 2003. 386 p.
 9. Atsyukovskiy V. A. *Transformator Tesla: energiya iz efira* [Tesla transformer: energy from ether]. Zhukovskiy: OOO Petit Publ., 2004. 24 p.
 10. Batygin Yu. V., Chaplygin E. A., Shinderuk S. A., Sabokar' O. S. Rezonans vo vtorichnom konture transformatora Tesla pri vzbuzhdenii garmonicheskimi napryazheniyami [Resonance in the secondary circuit of the Tesla transformer when excitation by the harmonic voltage]. *Visnik NTU «KhPI». Seriya: matematichne modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh* [Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies]. № 30 (1252). 2017. pp. 21–27.
 11. Batygin Yu. V., Shinderuk S. A., Serikov G. S. The quantitative indices of the induction effects and the resonance phenomena in the Tesla transformer. *Danish Scientific Journal*, № 11–1, 2018, pp. 72–79.
 12. Demirchyan K. S., Neyman L. R., Korovkin N. V., Chечурин V. L., *Теоретические основы электротехники* [Theoretical foundations of electrical engineering]. 4-е изд. Том 1. Saint Petersburg, Piter Publ., 2003. pp. 317–318.
 13. Atabekov G. I. *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of circuit theory]. Ucheb. 3-е изд. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2009. 432 p.
 14. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov)* [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 832 p.

References (transliterated)

1. Ushakov V. Ya. *Sovremennaya i perspektivnaya energetika: tekhnologicheskie, sotsial'no-ekonomicheskie i ekologicheskie aspekty* [Modern and future energy: technological, socio-economic and environmental aspects]. Tomsk, TPU Publ., 2008. 469 p.
2. Energy Technology Perspectives: Catalysing Energy Technology Transformations. OECD/IEA. Paris, 2017. 443 p.
3. Karpenkov S. Kh. *Kontseptsii sovremennogo estestvoznaniya* [Concepts of modern science]. Ucheb. dlya VUZov. 11 izd., pererab. i dop. Moscow, Knorus Publ., 2009. 672 p.
4. Tsvaydell Dzh., Ueyr A. *Vozobnovlyayemye istochniki energii* [Renewable Energy Resources]. Per. s angl. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 392 p.
5. Yavorskiy V. *Energiya iz niotkuda* [Energy out from “nowhere”]. *Nauka i zhizn'* [Science and life]. 1998. № 10. pp. 78–79.
6. Lindemann P. A. *The Free Energy Secrets of Cold Electricity*. Clear Tech Inc. Publ., 2000. 132 p.
7. Etkin V. A. *Teoreticheskie osnovy bestoplivnoy energetiki* [Theoretical Basis's of the Non-Fuel Power Engineering]. Altaspera Publishing & Literary Agency Inc., Canada, 2013. 159 s.

Поступила (received) 05.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Батигін Юрій Вікторович (Батыгин Юрий Викторович, Batygin Yuriy Victorovich) – доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1278-5621>; e-mail: yu.v.batygin@gmail.com.

Шиндерук Світлана Олександрівна (Шиндерук Светлана Александровна, Shinderuk Svitlana Olexandrivna) – кандидат технічних наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6354-4174>; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net.

Серіков Георгій Сергійович (Сериков Георгий Сергеевич, George Sergeevich Serikov) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри автомобільної електроніки, м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9578-1211>; e-mail: georgiy301212@gmail.com.

П. Г. ПЛІШКОВ, Н. Ю. ГАРАСЬОВА, В. П. СОЛДАТЕНКО

ОПТИМАЛЬНОЕ КЕРУВАННЯ РЕЖИМОМ РОБОТИ КОМБІНОВАНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Розроблено оптимальну систему автоматичного керування режимом комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії, яка дозволяє забезпечити максимальний рівень генерації активної потужності за умови дотримання нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання відновлюваних джерел електроенергії та електроспоживачів до електричної мережі. Показано, що дану задачу автоматичного керування найдоцільніше інтерпретувати як задачу багатокритеріальної оптимізації. Запропоновано структурну схему оптимальної системи автоматичного керування та алгоритм розрахунку вектора керування, в основу якого покладено розв'язки задачі багатокритеріальної оптимізації методом наближення до утопічної точки в просторі критеріїв. На основі розроблених структурної схеми системи автоматичного керування та алгоритму визначення вектору керування створено комп'ютерну імітаційну модель, яка дозволяє проводити аналіз режиму роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії. За допомогою даної моделі було визначено ефект від застосування розробленого алгоритму автоматичного керування установками генерації електричної потужності. Аналіз результатів комп'ютерного імітаційного моделювання засвідчив, що застосування розробленої оптимальної системи керування, на відміну від базової моделі, дозволяє підвищити рівень генерації активної потужності в районну електричну мережу за умови дотримання нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги. Так, при використанні розробленої системи автоматичного керування комбінованою електроенергетичною системою з відновлюваними джерелами енергії досягнуто збільшення генерації активної потужності в мережу на 8,13 %, порівняно з випадком базової моделі. При цьому результати статистичної обробки значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів засвідчили, що даний показник якості електроенергії для випадку розробленої системи автоматичного керування задовольняє вимогам ГОСТ 13109-97.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, система автоматичного керування, алгоритм, відхилення напруги.

П. Г. ПЛІШКОВ, Н. Ю. ГАРАСЕВА, В. П. СОЛДАТЕНКО

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ РАБОТЫ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Разработано оптимальную систему автоматического управления режимами комбинированной электроэнергетической системы с возобновляемыми источниками энергии, которая позволяет обеспечить максимальный уровень генерации активной мощности при условии соблюдения нормально допустимых значений установившегося отклонения напряжения в точке присоединения возобновляемых источников электроэнергии и электропотребителей к электрической сети. Показано, что данную задачу автоматического управления наиболее целесообразно интерпретировать как задачу многокритериальной оптимизации. Предложено структурную схему оптимальной системы автоматического управления и алгоритм расчета вектора управления, в основу которого положены решения задачи многокритериальной оптимизации методом приближения к утопической точке в пространстве критериев. На основании разработанных структурной схемы системы автоматического управления и алгоритма определения вектора управления создана компьютерная имитационная модель, которая позволяет проводить анализ режима работы комбинированной электроэнергетической системы с возобновляемыми источниками энергии. С помощью данной модели был определен эффект от применения разработанного алгоритма автоматического управления установками генерации электрической мощности. Анализ результатов компьютерного имитационного моделирования показал, что применение разработанной оптимальной системы управления, в отличие от базовой модели, позволяет повысить уровень генерации активной мощности в районную электрическую сеть при условии соблюдения нормально допустимых значений установившегося отклонения напряжения. Так, при использовании разработанной системы автоматического управления комбинированной электроэнергетической системой с возобновляемыми источниками энергии достигнуто увеличение генерации активной мощности в сеть на 8,13 %, в сравнении со случаем базовой модели. При этом результаты статистической обработки значений установившегося отклонения напряжения в точке присоединения электропотребителей показали, что данный показатель качества электроэнергии для случая разработанной системы автоматического управления удовлетворяет требованиям ГОСТ 13109-97.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, система автоматического управления, алгоритм, отклонение напряжения.

P. G. PLIESHKOV, N. Y. GARASEVA, V. P. SOLDATENKO

OPTIMAL CONTROL OF THE WORK OF THE HYBRID ELECTRIC ENERGY SYSTEM WITH RENEWABLE SOURCES OF ENERGY

Were developed an optimal system of automatical control for mode of hybrid electric power supply system with renewable energy sources, that let increase the maximal active power generation level in the case when were maintaining the normal admissible level of voltage deviation in the point of connection of renewable electric power sources and power consumers into the grid. It is shown that this task of automatical control is most acceptable to interpret as the matter of multicriterial optimisation. Where proposed a structural circuit of optimal system of automatical control and algorithm of calculation vector of the control, which based on the solution of the problem of multicriterial optimization using the method of approximation to the utopia point in the criteria space. Basing on the developed the structural circuit and the algorithm of definition vector of the control was created the computer imitational model which is let to analyze the modes of hybrid power system with renewable energy sources. Using the model was definite the effect from the application of the developed algorithm of automatic control of electric power generation plants. An analysis of computer imitational modeling results show that application of developed optimal automatic control system, in diverse from basic model, is let to increase the level of generation of active electric power into distribution grid in case of maintaining the normal admissible levels of voltage deviation. In case of application of the developed automatic control system for hybrid power system with renewable power sources were gained the increase of power generation to the distribution grid on 8,13 % more than in case of exploitation of based model. In this conditions the results of statistical analysis of values of voltages stable deviation in the connection point for electrical power consumers is shown that the electricity quality indicator for the case of developed automatic control system is appropriate with GOST 13109-97.

Keywords: renewable energy sources, automatic control system, algorithm, voltage deviation.

Вступ. Сучасний етап розвитку енергетики України характеризується все більшим поширенням установок генерації електричної потужності з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ). Згідно даних Держенергоефективності України в секторі відновлюваної енергетики введено потужностей, що генерують електричну енергію за «зеленим» тарифом, у 2016 р. – 121 МВт, у 2017 р. – 257 МВт, за три місяці 2018 р. – 159,4 МВт.

Зважаючи на географічне розташування та кліматичні умови, в Україні найбільшого розповсюдження набули сонячні електростанції (СЕС) та вітрові електростанції (ВЕС). На підприємствах агропромислового комплексу, досить поширеними є установки по переробці біологічних відходів з подальшим виробництвом електроенергії – біогазові електростанції (БГЕ). Основною метою встановлення таких установок на промислових підприємствах є зниження плати за спожиту електроенергію за рахунок власного її виробництва. До того ж, продаж надлишку генерованої електроенергії в енергосистему за «зеленим» тарифом значно скорочує термін окупності таких установок.

Приєднання установок з ВДЕ до електричної мережі відбувається на різних її рівнях в залежності від їх потужності та призначення. Для випадку застосування установок з ВДЕ на промислових підприємствах, точка їх підключення до розподільної електричної мережі (РЕМ), як правило, співпадає з точкою приєднання електроспоживачів.

Приєднання установок з ВДЕ до РЕМ напругою 0,4 – 35 кВ потребує здійснення заходів з модернізації електричних мереж. Проте, реалізація таких заходів ускладнюється рядом суттєвих факторів, основним з яких є необхідність значних капіталовкладень. З цієї причини приєднання установок з ВДЕ до РЕМ часто не супроводжується модернізацією останніх.

В зв'язку з цим нерідко виникає ситуація, коли в режимі реверсивного потоку потужності в РЕМ спостерігаються понаднормові завищені значення усталеного відхилення напруги.

Системи автоматичного керування (САК) сучасних установок з ВДЕ дозволяють здійснювати керування значенням усталеного відхилення напруги в точці приєднання шляхом автоматичної зміни рівня генерації потужності в електричну мережу. Так, в режимі реверсивного потоку потужності в РЕМ для уникнення завищених значень усталеного відхилення напруги, САК установок з ВДЕ здійснює обмеження генерації потужності в РЕМ в залежності від верхнього значення уставки по напрузі. Такий підхід до регулювання гарантовано забезпечує нормально допустимі значення усталеного відхилення напруги в точці приєднання установок з ВДЕ.

Проте суттєвим його недоліком є зниження рівня генерації активної потужності в мережу і, як наслідок, скорочення фінансових надходжень від продажу електричної енергії по «зеленому» тарифу.

Тому, задача удосконалення САК установками з ВДЕ з метою забезпечення максимального рівня генерації активної потужності цими установками за

умов дотримання нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів до РЕМ є актуальною.

Аналіз публікацій. Питання удосконалення керування установками з ВДЕ за умови дотримання нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів до розподільної мережі розглядалося в роботах [1-5]. Зокрема у роботі [4] була запропонована математична модель, яка формалізує задачу керування режимом комбінованої електроенергетичної системи (КЕС) з ВДЕ таким чином, щоб забезпечити максимально можливий рівень генерації активної потужності за умови дотримання нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання електроспоживачів до розподільної мережі. Шляхом порівняння переваг і недоліків методів розв'язку задачі керування був обраний метод багатокритеріальної оптимізації. В роботі [5] був проведений аналіз методів розв'язку задач скалярної оптимізації та висунуті вимоги до САК, що здатна реалізувати керування в режимі реального часу. Однак, для визначення ефективності обраного методу розв'язку шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання необхідно на основі запропонованої в [4] математичної моделі керування розробити структурну схему САК, алгоритм визначення вектора керування та створити на їх основі комп'ютерну імітаційну модель автоматичного керування режимом КЕС з ВДЕ.

Мета роботи. Метою даної статті є розробка та дослідження роботи САК режимом КЕС з ВДЕ, що забезпечить максимально можливий рівень генерації активної потужності за умови дотримання нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

– розробити структурну схему САК режимом КЕС з ВДЕ та алгоритм розрахунку вектора керування;

– створити комп'ютерну імітаційну модель САК установками генерації електричної потужності, що містять ВДЕ;

– визначити ефект від застосування розроблених алгоритмів автоматичного керування установками генерації електричної потужності, що містять ВДЕ, шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання.

Викладення основного матеріалу досліджень. В роботі [4] була сформульована задача автоматичного керування режимом КЕС з ВДЕ у вигляді задачі багатокритеріальної оптимізації [4-5]:

$$\begin{cases} Q_1(P_{\text{ген}}) = -P(P_{\text{ген}}) \rightarrow \min; \\ Q_2(P_{\text{ген}}) = 3_{\Delta U}(P_{\text{ген}}) \rightarrow \min; \\ P_{\text{ген}} \in [P_{\min} \dots P_{\max}], \end{cases} \quad (1)$$

де $P_{\text{ген}}$ – потужність, яка генерується установками ВДЕ в електромережу;

$[P_{\min} \dots P_{\max}]$ – область допустимих значень $P_{\text{ген}}$;

$P(P_{\text{ген}})$ – прибуток від генерації потужності в електромережу установками з ВДЕ по «зеленому» тарифу;

$$P(P_{\text{ген}}) = c_0^{\text{ВДЕ}} P_{\text{ген}}, \quad (2)$$

де $c_0^{\text{ВДЕ}}$ – середнє арифметичне зважене по потужності генерації установками з ВДЕ значення ставки «зеленого» тарифу:

$$c_0^{\text{ВДЕ}} = \frac{c_0^{\text{СЕС}} P_{\text{ген}}^{\text{СЕС}} + c_0^{\text{ВЕС}} P_{\text{ген}}^{\text{ВЕС}} + c_0^{\text{БГЕ}} P_{\text{ген}}^{\text{БГЕ}}}{P_{\text{ген}}^{\text{СЕС}} + P_{\text{ген}}^{\text{ВЕС}} + P_{\text{ген}}^{\text{БГЕ}}}, \quad (3)$$

де $P_{\text{ген}}^{\text{СЕС}}$, $P_{\text{ген}}^{\text{ВЕС}}$, $P_{\text{ген}}^{\text{БГЕ}}$ – потужність генерації СЕС, ВЕС, БГЕ відповідно;

$c_0^{\text{СЕС}}$, $c_0^{\text{ВЕС}}$, $c_0^{\text{БГЕ}}$ – ставки «зеленого» тарифу для електроенергії, що генерується СЕС, ВЕС та БГЕ відповідно;

$3_{\Delta U}(P_{\text{ген}})$ – економічні збитки від понаднормових значень усталеного відхилення напруги на затискачах електроспоживачів:

$$3_{\Delta U}(P_{\text{ген}}) = a_1 [\Delta U(P_{\text{ген}}) + a_2]^2 \frac{S_{\text{н}}}{S_{\text{н max}}}, \quad (4)$$

де $\Delta U(P_{\text{ген}})$ – значення усталеного відхилення напруги на затискачах електроспоживачів;

a_1 , a_2 – постійні коефіцієнти, що визначаються якісним складом електроспоживачів;

$S_{\text{н}}$ – поточне значення повної потужності навантаження;

$S_{\text{н max}}$ – максимальне значення повної потужності навантаження.

Задача (1) є задачею багатокритеріальної оптимізації. В роботах [6-12] показано, що для знаходження розв'язків задач, подібних до (1), найдоцільніше скористатися методом наближення до утопічної точки в просторі критеріїв. Згідно даного методу знаходяться координати утопічної точки $Q_{\text{ут}} = (Q_{1\text{min}}, Q_{2\text{min}})$ в просторі критеріїв оптимізації $Q \subset \mathbb{R}^2$ в результаті визначення оптимального (мінімального) значення кожного з критеріїв. Після цього, шляхом вирішення серії задач мінімізації відстані ρ від утопічної точки до парето-оптимальної множини розв'язків в просторі критеріїв знаходяться координати розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації $P_{\text{ген}}^{\text{opt}}$ в просторі керування $P^{\text{opt}} \subset \mathbb{R}^3$.

Для випадку чебишевської метрики знаходження кінцевого розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації (1) набуває вигляду [4]:

$$\begin{cases} Q(P_{\text{ген}}) = \max \left\{ \frac{Q_1(P_{\text{ген}}) - Q_{\text{ут1}}}{k_1}, \right. \\ \left. \frac{Q_2(P_{\text{ген}}) - Q_{\text{ут2}}}{k_2} \right\} \rightarrow \min; \\ P_{\text{ген}} \in [P_{\text{min}} \dots P_{\text{max}}], \end{cases} \quad (5)$$

де k_1 та k_2 – вагові коефіцієнти, що враховують відносну важливість кожного з критеріїв.

На рис. 1 наведено структурну схему САК режимом генерації КЕС з ВДЕ, що базується на розв'язках задачі керування (1).

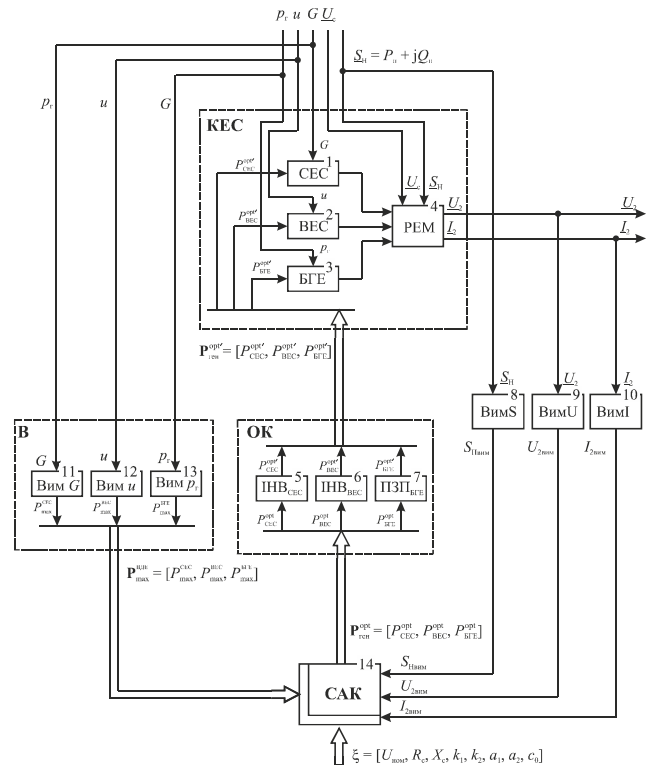


Рис. 1. Структурна схема САК режимом генерації КЕС з ВДЕ

На рис. 1: КЕС – комбінована електроенергетична система; ОК – об'єкт керування; В – вимірювач енергетичних характеристик ВДЕ; $p_{\text{г}}$ – тиск газу в газгольдері біогазової установки; u – швидкість вітру; G – інтенсивність сонячного випромінювання; U_c – напруга, яка підтримується в районній електричній мережі; $S_{\text{н}} = P_{\text{н}} + jQ_{\text{н}}$ – комплексна потужність навантаження; U_2 – комплекс напруги на шинах споживача; I_2 – комплекс струму в лінії; $S_{\text{нвим}}$ – виміряне значення комплексної потужності навантаження; $U_{2\text{вим}}$ – виміряне діюче значення комплексу напруги на шинах споживача; $I_{2\text{вим}}$ – виміряне значення комплексу струму в лінії; $\xi = [U_{\text{ном}}, R_c, X_c, k_1, k_2, a_1, a_2, c_0]$ – вектор задаючих параметрів; $P_{\text{ген}}^{\text{ВДЕ}} = [P_{\text{ген}}^{\text{СЕС}}, P_{\text{ген}}^{\text{ВЕС}}, P_{\text{ген}}^{\text{БГЕ}}]$ – вектор максимальних значень потужності ВДЕ; $P_{\text{ген}}^{\text{opt}} = [P_{\text{ген}}^{\text{opt СЕС}}, P_{\text{ген}}^{\text{opt ВЕС}}, P_{\text{ген}}^{\text{opt БГЕ}}]$ – вектор оптимальних значень потужностей ВДЕ, що визначений САК (вихідний сигнал САК); $P_{\text{ген}}^{\text{opt}} = [P_{\text{ген}}^{\text{opt СЕС}}, P_{\text{ген}}^{\text{opt ВЕС}}, P_{\text{ген}}^{\text{opt БГЕ}}]$ – вектор значень потужностей ВДЕ, що задається виконавчим пристроєм; 1 – сонячна електростанція; 2 – вітрова електростанція; 3 – біогазова електростанція; 4 – розподільна електрична мережа; 5 – інвертор сонячної електростанції; 6 – інвертор вітрової електростанції; 7 – інвертор біогазової електростанції; 8 – вимірювач потужності навантаження; 9 – вимірювач напруги на шинах споживачів; 10 – вимірювач струму в лінії; 11 – вимірювач інтенсивності сонячного випромінювання; 12 – вимірювач швидкості вітру; 13 – вимірювач тиску газу в газгольдері біогазової установки; 14 –

САК, що реалізує розрахунок вектора керування.

САК, структурну схему якої приведено на рис. 1 працює наступним чином. В блок 14 від вимірювачів енергетичних характеристик ВДЕ (11–13) надходить вектор $\mathbf{P}_{\max}^{\text{ВДЕ}} = [P_{\max}^{\text{СЕС}}, P_{\max}^{\text{ВЕС}}, P_{\max}^{\text{БГЕ}}]$ даних про максимально можливу в даний момент генерацію потужності установками ВДЕ.

На основі вектора $\mathbf{P}_{\max}^{\text{ВДЕ}}$ та даних вимірювань значення потужності споживання $S_{\text{НВМ}}$, напруги на шинах споживачів $U_{2\text{ВМ}}$, струму в лінії $I_{2\text{ВМ}}$, в блоці 14 відбувається розрахунок вектору оптимальних значень генерації потужностей ВДЕ $\mathbf{P}_{\text{ген}}^{\text{орт}} = [P_{\text{СЕС}}^{\text{орт}}, P_{\text{ВЕС}}^{\text{орт}}, P_{\text{БГЕ}}^{\text{орт}}]$. Вектор $\mathbf{P}_{\text{ген}}^{\text{орт}}$ передається на інвертори СЕС, ВЕС та БГЕ, які відповідно із власними технічними параметрами задають максимально близьку уставку потужності $\mathbf{P}_{\text{ген}}^{\text{орт}'} = [P_{\text{СЕС}}^{\text{орт}'}, P_{\text{ВЕС}}^{\text{орт}'}, P_{\text{БГЕ}}^{\text{орт}'}]$.

Алгоритм розрахунку оптимального вектора керування $\mathbf{P}_{\text{ген}}^{\text{орт}}$ режимом КЕС з ВДЕ приведений на рис. 2 у вигляді блок-схеми.

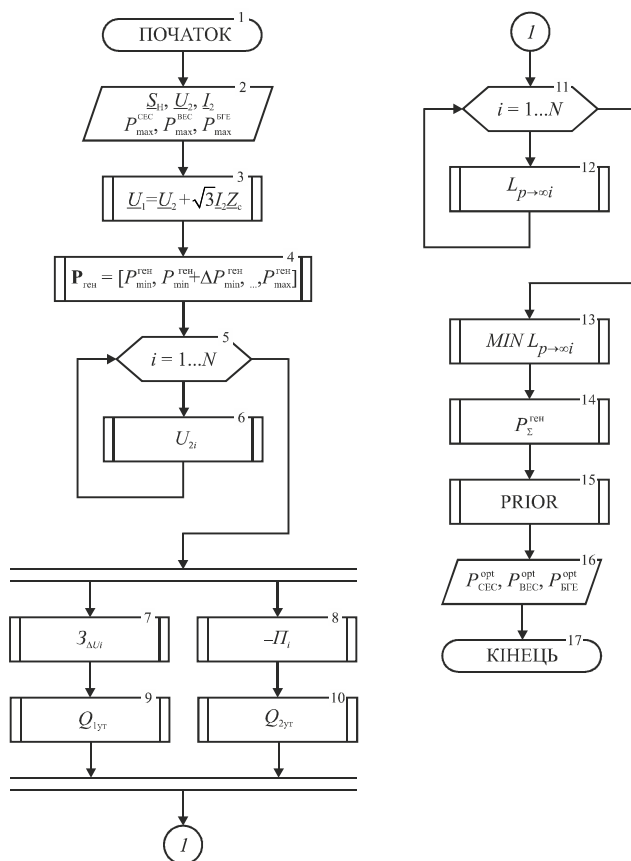


Рис. 2. Блок-схема алгоритму розрахунку оптимального вектора керування режимом роботи КЕС з ВДЕ

На рис. 2: 3 – процедура визначення напруги мережі U_c по відомим параметрам мережі та вимірним значенням потужності навантаження і струму в лінії; 4 – процедура дискретизації простору $\mathbf{P}_{\text{ген}} = [P_{\text{ген}}^{\text{СЕС}}, P_{\text{ген}}^{\text{ВЕС}}, P_{\text{ген}}^{\text{БГЕ}}]$ можливої потужності генерації; 6 – процедура розрахунку напруги U_2 на шинах споживача, при відповідних значеннях

потужності генерації із простору $\mathbf{P}_{\text{ген}}$, 7 – процедура визначення критерію Q_1 ; 8 – процедура визначення критерію Q_2 ; 9 і 10 – процедури визначення координат утопічної точки $Q_{1\text{yt}}$ і $Q_{2\text{yt}}$, реалізуються методом повного перебору; 12 – процедура визначення відстаней від елементів множини парето-оптимальних розв'язків та променя, що виходить з утопічної точки Q_{yt} ($Q_{1\text{yt}}$, $Q_{2\text{yt}}$) під кутом γ ; 13 – процедура пошуку мінімальної відстані від множини парето-оптимальних розв'язків до променя, що виходить з утопічної точки Q_{yt} ($Q_{1\text{yt}}$, $Q_{2\text{yt}}$) під кутом γ , реалізується методом повного перебору; 14 – процедура визначення оптимальної величини сумарної потужності генерації; 15 – процедура пріоритетного розподілу оптимальної величини сумарної потужності генерації між окремими видами ВДЕ та визначення оптимального вектора керування $\mathbf{P}_{\text{ген}}^{\text{орт}}$.

На рис. 3 представлено узагальнену комп'ютерну імітаційну модель САК режимом генерації КЕС з ВДЕ.

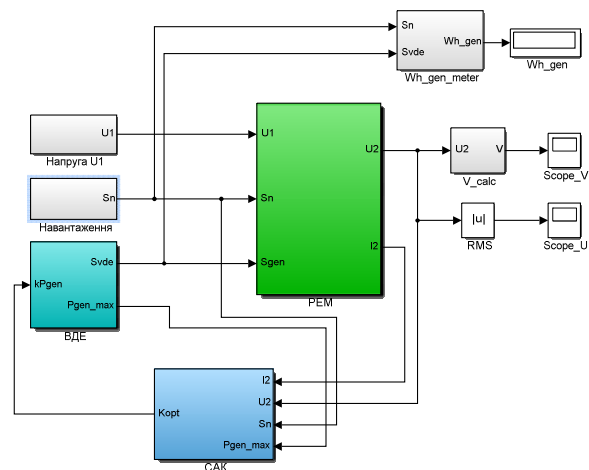


Рис. 3. Узагальнена комп'ютерна імітаційна модель САК режимом КЕС з ВДЕ для Matlab Simulink

Узагальнена модель САК режимом генерації КЕС з ВДЕ включає: «Напруга U1» – блок моделювання напруги РЕМ; «Навантаження» – блок моделювання навантаження споживачів; «ВДЕ» – блок моделювання роботи установок ВДЕ; «РЕМ» – блок моделювання режиму роботи РЕМ; «САК» – блок моделювання роботи САК режимами генерації; «Wh_gen_meter» – блок розрахунку згенерованої електричної енергії; «V_calc» – блок розрахунку відхилення напруги на шинах споживача; «RMS» – блок розрахунку діючого значення напруги на шинах споживача.

Для визначення ефекту від застосування розв'язку задачі керування (1) було проведено моделювання роботи РЕМ з КЕС з ВДЕ для таких випадків: при відсутності керування; для базової моделі при керуванні, що обмежує відхилення напруги на шинах споживачів значенням 5%; при розробленому оптимальному керуванні.

