



Науковий журнал

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№3'2019

*Засновано національним університетом "Запорізька політехніка"
у травні 1999 року*

Виходить 4 рази на рік

Запоріжжя

2019

Головний редактор д-р техн. наук
Яримбаш Д.С.

Заст. гол. редактора д-р техн. наук
Тіховод С.М.

Відповідальний канд. техн. наук
секретар Коцур М. І.

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ
КОЛЕГІЇ

Yunus Biçen, Ph.D, університет Дюздже, Туреччина;

Zgraja Jerzy, Ph.D, професор Лодзького технологічного університету, Лодзь, Польща;

Biro, Oszkar, Ph.D, професор інституту основ і теорії електротехніки Грацького технічного, Грац, Австрія;

Zurek Stan, Ph.D., науковий співробітник, Кардіфський університет, Кардіф, Великобританія;

Sebastian Tomy, Ph.D, професор університету Торонто, м. Торонто, Канада, технічний експерт корпорації "Motor Drives and Control Group", Бей-Сіті, Мічиган, США;

Arturi, Cesare Mario, Ph.D., професор політехнічного університету Мілана, Італія;

Ronseero-Clemente Carlos, Ph.D., професор факультету Електроенергетика та електронні системи, Університет Естремадури, м. Бадахос, Іспанія;

José Roberto Camacho, PhD, професор електротехніки в Uberlandia федеральний університет, Бразилія;

Mohamed Ahmed Moustafa Hassan, Ph.D., професор кафедри електротехніки та електроенергетики, Каїрський університет, Гіза, Єгипет.

*Включено до переліку
наукових фахових видань України
(наказ МОНУ № 1328 від 21.12.2015р.)*

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (Україна)

Загірняк М. В., д-р техн. наук, проф., Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна; **Зірка С. Є.**, д-р техн. наук, проф., Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна; **Міліх В. І.**, д-р техн. наук, проф., Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків, Україна; **Жильцов А. В.**, д-р техн. наук, проф., Національний університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна; **Паранчук Я. С.**, д-р техн. наук, проф., Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна; **Толочко О. І.**, д-р техн. наук, проф., Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського", м. Київ, Україна; **Бушер В. В.**, д-р техн. наук, проф., Одеський національного політехнічного університету, м. Одеса, Україна; **Андрієнко П. Д.**, д-р техн. наук, проф., Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна; **Зіновкін В. В.**, д-р техн. наук, проф., Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна; **Мороз Ю. І.**, канд. техн. наук, доц., Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна; **Коцур І. М.**, канд. техн. наук, доц., Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна; **Яримбаш С. Т.**, канд. техн. наук, доц., Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна; **Шило Г. М.**, д-р техн. наук, доц., Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна; **Фурманова Н. І.**, канд. техн. наук, доц., Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна; **Пархомеико А. В.**, канд. техн. наук, доц., Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна; **Щербовських С. В.**, д-р. техн. наук, доц., Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна; **Мартинюк В. В.**, д-р. техн. наук, проф., Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна; **Кочан В. В.**, канд. техн. наук, доц., Тернопільський національний економічний університет, м. Тернопіль, Україна; **Глоба Л. С.**, д-р. техн. наук, проф., Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; **Скулиш М. А.**, канд. техн. наук, с.н.с., Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна.

Журнал включено до міжнародних наукометричних баз: РИНЦ; каталогів та систем пошуку: CrossRef; Directory of Open Access Journals (DOAJ); OpenAIRE; Public Knowledge Project (PKP); ResearchBib - Academic Resource Index; Scientific Indexing Services (SIS); Ulrich's Periodicals Directory; WorldCat; КіберЛенінка; Наукова періодика України — проект Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського (НБУВ).

У науковому журналі друкуються результати фундаментальних та прикладних досліджень, зокрема результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук у галузі електротехніки та електроенергетики у відповідності з рубриками: 1. Електротехніка; 2. Електроенергетика.

Журнал розповсюджується за Каталогом періодичних видань України (передплатний індекс – 22913)

Видавець: національний університет "Запорізька політехніка", м. Запоріжжя. Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №6952 від 22.10.2019 р.

Реєстрація журналу: Журнал зареєстровано у Міністерстві юстиції України. Свідоцтво про державну реєстрацію КВ №24219-14059 ПР від 07.11.2019 р.

Адреса редакції: Редакційно-видавничий відділ. національний університет "Запорізька політехніка", вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. Телефон: +380(61)769-82-96 Факс: (061) 764-21-41 e-mail: rrvv@zntu.edu.ua.

Електронна адреса журналу <http://ee.zntu.edu.ua> E-mail: etae@ukr.net

Комп'ютерна верстка Дяченко О.О. Редактор англійських текстів Войтенко С.В. Журнал підписано до друку 01.10.2019 за рекомендацією вченої ради національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №2 від 30.09.2019 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 6,86. Тираж 300 прим. Зам. №1094



Scientific journal

ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING

№3'2019

Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999

4 issues per year

Zaporizhzhia

2019

Editor-in-chief

Prof., Sc.D.

Dmitro Yarymbash

Associate Editor-in-chief

Assoc. prof., Sci.D.,

Sergiy Tihovod

Senior secretary

Assoc. prof., Ph.D.

Mikhailo Kotsur

*The journal has been included**scientific professional editions of Ukraine**(Order of the Ministry of Education and Science № 1328**dated 21.12.2015)*

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD

Yunus Biçen, Ph.D. Duzce University, Turkey;**Prof. Jerzy Zgraja**, Ph.D., Lodz University of Technology, Lodz, Poland;**Prof. Oszkár Bíró**, Ph.D., Technical University of Graz, Graz, Austria;**Zurek, Stan**, Ph.D., Research Associate, Cardiff University, Cardiff, United Kingdom;**Sebastian Tomy**, Ph.D, Toronto University, Canada, (Technical Expert, Motor Drives and Control Group, Bay City, Michigan, USA);**Arturi Cesare Mario**, Ph.D., Prof., Polytechnic University of Milan, Italy;**Carlos Roncero-Clemente**, Ph.D., Prof., Universidad de Extremadura, Badajoz, Spain;**José Roberto Camacho PhD**, Prof., Universidade Federal de Uberlândia, Brazil;**Mohamed Ahmed Moustafa Hassan**, Ph.D., Prof., Cairo University, Giza, Egypt.

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD (Ukraine)

M.V. Zagirnyak, Sc.D., prof., Kremenchuk Michaylo Ostrogradskiy National University; **S. E. Zirka**, Sc.D., prof., Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine; **V. I. Milykh**, Sc.D., prof., National Technical University "KhPI", Kharkiv, Ukraine; **A. V. Zhylytsov**, Sc.D., prof., National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine; **Ya. S. Paranchuk**, Sc.D., prof., Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; **O. I. Tolochko**, Sc.D. prof., Kyiv Polytechnic National Technical University, Kiev, Ukraine; **V. V. Busher**, Sc.D., prof., Odesa National Polytechnic University, Odesa, Ukraine; **P. D. Andrienko**, Sc.D., prof., Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **V.V. Zinovkin**, Sc.D., prof., Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **Yu I. Moroz**, Ph.D., assoc. prof., Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine; **I. M. Kotsur**, Ph.D, assoc. prof., Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **S. T. Yarymbash**, Ph.D, assoc. prof., Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **G. M. Shilo**, Sci.D., assoc. prof., Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **N. I. Furmanova**, Ph.D., assoc. prof., Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **A. V. Parkhomenko**, Ph.D., assoc. prof., Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **S. V. Shcherbovskykh**, Sc.D., assoc. prof., Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; **V. V. Martynyuk**, Sc.D., prof., Khmelnytsky National University, Khmelnytsky, Ukraine; **V. V. Kochan**, Ph.D., assoc. prof., Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine; **L. S. Globa**, Sc.D. prof., Kyiv Polytechnic National Technical University, Kyiv, Ukraine; **M. A. Skulish**, Ph.D., assoc. prof., Kyiv Polytechnic National Technical University, Kyiv, Ukraine;

The journal included in the international scientometric databases: Index Copernicus Journals Master List; Inspec; PIIHQ; catalogs and search systems: CrossRef; Directory of Open Access Journals (DOAJ); Google Academy; OpenAIRE; Public Knowledge Project (PKP); ResearchBib - Academic Resource Index; Scientific Indexing Services (SIS); Ulrich's Periodicals Directory; WorldCat; CyberLeninka; Scientific Periodicals of Ukraine — the project of the National Library of Ukraine named V.I. Vernadsky (NBUV).