Статистична обробка результатів моделювання полягала у визначенні інтегральної імовірності потрапляння значення відхилення напруги V на шини споживачів у нормально допустимі межі

$$P(V_{\min} \leq V \leq V_{\max}) = \frac{N_{\text{доп}}}{N}, \quad (6)$$

де P – інтегральна імовірність потрапляння величини відхилення V в діапазон значень $V_{\min} < V < V_{\max}$;

$N_{\text{доп}}$ – кількість значень величини V , що входять в діапазон допустимих значень;

N – загальна кількість вимірювань величини V .

Результати комп'ютерного моделювання режиму роботи КЕС з ВДЕ для випадку відсутності регулювання приведені на рис. 4.

Результати комп'ютерного моделювання роботи САК базової моделі (з обмеженням відхилення напруги значенням 5 %) приведені на рис. 5.

Результати комп'ютерного моделювання роботи розробленої САК при оптимальному керуванні приведені на рис. 6.

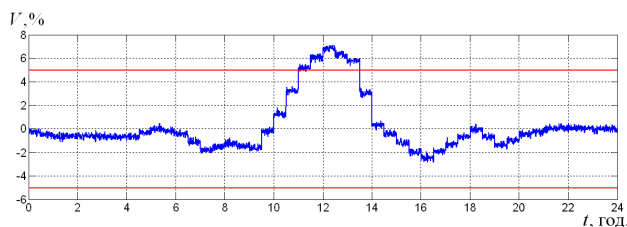


Рис. 4. Графік відхилення напруги на шини споживача без керування режимом

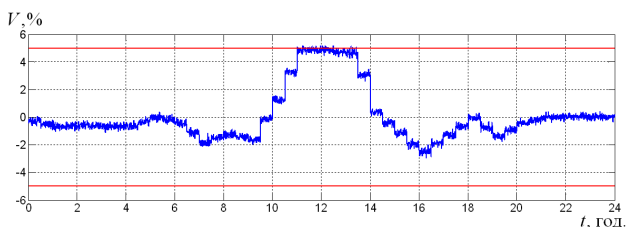


Рис. 5. Графік відхилення напруги на шини споживача при обмеженні відхилення напруги значенням 5 %

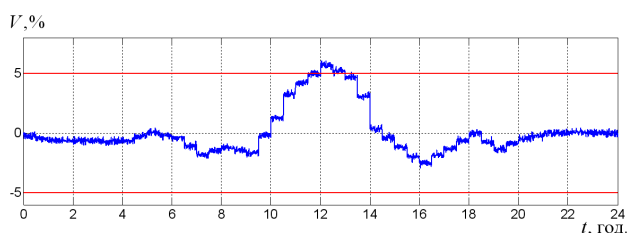


Рис. 6. Графік відхилення напруги на шини споживачів при керуванні режимом розробленою САК

Результати моделювання наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Числові результати моделювання

№	Показник	Модель базової САК	Модель розробленої САК
1	Електроенергія вироблена СЕС, кВт·год	992,6	1128
2	Електроенергія вироблена ВЕС, кВт·год	84,32	83,72
3	Електроенергія вироблена БГЕ, кВт·год	508,8	503,3
4	Електроенергія вироблена ВДЕ, кВт·год	1585,72	1715,02

Так для випадку без керування режимом генерації видно, що при цьому в РЕМ генерується максимальна кількість електроенергії – 219,3 кВт·год. Однак відхилення напруги V на шини споживача виходить за межі допустимих значень $[-5 \% \dots 5 \%]$ з інтегральною імовірністю 89,79 %, що суперечить вимогам ГОСТ 13109-97.

Для випадку базової моделі керування режимом генерації з обмеженням величини V крайніми межами діапазону $[-5 \% \dots 5 \%]$ вдається досягти 100 % потрапляння відхилення в діапазон допустимих значень. Однак при цьому величина генерації в РЕМ, а відтак і економічний ефект зменшується.

Застосування оптимального керування розробленою САК дозволяє підвищити рівень генерації в РЕМ, порівняно з базовою моделлю керування, на 8,13 %. При цьому інтегральна імовірність потрапляння величини відхилення в діапазон допустимих значень складає 95 %, що задовольняє вимогам ГОСТ 13109-97.

Таким чином реалізація алгоритму оптимального керування САК режимом КЕС з ВДЕ при розглянутих умовах дозволяє підвищити рівень генерації електроенергії в РЕМ на 8,13 % при збереженні технічних вимог ГОСТ 13109-97 до показника відхилення напруги V .

Висновки. Проведене дослідження показало:

1. Задачу оптимального керування режимом КЕС з ВДЕ за умови дотримання нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги найдоцільніше інтерпретувати як задачу багатокритеріальної оптимізації. Для вирішення даної задачі найдоцільніше застосовувати метод наближення до утопічної точки в просторі критеріїв.

2. Розроблені структурна схема САК режимом КЕС з ВДЕ та алгоритм визначення оптимального вектора керування, в основу яких покладено розв'язки задачі багатокритеріальної оптимізації дозволили створити комп'ютерні імітаційні моделі САК режимом КЕС з ВДЕ.

3. Результати комп'ютерного моделювання розробленої САК, в основу роботи яких покладено знайдені розв'язки задачі багатокритеріальної оптимізації підтвердили перевагу запропонованої САК над базовою. Так, для випадку розробленої САК величина генерації активної потужності виявилась на 8,13 % більшою в порівнянні з базовою САК. При цьому значення усталеного відхилення напруги для

випадку розробленої САК задовольняють вимогам ГОСТ 13109-97.

Список літератури

1. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування розосередженими джерелами енергії в локальній електричній системі / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. А. Ковальчук // Праці Інституту електродинаміки НАН України: збірник наукових праць. Спеціальний випуск, ч. 1. – 2011. – С. 48–55.
2. Лежнюк П. Д. Вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ / П. Д. Лежнюк, О. С. Рубаненко, І. О. Гунько // Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал. – 2015. – № 3 (41). – С. 7–13.
3. Лежнюк П. Д. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЛЕС / П. Д. Лежнюк, О. С. Рубаненко, І. О. Гунько // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 2. – С. 134–145.
4. Солдатенко В. П. Автоматичне керування режимами роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії / В. П. Солдатенко, С. П. Плешков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – 2017. №34(1256)2017 – С. 66–70
5. Солдатенко В. П. Система автоматичного керування роботою комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні навки. Вип. 187 Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2017 – С. 37–39.
6. Плешков П. Г. Оптимальне керування режимами напруг низьковольтних розподільних електричних мереж із використанням регулюючих пристроїв силових трансформаторів / П. Г. Плешков, Ю. А. Леванцова, В. В. Зінзура // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – 2017. №34(1256)2017 – С. 56–61
7. Тарануха М. С. Оптимальне керування режимами реактивного навантаження за умов несиметрії напруг розподільних електричних мереж / М. С. Тарануха, Р. В. Телюта, В. В. Зінзура // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 42. – С. 62–66.
8. Зінзура В. В. Розробка та дослідження роботи системи автоматичного управління пристроєм РПН силового трансформатора / В. В. Зінзура // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – № 3. – С. 99–109.
9. Зінзура В. В. Методи розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах. // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. / – Вип. 25. Ч.1 – Кіровоград: КНТУ, 2012. С. 350–360.
10. Машиунин Ю. К. Методы и модели векторной оптимизации. – М.: Наука, 1986. – 141 С.
11. Черноруцкий И. Г. Методы принятия решений. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 С.
12. Токарев В. В. Методы оптимальных решений. В 2 т. Т. 2. Многокритериальность. Динамика. Неопределенность. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 С.

References (transliterated)

1. Lezhniuk P. D., Kulyk V. V., Kovalchuk O. A. Optymalne keruvannya rozoseredzhenymy dzhерелamy enerhhiy v lokalnii elektrichnii systemi [Optimal control of scattered energy sources in the local electrical system] *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy: zbirnyk naukovykh prats. Spetsialnyi vypusk* [Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of

- Sciences of Ukraine: collection of scientific works. Special issue.] – 2011. – part 1. – pp. 48–55.
2. Lezhniuk P. D., Rubanenko O. Ye., Hunko I. O. Vplyv soniachnykh elektrichnykh stantsii na napruhu spozhyvachiv 0,4 kV [Flush of sonny electric power stations on the spur of settling 0,4 kV] *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia: naukovyi zhurnal*. [Energy: economics, technology, ecology: science journal] – 2015. – no. 3 (41). – pp. 7–13.
3. Lezhniuk P. D., Rubanenko O. Ye., Hunko I. O. Vplyv invertoriv SES na pokaznyky yakosti elektrichnoi enerhii v LES [Influence of solar power inverters on electrical energy quality in local electrical systems]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky* [Bulletin of the Khmelnytsky National University. Technical sciences.]. – 2015. – no. 2. – pp. 134–145.
4. Soldatenko V. P., Plieskov P. G. Avtomatychne keruvannya rezhymamy roboty kombinovanoi elektroenerhetychnoi systemy z vidnovliuvanymy dzhерелamy enerhii [Automatic control of the modes of operation of the combined power system with renewable energy sources] *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats. Serii: Problemy udoskonallennia elektrichnykh mashyn i aparativ*. [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of scientific works. Series: Problems of Improvement of Electric Machines and Apparatus.] – 2017. no. 34(1256)2017 – pp. 66–70
5. Soldatenko V. P. Systema avtomatychnoho keruvannya robotoiu kombinovanoi elektroenerhetychnoi systemy z vidnovliuvanymy dzhерелamy enerhii [The system of automatic control of the operation of a combined power system with renewable energy sources] *Visnyk KhNTUSH im. P. Vasylenka. Tekhnichni nauky. Vyp. 187 Problemy enerhozabezpechennia ta enerhozberezhennia v APK Ukrainy*. [Bulletin KhNTUSH P. Vasilenko. Technical lessons. Whip 187 Problems of power supply and energy saving in the agroindustrial complex of Ukraine.] – 2017 – pp. 37–39.
6. Plieskov P. H., Levantsova Yu. A., Zinzura V. V. Optymalne keruvannya rezhymamy napruh nyzkovoltnykh rozpodilnykh elektrichnykh merezh iz vykorystanniam rehuliuichykh prystroiv sylovykh transformatoriv [Optimal control of voltage regimes of low-voltage distribution electric networks using regulating devices of power transformers] *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats. Serii: Problemy udoskonallennia elektrichnykh mashyn i aparativ*. [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of scientific works. Series: Problems of Improvement of Electric Machines and Apparatus.] – 2017. no. 34(1256)2017 – pp. 56–61
7. Taranukha M. S., Teliuta R. V., Zinzura V. V. Optymalne keruvannya rezhymamy reaktivnoho navantazhennia za umov nesymetrii napruh rozpodilnykh elektrichnykh merezh [Optimal control of reactive load modes in the conditions of asymmetry of distributive electrical networks voltage] *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». Zbirnyk naukovykh prats. Tematychnyi vypusk: Problemy udoskonallennia elektrichnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka*. [Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Collection of scientific works. Thematic issue: Problems of improvement of electric machines and apparatuses. Theory and practice.] – 2015. – no. 42. – pp. 62–66.
8. Zinzura V. V. Rozrobka ta doslidzhennia roboty systemy avtomatychnoho upravlinnia prystroiem RPN sylovoho transformatora [Development and research of the system of automatic control of the control device under the voltage of the power transformer] *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». Zbirnyk naukovykh prats. Tematychnyi vypusk: Problemy udoskonallennia elektrichnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka*. [Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Collection of scientific works. Thematic issue: Problems of improvement of electric machines and apparatuses. Theory and practice.] – 2012. – no. 3. – pp. 99–109.
9. Zinzura V. V. Metody rozv'iazku zadachi bahatokryterialnoi optymizatsii rehuliuivannia napruhy v elektrichnykh merezhakh. [Methods of solving the problem of multicriteria optimization of voltage regulation in electric networks] *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohrads'koho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu* [Collection of scientific works of Kirovograd National Technical University] – 2012. no. 25 – part 1 – pp. 350–360.

10. Mashunyn Yu. K. Metody y modely vektornoї optymizatsyy. [Methods and models of vector optimization.] – Moscow – 1986. – 141 pp.
11. Chernorutskiy Y. H. Metody pryniatya resheniy. [Methods of decision making] – Saint Petersburg – 2005. – 416 pp.
12. Tokarev V. V. Metody optimalnykh resheniy. V 2 t. T. 2. Mnokryteryalnost. Dynamika. Neopredelennost. – 2-e yzd., pererab. y dop. [Methods of optimal solutions. In 2 t. T. 2. Multi-criterion. Dynamics. Uncertainty - 2nd ed., Pererab. and add] – Moscow – 2000. – 252 pp.

Надійшла (received) 18.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плешков Петро Григорович (Плешков Петр Григорьевич, Pleshkov Petr Grigorievich) – кандидат технічних наук, Центральноукраїнський національний технічний університет, професор кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, м. Кропивницький, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2141-4811>; e-mail: inbox@ets.kr.ua.

Гарасьова Наталія Юріївна (Гарасьова Наталья Юрьевна, Garasova Natalia Yuriivna) – кандидат технічних наук, Центральноукраїнський національний технічний університет, доцент кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, м. Кропивницький, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3609-4681>; e-mail: inbox@ets.kr.ua.

Солдатенко Валентин Петрович (Солдатенко Валентин Петрович, Soldatenko Valentyn Petrovych) – Центральноукраїнський національний технічний університет, викладач кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, м. Кропивницький, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7781-9343>; e-mail: kirovograd41@gmail.com.

І.В. ХОМЕНКО, М.Ф. ПІСКУРЬОВ, І.В. СТАСЮК

ДО ПИТАННЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ

Мета. Метою статті є дослідження впливу компенсації реактивної потужності на параметри режиму і стійкість електричної систем, встановлення допустимих рівнів компенсації реактивної потужності на стійкість вузлів навантаження і синхронних генераторів, дослідження області самозбудження синхронного генератора при компенсації реактивної потужності. **Методика.** Для проведення досліджень використовувалися математичні моделі електричної системи у вигляді вузлових рівнянь, які вирішувалися модифікованим методом Ньютона. Математичне моделювання стійкості вузлів навантаження і синхронних генераторів здійснювалося в пакеті Matlab. **Результати.** Отримано функціональні залежності впливу ступеня компенсації реактивної потужності на параметри режиму електричної системи за схемою "глибокого введення" з урахуванням добової нерівномірності навантаження. Встановлено межі компенсації реактивної потужності в електричних системах з урахуванням стійкої роботи вузлів навантаження і синхронного генератора. Встановлено, що при певному поєднанні параметрів електричної мережі з ємнісною послідовною компенсацією реактивних опорів ланцюга статора при компенсації реактивної потужності навантаження за допомогою батарей статичних конденсаторів можливе порушення статичної стійкості типу самозбудження синхронного генератора. **Наукова новизна.** Встановлено, що в мережах з ємнісною послідовною компенсацією реактивних опорів ланцюга статора синхронного генератора, компенсація реактивної потужності навантаження за допомогою батарей статичних конденсаторів може привести до порушення статичної стійкості типу самозбудження. **Практичне значення.** Встановлена техніко-економічна ефективність ступеня компенсації реактивної потужності на параметри режиму електричної системи за схемою "глибокого введення" з урахуванням добової нерівномірності навантаження. Визначено рівні компенсації реактивної потужності навантаження при яких значення коефіцієнта запасу статичної стійкості по напрузі в нормальному і післяаварійному режимах буде не меншою, ніж мінімальне нормоване значення, а значення коефіцієнта запасу статичної стійкості по активній потужності в нормальному і післяаварійному режимах буде не меншим, ніж мінімальне нормоване значення і коефіцієнт потужності генератора повинен бути близький до номінального.

Ключові слова: компенсація реактивної потужності, параметри режиму електричної системи, стійкість вузлів навантаження, стійкість синхронних генераторів, області самозбудження синхронних генераторів.

І.В. ХОМЕНКО, М.Ф. ПІСКУРЕВ, І.В. СТАСЮК

К ВОПРОСУ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Цель. Целью статьи является исследование влияния компенсации реактивной мощности на параметры режима и устойчивость электрической систем, установления допустимых уровней компенсации реактивной мощности на устойчивость узлов нагрузки и синхронных генераторов, исследования области самовозбуждения синхронного генератора при компенсации реактивной мощности. **Методика.** Для проведения исследований использовались математические модели электрической системы в виде узловых уравнений, решались модифицированным методом Ньютона. Математическое моделирование устойчивости узлов нагрузки и синхронных генераторов осуществлялось в пакете Matlab. **Результаты.** Получены функциональные зависимости влияния степени компенсации реактивной мощности на параметры режима электрической системы по схеме «глубокого ввода» с учетом суточной неравномерности нагрузки. Установлены границы компенсации реактивной мощности в электрических системах с учетом устойчивой работы узлов нагрузки и синхронного генератора. Установлено, что при определенном сочетании параметров электрической сети с емкостной последовательной компенсацией реактивных сопротивлений цепи статора при компенсации реактивной мощности нагрузки с помощью батарей статических конденсаторов возможно нарушение статической устойчивости типа самовозбуждения синхронного генератора. **Научная новизна.** Установлено, что в сетях с емкостной последовательной компенсацией реактивных сопротивлений цепи статора синхронного генератора, компенсация реактивной мощности нагрузки с помощью батарей статических конденсаторов может привести к нарушению статической устойчивости типа самовозбуждения. **Практическое значение.** Установлена технико-экономическая эффективность степени компенсации реактивной мощности на параметры режима электрической системы по схеме «глубокого ввода» с учетом суточной неравномерности нагрузки. Определены уровни компенсации реактивной мощности нагрузки, при которых значение коэффициента запаса статической устойчивости по напряжению в нормальном и послеаварийном режимах будет не меньше, чем минимальное нормированное значение, а значение коэффициента запаса статической устойчивости по активной мощности в нормальном и послеаварийном режимах будет не меньше, чем минимальное нормированное значение и коэффициент мощности генератора должен быть близок к номинальному.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, параметры режима электрической системы, устойчивость узлов нагрузки, устойчивость синхронных генераторов, области самовозбуждения синхронных генераторов.

І.В. ХОМЕНКО, М.Ф. ПІСКУРЕВ, І.В. СТАСІУК

ON THE ISSUE OF REACTIVE POWER COMPENSATION IN ELECTRICAL SYSTEMS

Purpose. Investigation of the effect of reactive power compensation on the regime parameters and the stability of the electrical system. Determination of the permissible levels of reactive power compensation for the stability of load nodes and synchronous generators. Research of self-excitation area of synchronous generator at compensation of reactive power. **Methodology.** The mathematical models of the electric system in the form of nodal equations, which were solved by the modified Newton method, were used for the research. Mathematical modelling of stability of load nodes and synchronous generators was carried out in Matlab package. **Results.** Functional dependences of the degree of reactive power compensation on the parameters of the regime of the electric system according to the "deep input" scheme taking into account the daily unevenness of the load are obtained. The limits of reactive power com-

pensation in electrical systems are set, taking into account the stable operation of load nodes and synchronous generator. It is established, that at a certain combination of parameters of an electric network with capacitive sequential compensation of reactive resistances of a stator circuit at compensation of reactive power of loading by means of batteries of static capacitors it is possible Violation of static stability of the type of self-excitation of synchronous generator. **Originality.** It is established that in networks with capacitive sequential compensation of reactive resistances of the stator circuit of synchronous generator, compensation of reactive power of loading by means of batteries of static capacitors can lead to violation of static Resistance type of self-excitation. **Practical value.** The technical and economic efficiency of the degree of compensation of reactive power on the parameters of the regime of the electric system according to the "deep input" scheme taking into account the daily unevenness of the load is established. The levels of compensation of reactive power of loading at which the value of a reserve coefficient of static stability on voltage in normal and repairs modes will be not less than the minimum rationed value are determined. The value of the reserve coefficient of static stability on the active power in normal and repairs modes will be not less than the minimum rationed value, and the power factor of the generators should be close to the nominal.

Key words: reactive power compensation, electrical system regime parameters, stability of load nodes, stability of synchronous generators, self-excitation region of synchronous generators.

Вступ. У сучасній електроенергетиці проблема компенсації реактивної потужності (КРП) є однією з основних. Сьогодні і з теоретичної і з практичної точки зору це питання розроблено досить детально [1, 2, 3, 4]. Як правило, вибір засобів КРП (ЗКРП) проводиться на основі розрахунків поточкорозподілу потужностей, рівнів напруги, статичної та динамічної стійкості електричних мереж [5]. Ці розрахунки виконуються для нормальної і для ремонтних схем електричної мережі. Встановлена потужність ЗКРП і необхідний діапазон регулювання визначаються з урахуванням режимів максимальних і мінімальних навантажень енергосистеми в межах доби в літній і зимовий періоди. При виборі ЗКРП враховуються обмеження, встановлені для генераторів за значенням і тривалості споживання ними реактивної потужності. Розрахунок режимів системоутворюючих мереж передбачає еквівалентування навантажень на шинах середньої або нижчої напруги підстанцій. При проектуванні вибір ЗКРП визначається найбільшим рівнем робочої напруги електрообладнання, а при виборі ЗКРП для підвищення пропускної здатності електропередачі підставою є розрахунки статичної та динамічної стійкості.

Для регулювання напруги і перерозподілу реактивної потужності, а також з метою зменшення втрат потужності в розподільчих мережах 110 – 330 кВ важливе значення мають трансформатори і автотрансформатори з пристроями регулювання напруги під навантаженням (РПН) [6].

Таким чином, техніко-економічно обґрунтоване використання ЗКРП в електричних мережах 110 – 750 кВ повинно забезпечити підтримку рівнів напруги в допустимих межах; зниження втрат потужності в електричних мережах енергосистем; підвищення пропускної спроможності лінії електропередачі за умовами статичної та динамічної стійкості; підвищення стійкості вузлів навантаження; запобігання «лавини напруги» і, як наслідок, підтримку реактивної потужності генераторів в допустимих межах.

Аналіз літературних джерел. Основи теорії реактивної потужності були розроблені Фрізе [1]. В даний час ряд зарубіжних [2, 3] і вітчизняних фахівців [4] продовжують ці дослідження. Потоки реактивної потужності істотно впливають на режими електричних систем і мереж [5, 7], а також на показники якості електроенергії [8, 9]. Використання сучасних комп'ютерних технологій і програм розширюють наші уяв-

лення про природу реактивної потужності. Ці матеріали представлені в ряді зарубіжних публікацій [10, 11, 12]. Теоретичні дослідження нерозривно пов'язані з практичними питаннями компенсації реактивної потужності, що вимагає розробки сучасних ЗКРП. Доцільність встановлення конденсаторних батарей в промислових електричних мережах проаналізована в [13], а розробка принципів управління статичним компенсатором (СТАТКОМ) і дослідження його роботи на підстанціях змінного і постійного струму в [14, 15]. Ефективність і особливості компенсації реактивної потужності в умовах несинусоїдальних і нелінійних режимів представлені в [16, 17]. Таким чином, аналіз літературних джерел показує, що проблема реактивної потужності і проблема розробки засобів по КРП має складний комплексний характер, що обумовлює необхідність подальших теоретичних і практичних досліджень в цій області. Метою статті є дослідження впливу компенсації реактивної потужності на параметри режиму і стійкість електроенергетичної системи.

Основна частина. У загальному випадку в електричній системі крім основних втрат, пов'язаних з передачею активної потужності, існують додаткові втрати, зумовлені реактивністю елементів системи, несиметрією навантажень, нестационарністю процесів і нелінійністю [18].

Одним з найбільш дієвих і ефективних способів зменшення як основних так і додаткових втрат є застосування ЗКРП на базі батарей статичних конденсаторів. Використання конденсаторних установок дозволяє:

- розвантажити живлячі лінії електропередачі, трансформатори і розподільні пристрої;
- знизити витрати на оплату електроенергії;
- при використанні певного типу установок знизити рівень вищих гармонік;
- знизити несиметрію фаз.

Проведемо розрахунок і аналіз параметрів усталеного режиму електричної мережі за схемою глибокого введення методом Ньютона для металургійного комбінату Донецького регіону. При розрахунках використовувалися рівняння вузлових напруг в формі балансу потужності [19]. У матричній формі вони мають вигляд:

$$U_{diag} (Y_y U + Y_b U_b) = S, \quad (1)$$

де U_{diag} – діагональна матриця, k діагональний еле-

мент котрої дорівнює спряженому комплексу напруги U_k^* вузла; S – вектор-стовпець, k елемент котрого дорівнює спряженому комплексу потужності k вузла.

Схема заміщення розподільчої електричної мережі за схемою глибокого введення представлена на рис. 1.

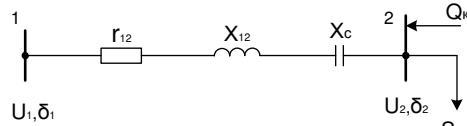


Рис. 1. Схема заміщення мережі

Дослідимо вплив на параметри режиму електричної мережі добової нерівномірності електричного навантаження, а також величин поздовжньої компенсації потужності ЛЕП (X_c) та величини компенсації реактивної потужності у споживача (Q_c)

Відомо, що електричне навантаження систем електропостачання нерівномірне. Фахівці виділяють добову, тижневу і річну нерівномірності. Зміна навантаження впливає на параметри режиму електричної мережі. Прийнемо, що навантаження у споживача S_H протягом доби змінюється від максимального до мінімального значення в такий спосіб:

$$S_1 = (-60 - j20) \text{ MVA}, S_2 = (-70 - j30) \text{ MVA},$$

$$S_3 = (-80 - j40) \text{ MVA}, S_4 = (-90 - j50) \text{ MVA},$$

$$S_5 = (-100 - j60) \text{ MVA},$$

Характер цього впливу показаний на рис. 2. Аналіз наведених результатів показує, що зі збільшенням навантаження втрати активної і реактивної потужності в мережі збільшуються, крім того збільшуються втрата напруги і кут δ_2 , а напруга у споживача знижується.

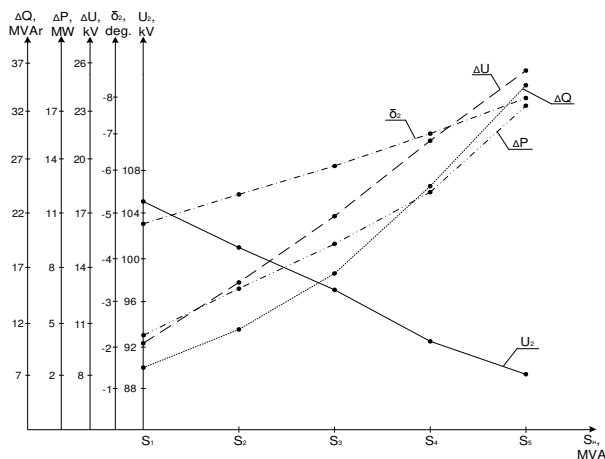


Рис. 2. Вплив добової нерівномірності навантаження на параметри режиму

На думку фахівців, на сьогодні одним з найбільш ефективних способів поліпшення режиму електричної мережі є компенсація потоків реактивної потужності у споживача. При цьому знижуються втрати потужності в мережі, а пропускна спроможність ліній підвищується. Результати розрахунків впливу компенсації реактивної потужності на параметри режиму наведені на рис. 3. Вони показують, що при компенсації падіння напруги,

втрати активної і реактивної потужності знижуються, а напруга і кут у споживача підвищуються.

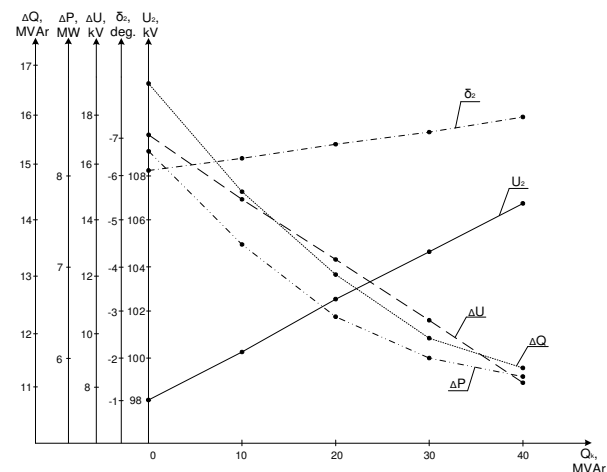


Рис. 3. Вплив компенсації реактивної потужності у споживача на параметри режиму

В останні роки підвищився інтерес до питань поздовжньої компенсації параметрів ЛЕП [20]. За своїм впливом збільшення величини поздовжньої компенсації аналогічно процесу збільшення компенсації реактивної потужності у споживача. Відмінність полягає у впливі на кут δ_2 . Функціональні залежності параметрів режимів від величини поздовжньої компенсації наведені на рис. 4.