The scientific journal publishes the results of fundamental and applied research, in particular the results of dissertation papers for obtaining the scientific degrees of a Sci.D. and a Ph.D. of technical sciences in the field of electrical engineering and electrical engineering in accordance with the headings: 1. Electrical engineering; 2. Power engineering.

The journal is distributed by the Catalog of periodicals of Ukraine (subscription index – 22913)

Founder and editor: Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia. Certificate of publisher Civil Code №6952 dated 22.10.2019.

Journal was registered: by the Ministry of Justice of Ukraine. Registration number KV № 24219-14059 PR dated November 07, 2019.

Address of editor and editorial office: Zaporizhzhia Polytechnic National University, st. Zhukovsky, 64, Zaporozhia, 69063, Ukraine. Phone: +380(61)769-82-96 Fax: (061) 764-21-41 e-mail: rvv@zntu.edu.ua.

E-address: <http://ee.zntu.edu.ua>; **E-mail:** etae@ukr.net

Computer layout Dyachenko O.O. Editor of English texts Voitenko S.V. The journal was signed on October 01, 2019 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No. 2 dated September 30, 2019). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 6,86. Number of copies printed 300. Rep. №1094

ЗМІСТ

I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Батигін Ю.В., Чаплигін Є.О., Шиндерук С.О., Стрельнікова В.А., Нескреба Е.Є. Електромагнітні процеси за безпосереднього збудження послідовного резонансного контуру прямокутними імпульсами напруги.....	8
Бородай В.А., Боровик Р.О., Нестерова О.Ю. Спосіб синтезу регулятора енергоефективного управління асинхронним приводом механізмів без прямої стабілізації швидкості.....	16
Хвоцан О.В., Жекул В.Г., Смірнов О.П. Сучасний стан і перспективи розвитку конструкції електророзрядних заглибних пристроїв для обробки свердловин.....	24
Верецаго Є. М., Костюченко В. І. Аналіз стійкості системи електроживлення зварювальної електричної і плазмової дуги.....	34

II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

Бешта О.С., Азюковський О.О., Худолій Є.П., Худолій С.С., Балахонцев О.В. Техніко-економічне обґрунтування технології когенерації із використанням електромобілів.....	42
--	----

CONTENTS

I ELECTRICAL ENGINEERING

- Batygin Yu.V. Chaplygin E.A. Shinderuk S.O. Strelnikova V.A. Neskreba E.Ye.***
Electromagnetic processes with direct excitation of serial resonant circuit by rectangular voltage pulses.....8
- Borodai V.A., Borovyk R.O., Nesterova O.Yu.***
Synthesis method for energy efficient control of asynchronous drive of mechanisms without direct speed stabilization.....16
- Khvoshchan O.V., Zhekul V.G., Smirnov A.P.***
Actual state and perspectives of development of design of electric discharge submersible devices for treatment of wells.....24
- Vereshchaho Ye.M., Kostiuchenko V.I.***
Analysis of the stability of the electrical power supply system of the welding electric and plasma arc.....34

II POWER ENGINEERING

- Beshta A.S., Aziukovski A.A., Khudolii E.P., Khudolii S.S., Balakhontsev O.V.***
Viability of vehicle-to-grid technology and renewables in ukraine.....42

СОДЕРЖАНИЕ

I ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

- Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Шиндерук С.А., Стрельникова В.А., Нескреба Э.Е.**
Электромагнитные процессы при непосредственном возбуждении последовательного резонансного контура прямоугольными импульсами напряжения.....8
- Бородай В.А., Боровик Р.А., Нестерова О.Ю.**
Способ синтеза регулятора энергоэффективного управления асинхронным приводом механизмов без прямой стабилизаций скорости.....16
- Хвоцан О.В., Жекул В.Г., Смирнов А.П.**
Современное состояние и перспективы развития конструкции электроразрядных погружных устройств для обработки скважин.....24
- Верещаго Е.Н., Костюченко В.И.**
Анализ устойчивости системы электропитания сварочной электрической и плазменной дуги.....34

II ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Бешта А.С., Азюковский А.А., Худолей Е.П., Худолий С.С., Балахонцев О.В.**
Технико-экономическое обоснование технологии когенерации с использованием электрических транспортных средств.....42

УДК 621.314

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ НЕПОСРЕДСТВЕННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРА ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НАПРЯЖЕНИЯ

БАТЫГИН Ю.В.