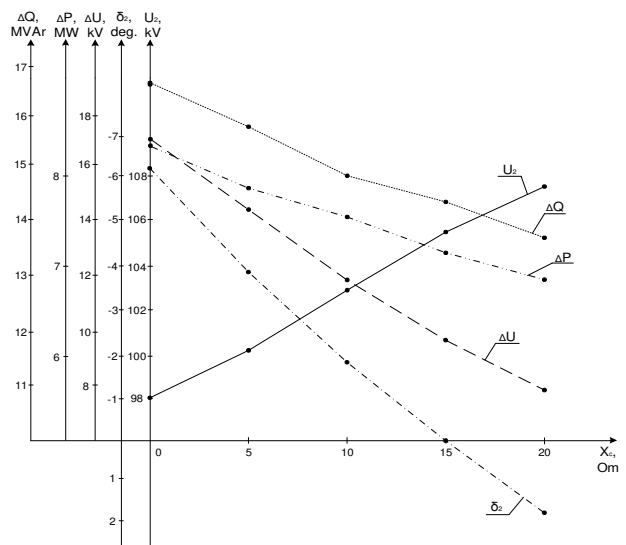


Рис. 4. Вплив поздовжньої компенсації ЛЕП на параметри режиму

Практична реалізація наших досліджень зводиться до визначення місць розміщення, типу і потужності СКРМ. Ці завдання вирішуються на основі подібних техніко-економічних розрахунків. В даний час для нормалізації рівнів напруги та зниження втрат потужності в розподільних мережах на вузових підстанціях 110 кВ і вище, як правило, застосовуються шунтові конденсаторні батареї з встановленою потужністю 52 і 108 мВАр, а при проектуванні нових об'єктів в мережах 110 кВ рекомендується застосовувати шунтові конденсаторні батареї модульного типу з блоків заводського виготовлення з конденсаторами з екологічно безпечними матеріалами [21].

Таким чином, постачальнику електричної енергії економічно доцільна повна або близька до неї компенсація реактивної потужності. Однак з точки зору технічної доцільності у споживача і виробника електричної енергії виникають питання, пов'язані зі зниження стійкості вузлів навантаження і генеруючих станцій і можливістю порушення їх стійкості в результаті компенсації реактивної потужності батареями статичних конденсаторів.

Відомо [22], що компенсація реактивної потужності навантаження за допомогою батарей статичних конденсаторів може іноді приводити до істотного зниження запасів стійкості асинхронних двигунів і при високому ступені компенсації – до «лавини напруги». Наприклад, з розрахунків наведених в [22] виходить, що збільшення $\cos \phi$ від 0,89 до 0,95 знижує запас стійкості навантаження приблизно в 1,5 рази, а збільшення $\cos \phi$ до 1 практично призводить до нестійкості вузла навантаження.

У відповідності з керівними вказівками по стійкості енергосистем [23], коефіцієнт запасу статичної стійкості по напрузі в нормальному режимі повинен бути не менше 15 %, в післяаварійному – не менше 10 %. Таким чином, виходячи з стійкості вузла навантаження, компенсувати реактивну потужність можна до рівня, при якому значення коефіцієнта запасу статичної стійкості по напрузі в нормальному і після аварійному режимах буде не менше, ніж мінімальне нормоване значення.

Про вплив компенсації реактивної потужності на стійкість синхронних генераторів можна судити, розглянувши найпростішу електричну систему, в якій генератор видає потужність через трансформатор і лінію на шини навантаження. Схема заміщення такої системи представлена на рис. 5.

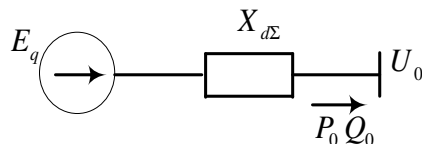


Рис. 5. Схема заміщення електричної системи

На схемі заміщення: U_0 – напруга на шинах навантаження; P_0 і Q_0 – активна і реактивна потужності, що видаються генератором в навантаження; $X_{d\Sigma}$ – результуючий індуктивний опір електропередачі.

Спрощена векторна діаграма синхронного неявнополюсного генератора при різному ступені компенсації реактивної потужності навантаження наведено на рис. 6.

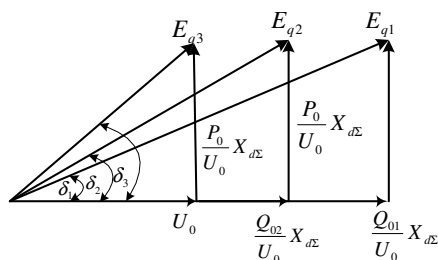


Рис. 6. Спрощена векторна діаграма синхронного генератора при різному ступені компенсації реактивної потужності навантаження

На цій векторній діаграмі:

Q_{01} – реактивна потужність, що видається генератором в навантаження при відсутності компенсації реактивної потужності;

Q_{02} – реактивна потужність, що видається генератором в навантаження при 50 % компенсації реактивної потужності.

У третьому випадку реактивна потужність навантаження скомпенсована повністю, тобто $Q_{03} = 0$.

E_{q1} , E_{q2} и E_{q3} – ЕРС генератора, що забезпечують видачу однакової активної потужності, при відповідних реактивних потужностях, які видаються генератором в навантаження. Як видно з векторної діаграми значення ЕРС генератора істотно зменшується зі збільшенням компенсації реактивної потужності навантаження. Зменшення ЕРС генератора обумовлено тим, що при компенсації реактивної потужності навантаження зменшується струм в обмотках статора генератора. Це призводить до збільшення напруги на шинах генератора. В результаті чого вступає в дію автоматичний регулятор напруги, зменшуючи струм в обмотці збудження, що в кінцевому підсумку призводить до зниження ЕРС генератора.

Якщо знехтувати активними опорами елементів електропередачі, то межа переданої активної потужності неявнополюсного синхронного генератора може бути розрахована за формулою:

$$P_{np} = \frac{E_q U_0}{X_{d\Sigma}}, \quad (2)$$

З цієї формули випливає, що межа переданої активної потужності зменшується пропорційно зменшенню ЕРС генератора і, отже, зменшується коефіцієнт запасу статичної стійкості, що розраховується за формулою:

$$K_{s.stab.} = \frac{P_{np} - P_0}{P_0} 100\%, \quad (3)$$

У відповідності з керівними вказівками по стійкості енергосистем [23] коефіцієнт запасу статичної стійкості по активній потужності в нормальному режимі повинен бути не менше 20 % в післяаварійному – не менше 8 %. Таким чином, компенсувати реактивну потужність можна до рівня, при якому значення коефіцієнта запасу статичної стійкості по активній потужності в нормальному і післяаварійному режимах буде не менше, ніж мінімальне нормоване значення.

У мережах з ємнісною послідовною компенсацією реактивних опорів ланцюга статора, компенсація реактивної потужності навантаження за допомогою батарей статичних конденсаторів може привести до порушення статичної стійкості типу самозбудження. Це пояснюється тим, що при підключенні досить великої ємності утворюється коливальний контур R-L-C, де L відповідає індуктивності генератора, трансформатора і лінії. При постійних значеннях R, L, C електричні коливання з часом згасають. В даному випадку індуктивність генератора періодично змінюється. У явнополюсного генератора вона змінюється від L_q до L_d через несиметрію ротора в подовжній і поперечній осях. Це при деяких умовах забезпечує можливість перетворення кінетичної енергії обертання ротора в електромагнітну енергію коливального контуру. Якщо втрати в цьому контурі досить малі, то амплітуда

коливань може наростати і таким чином виникає параметричний резонанс.

У неявнополісного генератора його індуктивність при коливаннях ротора змінюється від L_d^I до L_q . При наявності ковзання між електромагнітним полем статора і обмотками ротора виникає асинхронний момент за рахунок взаємодії струмів, наведених в роторних обмотках і обертового поля статора. Під дією цього асинхронного електромагнітного моменту розвивається самозбудження. Це не параметричний резонанс, заснований на періодичній зміні індуктивності контуру. Для його існування необхідно лише включення відповідної ємності і наявність ковзання [24].

Відомі [25] два основних види самозбудження: асинхронне і синхронне. Асинхронне самозбудження можливо у всіх видах машин при власній частоті коливального контуру менше частоти генератора ω_0 . Самозбудження на частоті $\omega_{own} = \omega_0$ (синхронне самозбудження) можливо тільки у явнополісних генераторів. Розвиток обох видів самозбудження припиняється, коли настає високий ступінь насичення генератора, тобто при режимі свідомо неприпустимому.

Наближена оцінка можливості самозбудження генераторів виконується побудовою областей самозбудження в координатах R, X_c (рис. 7), де R – сумарний активний опір найпростішої електричної системи; X_c – ємнісний результуючий опір батареї статичних конденсаторів і ємності послідовної компенсації.

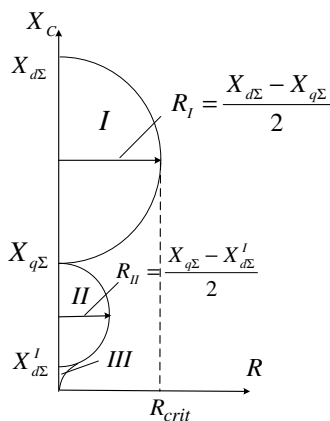


Рис. 7. Області самозбудження в координатах R, X_c :
I – зона синхронного самозбудження; II, III – зона асинхронного самозбудження

З рис. 7 видно, що при сумарному активному опорі найпростішої електричної системи менше критичного (R_{crit}) і результуючим опором ємності (X_c) менше $X_{d\Sigma}$ можливе порушення статичної стійкості типу самозбудження.

Висновки. Таким чином в статті показана техніко-економічна ефективність використання компенсації реактивної потужності. Встановлено її вплив на основні параметри режимів електричної мережі з урахуванням добової нерівномірності навантаження. У той же час, з точки зору технічної доцільності і для споживачів, і для виробників електричної енергії підходить до компенсації реактивної потужності батареями статичних конденсаторів потрібно дуже уважно.

По-перше, компенсувати реактивну потужність навантаження можна до рівня, при якому значення коефіцієнт запасу статичної стійкості по напрузі в

нормальному і післяаварійному режимах буде не менше, ніж мінімальне нормоване значення.

По-друге, компенсувати реактивну потужність навантаження можна до рівня, при якому значення коефіцієнт запасу статичної стійкості по активній потужності в нормальному і після аварійному режимах буде не менше, ніж мінімальне нормоване значення і коефіцієнт потужності генераторів повинен бути близький до номінального.

По-третє, в мережах з ємнісною послідовною компенсацією реактивних опорів ланцюга статора, компенсація реактивної потужності навантаження за допомогою батарей статичних конденсаторів, не повинна призводити до виникнення самозбудження.

Список літератури

1. S. Frize, "Active and Apparent power in non-sinusoidal systems" // Przegląd Elektrot (In Poland). – 1931. – no.7. – pp. 193-203.
2. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1984. – vol. IA-20. – no. 3. – pp. 625-630. doi: 10.1109/TIA.1984.4504460.
3. H. Akagi, H. Kim // IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. – 1999. – PEDS'99.
4. Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Теория мощности Фризе и современные теории мощности // Электротехника и электромеханика. – 2007. – №6. – С. 63-65.
5. Бурман А.П., Розанок Ю.К., Шакарян Ю.Г. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2012. – 336 с.
6. Хоменко І.В., Федосєєнко О.М., Стасюк І.В. Підвищення надійності пристроїв рпн силових трансформаторів. – 2017. – №170. – С. 60-71. doi: 10.18664/1994-7852.170.2017.111280.
7. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Бурикін О.Б. Взаємовплив електричних мереж і систем в процесі оптимального керування їх режимами. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2008. – 122 с.
8. Шидловський А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества электрической энергии в электрических сетях. – Киев: Наук. Думка, 1985. – 286 с.
9. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. – Москва: Слектроатомиздат, 1985. – 224 с.
10. Bhattacharyya B., Goswami S.K., Bansal R.C. Hybrid Fuzzy Particle Swarm Optimization Approach for Reactive Power Optimization // J. Electrical Systems. – 2003. – №5.
11. Ouyang S. An Improved Catastrophic Genetic Algorithm and Its Application in Reactive Power Optimization // Energy and Power Engineering. – 2010. – no.2. – pp.306-312. doi: 10.4236/epe.2010.24043.
12. Durairaj S., Kannan P.S. An Improved Catastrophic Genetic Algorithm and Its Application in Reactive Power Optimization // Annual IEEE India Conference. – 2005. doi: 10.1109/indcon.2005.1590223.
13. Гудко Є.І. Про доцільність установаження конденсаторних батарей у промислових електричних мережах у сучасних економічних умовах // Энергетика и электрификация. – 1997. – № 2 – С. 30-31.
14. Пешков М.В. Разработка и исследование управления статическим компенсатором реактивной мощности типа СТАТКОМ для электроэнергетических систем. Дисс. канд. техн. наук. – Москва, 2009. – 158 с.
15. Николаев А.Б. Разработка принципов управления статическим компенсатором (СТАТКОМ) и исследование его работы на подстанциях переменного и постоянного тока. – НИИПТ. – Санкт-Петербург, 2005.
16. Баламетов А.Б., Халилов Э.Д., Исаева Т.М. Об определении реактивной мощности при несинусоидальных режимах // Проблемы энергетики. – 2005. – №1.
17. Саснко Ю.Л. Реактивна потужність в системах електропостачання з нелінійними навантаженнями. Львів: НУ

- “Львівська політехніка”, 2003. – 36 с.
18. Железко Ю.С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. – Москва: НУ ЭНАС, 2002. – 280 с.
 19. Веников В.А., Глазунов А.А., Жуков Л.А. Электрические системы. Электрические сети. – Москва: высш. шк., 1998. – 511 с.
 20. Рыжов Ю.П., Некукар А.Р. О возможности сооружения на линиях СВН устройств продольной емкостной компенсации без шунтирующих реакторов на выводах конденсаторных батарей // *Электричество*. – 2012. – № 1.
 21. Конишев В.С. Нанотехнологии и новая эра электролитических конденсаторов // *Нанотехнологии Экология Производство*. – 2009. – №1. – С. 84-84.
 22. Веников В.А. Переходные электрохимические процессы в электрических системах. – Москва: Высш. шк., 1985. – 536 с.
 23. СОУ-Н МЕН 40.1.00100227-68:2012 Стійкість енергосистеми. Керівні вказівки. НТЦЕ НЕК Укренерго. Введ. в дію 21.10.2012. – 36 с.
 24. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. – Москва: Энергия, 1979. – 456 с.
 25. Гуревич Б.Е., Либова Л.Е. Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
- References (transliterated)**
1. S. Frize, “Active and Apparent power in non-sinusoidal systems”. *Przeglad Electrot (In Poland)*, 1931, no.7, pp. 193-203.
 2. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1984, vol. IA-20, no.3, pp. 625-630. doi: 10.1109/TIA.1984.4504460.
 3. H. Akagi, H. Kim. *IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, 1999, PEDS’99.
 4. Zhemerev G.G., Il’ina O.V. Fryze power theory and modern power theories. *Electrical engineering & Electromechanics*, 2007, no.6, pp. 63-65.
 5. Burman A.P., Rozanok Iu.K., Shakarian Iu.G. Upravlenie potokami elektroenergii i povyshenie effektivnosti elektroenergeticheskikh system [Control of electric power flows and increase of efficiency power systems]. Moscow, MEI Publ., 2012. 336 p. (Rus).
 6. Khomenko I.V., Fedosenko O.M., Stasiuk I.V. Improving the reliability of power transformers oltc devices. *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 2017, no.170, pp. 60-71. doi: 10.18664/1994-7852.170.2017.111280.
 7. Lezhniuk P.D., Kulik V.V., Burikin O.B. Vzaemovplyv elektrichnikh mrezezh i sistem v protsesi optimal'nogo keruvannya ikh rezhimami [In the process of optimal control of the electrical networks and systems]. Vinnitsia, Universum-Vinnitsia Publ., 2008. 122 p. (Ukr).
 8. Shidlovskii A.K., Kuznetsov V.G. Povyshenie kachestva elektricheskoi energii v elektricheskikh setiakh [Improving the quality of electrical energy in electrical networks]. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1985. 286 p. (Rus).
 9. Zhelezko Iu.S. Kompensatsiia reaktivnoi moshchnosti i povyshenie kachestva elektroenergii [Compensation of reactive power and improvement of power quality]. Moscow, Elektroatomizdat Publ., 1985. 224 p. (Rus).
 10. Bhattacharyya B., Goswami S.K., Bansal R.C. Hybrid Fuzzy Particle Swarm Optimization Approach for Reactive Power Optimization. *J. Electrical Systems*, 2003, no.5.
 11. Ouyang S. An Improved Catastrophic Genetic Algorithm and Its Application in Reactive Power Optimization. *Energy and Power Engineering*, 2010, no.2, pp.306-312. doi: 10.4236/epe.2010.24043.
 12. Durairaj S., Kannan P.S. An Improved Catastrophic Genetic Algorithm and Its Application in Reactive Power Optimization. *Annual IEEE India Conference*, 2005. doi: 10.1109/indcon.2005.1590223.
 13. Gudko C.I. Pro dotsil'nist' ustanovleniia kondensatornikh batarei u promisl'ovikh elektrichnikh mrezezhakh u suchasnikh ekonomichnikh umovakh [On expediency of installation of capacitor batteries in industrial electric networks in modern economic conditions]. *Energetika i elektrifikatsiia – Energy and electrification*, 1997, no.2, pp. 30-31. (Ukr).
 14. Peshkov M.V. Razrabotka i issledovanie upravleniia staticheskimi kompensatorami reaktivnoi moshchnosti tipa STATKOM dlia elektroenergeticheskikh system [Development and research of control of static compensator of reactive power type statcom for electric power systems]. Moscow, 2009. 158 p. (Ukr).
 15. Nikolaev A.B. Razrabotka printsipov upravleniia staticheskimi kompensatorami (STATKOM) i issledovanie ego raboty na podstantsiakh peremennogo i postoiannogo toka [Development of principles of control of the static compensator (statcom) and investigation of its work on substations of alternating and direct current]. Saint-Petersburg, 2005. (Rus).
 16. Balametov A.B., Khalilov E.D., Isaeva T.M. Ob opredelenii reaktivnoi moshchnosti pri nesinusoidal'nykh rezhimakh [About determination of reactive power at nonsinusoidal regimes]. *Problemy energetiki – Problems of energy*, 2005, no.1. (Rus).
 17. Saenko Iu.L. Reaktivna potuzhnist' v sistemakh elektropostachannia z nelineinimi navantazhenniami [Reactive power in power supply systems with nonlinear loads]. Lviv, NU “L'vivska politehnika” Publ., 2003. 36 p. (Ukr).
 18. Zhelezko Iu.S. Raschet, analiz i normirovanie poter' elektroenergii v elektricheskikh setiakh [Calculation, analysis and rationing of electricity losses in electrical networks]. Moscow, NU ENAS Publ., 2002. 280 p. (Rus).
 19. Venikov V.A., Glazunov A.A., Zhukov L.A. Elektricheskie sistemy. Elektricheskie seti [Electrical systems. Electrical networks]. Moscow, Vyssha shkola. Publ., 1998. 511 p. (Rus).
 20. Ryzhov Iu.P., Nekukar A.R. O vozmozhnosti sooruzheniia na liniakh SVN ustroistv prodol'noi emkostnoi kompensatsii bez shuntiruiushchikh reaktorov na vyvodakh kondensatornykh batarei [On the possibility of constructing longitudinal capacitive compensation devices on SHV lines without shunt reactors on the terminals of capacitor banks]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2012, no.1. (Rus).
 21. Konyshchikov V.S. Nanotekhnologii i novaia era elektroliticheskikh kondensatorov [Nanotechnology and the New Era of Electrolytic Capacitors]. *Nanotekhnologii Ekologiya Proizvodstvo – Nanotechnologies. Ecology. Production.*, 2009, no.1, pp. 84-84. (Rus).
 22. Venikov V.A. Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh [Transitional electromechanical processes in electronic electrical systems]. Moscow, Vyssha shkola Publ., 1985. 536 p. (Rus).
 23. SOU-Н МЕН 40.1.00100227-68:2012 Stiikist' energosistemi. Kerivni vkazivki [Sustainability Power system. Guidance]. NTTsE NEK Ukrenergo Publ., 2012. 36 p. (Ukr).
 24. Zhdanov P.S. Voprosy ustoiichivosti elektricheskikh system [Issues of stability of electrical systems]. Moscow, Energiia Publ., 1979. 456 p. (Rus).
 25. Gurevich B.E., Libova L.E. Oкин А.А. Raschety ustoiichivosti i protivovariinnoi avtomatiki [Calculations of stability and emergency automation]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 390 p. (Rus).

Поступила (received) 17.08.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Хоменко Ігор Васильович (Хоменко Игорь Васильевич, Khomenko Igor Vasilyevich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, професор кафедри передачі електричної енергії, м. Харків, Україна; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

Піскуров Михайло Федорович (Пискуров Михаил Федорович, Piskurev Mikhail Fedorovich) – доцент кафедри електричних станцій, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, м. Харків, Україна.

Стасюк Іван Володимирович (Стасюк Иван Владимирович, Stasiuk Ivan Vladimirovich) – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: brokeyourbike@gmail.com.

*Е.Ю. ЗОРИН, А.А. ЧЕПЕЛЮК***МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СЕТИ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ С КОМПЕНСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ**

В статье разработана расчетная модель сети среднего напряжения с тремя фидерами в среде Matlab, которая позволяет моделировать работу сети в режиме однофазного замыкания на землю. Расчетная модель базируется на положениях теории метода симметричных составляющих, что позволяет имитировать появление компонент нулевой последовательности токов, возникающих в энергосистеме в случае однофазного замыкания на землю. Проведено имитационное моделирование сети напряжением 20 кВ с компенсированной нейтралью в режиме однофазного замыкания на землю, результаты которого проиллюстрированы соответствующими осциллограммами и зависимостями напряжений и токов. По результатам моделирования проанализировано работу системы компенсации аварийного тока в режиме однофазного замыкания на землю. Предложенная расчетная модель может быть использована при разработке новых и модернизации существующих сетей среднего напряжения с компенсированной нейтралью для оценки эффективности их работы в режиме однофазного замыкания на землю и с целью наиболее рационального выбора соответствующего оборудования установки компенсации и алгоритмов его работы.

Ключевые слова: трехфазная сеть среднего напряжения, однофазное короткое замыкание, компенсированная нейтраль, катушка Петерсена, метод симметричных составляющих, Matlab-модель.

*Є. Ю. ЗОРИН, О. О. ЧЕПЕЛЮК***МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МЕРЕЖІ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ З КОМПЕНСОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ ПРИ ОДНОФАЗНОМУ ЗАМИКАННІ НА ЗЕМЛЮ**

В статті розроблено розрахункову модель мережі середньої напруги з компенсованою нейтраллю з трьома фідерами в середовищі Matlab, яка дозволяє моделювати роботу мережі в режимі однофазного замикання на землю. Розрахункова модель базується на положеннях теорії методу симетричних складових, що дозволяє імітувати появу складових нульової послідовності струмів які виникають у енергосистемі в випадку однофазного замикання на землю. Проведено імітаційне моделювання мережі напругою 20 кВ з компенсованою нейтраллю в режимі однофазного замикання на землю, результати якого проілюстровані відповідними осцилограммами та залежностями напруг і струмів. За результатами моделювання проаналізовано роботу системи компенсації аварійного струму в режимі однофазного замикання на землю. Запропонована розрахункова модель може бути використана при розробці нових і модернізації існуючих мереж середньої напруги з компенсованою нейтраллю для оцінки ефективності їх роботи в режимі однофазного замикання на землю та з метою найбільш раціонального вибору відповідного обладнання установки компенсації і алгоритмів його роботи.

Ключові слова: трифазна мережа середньої напруги, однофазне коротке замикання, компенсована нейтраль, катушка Петерсена, метод симетричних складових, Matlab-модель.

*Y. Y. ZORIN, O. O. CHEPELYUK***MODELING THE OPERATION OF A MEDIUM VOLTAGE POWER GRID WITH A COMPENSATED NEUTRAL AT SINGLE-PHASE GROUND FAULT**

Introduction. In this article is developed a computational model of medium voltage power grid with three feeder lines in Matlab environment, which allows to simulate the operation of power grid in single phase to ground fault mode. The computational model is based on the theory of symmetrical components method, that allows to imitate appearance of currents zero sequences, which exist in power system in case of single phase ground fault. The imitation modeling of 20 kV compensated power grid in single phase to ground fault mode has carried out, the results of this modeling are shown by corresponding oscillograms, current and voltage dependencies. According to the simulation results, the operation of the fault current compensation system has analyzed in single phase to ground fault mode. The proposed computational model can be used in the development of new and modernization of existing medium voltage compensated power grids to evaluate the effectiveness of their operation in single phase to ground fault mode for the most rational choice of appropriate compensation equipment installation and algorithms of its operation.

Key words: three phase medium voltage power grid, single phase short circuit, compensated neutral, Petersen coil, symmetrical components method, Matlab-model.

Введение. Правилами устройства электроустановок [1] предусматривается работа электрических сетей напряжением от 3 кВ до 35 кВ как с изолированной нейтралью, так и нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор (катушку Петерсена) или резистор, а также заземленной одновременно через дугогасящий реактор и резистор. Защита от замыка-

ний на землю должна надежно срабатывать при выбранном способе заземления нейтрали.

Каждый из указанных режимов работы нейтрали по-своему эффективен, основываясь на технико-экономическом соответствии бесперебойности электроснабжения потребителей.

В настоящее время компенсацию емкостного то-

ка замыкания на землю через дугогасящие реакторы необходимо применять при таких значениях этого тока в нормальных режимах [1]:

- в сетях напряжением от 6 кВ до 10 кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры на воздушных линиях электропередачи (ВЛ), – более 10 А;
- в сетях напряжением 20 кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры на ВЛ, – более 5 А;
- во всех сетях 35 кВ – более 10 А;
- в сетях, которые не имеют железобетонных и металлических опор на ВЛ: напряжением 6 кВ – более 30 А; напряжением 10 кВ – более 20 А; напряжением от 15 кВ до 20 кВ – более 15 А.

При наличии обоснования разрешено применять компенсацию в сетях 6-35 кВ также со значениями емкостного тока, меньше от вышеприведенных.

В данной статье рассматривается сеть среднего напряжения с компенсированной нейтралью, в которой нейтраль соединена через дугогасящий реактор, компенсирующий емкостный ток при возникновении однофазного замыкания на землю.

В зарубежной технической литературе дугогасящий реактор чаще называют катушкой Петерсена – в честь немецкого ученого Петерсена, который в 1917 году предложил заземлять нейтраль через указанную катушку. На территории Украины и стран СНГ такие катушки чаще именуют дугогасящими реакторами, подчёркивая этим эффект самогашения дуги и перевода подавляющей части однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в самоликвидирующиеся.

Индуктивность дугогасящего реактора подбирается таковой, чтобы в контуре, образованном этой индуктивностью и суммарной емкостью фазных проводников относительно земли, возникал резонанс на промышленной частоте. Амплитуда тока замыкания на землю снижалась при этом настолько, что не было бы необходимости отключать сеть при замыканиях одной из её фаз на землю.

Для оценки эффективности работы сетей с компенсированной нейтралью при ОЗЗ на стадии разработки, модернизации или эксплуатации таких сетей требуется наличие соответствующих расчетных моделей, способных моделировать работу указанных сетей с учетом параметров линий и параметров оборудования, компенсирующего ток нейтрали.

Цель работы заключается в разработке расчетной модели электрической сети напряжением 20 кВ с тремя фидерами и компенсированной нейтралью, которая будет имитировать процессы и появление компонент нулевой последовательности токов, возникающих в энергосистеме в случае однофазного замыкания на землю. Для решения поставленной задачи был выбран прикладной пакет математического моделирования Matlab. Данную модель можно применить при решении практических задач, подставив параметры реальной электрической сети.

Однофазные замыкания на землю. Как уже было отмечено выше, в отечественных энергосистемах электрические сети средних напряжений могут работать с изолированной нейтралью или с нейтралью, заземленной через большое индуктивное сопротивление

дугогасящего реактора (ДГР), а также с заземлением через большое активное сопротивление.

В отличие от сети с глухозаземленной нейтралью, однофазное замыкание в сети с изолированной и компенсированной нейтралью не сопровождается появлением больших токов короткого замыкания, поскольку ток повреждения замыкается на землю через очень большие сопротивления емкостей фаз сети.

Особенно часто однофазные замыкания на землю возникают на воздушных линиях из-за характера их конструкции, но проблема также актуальна и для кабельных линий. Однофазные замыкания на землю в сетях среднего напряжения составляют основную часть аварийных событий [3] (см. рис. 1).

При замыкании на землю одной из фаз в системе с изолированной нейтралью путь для тока, идущего в землю, осуществляется через емкостную проводимость элементов каждой фазы относительно земли.

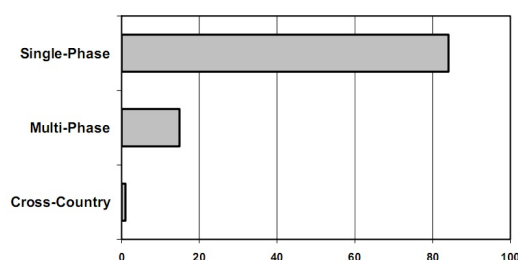


Рис. 1. Статистика однофазных и мультифазных коротких замыканий, за год в сетях 6-10 кВ (в %)

Пусть в начале трехфазной линии, присоединенной к источнику переменного тока, произошло замыкание на землю фазы А (рис. 2) Распределенные вдоль линии емкости каждой фазы относительно земли условно представлены сосредоточенными емкостями в конце линии. Частичные емкости между фазами для простоты не показаны; при этом отметим, что их влияние на ток замыкания на землю очень мало [2]. Путь циркуляции тока замыкания на землю указан стрелками. Поступая в землю в месте замыкания, ток возвращается по неповрежденным фазам через их емкостные проводимости относительно земли. Емкостная проводимость поврежденной фазы оказывается зашунтированной рассматриваемым замыканием, и ток в этой фазе справа от места замыкания отсутствует, если пренебречь весьма малым током, который наводится токами других двух фаз на данном участке линии. Характер векторных диаграмм токов слева и справа от места замыкания показан на том же рисунке.

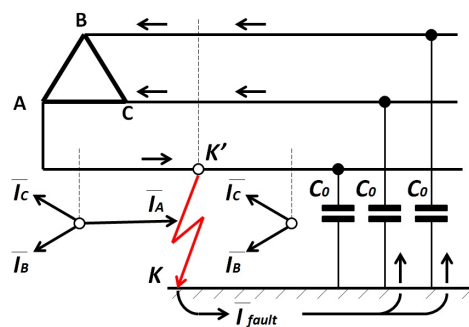


Рис. 2. Принципиальная схема сети при ОЗЗ

Емкостные сопротивления элементов электрической системы значительно превышают их индуктивные и активные сопротивления, что позволяет при определении тока ОЗЗ пренебречь последними и, следовательно, считать, что величина этого тока практически не зависит от места замыкания в рассматриваемой электрически связанной сети. Кроме того, так как этот ток относительно мал, при его нахождении можно считать, что напряжение источника сохраняется неизменным. При таких допущениях ток в месте замыкания на землю через дугу с сопротивлением r_d будет:

$$I_K = 3 \frac{U_{ф.ср}}{3r_d - jx_{C_0\Sigma}}, \quad (1)$$

где $x_{C_0\Sigma}$ – результирующее емкостное сопротивление нулевой последовательности всех элементов (практически только линий и кабелей), электрически связанных с точкой замыкания;

$U_{ф.ср}$ – среднее фазное напряжение той ступени, где рассматривается ОЗЗ.

Наибольшая величина тока ОЗЗ имеет место, разумеется, при металлическом замыкании ($r_d = 0$) и согласно рис. 2 составляет:

$$I_K = 3j \frac{U_{ф.ср}}{x_{C_0\Sigma}}, \quad (2)$$

т.е. она в 3 раза превышает емкостной ток на землю одной фазы в нормальных условиях.

Для грубой оценки порядка величины тока ОЗЗ может служить упрощенная формула:

$$I_K = \frac{\sqrt{3}U_{ср}}{N} l, \quad (3)$$

где $U_{ср}$ – среднее номинальное напряжение той ступени, где рассматривается ОЗЗ;

N – коэффициент, принимаемый для воздушных линий 350 и для кабельных – 10;

l – суммарная длина воздушных или кабельных линий, электрически связанных с точкой замыкания на землю, км.

Для симметричных составляющих напряжений за сопротивлением дуги при принятых допущениях имеем:

$$U_{K'A1} = U_{ф.ср} \quad (4)$$

$$U_{K'A2} = 0 \quad (5)$$

$$U_{K'0} = 3 \frac{jx_{C_0\Sigma}}{3r_d - jx_{C_0\Sigma}} \cdot U_{ф.ср} \quad (6)$$

На рис. 3 приведены векторные диаграммы напряжений и токов в месте ОЗЗ фазы А. Они построены при указанных допущениях. С изменением сопротивления дуги r_d концы векторов токов и напряжений скользят по дугам соответствующих окружностей, как показано пунктиром. Треугольник линейных напряжений остаётся без изменений и лишь перемещается параллельно самому себе в соответствии перемещением его центра тяжести, положение которого определяется напряжением нулевой последовательности. Неизменность линейных напряжений, в частно-

сти обуславливает практически постоянное значение тока в емкостной проводимости между фазами как при нормальных условиях, так и при ОЗЗ. С уменьшением сопротивления дуги напряжение повреждённой фазы стремится к нулю, а напряжение неповреждённых фаз – к соответствующим линейным напряжениям.

Комплексная схема при ОЗЗ представлена на рис. 4. Здесь помимо емкостных сопротивлений введены индуктивные сопротивления линии и трансформатора и сопротивление дуги.

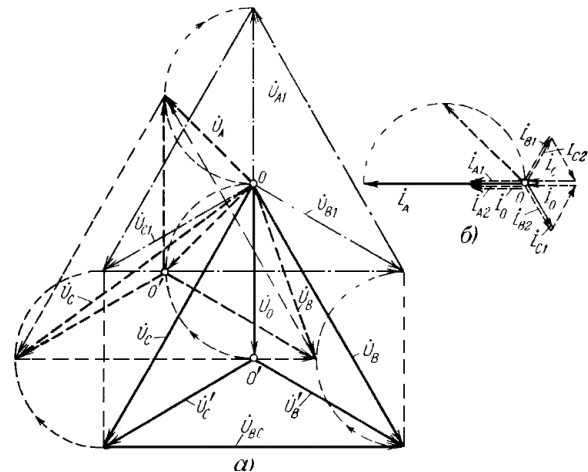


Рис. 3. Векторные диаграммы в месте ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью: а – напряжений; б – токов

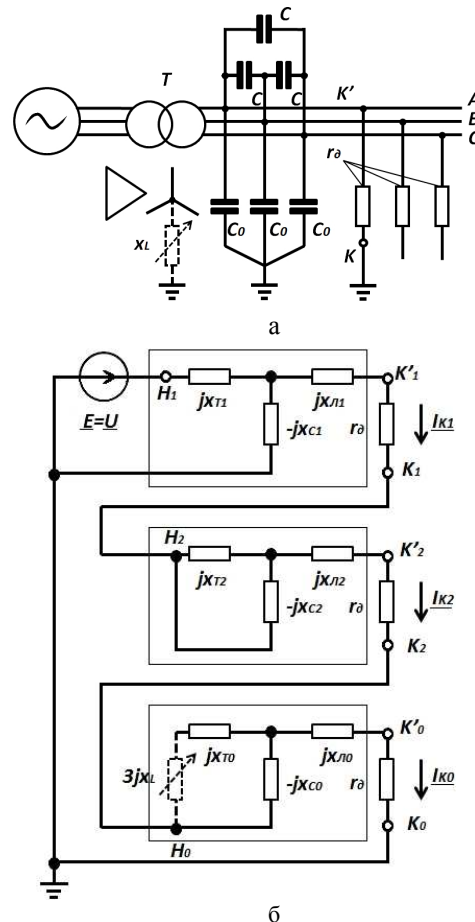


Рис. 4. Комплексная схема при ОЗЗ: а – исходная схема; б – схема замещения

Из приведенной схемы непосредственно следует, что для ограничения тока ОЗЗ целесообразно нейтраль трансформатора заземлить через индуктивную катушку с реактивным сопротивлением x_L (как показано пунктиром). Индуктивность такой катушки можно выбрать так, чтобы в цепи нулевой последовательности был обеспечен резонанс между индуктивностью и емкостью, что приведет к полной компенсации тока ОЗЗ. Пренебрегая реактивностью трансформатора, найдём, что данное условие будет выполнено при:

$$x_L = x_{C0} \Sigma / 3. \quad (7)$$

Такие катушки называют дугогасящими реакторами (катушками Петерсена). Их выполняют с возможностью регулирования индуктивности, для того чтобы производить их настройку при изменениях параметров защищаемой сети.

Обычно стремятся снизить ток ОЗЗ до величины, при которой создаются благоприятные условия для самопогасания дуги, возникшей при таком замыкании. Опытным путём установлено, что для обеспечения этого необходимо, чтобы ток замыкания на землю не превышал [2]: при 6 кВ – 30 А, при 10 кВ – 20 А, при 15-20 кВ – 15 А, при 35 кВ – 10 А.

Установка компенсации емкостных токов состоит из двух основных элементов. Первый из них – трансформатор, назначением которого является выделение из трехфазной сети потенциала нейтрали. Он представляет собой силовой трансформатор, у которого первичная обмотка соединена в звезду с нулевым выводом, а вторичная – в треугольник. Нейтраль звезды соединяется с землей через дугогасящий реактор (катушку Петерсена).

По способу регулирования тока компенсации современные дугогасящие реакторы разделяются на четыре основных вида:

- с переключением ответвлений обмотки (ступенчато-регулируемые реакторы);
- с изменением зазоров в магнитной системе (плунжерные реакторы);
- с изменением индуктивности подмагничиванием постоянным током;
- с одной силовой и одной вспомогательной обмоткой для подключения блока конденсаторных батарей (статические реакторы).

В такой установке при отсутствии замыкания ток через катушку Петерсена минимален. Предварительно ее настраивают в резонанс с общей емкостью сети. На устройствах со ступенчатой регулировкой это выполняется довольно приближенно и грубо. Если суммарное емкостное сопротивление сети больше, чем индуктивное сопротивление катушки, этот режим работы называется недокомпенсацией, если ситуация противоположная – перекомпенсацией.

В виду того, что емкостное сопротивление сети изменяется в зависимости от подключенных к ней фидерных линий, установка компенсации емкостных токов требует соответствующей корректировки настройки катушки Петерсена. За этим в современных катушках как правило следит автоматика.

Помимо основного электрооборудования в состав установки компенсации емкостных токов, входят и вспомогательные элементы. Это трансформатор тока, служащий для измерения тока замыкания на землю, специальная обмотка для выделения напряжений нулевой последовательности, именуемая $3U_0$.

Работа установки компенсации емкостных токов. При ОЗЗ в точку короткого замыкания (КЗ) течет емкостной ток сети I_C , который может вызывать электрическую дугу в месте замыкания [4]:

$$I_C = \frac{3U_{ph}}{X_C}, \quad (8)$$

где U_{ph} – фазное напряжение;

X_C – эквивалентное емкостное сопротивление сети.

При наличии установки компенсации в место КЗ течёт и ток через дугогасящую катушку I_L .

$$I_L = \frac{U_{ph}}{\omega L}, \quad (9)$$

где L – индуктивность катушки Петерсена;

ω – угловая частота ($\omega = 2\pi f$), зависящая от частоты сети – f .

В точке КЗ ток катушки компенсирует емкостной ток сети, снижая или сводя к минимуму ток в поврежденной фазе. Поэтому для нейтрализации аварийного тока запишем равенство $I_L = I_C$. Следовательно

$$\frac{U_{ph}}{\omega L} = \frac{3U_{ph}}{X_C}. \quad (10)$$

Проведя некоторые преобразования равенства (10), получаем формулу индуктивности катушки Петерсена для резонансного заземления:

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C}, \quad (11)$$

где L – индуктивность катушки Петерсена;

C – эквивалентная ёмкость сети.

Для установки разных уровней компенсации лучше использовать формулу:

$$L = \frac{k}{3\omega^2 C}, \quad (12)$$

где k – коэффициент компенсации:

$$k = I_L / I_C. \quad (13)$$

Результирующий аварийный ток равен:

$$I_{res} = I_L - I_C. \quad (14)$$

При этом дуговое замыкание при переходе синусоидального напряжения КЗ через ноль гаснет. Для повторного зажигания дуги напряжения оказывается недостаточно. Так минимизируются все вредные воздействия замыкания на землю на всю сеть целиком.

Чтобы сделать защиту от ОЗЗ максимально эффективной, современные катушки Петерсена содержат в своем составе резистор с заранее рассчитанной величиной сопротивления. В момент замыкания контактором он подключается в цепь катушки на ограниченное время, достаточное для срабатывания релейной защиты. Так нейтраль кратковременно приобретает резистивное заземление.

За счет ввода активной составляющей тока замыкания на землю произойдет отключение только линии, подпитывающей КЗ.

Но в реальных энергосистемах чаще всего случается, что ёмкости фаз фидеров различаются в зависимости от их местоположения в пространстве, относительно друг друга. Линии, питающие потребителей, могут загружаться неравномерно, что приводит к нарушению симметрии системы и возникновению потенциала в нейтральном проводнике вспомогательного трансформатора установки компенсации емкостных токов.

Такие асимметричные режимы могут приводить к чрезмерной работе дугогасительных реакторов и даже к появлению резонансных схем. Чтобы исключить такие ситуации, допускается работа электросети в недокомпенсированном режиме.

Моделирование и симуляция сети напряжением 20 кВ с компенсированной нейтралью в прикладном пакете Matlab. Однолинейная схема трехфазной электрической сети показана на рис. 5. Она представляет собой источник питания напряжением 110 кВ и полной мощностью 1 ГВА. Соотношение реактивного сопротивления к активному равно 7. Далее по схеме включен силовой трансформатор 110/20 кВ с обмотками, имеющими соединение звезда-треугольник. К вторичной обмотке силового трансформатора подсоединён вспомогательный трансформатор 20/0,4 кВ, имеющий соединение обмоток звезда с нейтралью-треугольник. К нейтральному выводу первичной обмотки вспомогательного трансформатора подсоединяется плунжерный дугогасительный реактор (катушка Петерсена), имеющий активное сопротивление 50 мОм и переменную величину индуктивности, настраиваемую в зависимости от значения общей ёмкости сети. Также от силового трансформатора отходит 3 фидерных линии различной длины и с различной мощностью потребителей. Длина фидеров устанавливается из соотношения, что ток утечки на каждый км линии будет распределяться как $I_{feeder}=[0.6 \ 0.3 \ 0.1]$ (исходя из этого условия в Matlab рассчитываются длины фидерных линий), а общий ток утечки будет равен 100 А. Фидеры представляют собой кабельные линии, параметры которых взяты из каталога производителя Nexans [5] и представлены на рис. 6.

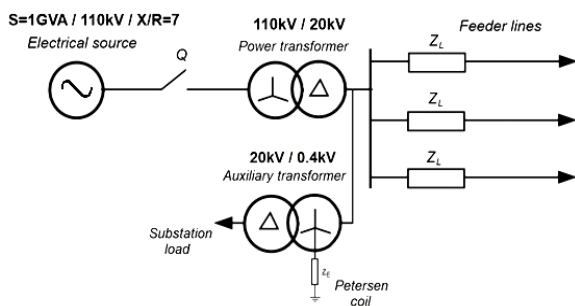


Рис. 5. Схема электрической сети 20 кВ с компенсированной нейтралью

Nominal cross-sectional area	mm ²	3x70	3x95
Diameter over conductor	mm	9.8	11.5
Approximate diameter over insulation	mm	22	23.7
Approximate overall diameter	mm	71	75
Approximate weight of cable	kg/m	8200	9500
Minimum bending radius (static)	mm	850	900
Maximum pulling tension on cable	kg	1050	1425
Maximum DC resistance @ 20°C	Ω/km	0.2680	0.1930
Maximum AC resistance @ 90°C	Ω/km	0.3420	0.2470
Inductance	mH/km	0.388	0.369
Reactance @ 50Hz	Ω/km	0.122	0.116
Impedance @ 50Hz @ 90°C	Ω/km	0.363	0.273
Maximum capacitance (C)	μF/km	0.2	0.233
Maximum charging current	A/km	0.8	0.89
Short circuit ratings			
1 second short circuit-rating of conductor (90 to 250 °C)	kA	9.7	13.5
1 second short circuit-rating of metallic screen (80 to 200 °C)	kA	9.7	13.5
Continuous current carrying capacity (as per conditions detailed below)			
Direct buried	Amps	255	295
Single way ducts	Amps	225	260
In air	Amps	275	330

Рис. 6. Параметры кабелей фидерных линий

Схема моделирования представлена на рис. 7. Она включает в себя:

- незаземленный трехфазный источник питания, мощность 1 ГВА, отношение X/R равно 7, частота источника питания равна 50 Гц;
- трехфазные измерительные блоки напряжения и тока;
- трехфазный силовой трансформатор с соединением звезда-треугольник;
- блоки линий электропередач с распределенными параметрами, где мы можем задать параметры фидерных линий, используя один из предложенных методов. В данной модели устанавливаются параметры кабельной линии [6] с использованием сопротивлений положительной и нулевой последовательности, а также аналогично индуктивности и емкости. Первая фидерная линия состоит из двух секционных линий – это позволяет установить в параметрах местоположение неисправности;
- нагрузку сети с различными параметрами;
- однофазный выключатель для имитации замыкания на землю;
- вспомогательный трансформатор с соединением звезда с нейтралью-треугольник. Он имеет более низкую мощность по сравнению с силовым трансформатором и его первичная обмотка необходима для выделения нейтрали и подключения катушки Петерсена к компенсированной цепи. Вторичная обмотка этого трансформатора может остаться вовсе не нагруженной или может быть подключена маломощная нагрузка для собственных нужд подстанции (например, освещение);
- последовательная RL-цепь, используется для моделирования катушки Петерсена. Активное сопротивление этой катушки постоянное и равно 50 мОм. Индуктивность этой катушки является переменной величиной и зависит от емкостных токов компенси-

рованной электрической сети.

Все параметры блоков могут быть установлены с использованием m-кода и созданием файла «.m», который мы должны выполнить до начала моделирования. Но также необходимо установить параметры в свойствах блоков, используя ключевые слова или имена значений из m-файла.

Для обработки сигналов и получения данных от измерительных блоков необходимо построить измерительную схему, показанную на рис. 8, которая, по сути является частью модели цифрового реле [7]. Измерительная схема в себя включает:

- блок создания шины, который собирает все сигналы из блоков измерения и помещает их в одну шину;
- блок цифровой обработки сигналов, представляющий подсистему, показанную на рис. 9 [7];

• блок рабочей области, который необходим для загрузки данных из Simulink в рабочее пространство Matlab для автоматического моделирования;

• блок селектор шины, используемый для распределения сигналов от общей шины к отдельным шинам;

• блоки Abs – для получения абсолютного значения сигнала;

• блоки перехода между частотами - используются между двумя доменами с разными периодами выборки, для их соединения;

• блоки выбора – для выбора одной из трех компонентов последовательностей, в нашем случае это нулевая последовательность;

• блоки усиления – необходимы для усиления сигнала по некоторому коэффициенту; которые используются для получения выходных данных.

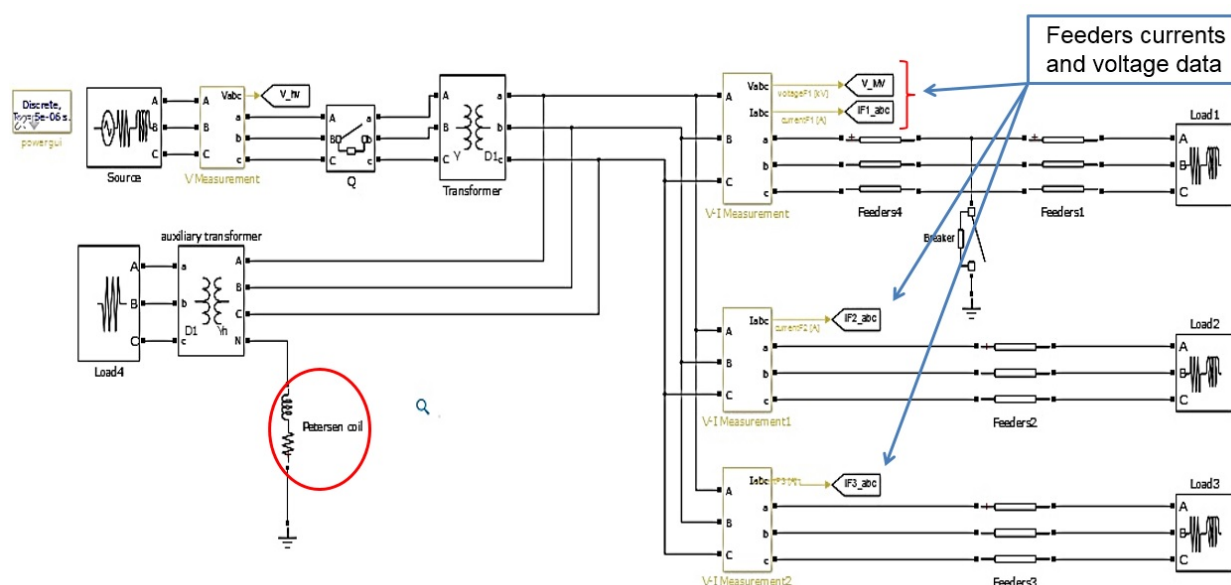


Рис. 7. Matlab-модель сети 20 кВ с компенсированной нейтралью

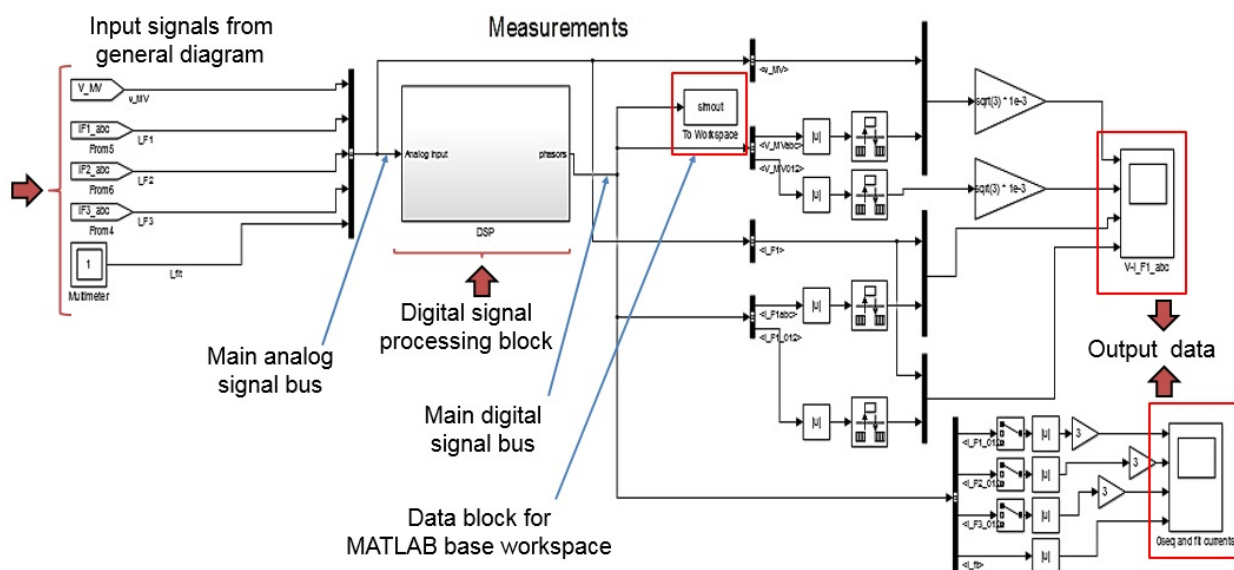


Рис. 8. Matlab-модель измерительной цепи сети 20 кВ с компенсированной нейтралью

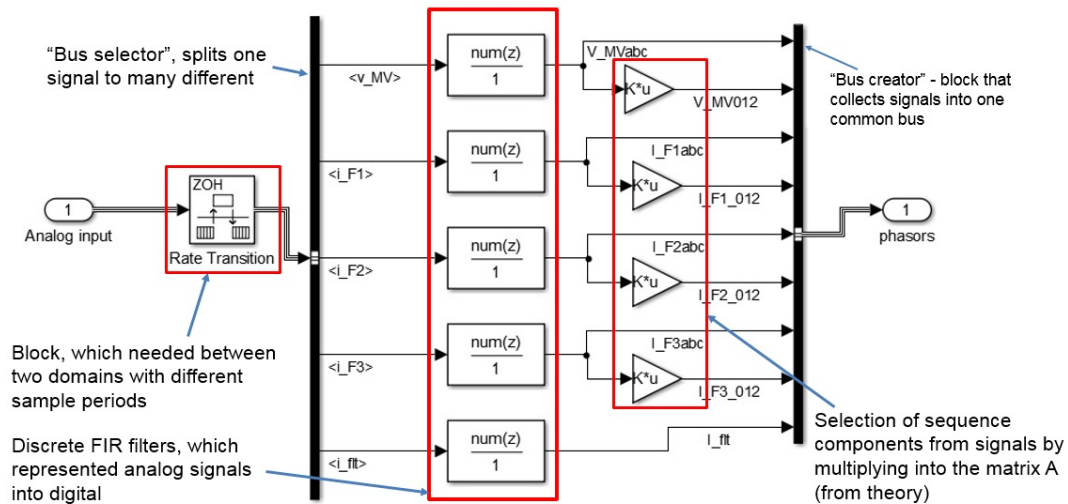


Рис. 9. Matlab-модель блока цифровой обработки сигналов

Результаты моделирования. Перед началом моделирования был выбран дискретный алгоритм, а время окончания моделирования составляло 0.5 с, заданное время выборки для $T_s=5e-6$ с с блоком «Powergui». Замыкание фазы А первого фидера на землю происходит через 0.1 с.

После симуляции расчетной модели компенсированной электрической сети 20 кВ в режиме замыка-

ния на землю были получены напряжения фидеров со стороны 20 кВ, симметричные составляющие напряжения фидеров, токи вторичной обмотки трансформатора, токи первого фидера, симметричные составляющие токов первого фидера, аварийный ток и осциллограммы токов нулевой последовательности фидеров, которые представлены на рис. 10-13.