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина, e-mail: yu.v.batygin@gmail.com;

ЧАПЛЫГИН Е.А.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина, e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com;

ШИНДЕРУК С.А.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина, e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net;

СТРЕЛЬНИКОВА В.А.

аспирант, ассистент кафедры физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина, e-mail: v.strelnikova91@gmail.com;

НЕСКРЕБА Э.Е.

студент автомобильного факультета Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина, e-mail: eeneskreba12@ukr.net;

Цель работы. Получение аналитических амплитудно-временных зависимостей возбуждаемых токов и численных оценок их характеристик при непосредственном возбуждении резонансного последовательного активно-реактивного контура периодическими сериями из прямоугольных униполярных или осциллирующих импульсов напряжения.

Методы исследования. Математический аппарат теории электрических цепей в расчётах переходных процессов при подключении последовательных резонансных контуров. Численные оценки характеристик протекающих электромагнитных процессов.

Полученные результаты. Определены амплитудно-временные формы тока в последовательном активно-реактивном контуре при его резонансном возбуждении периодическими сериями из прямоугольных униполярных или осциллирующих импульсов напряжения с резонансной частотой их следования. Выполнены численные оценки характеристик возбуждаемых токов. Отмечена несколько большая эффективность униполярного возбуждения гармонических процессов в сравнении с возбуждением осциллирующими последовательностями периодических импульсов напряжения. Показано, что с увеличением добротности резонансного контура – Q вклад высших спектральных составляющих вне зависимости от вида входного напряжения существенно падает, и при $Q \gg 1$ возбуждаемый ток становится строго гармоническим.

Научная новизна. Научная новизна настоящей работы состоит в получении аналитических амплитудно-временных зависимостей и численных оценок для возбуждаемых токов при непосредственном подключении источника ангармонического напряжения к последовательному резонансному контуру и инициирована практическими задачами в разработках электротехнических устройств, реальная действенность которых возможна только в условиях, достаточно близких к резонансным.

Практическая ценность. Полученные выражения для токов, возбуждаемых при непосредственном подключении источника ангармонического напряжения к последовательному резонансному активно-реактивному контуру, и результаты проведенного анализа необходимы для проектирования электротехнических устройств с резонансными компонентами. Весьма перспективным в направлении дальнейших исследований видится решение задачи и анализа процессов в системе из двух индуктивно-связанных последовательных резонансных контуров, возбуждаемых временной последовательностью ангармонических сигналов.

Ключевые слова: последовательный резонансный контур, прямоугольные импульсы напряжения; добротность активно-реактивного контура; резонанс напряжений.

I. ВВЕДЕНИЕ

Резонанс играет существенную роль в различных физических процессах, поэтому, в зависимости от

желаемого результата, исследователи сталкиваются как с негативными, так и с положительными сторонами этого явления.

Особое место резонансные явления занимают в

электротехнике, где являются одним из возможных способов повышения эффективности работы электротехнических устройств. В основном резонансные схемы используют для разработок силовых преобразователей [1], импульсных трансформаторов [2], преобразователей энергии солнечных батарей [3] и др.

Опираясь на физический принцип подобия, можно сделать заключение о широте применения резонанса для создания технических устройств любого назначения [4], [5]. Актуальность работ такого рода также подтверждается предложениями и разработками резонансных систем, направленными на развитие современной электроэнергетики [6], [7].

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В электротехнике и силовой электронике явление резонанса позволяет настраивать аппаратуру на заданные частоты и обеспечивать ее работу с максимальной эффективностью [8], [9]. Известны два вида электрических резонансов. Это резонанс токов и резонанс напряжений. Последний представляет особый интерес, например, для создания высоковольтных импульсных трансформаторов и питания высокоомной нагрузки повышенным напряжением [10], [11], в устройствах индукционного нагрева и др. [12], [13].