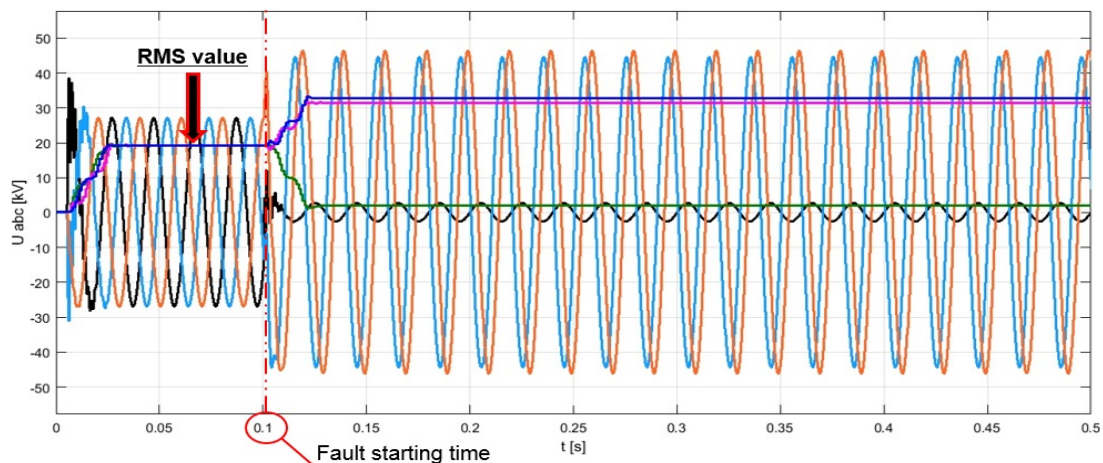


Рис. 10. Аварийный режим. Напряжение фидеров, амплитуда и среднеквадратичные значения

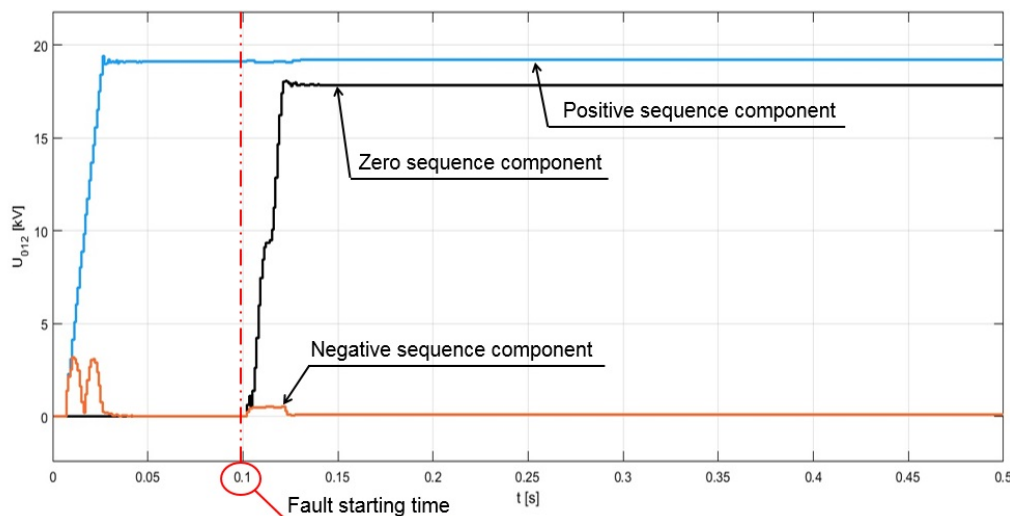


Рис. 11. Аварийный режим. Симметричные составляющие напряжения фидеров

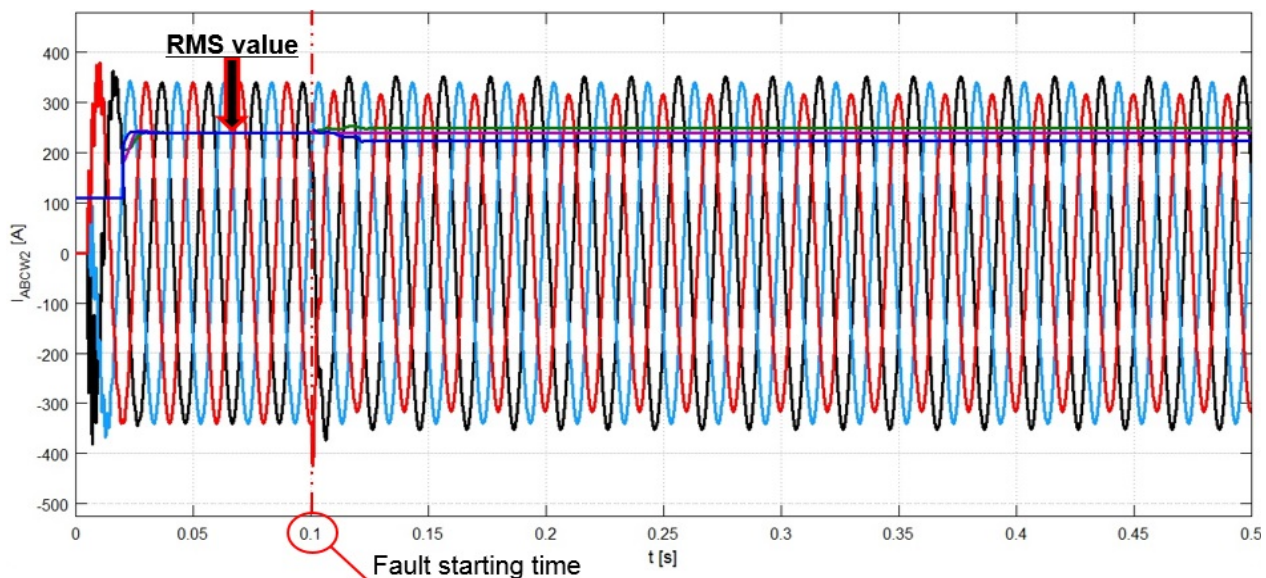


Рис. 12. Аварийный режим. Токи вторичной обмотки трансформатора, амплитуда и среднеквадратичное значения

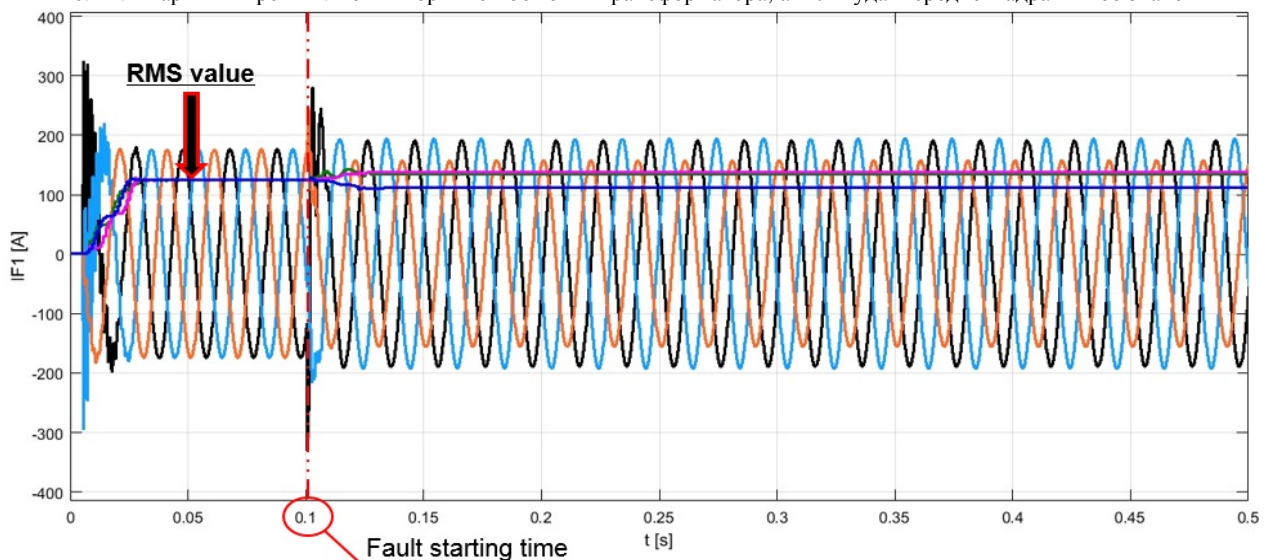


Рис. 13. Аварийный режим. Токи первого фидера, амплитуда и среднеквадратичное значения

На основании анализа полученных зависимостей сделаны следующие выводы.

Когда происходит ОЗЗ, во всей силовой системе появляется напряжение нулевой последовательности (см. рис 11).

Для повреждённой линии (1-й фидер) значение тока нулевой последовательности является суммой емкостных токов неповреждённых линий (2-го и 3-го фидеров) – рис. 14, а.

При ОЗЗ в сети с компенсированной нейтралью нет влияния на токи первичной обмотки трансформатора.

В сети с компенсированной нейтралью повреждённая линия может работать некоторое время с ОЗЗ, которое регламентируется техническими требованиями [1], до устранения неисправности. Линейные напряжения при этом остаются без изменений.

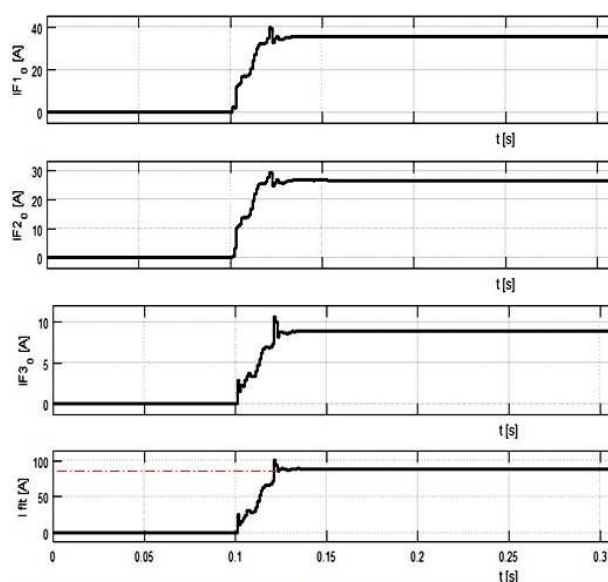
Из рис. 10 следует, что после однофазного замыкания фазы А на землю (в момент времени 0.1 с) фазное напряжение стремится к нулю, остаточное напряжение вызвано сопротивлением сети, в это время ранее

симметричная трехфазная система переходит в не симметричный режим. В нейтральной точке появляется потенциал (см. векторную диаграмму рис. 3), остальные два напряжения между фазами (фаза В и фаза С) увеличиваются до $\sqrt{3}$ раз (линейное напряжение).

На рис. 14 представлены результаты моделирования аварийных токов и токов нулевой последовательности фидеров в сети без компенсации тока в нейтрали (а), и с его компенсацией катушкой Петерсена (б) – токи повреждения в этих режимах соответственно около 80 А и 4 А (нижние графики). Эти результаты моделирования наглядно демонстрируют работу катушки Петерсена: разница заключается в наличии индуктивного тока I_L в точке КЗ. Аварийный ток состоит из переходного емкостного тока и переходного индуктивного тока.

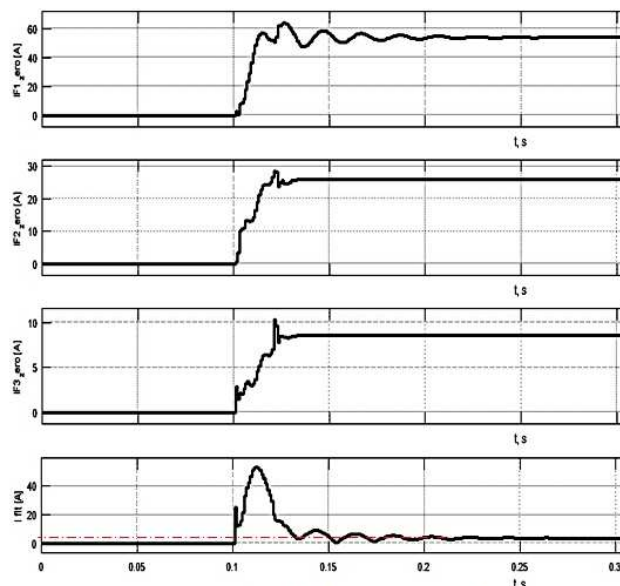
Для неповрежденных фидерных линий ток нулевой последовательности является их собственным емкостным током потерь. Ток нулевой последовательности опережает напряжение нулевой последовательности на 90 градусов. При использовании заземления нейтрали

через катушку Петерсена токи нулевой последовательности, которые текут через аварийную линию и неповрежденные линии все еще остаются их собственными емкостными токами потерь. При использовании избыточной компенсации направление емкостного тока совпадает с направлением тока в неповрежденной линии (см. рис. 2). Поэтому в этих случаях очень трудно определить поврежденную линию точно.



Without Petersen coil

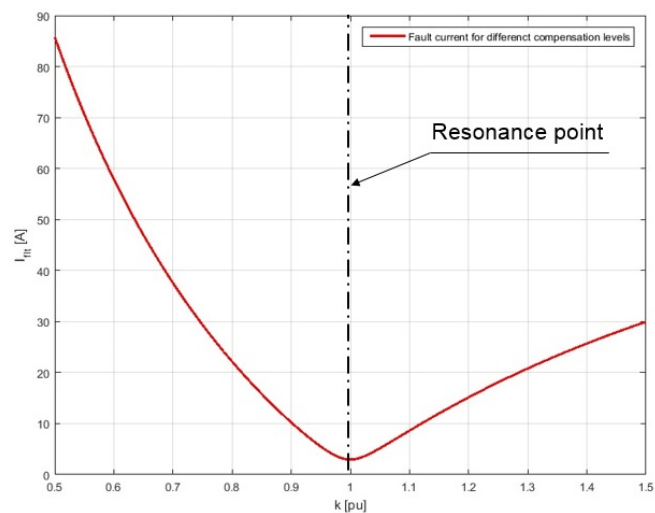
а



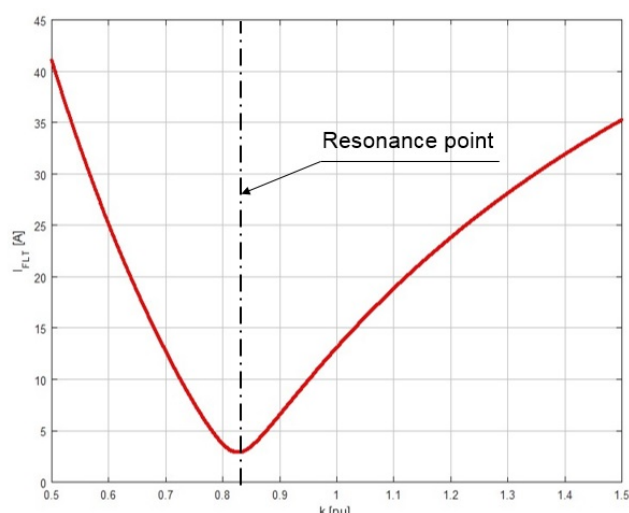
With Petersen coil

б

Рис. 14. Режим ОЗЗ. Сравнение осциллограмм аварийных токов и токов нулевой последовательности фидеров в сетях: а – с изолированной нейтралью; б – компенсированной катушкой Петерсена нейтралью



а



б

Рис. 15. Графики зависимостей аварийного тока от различных уровней компенсации катушки Петерсена: а – без учета влияния индуктивности рассеяния вспомогательного трансформатора; б – с учетом влияния индуктивности рассеяния вспомогательного трансформатора

Выводы.

1. Разработана расчетная модель электрической сети напряжением 20 кВ с тремя фидерами и компенсированной нейтралью в среде математического моделирования Matlab. Указанная модель базируется на положениях теории метода симметричных составляющих, что позволяет имитировать появление компо-

нент нулевой последовательности токов, возникающих в энергосистеме в случае однофазного замыкания на землю.

2. Проведено имитационное моделирование сети с компенсированной нейтралью в режиме однофазного замыкания на землю, результаты которого проиллюстрированы соответствующими осциллограммами и

зависимостями напряжений и токов. По результатам моделирования проанализирована работа системы компенсации аварийного тока в режиме однофазного замыкания на землю.

3. Предложенная расчетная модель может быть использована при разработке новых и модернизации существующих сетей среднего напряжения с компенсированной нейтралью для оценки эффективности их работы в режиме однофазного замыкания на землю и с целью наиболее рационального выбора соответствующего защитного оборудования и алгоритмов его работы.

Список литературы

1. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х.: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. Учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов. М., «Энергия», 1970. – 520 с.
3. ABB Distribution Automation Handbook Section Feeder EF Protection 757287 ENa.
4. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: Учебное пособие 7-е изд., СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 592 с.
5. <http://www.nexans.co.uk/UK/files/Underground%20Power%20Cables%20Catalogue%202003-2010.pdf>.
6. <https://www.mathworks.com/support>.
7. Digital Signal Processing in Power System Protection and Control - W. Rebizant, et al., (Springer, 2011) BBS.
8. Electromagnetic Transients Program Rule Book. Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, April 1982.
9. A.H. Osman and O.P. Malik, "Transmission line protection based on wavelet transform", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.19, No.2, pp.515-523, April 2004.
10. B. Das and J.V. Reddy, "Fuzzy-logic-based fault classification scheme for digital distance protection", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, pp. 609-616, April 2005.

References (transliterated)

1. Pravila ulashtuvannya elektroustanovok. – Vidannya ofitsiynе. Minenergovugillya Ukraini. – H.: Vidavnistvo «Fort», 2017. – 760 s.
2. Ulyanov S.A. Elektromagnitnye perehodnye protsessy v elektricheskikh sistemah. Uchebnik dlya elektrotehnicheskikh i energeticheskikh vuzov i fakultetov. M., «Energiya», 1970. – 520 s.
3. ABB Distribution Automation Handbook Section Feeder EF Protection 757287 ENa.
4. Atabekov G.I. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Lineynye elektricheskie tsepi: Uchebnoe posobie 7-e izd., SPb.: Izdatelstvo «Lan», 2009. – 592 s.
5. <http://www.nexans.co.uk/UK/files/Underground%20Power%20Cables%20Catalogue%202003-2010.pdf>.
6. <https://www.mathworks.com/support>.
7. Digital Signal Processing in Power System Protection and Control - W. Rebizant, et al., (Springer, 2011) BBS.
8. Electromagnetic Transients Program Rule Book. Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, April 1982.
9. A.H. Osman and O.P. Malik, "Transmission line protection based on wavelet transform", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.19, No.2, pp.515-523, April 2004.
10. B. Das and J.V. Reddy, "Fuzzy-logic-based fault classification scheme for digital distance protection", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, pp. 609-616, April 2005.

Поступила (received) 10.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Зорін Євген Юрійович (Зорин Евгений Юрьевич, Zorin Yevgeniy Yur'yevich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр, кафедра електричних апаратів; м. Харків, Україна; e-mail: yevgeny.zorin@gmail.com.

Чепелюк Олександр Олександрович (Чепелюк Александр Александрович, Chepelyuk Oleksandr Oleksandrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9821>; e-mail: chep1@i.ua.

М.Г. ПАНТЕЛЯТ, Ю.С. ГРИЩУК, О.О. ЧЕПЕЛЮК, А.К. ЄЛОЄВ

СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ МУЛЬТИФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ІНДУКЦІЙНИХ КУХОННИХ ПЛИТ

Індукційні плити являють собою відносно новий клас сучасної електропобутової техніки – кухонні електричні плити, які розігрівають металевий посуд вихровими струмами, які створюються електромагнітним полем частотою 20-100 кГц. Представляє значний інтерес дослідження мультифізичних (електромагнітних, теплових і механічних) процесів, що протікають в індукційних плитах в процесі їх експлуатації, а також розробка методики розрахунку і проектування їх конструктивних елементів. Отримані результати мають бути розраховані на використання в практиці конструювання побутових індукційних плит, а також у навчальному процесі для підготовки фахівців за відповідною навчальною програмою. Кількість опублікованих робіт, присвячених комп'ютерному моделюванню процесів в індукційних кухонних плитах, на багато порядків менше, ніж кількість публікацій з питань добре розвинутого чисельного аналізу мультифізичних явищ у промислових індукційних нагрівачах. У статті наведено огляд і аналіз публікацій, головним чином опублікованих у закордонних виданнях, присвячених мультифізичному комп'ютерному моделюванню електромагнітних і теплових процесів і явищ в індукційних кухонних плитах і посуді, що нагрівається. Запропоновані напрямки подальших досліджень: доцільно врахувати при застосуванні метода скінчених елементів залежності електрофізичних та теплофізичних властивостей матеріалів від температури, а також нелінійні магнітні властивості (основні криві намагніченості) ферромагнітних матеріалів. Математичне моделювання розподілу зв'язаних полів доцільно розпочати у двовимірній постановці (значно більш складна тривимірна постановка та відповідне програмне забезпечення можуть бути використані пізніше для уточнення отриманих результатів).

Ключові слова: індукційні плити, мультифізичні процеси, комп'ютерне моделювання, індукційні нагрівачі, огляд і аналіз публікацій, напрямки подальших досліджень.

М.Г. ПАНТЕЛЯТ, Ю.С. ГРИЩУК, А.А. ЧЕПЕЛЮК, А.К. ЕЛОЕВ

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ МУЛЬТИФИЗИЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ КУХОННЫХ ПЛИТ

Индукционные плиты представляют собой относительно новый класс современной электробытовой техники – кухонные электрические плиты, которые разогревают металлическую посуду вихревыми токами, создаваемыми электромагнитным полем частотой 20-100 кГц. Представляет значительный интерес исследование мультифизических (электромагнитных, тепловых и механических) процессов, протекающих в индукционных плитах в процессе их эксплуатации, а также разработка методики расчета и проектирования их конструктивных элементов. Полученные результаты должны быть рассчитаны на использование в практике конструирования бытовых индукционных плит, а также в учебном процессе для подготовки специалистов по соответствующей учебной программе. Количество опубликованных работ, посвященных компьютерному моделированию процессов в индукционных кухонных плитах, на много порядков меньше, чем количество публикаций по вопросам хорошо развитого численного анализа мультифизических явлений в промышленных индукционных нагревателях. В статье приведен обзор и анализ публикаций, главным образом опубликованных в зарубежных изданиях, посвященных мультифизическому компьютерному моделированию электромагнитных и тепловых процессов и явлений в индукционных кухонных плитах и нагреваемой посуде. Предложены направления дальнейших исследований: целесообразно учесть при применении метода конечных элементов зависимости электрофизических и теплофизических свойств от температуры, а также нелинейные магнитные свойства (основные кривые намагниченности) ферромагнитных материалов. Математическое моделирование распределения связанных полей целесообразно начать в двумерной постановке (значительно более сложная трехмерная постановка и соответствующее программное обеспечение могут быть использованы позднее для уточнения полученных результатов).

Ключевые слова: индукционные плиты, мультифизические процессы, компьютерное моделирование, индукционные нагреватели, обзор и анализ публикаций, направления дальнейших исследований.

M.G. PANTELYAT, Yu.S. GRISHCHUK, A.A. CHEPELYUK, A.K. ELOEV

STATUS AND PERSPECTIVES OF THE MULTIPHYSICAL SIMULATION OF INDUCTION KITCHEN PLATES

Induction cookers are a relatively new class of modern electrical household appliances – kitchen electric stoves that heat metal dishes with eddy currents generated by an electromagnetic field with a frequency of 20-100 kHz. Of considerable interest is the study of multiphysical (electromagnetic, thermal, and mechanical) processes occurring in induction cookers during their operation, as well as the development of methods for calculating and designing their structural elements. The results obtained should be intended for use in the practice of designing domestic induction cookers, as well as in the educational process for training specialists in the relevant curriculum. The number of published papers devoted to computer simulation of processes in induction cookers is many orders of magnitude less than the number of publications on the issues of well-developed numerical analysis of multiphysical phenomena in industrial induction heaters. The paper presents a review and analysis of publications, mainly published abroad devoted to multiphysical computer modeling of electromagnetic and thermal processes and phenomena in induction cookers and heated dishes. The directions for further research have been proposed: it is advisable to take into account, when applying the finite element method, the dependencies of the electrophysical and thermal properties on temperature, as well as the nonlinear magnetic properties (main magnetization curves) of ferromagnetic materials. Mathematical modelling of the distribution of coupled fields should be started in a two-dimensional formulation (a much more complicated three-dimensional formulation and the corresponding software can be used later to refine the results).

Key words: induction cooker, multiphysical processes, computer simulation, induction heaters, review and analysis of publications, directions for further research.

Вступ. Індукційні плити являють собою відносно новий клас сучасної електропобутової техніки – кухонні електричні плити, які розігрівають металевий посуд вихровими струмами, які створюються електромагнітним полем частотою 20-100 кГц [1]. Конст-

рукції сучасних індукційних плит різних виробників наведені на рис. 1. Основним вузлом індукційної кухонної плити є індуктор – плоска одновиткова або багатовиткова котушка, при протіканні по якій змінного струму створюється електромагнітне поле, яке

© М.Г. Пантелят, Ю.С. Грищук, О.О. Чепелюк, А.К. Єлоєв, 2018

індуктує в свою чергу вихрові струми в посуді, що нагрівається. Конструкція індуктора індукційної плити представлена на рис. 2.

Представляє значний інтерес дослідження мультифізичних (електромагнітних, теплових і механічних) процесів, що протікають в індукційних плитах в процесі їх експлуатації, а також розробка методики розрахунку і проектування їх конструктивних елементів. Отримані результати мають бути розраховані для використання в практиці конструювання побутових індукційних плит, а також у навчальному процесі для підготовки фахівців за відповідною навчальною програмою.



Рис. 1. Сучасні індукційні кухонні плити

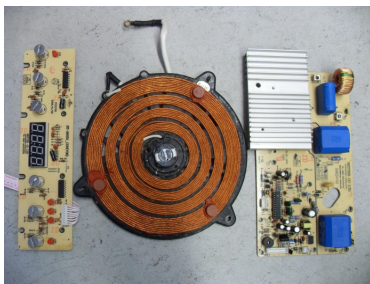


Рис. 2. Плоский багатовитковий індуктор індукційної плити

Дослідження надзвичайно складних з фізичної та математичної точки зору мультифізичних електромагнітних, теплових і механічних явищ, що мають місце в процесі роботи індукційних кухонних плит, можливо проводити лише з використанням сучасних методів комп'ютерного моделювання (чисельних методів). При цьому, потрібно враховувати їх взаємний вплив одне на інше, що дозволить отримати найбільш достовірні результати розрахунків.

Кількість опублікованих робіт, присвячених комп'ютерному моделюванню процесів в індукційних кухонних плитах, на багато порядків менше, ніж кількість публікацій з питань добре розвинутого чисельного аналізу мультифізичних явищ у промислових індукційних нагрівачах (лише деякі з тисяч публікацій наведені, наприклад, у [2]). В останні роки інтерес науковців до дослідження саме індукційних кухонних плит безперервно зростає, кількість відповідних наукових праць зростає, підвищується складність математичних моделей і чисельних методів, що використовуються для виконання розрахунків.

Мета роботи – огляд і аналіз публікацій,

присвячених мультифізичному комп'ютерному моделюванню процесів і явищ в індукційних кухонних плитах, і визначення напрямків подальших досліджень.

Огляд літературних джерел та аналіз стану проблеми. У вітчизняній науково-технічній літературі наразі не знайдено робіт, присвячених розробці та реалізації інженерних та чисельних методик розрахунку та проектування індукційних кухонних плит, за винятком публікацій досліджень кафедри електричних апаратів НТУ «ХПІ» [1, 3-7]. У закордонних виданнях відповідних публікацій теж небагато. Розглянемо найбільш цікаві з них.

У роботах [8-10] запропоновано методику спільного чисельного аналізу процесів в електронних схемах генераторів високої частоти та розподілу електромагнітного поля в індукторній системі індукційної кухонної плити, що дозволило авторам запропонувати, розрахувати та експериментально перевірити цікаву новітню конструкцію індуктора плити (рис. 3). Комп'ютерне моделювання розподілу електромагнітного поля виконується методом скінчених елементів у двовимірній [8, 9] та тривимірній [10] постановках. Двовимірна та тривимірна розрахункові моделі, створені для виконання електромагнітних розрахунків, наведені відповідно на рис. 4, 5 [9, 10]. На рис. 6 наведені приклади отриманих результатів розрахунку електромагнітного поля при різних режимах роботи індукторної системи.

Недоліком робіт є відсутність аналізу теплових процесів у конструкції, що розглядається.



Рис. 3. Індукторна система індукційної кухонної плити з двома концентричними котушками та концентраторами електромагнітного поля [10]: а – вид зверху; б – вид знизу

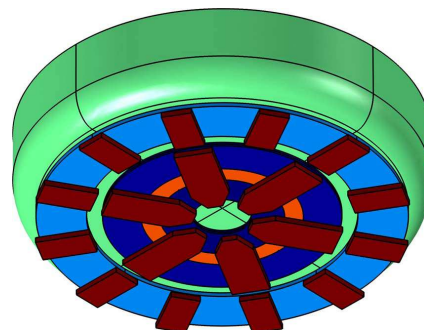


Рис. 4. Тривимірна модель індукторної системи з двома концентричними котушками, концентраторами електромагнітного поля та посудом, що нагрівається [10]

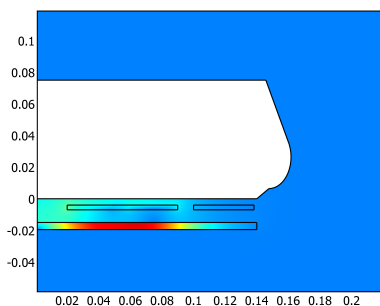


Рис. 5. Двовимірна розрахункова модель системи «дві концентричні котушки – посуд» для розрахунку розподілу електромагнітного поля [9]

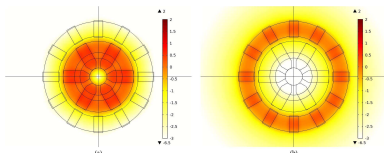


Рис. 6. Приклади результатів розрахунку розподілу електромагнітного поля [10]

У роботі [11] здійснено оптимізацію та виконано скінченоелементний аналіз у двовимірній постановці електромагнітних процесів (розподіл електромагнітного поля та електромагнітних сил) в індукційній кухонній плиті. Суттєвими недоліками використаної методики є розв'язання рівнянь електромагнітного поля у магнітостатичному наближенні (тобто знехтування вихровими струмами в першу чергу у посуді, що нагрівається), а також знехтування реальними магнітними властивостями матеріалів плити та посуду (всі матеріали вважаються немагнітними). Це не дозволяє отримати уяву про реальні процеси, що мають місце в процесі експлуатації індукційної кухонної плити. Крім того, при використанні вказаної постановки не може йти й мови про наступний аналіз теплових процесів у конструкції, що розглядається.

Автори роботи [12] розв'язали аналогічну задачу з використанням більш сучасного формулювання, аналогічного запропонованому в [3], що дозволило з використанням метода скінчених елементів (рис. 7) отримати детальний двовимірний розподіл амплітудних значень щільності вихрових струмів у запропонованій конструкції індукційної кухонної плити з індуктором у вигляді спіралі (рис. 8). Крім того, виконано розрахунок теплових втрат у плоскому індукторі плити, але не зроблено наступний крок – комп'ютерне моделювання теплового стану індуктора та посуду, що нагрівається.

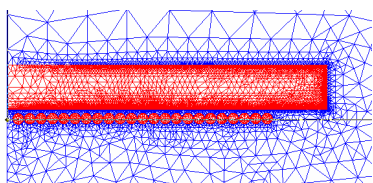


Рис. 7. Розрахункова модель системи «індуктор – посуд» з розбивкою на скінчені елементи для розрахунку розподілу електромагнітного поля [12]

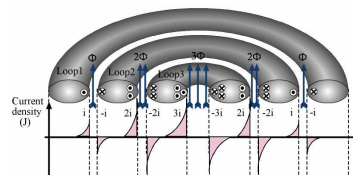


Рис. 8. Плоский спіральний індуктор індукційної кухонної плити [12]

Робота [13] присвячена розв'язанню задачі електромагнітної сумісності стосовно сучасного побутового обладнання, у тому числі побутових індукційних плит. Отже, виконується розрахунок електромагнітного поля у просторі, що оточує побутовий пристрій. При цьому використовується метод еквівалентного електромагнітного дипольного моменту. Таким чином, запропонована розрахункова методика не дозволяє отримати детальний розподіл електромагнітного та, тим більше, температурного поля в конструктивних елементах побутових плит та посуду, що нагрівається.

У статті [14] запропоновано використати метод скінчених елементів для розв'язання зв'язаних двовимірних задач розрахунку нестационарного електромагнітного поля у комплексній формі та стаціонарного теплового поля посуду, що нагрівається. На рис. 9 наведено ескіз розрахункової моделі системи «індуктор – посуд», а на рис. 10, 11 – запропонована авторами конструкція та її розрахункова модель з відповідними геометричними розмірами. Результати розрахунку просторового розподілу температури в посуді, що нагрівається, наведені на рис. 12.