Физическая сущность резонанса напряжений состоит в следующем. Если соединить последовательно резистор, электрический конденсатор и катушку индуктивности (последовательный активно-реактивный контур), то для синусоидального сигнала определенной частоты указанная схема будет демонстрировать нулевое реактивное сопротивление. Причина проста. конденсатор и катушка накапливает энергию, конденсатор ее отдает, и наоборот. Следует подчеркнуть, что этот эффект проявляется только для синусоидального сигнала, на определенной частоте и в установившемся режиме [14], [15].

Принципиальные вопросы возбуждения резонансных систем гармоническими напряжениями или токами в специальной литературе описаны достаточно подробно, см. например научное издание [16]. Практические приложения и новые наработки, связанные с созданием конкретных резонансных электротехнических устройств (в частности, это усилители реактивной мощности) освещены авторами публикаций [17], [18].

Общим недостатком известных работ является их направленность на исследование электромагнитных процессов в различных конструкциях резонансных систем, возбуждаемых исключительно гармоническими сигналами. Но развитие преобразовательной техники требует новых исследований возникновения резонанса в практически интересных случаях, когда последовательный активно-реактивный контур по техническим причинам должен возбуждаться ангармоническими сигналами (то есть, в отсутствие специальных амплитудно-частотных инверторов), спектр

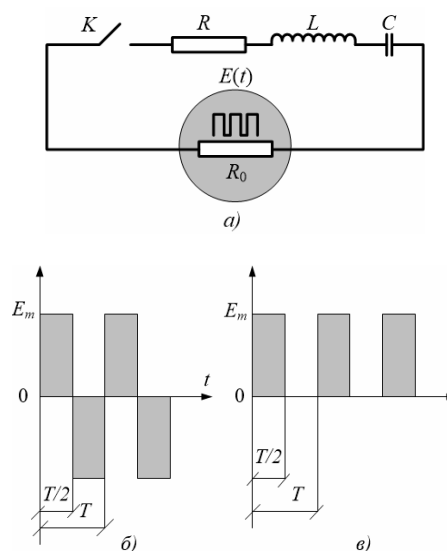
которых наряду с основной частотой колебаний содержит, так называемые, высшие гармоники с частотами, кратными основному типу колебаний.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Получение аналитических амплитудно-временных зависимостей возбуждаемых токов и численных оценок их характеристик при непосредственном возбуждении резонансного последовательного активно-реактивного контура периодическими сериями из прямоугольных униполярных или осциллирующих импульсов напряжения.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расчетные модели исследуемого последовательного активно-реактивного контура и временных форм возбуждающего напряжения представлены на рис. 1.



а) схема замещения последовательного резонансного контура; R , L , C – элементы контура; $E(t)$ – источник напряжения с внутренним сопротивлением R_0 ; б, в) временные формы возбуждающих импульсов напряжения: б – осциллирующий, в – униполярный сигналы.

Рисунок 1. Расчетные модели

Постановка задачи. Сопротивление соединительных проводов и проводов обмотки индуктивности – R , а также внутреннее сопротивление источника – R_0 , так что их сумма много меньше реактивных сопротивлений контура, $(R_0 + R_1) \ll \omega_0 L$ и $(R_0 + R_1) \ll \frac{1}{\omega_0 C}$, где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – собственная частота, L – индуктивность, C – емкость (рис. 1а).

Источник питания генерирует последовательность прямоугольных импульсов напряжения с амплитудой – E_m и частотой следования – $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ (T – период), равной собственной частоте контура –

ω_0 , так что $\omega_0 = \omega_1$.

Амплитудно-временные формы возбуждающих сигналов – $E(t)$: осциллирующие или уніполярные прямоугольные импульсы с длительностью, равной половине периода их следования (рис. 1б, в).

Отметим, что принимаемая постановка задачи позволяет сконцентрироваться на проблеме формирования квазигармонического тока и напряжения при резонансном возбуждении активно-реактивного контура ангармоническими сигналами.

Расчётные соотношения.