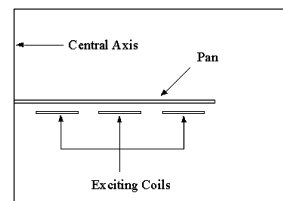


Рис. 9. Ескіз двовимірної розрахункової моделі системи «індуктор – посуд» [14]

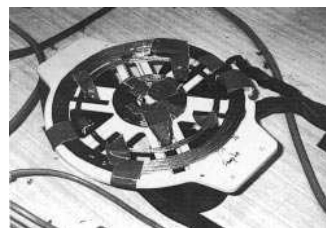


Рис. 10. Виготовлений індуктор індукційної кухонної плити [14]

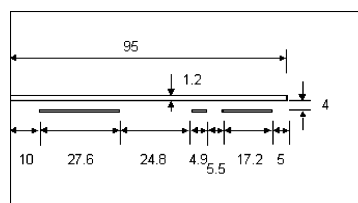


Рис. 11. Двовимірна розрахункова модель системи «індуктор – посуд» з виготовленою котушкою [14]

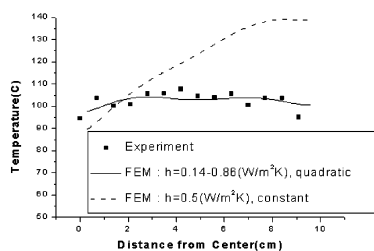


Рис. 12. Температурне поле посуду, що нагрівається [14]

Недоліками роботи [14] є:

– розв'язання саме стаціонарного рівняння теплопровідності, в той час як температура посуду в процесі нагрівання суттєво змінюється не лише у просторі, а також у часі

– запропонована методика не використовується для розрахунку теплового стану конструктивних елементів індукційної кухонної плити (індуктора та магнітопроводу); наявність магнітопроводу в конструкції плити навіть не враховується

– автори роботи не враховують залежності електрофізичних та теплофізичних властивостей матеріалів від температури, а також нехтують суттєво нелінійними магнітними властивостями феромагнітних матеріалів посуду та магнітопроводу

В роботі [15] метод скінчених елементів використовується для комп'ютерного моделювання розподілу тривимірного електромагнітного поля запропонованої конструкції індукційної кухонної плити (рис. 13). На рис. 14 наведена відповідна розрахункова модель, а на рис. 15 – отриманий розподіл індукції магнітного поля плити. Теплове поле конструкції розрахунковим шляхом не досліджується, хоча відповідні експериментальні дослідження виконані (рис. 16).



Рис. 13. Запропонована конструкція індукційної кухонної плити [15]



Рис. 14. Тривимірний розрахунковий модель запропонованої конструкції індукційної кухонної плити [15]

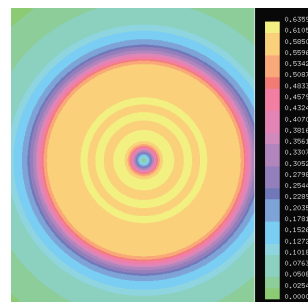


Рис. 15. Розподіл індукції магнітного поля запропонованої конструкції індукційної кухонної плити [15]

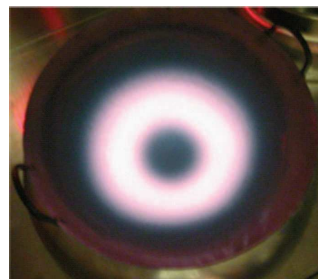


Рис. 16. Температурне поле посуду, що нагрівається (результати експериментальних досліджень) [15]

У статті [16] метод скінчених елементів використано для комп'ютерного аналізу зв'язаних тривимірних електромагнітного та нестационарного теплового полів у запропонованій авторами конструкції індукційної кухонної плити (рис. 17). Враховано залежності теплофізичних властивостей матеріалів від температури. На рис. 18 наведено приклад розрахованого розподілу щільності вихрових струмів у системі «індуктор – посуд».

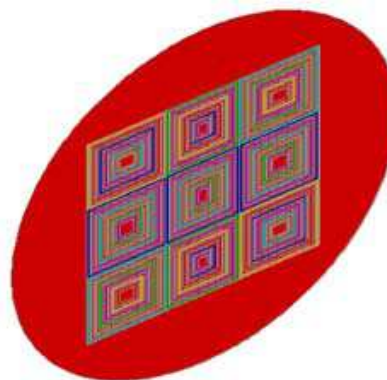


Рис. 17. Тривимірний розрахунковий модель запропонованої конструкції індукційної кухонної плити з 9 ідентичними прямокутними котушками [16]

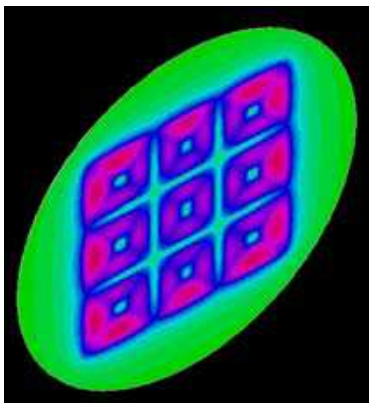


Рис. 18. Розподіл щільності вихрових струмів у запропонованій конструкції індукційної кухонної плити [16]

Недоліки роботи:

– не враховано залежності електрофізичних властивостей матеріалів від температури, а також суттєво нелінійні магнітні властивостями феромагнітних матеріалів;

– не розглядається феромагнітний магнітопровід індукційної плити.

Вибір напрямку досліджень. Для досягнення мети роботи доцільно розвинути методику, викладену в роботі [16], а саме врахувати при застосуванні метода скінчених елементів залежність електрофізичних та теплофізичних властивостей матеріалів від температури, а також нелінійні магнітні властивості (основні криві намагніченості) феромагнітних матеріалів. Математичне моделювання розподілу зв'язаних полів доцільно розпочати у двовимірній постановці (значно більш складна тривимірна постановка та відповідне програмне забезпечення можуть бути використані пізніше для уточнення отриманих результатів).

Список літератури

1. Пантелія М.Г., Гуренцов Ю.В., Трофімов А.В. Методика розрахунку індукторів індукційних кухонних плит // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 20 (1063). – С. 13-24.
2. Bajda Ye.I., Klymenko B.V., Pantelyat M.G., Trichet D., Wasselynck G. Electromagnetic and thermal transients during induction heating of cylindrical workpieces // Acta Technica. – 2018. – v. 63, No. 5 (accepted).
3. Пантелія М.Г., Гуренцов Ю.В. Методика комп'ютерного моделювання методом скінчених елементів розподілу електромагнітного поля індукційної кухонної плити // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 41 (1084). – С. 16-24.
4. Пантелія М.Г., Трофімов А.В. Методика скінченоеlementного аналізу теплового стану індукційної кухонної плити та посуду, що нагрівається // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 36-44.
5. Пантелія М.Г., Трофімов А.В. Методика мультифізичного аналізу електромагнітних і теплових процесів в індукційній кухонній плиті та посуді, що нагрівається // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 42 (1151). – С. 3-7.
6. Пантелія М.Г., Гуренцов Ю.В. Скінченоеlementний аналіз розподілу електромагнітного поля індукційної кухонної плити // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення

7. Пантелія М.Г., Єлєєв А.К. Скінченоеlementний аналіз розподілу температурного поля посуду, що нагрівається на індукційній кухонній плиті // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 26-28.
8. Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M., Alonso R. Passive network equivalent of an induction system for domestic cookers application based on FEA tool simulation // Proceedings of the 26th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 6-11 March 2011, Fort Worth, Texas, USA. – 2011. – P. 1753-1758.
9. Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M. FEA tool based model of partly coupled coils used in domestic induction cookers // Proceedings of the 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2011). – 7-10 November 2011, Melbourne, Victoria, Australia. – 2011. – P. 2533-2538.
10. Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M. Computational modeling of two partly coupled coils supplied by a double half-bridge resonant inverter for induction heating appliances // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – v. 60, No. 8. – P. 3092-3105.
11. Hosseini S.H., Kashtiban A.M., Alizadeh G. Particle swarm optimization and finite-element based approach for induction heating cooker design // Proceedings of the SICE-ICASE International Joint Conference. – 18-21 October 2006, Busan, Korea. – 2006. – P. 4624-4627.
12. Hediello M., Akhbari M. New approach in design of planar coil of induction cooker based on skin and proximity effect analysis // Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). – 10-13 February 2009, Churchill, Victoria, Australia. – 2009. – P. 1100-1105.
13. Yamazaki K., Kawamoto T., Fujinami H., Shigemitsu T. Equivalent dipole moment method to characterize magnetic field generated by electric appliances: extension to intermediate frequencies of up to 100 kHz // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2004. – v. 46, No. 1. – P. 115-120.
14. Jin-Kyu Byun, Kyung Choi, Hee-Sue Roh, Song-yop Hahn. Optimal design procedure for a practical induction heating cooker appliances // IEEE Transactions on Magnetics. – 2000. – v. 36, No. 4. – P. 1390-1393.
15. Meng L.C., Cheng K.W.E., Chan K.W. Heating performance improvement and field study of the induction cooker // Proceedings of the 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA). – 20-22 May 2009, Hong Kong. – 2009. – P. 313-317.
16. Meng L.C., Cheng K.W.E., Luk P.C.K. Field analysis of an induction cooker with square 9-coil system by applying diverse exciting pattern // Proceedings of the 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012). – 27-29 March 2012, Bristol, United Kingdom. – 2012. – P. 1-5.

References (transliterated)

1. Panteliat M.H., Hurentsov Yu.V., Trofimov A.V. Metodyka rozrakhunku induktoriv induktsiynykh kukhonnykh plyt. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. – Kh.: NTU "KhPI", 2014. 20 (1063). P. 13-24.
2. Bajda Ye.I., Klymenko B.V., Pantelyat M.G., Trichet D., Wasselynck G. Electromagnetic and thermal transients during induction heating of cylindrical workpieces. Acta Technica. 2018. v. 63, No. 5 (accepted).
3. Panteliat M.H., Hurentsov Yu.V. Metodyka komp'uternoho modeliuvannia metodom skinchennykh elementiv rozpodilu elektromagnitnoho polia induktsiinoi kukhonnoi plyty. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. 41 (1084). P. 16-24.
4. Panteliat M.H., Trofimov A.V. Metodyka skinchenelementnoho analizu teplovoho stanu induktsiinoi kukhonnoi plyty ta posudu, shcho nahrivaetsia. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. 13 (1122). P. 36-44.
5. Panteliat M.H., Trofimov A.V. Metodyka multyfizychnoho analizu

- електромagnetnykh i teplovykh protsesiv v induktsiini kukhonni plyty ta posudi, shcho nahrivaietsia. Visnyk NTU "KhPI". Seria: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. 42 (1151). P. 3-7.
6. *Panteliat M.H., Hurentsov Yu.V.* Skinchenoelementnyi analiz rozpodilu elektromagnetnoho polia induktsiinoi kukhonnoi plyty. Visnyk NTU "KhPI". Seria: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. № 32 (1204). P. 32-36.
 7. *Panteliat M.H., Yeloiev A.K.* Skinchenoelementnyi analiz rozpodilu temperaturnoho polia posudu, shcho nahrivaietsia na induktsiini kukhonni plyty. Visnyk NTU "KhPI". Seria: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. 34 (1256). P. 26-28.
 8. *Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M., Alonso R.* Passive network equivalent of an induction system for domestic cookers application based on FEA tool simulation. Proceedings of the 26th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 6-11 March 2011, Fort Worth, Texas, USA. 2011. P. 1753-1758.
 9. *Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M.* FEA tool based model of partly coupled coils used in domestic induction cookers. Proceedings of the 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2011). 7-10 November 2011, Melbourne, Victoria, Australia. 2011. P. 2533-2538.
 10. *Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M.* Computational modeling of two partly coupled coils supplied by a double half-bridge resonant inverter for induction heating appliances. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013. v. 60, No. 8. P. 3092-3105.
 11. *Hosseini S.H., Kashtiban A.M., Alizadeh G.* Particle swarm optimization and finite-element based approach for induction heating cooker design. Proceedings of the SICE-ICASE International Joint Conference. 18-21 October 2006, Busan, Korea. 2006. P. 4624-4627.
 12. *Hediehloo M., Akhbari M.* New approach in design of planar coil of induction cooker based on skin and proximity effect analysis. Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). 10-13 February 2009, Churchill, Victoria, Australia. 2009. P. 1100-1105.
 13. *Yamazaki K., Kawamoto T., Fujinami H., Shigemitsu T.* Equivalent dipole moment method to characterize magnetic field generated by electric appliances: extension to intermediate frequencies of up to 100 kHz. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2004. v. 46, No. 1. P. 115-120.
 14. *Jin-Kyu Byun, Kyung Choi, Hee-Suce Roh, Song-yop Hahn.* Optimal design procedure for a practical induction heating cooker appliances. IEEE Transactions on Magnetics. 2000. v. 36, No. 4. P. 1390-1393.
 15. *Meng L.C., Cheng K.W.E., Chan K.W.* Heating performance improvement and field study of the induction cooker. Proceedings of the 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA). 20-22 May 2009, Hong Kong. 2009. P. 313-317.
 16. *Meng L.C., Cheng K.W.E., Luk P.C.K.* Field analysis of an induction cooker with square 9-coil system by applying diverse exciting pattern. Proceedings of the 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012). 27-29 March 2012, Bristol, United Kingdom. 2012. P. 1-5.

Надійшло (received) 09.10.18

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Пантелят Михайло Гаррійович (Пантелят Михаил Гарриевич, Pantelyat Michael Garrievich) – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри електричних апаратів, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1357-2134>; e-mail: m150462@yahoo.com.

Гришук Юрій Степанович (Гришук Юрий Степанович, Grischuk Yuri Stepanovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7427-5419>; e-mail: grischuk-kpi@ukr.net.

Чепелюк Олександр Олександрович (Чепелюк Александр Александрович, Chepelyuk Oleksandr Oleksandrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9821>; e-mail: chep1@i.ua.

Єлоєв Алан Казбекович (Елоев Алан Казбекович, Yeloyev Alan Kazbekovich) – аспірант, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; e-mail: mauser98kar@gmail.com.

*О. С. САБОКАР***СТУПІНЧАТИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ НАПРУГИ ЯК АЛЬТЕРНАТИВНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ СИСТЕМ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТА ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ**

Застосування попереднього індукційного нагріву робочої зони магнітно-імпульсної обробки листових металів, може підвищити ефективність останньої і розширити існуючу номенклатуру технологічних операцій безконтактної обробки металів. Інтегрування систем індукційного нагріву потребує вдосконалення існуючих технічних рішень з перетворення і передачі електричної енергії. Робота присвячена математичному та експериментальному аналізу фізичних процесів, що протікають в електричній системі ступеневого перетворювача напруги, технічна реалізація якого спрямована на підвищення якісних і кількісних показників ефективності роботи систем магнітно-імпульсної обробки металів і індукційного нагріву. Новизна роботи полягає в розробці системи ступеневого заряду який представляє собою автономний блок, що дозволяє реалізувати перетворювач рівнів напруги в якості контрольованого джерела електричної енергії. Представлена методика математичного опису нестационарного перехідного процесу у вигляді кусочно-неперервних функцій була підтверджена експериментально. Отримані експериментальні дані модельного прототипу запропонованої системи перетворення напруги повністю відповідають аналогічним розрахунковим значенням, а сам перетворювач напруги є працездатним для застосування в якості конструктивного елемента систем магнітно-імпульсної обробки металів з використанням систем індукційного нагріву як інтегрованого допоміжного вузла. Результати проведених досліджень мають практичну значимість для створення більш компактних і автоматизованих систем безконтактної обробки металів.

Ключові слова: індукційний нагрів, магнітно-імпульсна обробка, напівпровідниковий ключ, математичне моделювання.

*О. С. САБОКАРЬ***СТУПЕНЧАТЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ СИСТЕМ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ И ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА**

Применение предварительного индукционного нагрева рабочей зоны магнитно-импульсной обработки листовых металлов, может повысить эффективность последней и расширить существующую номенклатуру технологических операций бесконтактной обработки металлов. Интегрирование систем индукционного нагрева требует усовершенствования существующих технических решений по преобразованию и передаче электрической энергии. Работа посвящена математическому и экспериментальному анализу физических процессов, протекающих в электрической системе ступенчатого преобразователя напряжения, техническая реализация которого направлена на повышение качественных и количественных показателей эффективности работы систем магнитно-импульсной обработки металлов и индукционного нагрева. Новизна работы состоит в разработке системы ступенчатого заряда представляющей собой автономный блок, позволяющий реализовать преобразователь уровней напряжения в качестве контролируемого источника электрической энергии. Представленная методика математического представления нестационарного переходного процесса в виде кусочно-непрерывных функций была подтверждена экспериментально. Полученные экспериментальные данные модельного образца предложенной системы преобразования напряжения полностью соответствуют аналогичным расчетным значениям, а сам преобразователь напряжения является работоспособным для применения в качестве конструктивного элемента систем магнитно-импульсной обработки металлов с использованием систем индукционного нагрева в качестве интегрированного вспомогательного узла. Результаты проведенных исследований имеют практическую значимость для создания более компактных и автоматизированных систем бесконтактной обработки металлов.

Ключевые слова: индукционный нагрев, магнитно-импульсная обработка, полупроводниковый ключ, математическое моделирование.

*O. S. SABOKAR***STEP VOLTAGE CONVERTER AS AN ALTERNATIVE SOURCE FOR MAGNETIC PULSE METAL WORKING SYSTEMS AND INDUCTION HEATING SYSTEMS**

The use of preliminary induction heating of the working zone of magnetic-pulse sheet metals working can improve its efficiency and expand the existing range of technological operations for contactless metal working. Integration of the induction heating systems requires the improvement of existing technical solutions for the electrical energy transformation and transmission. This work is devoted to the mathematical and experimental analysis of the physical processes in the electrical system of a step voltage converter, the technical realization of which is aimed to improve the qualitative and quantitative efficiency indicators of the magnetic pulse metals processing systems and induction heating systems. The novelty of the work is the development of a step charging system to be realized as a controlled source of electrical energy that is a self-contained unit allows to convert voltage levels. The method presented of the non-stationary transient process mathematical representation in the form of piecewise-continuous functions was confirmed experimentally. The experimental data obtained for the model sample of the voltage conversion system proposed was fully correspond to those of the values calculated, that is why the voltage converter is operable itself for using as previous charge systems for magnetic pulse metals processing using induction heating systems as an integrated auxiliary unit. The results of the studies conducted direct on the practical importance for the creation of more compact and automated systems for contactless metal processing.

Key words: induction heating, magnetic pulse working, semiconductor, mathematical modeling.

Вступ, аналіз публікацій. З метою підвищення якості виконання операцій, авторами [1, 2] було запропоновано використовувати індукційний нагрів (ІН) як можливу попередню обробку зони впливу з метою ослаблення пружних властивостей металу перед безпосередньою магнітно – імпульсною (МІ) обробкою.

Практичний інтерес представляють собою про-

позиції [3, 4], що дозволяють інтегрувати систему ІН як складову магнітно імпульсної установки (МІУ). Дана модернізація дозволить підвищити універсальність самої МІУ та розширити її технічні можливості, на кшталт можливості виконання деформацій металів з більш складною геометричною конфігурацією поверхні, або видалення вм'ятин з поверхні листових металів у випадку використання систем МІ рихту-

вання. Доцільним є рішення використовувати спільний вузол перетворення первинної напруги як джерела живлення силових контурів ІН та МІУ.

У найбільш відомих схемних реалізаціях, пристрій заряду складається із блоку підвищувачого силового трансформатора та випрямляючого блоку. Перший представляє собою високовольтний трансформатор з індуктивним обмеженням струму, другий – групу кремнієвих або селенових діодів. Більш детальне описання принципу роботи та самої схеми представлено у посібнику [5, 6].

Основними недоліками такого зарядного пристрою є наявність перетворюючого трансформатора, який має обмежений рівень максимальної вихідної напруги. У поєднанні з ємнісним навантаженням, яке, у випадку магнітно-імпульсної установки, представлене конденсаторним накопичувачем енергій, постійний рівень вихідної напруги суттєво впливає на швидкість заряду, що є важливим показником якості роботи усього комплексу магнітно-імпульсної обробки.

Відомим є пристрій заряду, який описаний у монографії [7]. За своєю будовою, він є спорідненим до першого аналогу, але у поєднанні із додатковою системою контролю та автоматики утворює джерело струму нормованої амплітуди. На відміну від першого, заряд від джерела струму дозволяє отримати значно вищий коефіцієнт корисної дії усього процесу магнітно-імпульсної обробки загалом. Основним недоліком цього пристрою є значна складність його

побудови, яка потребує використання елементів контролю значної вартості.

Альтернативою до попередніх двох пристроїв заряду є імпульсний перетворювач електричної енергії [8, 9]. В основу його роботи покладено застосування високих робочих частот струмів, які протікають у підвищувачому трансформаторі. За своєю фізичною суттю, такий підхід дозволяє суттєво знизити масогабаритні показники пристрою в цілому та підвищити ККД перетворювача, за рахунок привалювання реактивних опорів електричних контурів над активними – омичними опорами, на яких відбувається теплове розсіювання енергії.

Перераховані вище недоліки існуючих розробок, можуть бути виключені за рахунок реалізації безтрансформаторної системи ступеневого заряду ємнісних накопичувачів комплексів МІОМ.

Мета роботи полягає в підтвердженні працездатності запропонованої системи ступеневого заряду, як джерела живлення магнітно – імпульсних установок і систем індукційного нагріву, шляхом виконання математичного аналізу моделі системи, її експериментальної апробації та представлених практично значимих рекомендацій, щодо її проектування.

Постановка задачі. Розглянемо більш докладно систему ступеневої заряду.

Схема - електрична силових контурів в реалізації для МІУ, з додатковими елементами контролю представлена на рис. 1.

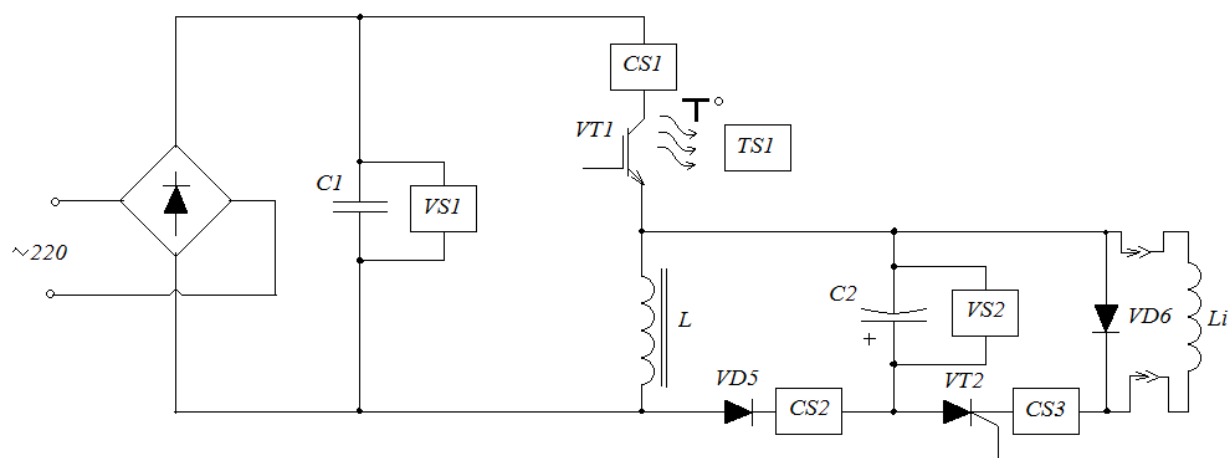


Рис. 1. Перетворювач напруги в складі МІУ

На рис. 1 представлені наступні позначки:

- VS1, VS2 – датчики напруги;
- CS1...CS3 – датчики струму;
- TS1 – датчик температури силового ключа;
- VT1, VT2 – напівпровідникові ключі;
- VD1...VD6 – силові високочастотні діоди;
- L – дросель;
- Li – індуктор – інструмент, що підключається;
- C1...C2 – ємності.

Фактично, L елемент контура являє собою ідеальне джерело електричної енергії в заданих рамках умов роботи, а також, характеристик елементів, що використовуються.

Індуктивний накопичувач енергії, без урахування втрат на активному опорі провідника обмотки, в

умовах безперервного повторення циклу заряду описаного в патенті [3], представляє собою джерело енергії на інтервалі часу, який у багато разів перевищує час одного циклу. За рахунок цього, система ступеневого заряду як елемент МІУ може бути вдосконалена і адаптована для установки ІН в якості вузла перетворення енергії і регулювання потужності, що споживається силовим контуром перетворювача частоти.

В основі запропонованої схеми зарядного контуру ємнісного накопичувача C2 лежить принцип послідовного ступеневого заряду імпульсами струму рівної енергії. Нормування величини енергії заряду кожного ступеня здійснюється постійністю параметрів індуктивності L і величиною сили струму, що

протікає в ній.

Роботу схеми можна умовно розділити на два режими:

- режим накопичення енергії в магнітному полі індуктивності, далі дроселя, рис. 2, а;
- режим передачі накопиченої енергії на ємність, рис. 2, б.

При відкритті ключа VT1 струм, що протікає через дросель призводить до накопичення в ньому енергії пропорційної індуктивності і квадрату значення струму. Наявність діода VD5 запобігає протіканню струму по паралельній гілці з C_2 при відкритому стані ключа.

У другому режимі, в момент закриття ключа VT1 накопичена в індуктивності енергія передається в ємність за рахунок виконання умови безперервності струму на індуктивності.

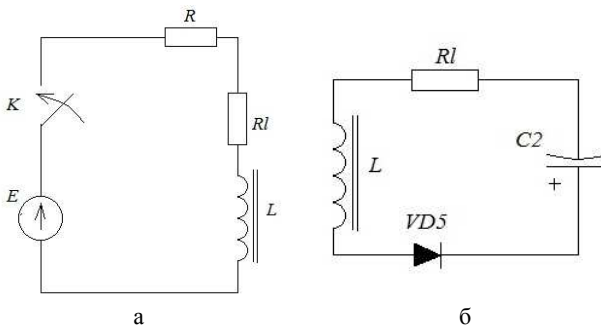


Рис. 2. Ідеалізація електричного зарядного контуру:
а – для замкнутого стану ключа; б – для розімкненого стану ключа

Розв'язок рівняння стану при нульових початкових умовах для функції струму дроселя має вигляд

$$J_i(t - \tau_{1i}) = \frac{U_{II}}{R + R_L} \left[1 - e^{-\left(\frac{R + R_L}{L}\right)(t - \tau_{1i})} \right] \quad (1)$$

де τ_{1i} – час дії відповідного циклу;

U_{II} – напруга живлення;

R, R_L – активні опори контуру і дроселя.

Час досягання заданого значення струму на дроселя

$$t_L = \frac{L}{R + R_L} \ln \left(1 - \frac{J_3(R + R_L)}{U_{II}} \right)^{-1} \quad (2)$$

де J_3 – фіксоване значення струму заряду.

Рівняння стану для циклу заряду ємності від джерела струму вигляді індуктивності має класичний вигляд для «RLC» контуру [10].

При виконанні умови коливального перехідного процесу $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ отримуємо рішення (3) рівняння

$$\begin{cases} U_C(t - \tau_{2i})_i = e^{-\beta(t - \tau_{2i})} (C_{1i} \cos(\omega(t - \tau_{2i})) + \\ \quad + C_{2i} \sin(\omega(t - \tau_{2i}))) \\ J_2(t - \tau_{2i})_i = C e^{-\beta t} ((C_{1i} \omega - C_{2i} \beta) \sin(\omega(t - \tau_{2i})) - \\ \quad - (C_{2i} \omega + C_{1i} \beta) \cos(\omega(t - \tau_{2i}))) \end{cases} \quad (3)$$

де $\beta = \frac{R_L}{2L}$ – декримент затухання;

$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$ – власна частота;

$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ – частота перехідного процесу;

τ_{2i} – час дії відповідного циклу;

C_{1i} – константи інтегрування.

Початкові умови для кожного наступного циклу сформульовані у вигляді (4)

$$\begin{cases} U_C(t = \tau_{2i})_i = C_{1i} = U_C(t)_{i-1} \\ J_2(t = \tau_{2i})_i = C(-J_3\beta - C_{2i}\omega) = J_3 \end{cases} \quad (4)$$

Вирази для функцій струму (6) і напруги (5) на ємності на кожному i -тому циклі заряду

$$U_C(t - \tau_{1i})_i = \left(U_C(t - \tau_{2i-1})_{i-1} \cos(\omega(t - \tau_{2i})) + \right. \\ \left. + \left[\frac{J_3 + C\beta U_C(t - \tau_{2i-1})_{i-1}}{C\omega} \right] \sin(\omega(t - \tau_{2i})) \right) e^{-\beta(t - \tau_{2i})} \quad (5)$$

$$J_2(t - \tau_{2i})_i = C \int_0^t U_C(t - \tau_{1i})_i dt \quad (6)$$

Час перенесення електричної енергії дроселя в ємнісний накопичувач отримуємо з виразу (6) з умови уніполярного характеру струму, що протікає, обумовленого наявністю діода VD5 в контурі (рис. 2, б).

$$t_{c_i}(J_2(t)_i = 0) = \frac{1}{\omega} \arctg \times$$

$$\times \left(\frac{J_3}{C U_C(\tau_{i-1})_{i-1} \omega + \frac{\beta J_3}{C \omega} + U_C(\tau_{i-1})_{i-1} \frac{\beta^2}{\omega}} \right) \quad (7)$$

Відповідні значення проміжків часу $t_{c_i}(J_2(t)_i = 0)$ та $t_L(J_1(t) = J_3)$ на кожному i -тому циклі буде визначати тривалість одного циклу заряду ємності.