При решении поставленной задачи воспользуемся операторным методом расчёта электрических цепей [16], [18].

Дифференциальное уравнение относительно напряжения на ёмкости – $U_C(t)$ в пространстве изображений по Лапласу при нулевых начальных условиях $\left\{ U_C(0) = \frac{dU_C(0)}{dt} = 0 \right\}$ имеет вид [16], [19]:

$$p^2 U_C(p) + 2\delta \cdot p U_C(p) + \omega_0^2 \cdot U_C(p) = \omega_0^2 \cdot E(p); \quad (1)$$

где p – оператор Лапласа;

$$U_C(p) = L\{U_C(t)\}; \quad E(p) = L\{E(t)\}$$

$$\delta = \frac{L}{2(R_0 + R_1)} - \text{декремент затухания};$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} - \text{собственная частота контура}.$$

Решение уравнения (1) позволяет найти L -изображение возбуждаемого тока [19].

Из (1) получаем следующие зависимости.

Модуль отношения амплитуд токов,

$$I(p) = C \cdot p U_C(p) = \frac{1}{L} \cdot F(p) \cdot E(p); \quad (2)$$

$$\text{где } F(p) = \frac{(p + \delta)}{(p + \delta)^2 + \omega^2} - \left(\frac{\delta}{\omega} \right) \cdot \frac{\omega}{(p + \delta)^2 + \omega^2};$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

Оригинал выражения (2) запишется как свёртка функций [19].

$$I(t) = \frac{1}{L} \cdot F(t) * E(t); \quad (3)$$

где $F(t) \leftrightarrow F(p)$; $E(t) \leftrightarrow E(p)$ – оригиналы сомножителей в формуле (2).

Согласно постановке задачи диссипация энергии минимальна, что означает достаточную малость величины относительного декремента затухания

$$\left(\delta_0 = \frac{\delta}{\omega} \ll 1 \right) \text{ и равенство частоты возбуждаемого}$$

сигнала собственной частоте исследуемого резонансного контура $\left(\omega \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \right)$. В этом случае выра-

жение для $F(p)$ в выражении (2) можно упростить. После перехода в пространство оригиналов получаем следующее соотношение [19].

$$F(p) \approx \frac{(p + \delta)}{(p + \delta)^2 + \omega_0^2} \leftrightarrow F(t) = e^{-\delta t} \cdot \cos(\omega_0 t); \quad (4)$$

Свёртка функций в выражении (3) с учётом (4) при введении фазовой зависимости вместо временной в развёрнутом виде принимает вид [19]:

$$I(\varphi) = \frac{1}{(\omega_0 \cdot L)} \cdot \int_0^\varphi e^{-\delta_0(\varphi-x)} \cdot \cos(\varphi-x) \cdot E(x) dx; \quad (5)$$

где $\varphi = \omega_0 \cdot t$ – фаза,

$$\delta_0 = \frac{\delta}{\omega_0} - \text{относительный декремент затухания}.$$

Амплитудно-временную зависимость возбуждающего напряжения из последовательности осциллирующих прямоугольных импульсов (рис. 1б) можно представить разложением Фурье по синусам кратных дуг [19]:

$$E(\varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \cdot \sin(\omega_n \cdot \varphi); \quad (6)$$

$$\text{где } E_n = \frac{2}{\pi} E_m \cdot \frac{[(-1)^n - 1]}{n^2 - 1} \text{ и } \omega_n = \frac{\left(\frac{2\pi}{T} \cdot n \right)}{\omega_0} - \text{ам-}$$

плитуды и относительные частоты гармоник спектрального разложения, соответственно.

Ряд (6) поставим под знак интеграла в выражении (5). Учтём малость относительного декремента затухания. Полученный результат преобразуем, полагая, что собственная частота контура совпадает с частотой первой гармоники разложения (6). После выполнения необходимых тождественных преобразований получаем амплитудно-временную зависимость для тока, возбуждаемого в режиме резонанса напряжений всеми гармониками входного сигнала.