Безперервні часові залежності функцій струму заряду ємності і напруги можуть бути представлені у вигляді суми функцій для кожного з циклів заряду за відповідного інтервалу часу визначеного i -того циклу. З використанням ступінчастої функції $\eta(t)$ отримуємо

$$\begin{cases} U_C(t) = \sum_{i=1}^{\infty} U_{Ci}(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_{n-1}}) \times \\ \quad \times \left[\eta \left(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_{n-1}} \right) - \eta \left(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_n} \right) \right] \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} J_2(t) = \sum_{i=1}^{\infty} J_{2i}(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_{n-1}}) \times \\ \quad \times \left[\eta \left(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_{n-1}} \right) - \eta \left(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_n} \right) \right] \end{cases} \quad (9)$$

Числові оцінки, експериментальне моделювання. Для підтвердження достовірності отриманих залежностей струму і напруги, зробимо порівняння результатів моделювання і реальних часових залежностей отриманих експериментально при різних

параметрах контура.

Для експериментальної оцінки були вибрані наступні електричні параметри експериментального зразка ступеневого перетворювача напруги:

- індуктивність дроселя $L=0.022$ Гн;
- активний опір дроселя $R \approx 0.9$ Ом
- напруга живлення $U=10$ В;
- струм дроселя $I=3$ А
- зарядна ємність 100, 200 мкФ.

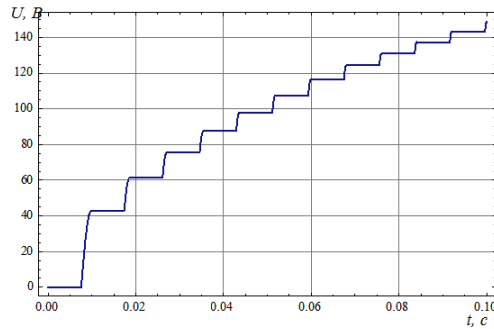


Рис. 3. Розрахункова часова залежність напруги для $C=100$ мкФ

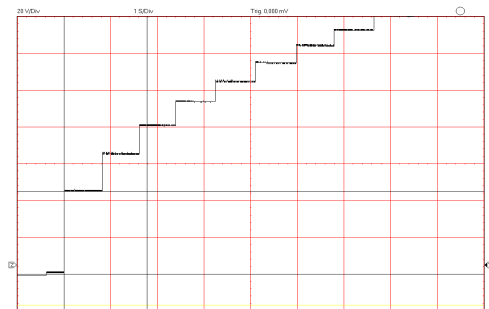


Рис. 4. Осцилограма залежності напруги для $C=100$ мкФ, 20 В/діл

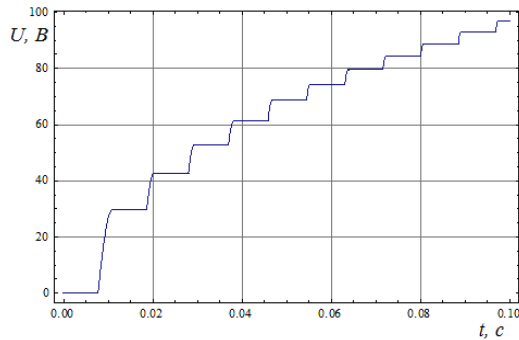


Рис. 5. Розрахункова часова залежність напруги для $C=200$ мкФ

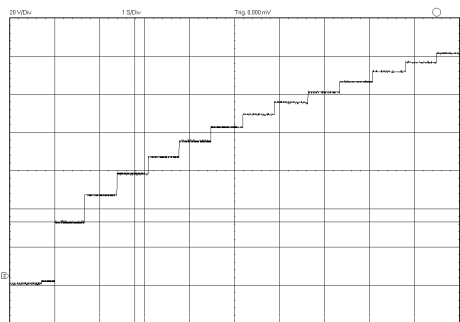


Рис. 6. Осцилограма залежності напруги для $C=200$ мкФ, 20 В/діл

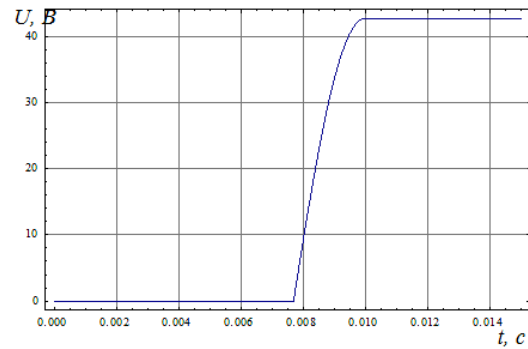


Рис. 7. Розрахункова залежність наростання напруги на першому циклі заряду для $C = 100$ мкФ

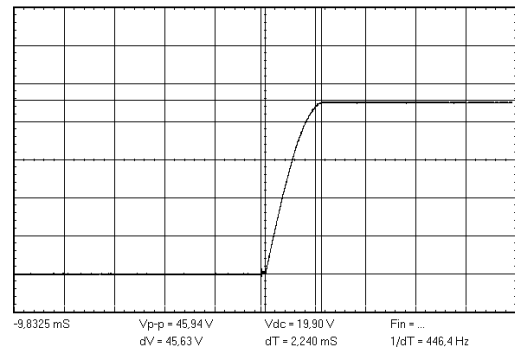


Рис. 8. Осцилограма напруги на першому циклі заряду для $C=100$ мкФ 10 В/діл

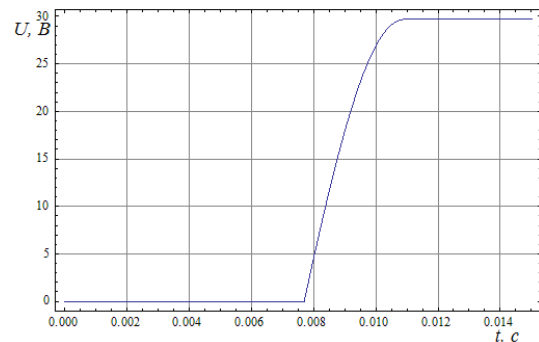


Рис. 9. Розрахункова залежність наростання напруги на першому циклі заряду для $C = 100$ мкФ

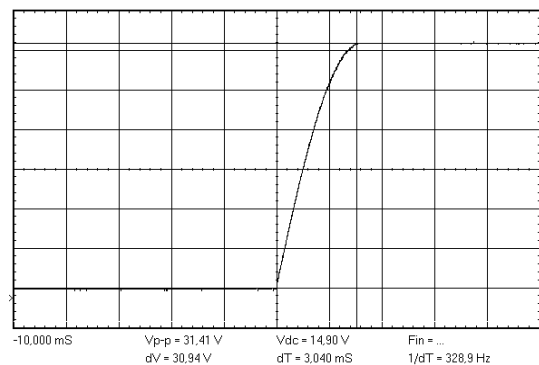


Рис. 10. Осцилограма напруги на першому циклі заряду для $C=200$ мкФ 5 В/діл

Зведені числові показники представлені у вигляді табл. 1.

Таблиця 1 – Числові показники процесу заряду

	Зарядна ємність $C = 100 \text{ мкФ}$		Зарядна ємність $C = 200 \text{ мкФ}$	
	Моделювання	Експеримент	Моделювання	Експеримент
Напруга заряду першого циклу, В	43,5	45,6	29,0	30,9
Час встановлення значення заряду першого циклу, мс	2,5	2,24	3,0	3,0
Кількість циклів заряду до напруги 100 В	5	5	11	9

Як видно з табличних значень, і часових розгортки функцій, крім візуальної ідентичності результатів моделювання та експерименту, можна відзначити більш значуще для практики проектування, числову відповідність основних вихідних показників поведінки даної схеми. Даний факт дає можливість стверджувати про достовірність отриманих функцій, а отже, їх придатність для подальшого розрахунку робочого варіанту системи заряду.

Практичний інтерес представляють процеси, що протікають в діючій установці [11]. Так, на рис. 11-12 представлені часові розгортки напруги заряду ємності 1200 мкФ для струмів заряду від 10 А до 100 А і індуктивності дроселя 0,01 Гн і 0,05 Гн.

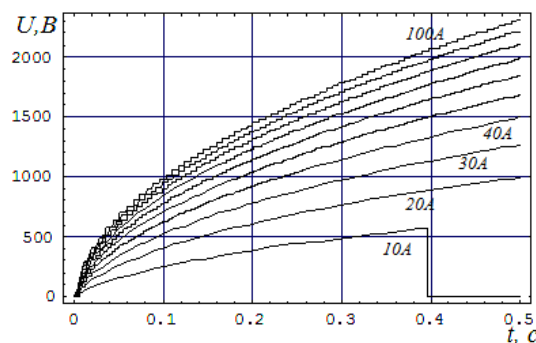


Рис. 11. Процес заряду ємнісного накопичувача дроселем 0,01 Гн

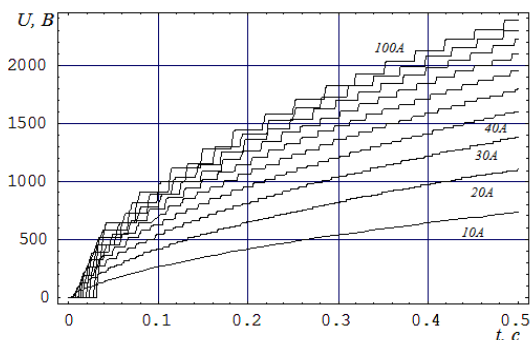


Рис. 12. Процес заряду ємнісного накопичувача дроселем 0,05 Гн

Як видно з рис. 11-12, для обраних параметрів контуру, необхідна напруга заряду ємності може бути досягнута за 0,35 с і 0,3 с, що на практиці може відповідати частоті повторення силових імпульсів на рівні від 3 Гц. У підтвердженні закону збереження енергії, середній час заряду, або потужність, що передається, залежить тільки від струму комутації, а величина індуктивності дроселя впливає тільки на необхідну частоту комутації. Даний показник позитивно відбивається на можливості вибору оптимальних параметрів дроселя і струмо-часових параметрів комутатора. Виходячи з цього, була отримана формула для виконання наближеного інженерно-технічного розрахунку необхідного струму комутації у вигляді (10), яка дозволяє не враховувати первинну напругу мережі живлення.

$$J_3 = \sqrt{\frac{2\langle P \rangle}{L f}} \quad (10)$$

де $\langle P \rangle$ – середня задана потужність;

f – середня частота комутації напівпровідникового комутатора.

З урахуванням втрат активної потужності в провідниках, вираз (10) повністю корелює з наведеними модельними і експериментальними даними.

На відміну від стандартного трансформаторного перетворювача напруги, розглянута система, фактично, не має обмежень з боку якості мережі живлення, тому що вихідна напруга і потужність перетворювача визначається тривалістю спрацьовування силового ключа.

Єдиним суттєвим недоліком запропонованої системи перетворювача напруги є схемотехнічна складність побудови систем контролю та управління та можливе перевищення вартості у разі її проектування на велику потужність більше 20 кВт.

Висновки. Розроблена система ступеневого заряду являє собою автономний блок, що дозволяє реалізувати перетворювач рівнів напруги в якості контрольованого джерела електричної енергії.

Отримана математична модель показала принципову можливість використання даного джерела в якості елемента підвищення напруги заряду ємнісних накопичувачів МІУ і регулятора потужності для живлення інтегрованої або автономної системи індукційного нагріву.

При роботі на заряд ємнісних накопичувачів МІУ було отримано, що рівень заряду не має асимптотичного стаціонарного характеру і має наближену до квадратичної залежність від тривалості циклу заряду.

Вихідна потужність залежить тільки від амплітуди струму комутації дроселя і не залежить від обраної величини індуктивності дроселя.

Отримані експериментальні дані модельного варіанта повністю відповідають аналогічним розрахунковим значенням, а сам перетворювач напруги є працездатним для роботи в якості конструктивного елемента систем МІОМ з використанням систем ІН як інтегрованого допоміжного вузла.

Розглянута методика математичного представ-

лення перехідного нестационарного процесу, в схемах зі змінними електричними параметрами, включаючи напівпровідникові елементи, дозволяє з абсолютною точністю представляти фізичні часозалежні величини у вигляді кусково-неперервних функцій.

Результати проведених досліджень мають практичну значимість для створення більш компактних і автоматизованих систем безконтактної обробки металів.

Список літератури

1. Белый И.В., Горкин Л.Д. СРСР. Установка для нагрева изделий высокочастотными импульсами. В.Ю. Кленов, В.А. Матвейчук, М.П., Пшиков, Л.Т. Хименко. – №945194; Опубл. 23.07.1982.
2. Брон О.Б. Горячая магнитно-импульсная обработка металлов. О.Б. Юрон, В.П. Епечурин, Ю.И. Вершилов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 2. – С. 12-14.
3. Батигін Ю.В., Чаплигін Є.О. Пат. Україна. В21D 26/14 (2006.01). Спосіб обробки листових металів концентрованими джерелами енергії магнітних полів з попереднім нагрівом. Сабокар О.С., Стрельнікова В.А. – №121597; Опубл. 11.12.2017, Бюл. №23.
4. Larsson Linus. Warm Sheet Metal Forming with Localized In-Tool Induction Heating. Lund University. October 2005 76pp.
5. Батигін Ю.В. Гнатов А.В., Чаплигін Є.О., Єрьоміна Є.Ф. *Фізичні основи прогресивних магнітно-імпульсних технологій*. ХНАДУ 2013. 336 с
6. Данилевич О.И. Учет намагничивающего тока трансформатора при заряде емкостного накопителя магнитно-импульсной установки. *Вестник ХПИ*. 1971. Вып. 4. С. 62-65.
7. Батыгин Ю.В. Лавинский В.И. Хименко Л.Т. Импульсные магнитные технологии для прогрессивных технологий. ХПИ 2-е изд. Харьков 2003. 288с.
8. URL: <http://www.irf.com/application-notes> Infeneon. (дата звернення 20.04.2018)
9. Гилев А.А. Данилов В.Н. Устройство заряда емкостных накопителей энергии быстродействующих приводов электроаппаратов. *Вісник КДПУ*. Випуск 4/2006 (39). Частина 1 С. 60-61.
10. Electrical Circuit Theory and Technology. Revised second edition. John Bird ISBN 0 7506 5784 7/ – 2003. – 984pp.
11. Аргун Ш.В., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Чаплигин Е.А. Магнитно-импульсная установка для внешней рихтовки кузовных панелей автомобилей / ХНАДУ 2015 – 172с.

References (transliterated)

1. Bilyy I.V., Horkyn L.D. USSR. Ustanovka dlya nagreva izdeliy vysokochastotnymi impul'sami [Plant for heating products with high-frequency pulses.] V.YU. Klenov, V.A. Matveychuk, M.P., Pshikov, L.T. Khimenko / №945194; Printed. 23.07.1982.
2. Bron O.B., Yepechurin V.P., Vershilov YU.I. Goryachaya magnitno – impul'snaya obrabotka metallov. [Hot magnetic pulse processing of metals]. *Russian – Forging - stamping production*. 1970. no 2. pp. 12-14.
3. Batyhin Yu. V., Chaplyhin Ye. O. Sabokar O. S., Strelnikova V. A. Ukraine. Sposib obrobky lystovykh metaliv kontsentrovanyimi dzhherelamy enerhiyi mahnitnykh poliv z poperednim nahrivom. [Method of sheet metals with concentrated processing energy sources of magnetic fields with preheating.]. no. 21597; Printed. 11.12.2017.
4. Larsson Linus . Warm Sheet Metal Forming with Localized In-Tool Induction Heating. Lund University. October 2005 76 pp.
5. Batigin Yu.V. Hnatov AV, Chaplygin Ye.O., Eryomina Ye.F. *Fizychni osnovy prohresyvykh mahnitno-impul'snykh tekhnolohiy. [Physical basis of progressive magnetic pulse technologies.] KhNAHU 2013. 336 s*
6. Danilevich O. I. Uchet namagnichivayushchego toka transformatora pri zaryade yemkostnogo nakopitelya magnitno-impul'snoy ustanovki [Accounting for the magnetizing current of the transformer when the capacitive accumulator of a magnetic pulse installation]. *Herald of KHPI*. 1971. no. 4. pp. 62-65.
7. Batygin Yu.V. Lavinskiy V.I. Khimenko L.T. Impul'snyye magnitnyye tekhnologii dlya progressivnykh tekhnologiy. [Pulsed magnetic fields for advanced technologies] KhPI 2nd ed. Kharkiv 2003. 288p.
8. URL: <http://www.irf.com/application-notes> Infeneon. (дата звернення 20.04.2018)
9. Gilev A.A. Danilov V.N. Ustroystvo zaryada yemkostnykh nakopiteley energii bystrodeystvuyushchikh privodov elektroapparatov. [Device for charging energy capacitors for quick-driving electrical appliances] *Bulletin KSPU*. no. 4. 2006. pp. 60-61.
10. Electrical Circuit Theory and Technology. Revised second edition. John Bird ISBN 0 7506 5784 7. 2003. 984pp.
11. Argun Shch.V., Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin Ye.A. Magnitno-impul'snaya ustanovka dlya vneshney rikhtovki kuzovnykh paneley avtomobiley [Magnetic-impulse plant for external working of car body panels]. KhNAHU. 2015. 172pp.

Надійшла (received) 29.05.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Сабокар Олег Сергійович (Сабокарь Олег Сергеевич, Sabokar Oleh Vasilyevich) – аспірант, асистент кафедри фізики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-5146-1489; e-mail: o.s.sabokar@gmail.com.

В. А. СТРЕЛЬНИКОВА**ОСОБЕННОСТИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА МАССИВНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ИНДУКТОРАМИ С ФЕРРОМАГНИТНЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ**

Проведен анализ электромагнитных процессов в системе «индуктор с ферромагнитным сердечником – массивная металлическая заготовка». Путем интегрирования уравнений Максвелла, решена электродинамическая задача для принятых крайне противоположных идеализаций: идеальной проводимости и «прозрачности» обрабатываемого металла для действующих полей. Получены аналитические выражения для полей и токов при условии различного наполнения внутренней полости инструмента электромагнитного воздействия. Впервые получены оценки влияния уровня намагниченности конструктивных элементов индуктора на интенсивность индукционного нагрева массивных металлов. Показано, что ферромагнетик в качестве основы намотки соленоида играет определяющую роль в формировании индуцированного сигнала, тогда как, наличие или отсутствие магнитных свойств у нагреваемого массивного объекта практически не влияет на амплитуды возбуждаемых вихревых токов. Это подтверждает возможность использования ферромагнетиков в качестве концентраторов поля для более интенсивного нагрева немагнитных металлов и металлов с низкой удельной электропроводностью. С практической точки зрения применение результатов исследования интересно для проведения численных оценок эффективности индукционного нагрева для ремонтных технологий автотранспорта, а также для создания эффективных систем индукционного нагрева с магнитными концентраторами различных конфигураций.

Ключевые слова: индукционный нагрев, вихревые токи, электромагнитное поле, ферромагнетик, индуктор, уравнения Максвелла, электродинамическая задача

В. А. СТРЕЛЬНИКОВА**ОСОБЛИВОСТІ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ МАСИВНИХ МЕТАЛЕВИХ ЗАГОТОВОК ІНДУКТОРАМИ З ФЕРРОМАГНІТНИМИ СЕРДЕЧНИКАМИ**

Проведено аналіз електромагнітних процесів в системі «індуктор з ферромагнітним сердечником – масивна металева заготовка». Шляхом інтегрування рівнянь Максвелла, вирішена електродинамічна задача для прийнятих вкрай протилежних ідеалізацій: ідеальної провідності і «прозорості» оброблюваного металу для діючих полів. Отримані аналітичні вирази для полів і струмів за умови різного наповнення внутрішньої порожнини інструменту електромагнітного впливу. Вперше отримані оцінки впливу рівня намагніченості конструктивних елементів індуктора на інтенсивність індукційного нагріву масивних металів. Показано, що ферромагнетик в якості основи намотки соленоїда грає визначальну роль у формуванні індукваного сигналу, тоді як, наявність або відсутність магнітних властивостей у масивного об'єкта, що нагрівається практично не впливає на амплітуди збуджуваних вихрових струмів. Це підтверджує можливість використання ферромагнетиків як концентраторів поля для більш інтенсивного нагріву немагнітних металів і металів з низькою питомою електропровідністю. З практичної точки зору застосування результатів дослідження цікаво для проведення чисельних оцінок ефективності індукційного нагріву для ремонтних технологій автотранспорту, а також для створення ефективних систем індукційного нагріву з магнітними концентраторами різних конфігурацій.

Ключові слова: індукційний нагрів, вихрові струми, електромагнітне поле, ферромагнетик, індуктор, рівняння Максвелла, електродинамічна задача

V. A. STRELNIKOVA**FEATURES OF INDUCTION HEATING OF A MASSIVE METAL BILLETS BY INDUCTORS WITH FERROMAGNETIC CORES**

There has been conducted an analysis of electromagnetic processes in the system “inductor with a ferromagnetic core – a massive metal billet”. The electrodynamic problem was solved by the Maxwell's equations integrating for the adopted extremely opposite idealizations: ideal conductivity and “transparency” of the processed metal for the active fields. Analytical expressions for the fields and currents are obtained under the condition of different filling of the inductor inner hollow. For the first time, there have been obtained the estimates of the inductor structural elements magnetization level influence on the intensity of induction heating of massive metals. It is shown that a ferromagnet as the basis for solenoid winding plays a decisive role in the formation of an induced signal, whereas the presence or absence of magnetic properties of a heated massive object has almost no effect on the excited eddy currents amplitudes. This confirms the possibility of using ferromagnets as field concentrators for more intensive heating of nonmagnetic metals and metals with low electrical conductivity. From a practical point of view, the application of the research results is interesting for carrying out numerical estimates of the efficiency of induction heating for vehicle repair technologies, as well as for creating effective induction heating systems with magnetic concentrators of various configurations.

Key words: induction heating, eddy currents, electromagnetic field, ferromagnetic, inductor, Maxwell's equations, electrodynamic problem

Введение. Исходя из требований современности, индукционный нагрев по праву можно отнести к инновационным технологиям. Он сочетает в себе высокую скорость выполнения технологических операций, высокую автоматизацию процессов, экологичность и энергоэффективность в сравнении с традиционными методами обработки металлов. Физический смысл индукционного нагрева заключается сразу в нескольких явлениях, а именно: электромагнитная индукция, открытая Фарадеем;

выделение тепловой энергии в проводнике, по которому протекает ток, закон Джоуля-Ленца; поверхностный эффект, когда индуцированные токи вытесняются к поверхности проводника; магнитный гистерезис; эффект близости и кольцевой эффект [1].

Анализ литературы. Индукционный нагрев с каждым годом занимает все более значимые позиции в современной промышленности. Сегодня он используется не только для закалки деталей и плавки металлов [2], но и в нефтяной промышленности [3],

агропромышленных комплексах для производства продуктов питания [4] и в медицинских целях [5]. Применение индукционного нагрева металлов для ремонта транспортных средств позволяет выполнять достаточно обширный перечень производственных операций [6]. Например, предварительный нагрев деталей для дальнейшего механического воздействия, разъем соединений с натягом, удаление наклеек, сьем молдингов различного типа и т. п. [7]. Как правило, инструментами индукционного нагрева являются соленоиды различной геометрии: протяженные цилиндры, внутренняя полость которых является их рабочей поверхностью, плоские круговые катушки и т.п., намотка может проводиться как на диэлектрические, так и на ферромагнитные каркасы. Во втором случае, как известно из феноменологических соображений, ферромагнетик выступает в роли концентратора магнитного потока. Он повышает уровень электромагнитной связи между индуктором и обрабатываемым металлом (за счет снижения потерь при рассеивании электромагнитного поля в окружающую среду) и локализует эффективный нагрев в области расположенной непосредственно под инструментом [8, 9].

Повышение эффективности систем индукционного нагрева является важной проблемой, как с научной точки зрения, так и с практической. Поиск способов решения этой проблемы определяет актуальность выбора темы исследования. Как один из таких способов можно рассматривать вариацию материалов основы намотки соленоида. Работы, отражающие влияние электрофизических свойств материала заполнения соленоида на эффективность индукционного нагрева в современной научной периодике освещены недостаточно подробно.

Цели и задачи исследования. Анализ электромагнитных процессов в массивной металлической заготовке под воздействием поля плоского кругового соленоида с ферромагнитным сердечником. Оценка влияния магнитных свойств конструктивных элементов индуктора на интенсивность нагрева массивных металлических образцов.

Для достижения поставленных целей необходимо выполнить следующее:

- решить электродинамическую задачу в рамках заданных начальных и граничных условий и физических допущений, адекватных исследуемой системе;
- проанализировать полученные результаты в различных физических идеализациях, в рамках принятых допущений;
- оценить влияние магнитных свойств материала основы обмотки индуктора на эффективность нагрева обрабатываемого материала.

Расчетная модель функционирования системы. Представим реальную систему как адекватную модель из двух сред с различными электрофизическими характеристиками, в одной из которых расположен индуктор. Что бы избежать потерь на самоиндукцию и тепловых потерь связанных с ней, основа обмотки индуктора выполняется либо из

диэлектрика, либо из шихтованной стали, либо из феррита. Электрофизические свойства этих материалов позволяют считать среду с индуктором непроводящей, но обладающей в той или иной степени магнитными свойствами, достаточными для концентрации поля. Вторая среда, в которой возбуждаются индуцированные токи, – это массивный металл, с произвольными электрофизическими характеристиками. Графически принятая модель представлена на рис. 1.

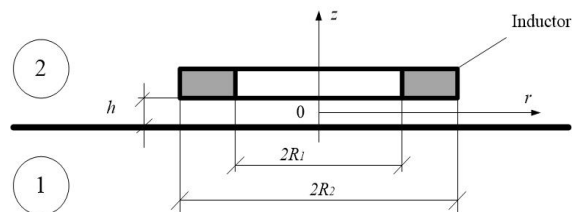


Рис. 1. Расчетная модель в цилиндрической системе координат: 1 – проводящая магнитная среда $\gamma_1 \neq 0$, $\mu_{r1} > 1$; 2 – непроводящая магнитная среда $\gamma_2 = 0$, $\mu_{r2} > 1$

Формулировка допущений:

1. Полупространство -1 , $z \in (-\infty, 0]$, проводящая магнитная среда – металл с удельной электропроводностью $\gamma_1 \neq 0$ и относительной магнитной проницаемостью $\mu_{r1} > 1$.

2. Полупространство -2 , $z \in [0, \infty)$, непроводящая (диэлектрическая) магнитная среда с удельной электропроводностью $\gamma_2 = 0$ и относительной магнитной проницаемостью $\mu_{r2} > 1$.

3. Имеет место азимутальная однородность $\frac{\partial}{\partial \phi} = 0$.

4. Круговой индуктор из «w» витков пренебрежимо малой толщины, не влияющей на протекающие электромагнитные процессы, размещен над границей раздела выделенных сред на высоте $z = h$.

5. В индукторе протекает равномерно распределенный по радиусу гармонический во времени ток с плотностью $j_i(t)$. Его рабочая частота – ω удовлетворяет условию квазистационарности: $\frac{\omega}{c} \cdot l \ll 1$, где c – скорость света в вакууме, l – наибольший характерный размер системы.

Решение задачи с принятыми допущениями проведем аналогично работам [10–12], более подробное описание особенностей применяемого математического аппарата можно найти в [13].

Интегрирование уравнений Максвелла. Уравнения Максвелла для ненулевых составляющих напряженностей электромагнитного поля, преобразованные по Лапласу, имеют вид:

$$\left\{ \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial r} = j_\varphi(p, r, z), \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r, z)) = -\mu \cdot p \cdot H_z(p, r, z), \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \frac{\partial E_\varphi(p, r, z)}{\partial z} = \mu \cdot p \cdot H_z(p, r, z), \right. \quad (3)$$

где p – параметр преобразования Лапласа;

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$, μ_r – относительная магнитная проницаемость среды.

В пространстве отображений:

$$E_\varphi(p, r, z) = L\{E_\varphi(t, r, z)\}$$

$$H_{r,z}(p, r, z) = L\{H_{r,z}(t, r, z)\}$$

$$j_\varphi(p, r, z) = L\{j_\varphi(t, r, z)\}$$

В общем случае плотность тока в правой части уравнения (1) записывается в виде:

$$j_\varphi(p, r, z) = (p\varepsilon_0 + \gamma) \cdot E_\varphi(p, r, z) + j_{\varphi i}(p, r, z) \quad (4)$$

где $j_{\varphi i}(t, r, z)$ – плотность стороннего тока в индукторе,

$$j_{\varphi i}(p, r, z) = j_i(p) \cdot [\eta(r - R_1) - \eta(r - R_2)] \cdot \delta(z - h) \quad (5)$$

$$j_i(p) = L\{j_i(t)\}, \quad j_i(p) = \frac{I(p)}{R_2 - R_1}$$

$j_i(t)$ – амплитудно-временная зависимость плотности возбуждающего тока;

$\eta(r)$, $\delta(z)$ – ступенчатая функция Хевисайда и дельта-функция Дирака;

γ – удельная электропроводность среды с током;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Для анализа выделим области с однородными электрофизическими характеристиками:

Область 1 – $z \leq 0, \gamma_1 \neq 0, \mu_{r1} > 1$;

Область 2 – $z \geq 0, \gamma_2 = 0, \mu_{r2} > 1$.

Из системы (1) – (3) можно получить дифференциальные уравнения для азимутальной компоненты напряженности электрического поля, которое после интегрального преобразования Фурье-Бесселя, примет вид:

Для области 1,

$$\frac{d^2 E_\varphi^{(1)}(p, \lambda, z)}{dz^2} - q^2(p, \lambda) \cdot E_\varphi^{(1)}(p, \lambda, z) = 0 \quad (6)$$

где $E_\varphi^{(1)}(p, \lambda, z)$ – L -образ азимутальной компоненты напряженности электрического поля в области 1,

$$E_\varphi^{(1)}(p, \lambda, z) = \int_0^\infty E_\varphi^{(1)}(p, \lambda, z) \cdot J_1(\lambda \cdot r) r dr$$

λ – параметр интегрального преобразования Фурье-Бесселя,

$J_1(\lambda \cdot r)$ – функция Бесселя 1-го порядка,

$q(p, \lambda) = \sqrt{\lambda^2 + p(\mu_0 \mu_{r1}) \gamma_1}$ – параметр, имеющий смысл волнового числа.

Общий интеграл уравнения (6), удовлетворяющий условию ограниченности для $z \rightarrow -\infty$, имеет вид:

$$E_\varphi^{(1)}(p, \lambda, z) = A(p, \lambda) \cdot e^{q(p, \lambda, z)} \quad (7)$$

где $A(p, \lambda)$ – произвольная константа интегрирования.

Для области 2,

$$\frac{d^2 E_\varphi^{(2)}(p, \lambda, z)}{dz^2} - \lambda^2 \cdot E_\varphi^{(2)}(p, \lambda, z) = K(p, \lambda) \delta(z - h) \quad (8)$$

где $E_\varphi^{(2)}(p, \lambda, z)$ – L -образ азимутальной компоненты напряженности электрического поля в области 2,

$$E_\varphi^{(2)}(p, \lambda, z) = \int_0^\infty E_\varphi^{(2)}(p, \lambda, z) \cdot J_1(\lambda \cdot r) r dr$$

$$K(p, \lambda) = (\mu_0 \cdot \mu_{r2}) \cdot p \cdot j_i(p) \cdot F(\lambda)$$

$$F(\lambda) = \int_{R_1}^{R_2} r \cdot J_1(\lambda \cdot r) dr \quad \text{– Фурье-Бесселя образ}$$

функции равномерного радиального распределения тока в индукторе.

Общий интеграл уравнения (8) удовлетворяющий условию ограниченности для $z \rightarrow \infty$, имеет вид:

$$E_\varphi^{(2)}(p, \lambda, z) = B(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda z} + \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \times \\ \times (\eta(z - h) \cdot \text{sh}(\lambda(z - h)) - 0,5 \cdot e^{\lambda(z - h)}) \quad (9)$$

где $B(p, \lambda)$ – произвольная константа интегрирования.

Анализ электромагнитных процессов в различных физических идеализациях. Используя полученные общие интегралы (7) и (9) для напряженности электрического поля в двух областях, проведем анализ процессов в крайне противоположных физических идеализациях. Первая это воздействие инструментом индуктором на идеальный проводник, а вторая на «прозрачный» для действующих полей. Реальная ситуация, для обрабатываемого металла с конечным значением удельной электропроводности, имеет место между ними.

1. Воздействие электромагнитного поля на идеальный проводник. Наиболее простой результат анализа влияния магнитных свойств среды, с возбуждающим током, на индукционные процессы в металле можно получить в предположении его идеальной проводимости, считая $\gamma_2 \rightarrow \infty$.

Из граничного условия на поверхности раздела двух сред – $E_\varphi^{(2)}(p, \lambda, z = 0) = 0$ можно легко определить произвольную постоянную интегрирования – $B(p, \lambda) = 0,5 \cdot e^{-\lambda z}$, после подстановки которой, в выражение (9), получаем:

$$E_\varphi^{(2)}(p, \lambda, z) = \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \times \\ \times [e^{-\lambda z} \text{sh}(\lambda, z) - \eta(z - h) \cdot \text{sh}(\lambda(z - h))] \quad (10)$$

Из уравнения (3) находим тангенциальную компоненту вектора напряженности возбуждаемого магнитного поля:

$$H_r^{(2)}(p, \lambda, z) = \frac{K(p, \lambda)}{p(\mu_0 \mu_{r2})} \times [e^{-\lambda z} \operatorname{ch}(\lambda, z) - \eta(z-h) \cdot \operatorname{ch}(\lambda(z-h))] \quad (11)$$

В выражении (11) положим $z = 0$. В полученном результате выполним обратные преобразования Фурье-Бесселя и Лапласа. После всех необходимых подстановок найдем линейную плотность тока, индуцированного в идеально проводящем металле и сконцентрированного на его граничной поверхности:

$$j_\phi^{(1)}(t, r) = -j_i(t) \cdot \int_0^\infty e^{-\lambda h} \cdot \left[\int_{R_1}^{R_2} r J_1(\lambda \cdot r) dr \right] J_1(\lambda \cdot r) \lambda d\lambda \quad (12)$$

Из (12) можно заключить следующее.

Первое. При $h \rightarrow 0$ индуцированный сигнал является зеркальным отображением возбуждающего тока в индукторе, что согласуется с известным фактом электродинамики и является показателем достоверности проведенного анализа:

$$J_\phi^{(2)}(t, r) = -j_i(t) \cdot [\eta(r-R_1) - \eta(r-R_2)]$$

Второе. Для плотности индуцированного сигнала отсутствуют характеристики магнитных свойств диэлектрической и проводящей сред (μ_{r1} и μ_{r2} соответственно). Поэтому, в принятой идеализации, которая практически соответствует режиму сверхвысоких частот протекающих процессов, когда в металле реализуется резкий поверхностный эффект, магнитные свойства выделенных сред не влияют на индукционные эффекты.

2. Оценка в реальном приближении. Что же касается анализа в случае конечного значения удельной электропроводности металла, то используя выведенные ранее зависимости, вначале определим тангенциальные составляющие напряженности возбуждаемого магнитного поля.

С помощью выражений (7), (9) и уравнения (3) находим, что для выделенных областей:

а) $z \leq 0$

$$H_r^{(1)}(p, \lambda, z) = \frac{q(p, \lambda)}{p(\mu_0 \mu_{r1})} \cdot A(p, \lambda) \cdot e^{q(p, \lambda, z)} \quad (13)$$

б) $z \geq 0$

$$H_r^{(2)}(p, \lambda, z) = \frac{\lambda}{p(\mu_0 \mu_{r1})} \left[-B(p, \lambda) e^{-\lambda z} + \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \times [\eta(z-h) \cdot \operatorname{sh}(\lambda(z-h)) - 0,5 e^{\lambda(z-h)}] \right] \quad (14)$$

Неизвестные $A(p, \lambda)$ и $B(p, \lambda)$ в выражениях для компонент вектора возбуждаемого электромагнитного поля можно определить из условий непрерывности тангенциальных составляющих напряженностей на границах раздела сред. Получаем систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} A(p, \lambda) = B(p, \lambda) - 0,5 e^{-\lambda h} \cdot \frac{K(p, \lambda)}{\lambda}; \\ -\left(\frac{q(p, \lambda) \cdot \mu_{r2}}{\lambda \mu_{r1}} \right) A(p, \lambda) = B(p, \lambda) + 0,5 e^{-\lambda h} \cdot \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \end{cases} \quad (15)$$

Из (15) находим, что

$$A(p, \lambda) = -\frac{K(p, \lambda) e^{-\lambda h}}{\left(\left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \right) q(p, \lambda) + \lambda \right)} \quad (16)$$

Выражение (16) подставим в формулу (7). Результат помножим на удельную электропроводность металла $-\gamma_1$. После выполнения всех необходимых подстановок получим формулу для плотности индуцированного тока в пространстве изображений, определенных принятыми интегральными преобразованиями.

$$J_\phi^{(1)}(p, \lambda) = -((\mu_0 \mu_{r2}) \gamma_1) F(\lambda) e^{-\lambda h} \frac{p \cdot j_i(p) e^{q(p, \lambda) z}}{\left(\left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \right) q(p, \lambda) + \lambda \right)} \quad (17)$$

Полный ток, индуцированный в металле, находится интегрированием выражения (17) по $z \in (-\infty, 0]$. С учетом его направления в принятой системе координат получаем, что

$$J_\phi(p, \lambda) = -((\mu_0 \mu_{r2}) \cdot \gamma_1) \cdot \frac{p \cdot j_i(p) \cdot F(\lambda) \cdot e^{-\lambda h}}{q(p, \lambda) \left(\left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \right) q(p, \lambda) + \lambda \right)} \quad (18)$$

В выражении (18) выполним обратное интегральное преобразование Фурье-Бесселя. Получим, что

$$J_\phi(p, \lambda) = -((\mu_0 \mu_{r1}) \gamma_1) \int_0^\infty \frac{p \cdot j_i(p) \cdot F(\lambda) \cdot e^{-\lambda h}}{q(p, \lambda) \left(\left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \right) q(p, \lambda) + \lambda \right)} \lambda J_1(\lambda r) d\lambda \quad (19)$$

В выражении (19) выполним предельный переход при $\gamma_1 \rightarrow \infty$. Получим, что

$$\lim_{\gamma_1 \rightarrow \infty} J_\phi(p, \lambda) = \|q(p, \lambda) \approx \sqrt{p \cdot (\mu_0 \mu_{r1}) \gamma_1} \rightarrow \infty\| = -j_i(p) \cdot F(\lambda) \cdot e^{-\lambda h} \quad (20)$$

Обратное преобразование Лапласа в выражении (20) после необходимых подстановок даст с точностью до обозначений ранее полученную зависимость (12), описывающую возбуждение вихревых токов в идеальном проводнике. Таким образом, выполненный предельный переход подтверждает достоверность проводимых вычислений для металла с реальным значением удельной электропроводности.

3. Воздействие электромагнитного поля на «прозрачный» проводник. Теоретически «прозрачность» металлического слоя толщиной d обеспечи-

вается при условии $\frac{\delta}{d} \gg 1$, где $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega(\mu_0 \mu_{r1}) \gamma_1}}$ –

эффективная глубина проникновения поля [12]. Отсюда соответствующий диапазон рабочих частот:

$\omega \ll \frac{2}{d^2(\mu_0 \mu_{r1}) \gamma_1}$. В случае металла как

полупространства где $d \rightarrow \infty$ и удельной электропроводностью $-\gamma_1$, «прозрачность» для

действующего поля может иметь место только при достаточно низкой проводимости, то есть при $\gamma_1 \rightarrow 0$.

Следует отметить, что практическая реализация данного режима не возможна физически. Вследствие массивности нагреваемого металла, идеализация «прозрачности» при его бесконечной протяженности требует выполнения хотя бы одного из двух условий. Первое из них, это стремление к нулю удельной проводимости металла, что скорее соответствует не проводнику, а диэлектрику. И второе, это стремление к нулю частоты возбуждающего сигнала, что соответствует постоянному току в обмотке индуктора, когда невозможны никакие индукционные эффекты.

Тем не менее, идеализация «прозрачности» интересна именно из практических соображений, поскольку, пусть качественно, но устанавливает возможные ориентиры для реализации индукционного нагрева достаточно массивных и плохо проводящих объектов.

Выполним в (18) предельный переход при $\gamma_1 \rightarrow 0$. После обратного преобразования Лапласа получим, что

$$J_\varphi(p, r) = -\frac{dj_i(t)}{dt} \cdot \frac{(\mu_0 \mu_{r2}) \cdot \gamma_1}{\left(\left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}}\right) + 1\right)} \int_0^\infty \frac{F(\lambda) \cdot e^{-\lambda h}}{\lambda} J_1(\lambda R) d\lambda \quad (21)$$

Приведем выражение (21) к виду, удобному для практических оценок.

Как правило, возбуждающий сигнал имеет гармоническую форму во времени, то есть, $j_i = j_{im} \cdot \sin(\omega t)$, где j_{im} – амплитуда плотности тока в индукторе. Соответственно, $\frac{dj_i(t)}{dt} = j_{im} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)$ и максимум производной будет равен $-j_{im} \cdot \omega$.

Интегрированием выражения (21) по $r \in [0, R_2]$ можно найти величину тока, индуцированного в круге радиуса $-R_2$. Итак,

$$\int_0^{R_2} J_1(\lambda r) dr = \frac{1}{\lambda} (1 - J_0(\lambda R_2)).$$

Выполняя соответствующие подстановки в формулу (21), находим максимум тока индуцированного в металле при интенсивном проникновении возбуждаемого поля.

$$J_{\varphi m} = -j_{im} \frac{(\mu_0 \mu_{r2}) \cdot \gamma_1}{\left(\left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}}\right) + 1\right)} \int_0^\infty \frac{F(\lambda) \cdot e^{-\lambda h}}{\lambda^2} (1 - J_0(\lambda R_2)) d\lambda \quad (22)$$

Зависимость от магнитных свойств выделенных сред определяется множителем β . Его величина устанавливает влияние намагниченности на процесс возбуждения индуцированного тока в металле образца.

$$\beta = \frac{\mu_{r2}}{\left(\left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}}\right) + 1\right)} \approx \begin{cases} (0,5\mu_{r1,2}), & \text{при } \mu_{r2} \approx \mu_{r1} \\ \mu_{r1}, & \text{при } \mu_{r2} \gg \mu_{r1} \\ \mu_{r2}, & \text{при } \mu_{r2} \ll \mu_{r1} \end{cases} \quad (23)$$

Из оценок (23) следует, что:

1. При одинаковом уровне намагниченности сред (относительные магнитные проницаемости равны) количественная зависимость индуцированного тока определяется величиной, равной половине относительной магнитной проницаемости;

2. При намагниченности диэлектрической среды, намного превышающей намагниченность металла, количественно, индуцированный ток определяется величиной проницаемости только металла;

3. При намагниченности диэлектрической среды, намного меньшей намагниченности металла, индуцированный ток определяется величиной проницаемости диэлектрической среды (а не металла).

В терминах реального положения вещей следствия из (23) можно переформулировать таким образом:

Основа обмотки индуктора и металл не обладают магнитными свойствами, то есть $\mu_{r2} = \mu_{r1} = 1$. Естественно, что величина индуцированного тока определяется множителем $-\left(\frac{\mu_0}{2}\right)$.

Основа обмотки индуктора – магнитный материал $\mu_{r2} > 1$, но металл немагнитен $\mu_{r1} = 1$. Амплитуда индуцированного тока определяется множителем $-\mu_0$, не зависит от уровня намагниченности основы обмотки индуктора (величины $\mu_{r2} > 1$), но в 2 раза превышает аналог предыдущего случая немагнитной основы индуктора. Таким образом, уровень индуктивной связи системы «индуктор с магнитным заполнением – немагнитный металл» в 2 раза выше, за счет влияния магнитных свойств основы обмотки индуктора.

Основа обмотки индуктора и металл – ферромагнетики. В зависимости от уровней их намагниченности возможно определяющее влияние магнитных свойств, как основы обмотки, так и металла. Но множитель, определяющий амплитуду индуцированного тока, в отличие от ситуации с не ферромагнетиками, будет содержать уже относительную магнитную проницаемость отличную от единицы.

Выводы. Проведенный анализ в первую очередь связан с выявлением возможности повышения уровня электромагнитной связи между массивным металлическим объектом и источником поля в виде плоского кругового соленоида, при введении в его внутреннюю полость ферритового заполнения.

Основные результаты выполненного исследования заключаются в следующем:

1. Получены аналитические соотношения для характеристик электромагнитных процессов в массивном металлическом образце при возбуждении поля плоским соленоидом с ферритовым сердечником – инструментом индукционного нагрева в прогрессивных технологиях ремонта современного автотранспорта.

2. Обобщение результатов выполненного анализа показало, что в формировании индуцированного

сигнала определяющую роль играет уровень намагниченности среды с источниками магнитного поля, наличие или отсутствие магнитных свойств у металла нагреваемого массивного объекта практически не влияет на амплитуды возбуждаемых вихревых токов.

Список литературы

1. Кухлинг Х. Справочник по физике / Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с.
2. Слухоцкий А. Е. Установки индукционного нагрева – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.
3. Орлов А. И. Электроиндукционный метод очистки демонтированных нефтегазовых труб от отложений парафина / А. И. Орлов, И. П. Попов, И. П. Зельди, С. М. Обухов. Вестник Чувашского университета, 2009. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru>
4. Коробков А. Н. Разработка магнитно-индукционного сепаратора для обработки семян кормовых культур / А. Н. Коробков, О. В. Михайлова. Вестник НГИЭИ, 2013. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru>
5. Осинцев А. М. Использование локального индукционного нагрева в биотехнологиях и медицине / А. М. Осинцев, И. Л. Васильченко, А. Л. Майтаков, В. В. Рынк, Н. В. Васильченко. Техника и технология пищевых производств, 2012. №2. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru>
6. Алиферов А. Индукционный и электроконтактный нагрев металлов / А. Алиферов, С. Лупи. Новосибирск : изд. НГТУ. 2013. – 354 с.
7. Welcome to BETAG Innovation. Материалы сайта – 2017. – Режим доступа : <http://www.betaginnovation.com>
8. Яворский Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М : Наука. 1968. – 940 с.
9. Сысун В. И. Индукционный нагрев в режиме насыщения. Фундаментальные исследования / В. И. Сысун, В. А. Подопрігора – М : 2004. №3. с. 132 – 134
10. Батыгин Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий: в т. / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, Л. Т. Хименко. – Х. : «ТОРНАДО-Мост» – Т. 1 : [изд. 2-е, перераб. и доп. под общ. ред. Батыгина Ю. В.] – 2003. – 284 с.
11. Батыгин Ю. В. Вихревые токи в тонких металлических листах при магнитно-импульсной обработке металлов / Ю. В. Батыгин, А. Ю. Бондаренко, В. И. Лавинский. – М. : Электричество – 2009. №9. с. 61 – 65
12. Туренко А. Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий: в т. / А. Н. Туренко, Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов. – Х. : Изд. ХНАДУ – Т.3 : Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями. – 2009. – 236 с.
13. Корн Т. Справочник по математике / Т. Корн, Г. Корн. – М. : Наука, 1973. – 834 с.

References (transliterated)

1. Kuhling H. *Spravochnik po fizike. Per. s. nem.* [Dictionary on Physics. Translated from German]. Moscow, Mir Publ., 1982. 520 p. (Rus).
2. Slukhtskiy A. *Ustanovki induktsionnogo nagreva* [Induction heating installations]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981, 328 p. (Rus)
3. Orlov A. I., Popov I. I., Zeldi I. P., Obukhov S. M. *Elektroinduktsionnyi metod ochistki demontirovannykh neftegazoprovodnykh trub ot otlozhenii parafina* [Electroinduction method of clearing of unmounted oil-gas pipes from paraffin accumulation]. Available at: <https://cyberleninka.ru>
4. Korobkov A. N., Mikhailova O. V. *Razrabotka magnitno-induktsionnogo separatora dlya obrabotki semyan kormovykh kul'tur* [Elaboration of magnetic induction separator for grain of food cultures processing]. Available at: <https://cyberleninka.ru>
5. Osintsev A. M., Vasilchenko I. L., Maitakov A. L., Rynk V. V., Vasilchenko N. V. *Ispol'zovanie lokal'nogo induktsionnogo nagreva v biotekhnologiyakh i meditsine* [Application of local induction heating in biotechnologies and medicine]. Available at: <https://cyberleninka.ru>
6. Aliferov A., Lupi S. *Induktsionnyy i jelektrokontaktnyy nagrev metallov* [Induction and electrocontact metal heating]. Novosibirsk, NGTU Publ. 2013. 354 p.
7. Welcome to BETAG Innovation. Available at: <http://www.betaginnovation.com> (accessed 15.11.2017)
8. Javorskij B. M., Detlaf A. A. *Spravochnik po fizike* [Handbook of physics]. Moscow, Nauka Publ. 1968. 940 p.
9. Sysun V. I., Podoprigora V. A. *Induktsionnyy nagrev v rezhime насыщения. Fundamental'nye issledovaniya* [Induction heating in the mode of saturation. Fundamental research]. Moscow, 2004. no 3. pp. 132-134
10. Batygin Yu. V., Lavinskii V. I., Khimenko L. T. *Impul'snye magnetnye polya dlya progressivnykh tekhnologii: v t.* [Pulsed magnetic fields for progressive technologies: in vol.]. Kharkov, «TORNAIDO-Most» Publ. 2003. Vol 1. 2nd ed. 284 p.
11. Batygin Yu. V., Bondarenko A. Yu., Lavinskii V. I. *Vikhrevye toki v tonkikh metallicheskih listakh pri magnitno-impul'snoi obrabotke metallov* [Eddy currents in thin metal sheets during magnetic-pulsed processing of metals]. Moscow, Elektrichestvo Publ. 2009. no 9. pp. 61-65
12. Turenko A. N., Batygin Yu. V., Gnatov A. V. *Impul'snye magnetnye polya dlya progressivnykh tekhnologii: v t. T. 3 Teoriya i eksperiment prityazheniya tonkostennykh metallov impul'snymi magnetnymi polyami* [Pulsed magnetic fields for progressive technologies: in vol. Vol 3 The theory and experiment of thin-walled metals attraction by pulsed magnetic fields]. Kharkov, KhNADU Publ. 2009. 236 p.
13. Korn T., Korn G. *Spravochnik po matematike* [Handbook of mathematics]. Moscow, Nauka Publ. 1973. 834 p.

Received 16.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Стрельникова Вікторія Анатоліївна (Стрельникова Виктория Анатольевна, Strelnikova Viktoriia Anatoliivna) – магістр, аспірант, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, асистент кафедри фізики, м. Харків, Україна; e-mail: v.strelnikova91@gmail.com

ЗМІСТ

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

Волкова О. Г., Жорняк Л. Б., Левенков И. В. Диагностика силовых трансформаторов длительное время находящихся в эксплуатации.....	3
Гречко А. М., Варшамова И. С. Обзор нового поколения системы разъемного монтажа электрооборудования Smissline от ABB.....	8
Гришук Ю. С., Пантелеят М. Г., Єлоєв А. К. Автоматизація дослідження мультиварок.....	16
Жорняк Л. Б., Афанасьєв О. І., Снігірьов В. М., Скорик С. В., Чорний Д. В., Беляєв С. І. Ефективність засобів примусового вирівнювання напруженості електричного поля зовнішньої ізоляції газонаповнених трансформаторів струму.....	22
Клименко Б. В., Лелюк М. А., Бугайчук В. М., Форкун Я. Б. Электромагнитный актуатор для вакуумного контактора средних напряуг.....	27
Король О. Г., Клименко Б. В., Ересько О. В. Дослідження перехідних процесів в пристрої форсованого керування моностабільним електромагнітом вакуумного контактора.....	34
Литвиненко В. В. Дослідження характеристик спрацьовування індукційно-динамічного механізму.....	41
ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ	
Галиновский А. М. Параметры и характеристики генераторов ветроэнергетических установок малой мощности на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.....	45
Галайко Л. П. Выбор управляющих параметров для регулирования режимов работы вентильно-индукторного двигателя.....	51
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ	
Михайленко В. В., Чарняк О. С. Аналіз електромагнітних процесів у перетворювачі з десятизонним регулюванням напруги і електромеханічним навантаженням.....	55
СИЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ ТА МАГНІТНІ ПОЛЯ	
Батыгин Ю. В., Шиндерук С. А., Сериков Г. С. Основные расчётные соотношения в двухконтурном резонансном усилителе электрической мощности.....	59
ЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ І МЕРЕЖІ	
Плешков П. Г., Гарасьова Н. Ю., Солдатенко В. П. Оптимальне керування режимом роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії.....	64
Хоменко І. В., Піскурьов М. Ф., Стасюк І. В. До питання компенсації реактивної потужності в електричних системах.....	71
КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	
Зорин Е. Ю., Чепелюк А. А. Моделирование работы сети среднего напряжения с компенсированной нейтралью при однофазном замыкании на землю.....	77
Пантелеят М. Г., Гришук Ю. С., Чепелюк О. О., Єлоєв А. К. Стан і перспективи мультифізичного моделювання індукційних кухонних плит.....	87
Сабокар О. С. Ступінчатий перетворювач напруги як альтернативне джерело живлення систем магнітно-імпульсної обробки металів та індукційного нагріву.....	93
ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЙ	
Стрельникова В. А. Особенности индукционного нагрева массивных металлических заготовок индукторами с ферромагнитными сердечниками.....	99

CONTENT

ELECTRIC APPARATUS

Volkova O. G., Zhorniak L. B., Lyevyankov I. V. Diagnostic of power transformers are in service long time	3
Grechko O. M., Varshamova I. S. Review of new generation of the system of connector mounting of electrical equipment Smissline from ABB	8
Hryshchuk Yu. S., Pantelyat M.G., Eloev A.K. Automation of the research multicooker	16
Zhorniak L.B., Afanasiev A.I., Snigirev V.M., Skoryk S.V., Chorny D.V., Bieliaiev S.I. Possibility of electric field compensation of external isolation of high-voltage gas-insulated current transformers	22
Klimenko B.V., Leliuk M.A., Bugaichuk V.M., Forkun Y.B. An electromagnetic actuator for the medium voltage vacuum contactor.....	27
Korol O. G., Klimenko B. V., Eresko O. V. Investigations of transients in the device of forced control of the vacuum contactor monostable electromagnet.....	34
Lytvyenko V. V. Research of the induction-dynamic mechanism operation characteristics	41
ELECTRIC MACHINES	
Galinovskiy O. M. Parameters and characteristics of low power generators for wind power plants on the basis of asynchronous motors with a short circuited rotor	45
Galayko L. P. The choice of control parameters for regulating modes of operation of a switched reluctance motor	51

THEORETICAL ELECTRICAL ENGINEERING

Mihaylenko V. V., Charnyak O. S. Analysis of electromagnetic processes in a converter with a decondon voltage regulation and electromechanical load..... 55

POWER ELECTRICAL AND MAGNETIC FIELDS

Batygin Yu. V., Shinderuk S. A., Serikov G. S. The main relationships for calculations in two-circuits resonant amplifier of the electric power..... 59

ELECTRICAL STATIONS AND NETWORKS

Plieskov P. G., Garaseva N. Y., Soldatenko V. P. Optimal control of the work of the hybrid electric energy system with renewable sources of energy..... 64

Khomenko I. V., Piskurev M. F., Stasiuk I. V. On the issue of reactive power compensation in electrical systems..... 71

COMPUTER MODELING

Zorin Y. Y., Chepelyuk O. O. Modeling the operation of a medium voltage power grid with a compensated neutral at single-phase ground fault..... 77

Pantelyat M. G., Grishchuk Yu. S., Chepelyuk A. A., Eloev A. K. Status and perspectives of the multiphysical simulation of induction kitchen plates 87

Sabokar O. S. Step voltage converter as an alternative source for magnetic pulse metal working systems and induction heating systems..... 93

USE OF ELECTRICAL ENGINEERING

Strelnikova V. A. Features of induction heating of a massive metal billets by inductors with ferromagnetic cores 99

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХП».
СЕРІЯ: ПРОБЛЕМИ УДОСКОНАЛЕННЯ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН І АПАРАТІВ.
ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА**

Збірник наукових праць

№ 32 (1308) 2018

Наукові редактори д-р техн. наук, проф. Б.В. Клименко,
д-р техн. наук, проф. В. Ф. Болюх
Технічний редактор І. С. Варшамова

Відповідальний за випуск І. Б. Обухова канд. техн. наук

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХП».
Кафедра "Електричні апарати"
Тел.: (057) 707-69-76; e-mail: varshamova.i.s@gmail.com

Підп. до друку 02.11.2018 р. Формат 60×90 1/8. Папір офсетний.
Друк лазерний. Умов. друк. арк. 9,25.
Тираж 300 пр. Зам. № 66/172-32-2017. Ціна договірна.

Надруковано ТОВ «Друкарня «Мадрид»»
61002, Харків, вул. Максиміліанівська, 11, тел. (057) 764-03-79