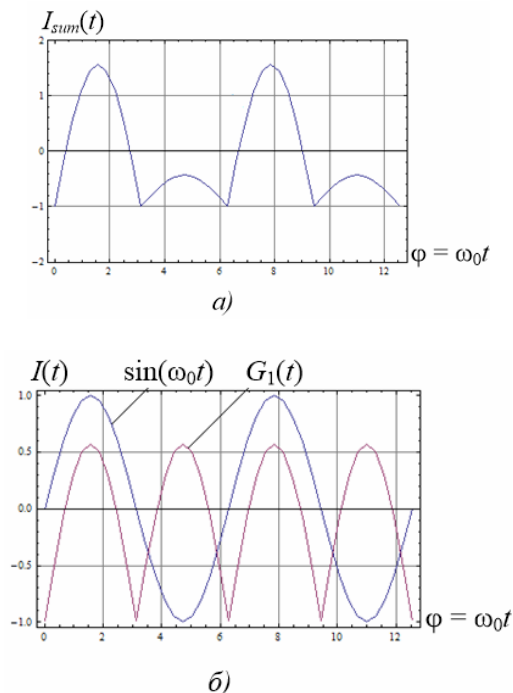
$$I_{sum}(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{E_m}{(R_0 + R)} \cdot \left(\sin(\omega_0 t) + \frac{1}{Q} \cdot G_1(t) \right); \quad (7)$$

$$\text{где } Q = \frac{\omega_0 \cdot L}{(R_0 + R)} - \text{добротность контура},$$

$$G_1(t) = \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{(-1)^n - 1}{n^2 - 1} \right) \cos(n(\omega_0 t)).$$

Некоторые численные оценки, иллюстрирующие формирование резонансного тока в рассматриваемых

условиях возбуждения последовательного активно-реактивного контура, представлены ниже (рис. 2).



а) суммарный сигнал, включающий все гармонические составляющие; б) резонансная гармоника – $\sin(\omega_0 t)$, сумма высших гармоник – $G_1(t)$.

Рисунок 2. Временные зависимости тока, возбуждаемого осциллирующей последовательностью прямоугольных импульсов напряжения (рис. 1б), с нормировкой на амплитуду резонансной гармоники

Прокомментируем полученные результаты.

Первая гармоника возбуждающего напряжения определяет гармоническую составляющую тока с частотой, равной резонансной частоте, и амплитудой, равной отношению амплитуды первой гармоники возбуждающего напряжения и активного сопротивления последовательного резонансного контура.

Вклад высших гармоник пропорционален функции $G_1(t)$ и обратно пропорционален добротности контура – Q .

Суммарная амплитуда высших гармоник (при $Q = 1$) равна амплитуде резонансной гармоники ($G_{1max} \approx 1$).

При достаточном увеличении добротности и выполнении условия – $\frac{1}{Q} \cdot G_{1max} \ll 1$ входное напряжение из серии осциллирующих импульсов с частотой следования, равной резонансной частоте контура, возбуждает исключительно гармонический ток. Вклад высших гармоник есть бесконечно малая величина порядка $\sim \left(\frac{1}{Q} \cdot G_{1max} \ll 1 \right)$ Для наглядности укажем

количественную оценку, следующую, например, из зависимостей на рис.1. В принятых условиях расчёта имеет место довольно существенный вклад высших гармоник в формирование результирующего суммарного тока ($|G_1(t)| \sim (0,5 \div 10) \cdot |\sin(\omega_0 t)|$ рис.1б), что приводит к значительному искажению его амплитудно-временной формы в сравнении со строгой гармонической зависимостью (рис.1а).

Аналогично предыдущему проанализируем возбуждение резонансного RLC -контура периодической последовательностью униполярных прямоугольных импульсов напряжения длительностью, равной половине периода повторения (рис. 1в).

Соответствующую фазовую (амплитудно-временную) зависимость представим разложением Фурье по косинусам кратных дуг [18], [19]:

$$E(\varphi) = \frac{\pi}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} E_n \cdot \cos\left(\omega_n \cdot \left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)\right); \quad (8)$$

$$\text{где } E_n = \frac{2}{\pi} \cdot E_m \cdot \frac{\sin\left(n \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{n} \text{ и } \omega_n = \frac{\left(\frac{2\pi}{T} \cdot n\right)}{\omega_0}$$

амплитуды и относительные частоты гармоник спектрального разложения, соответственно.

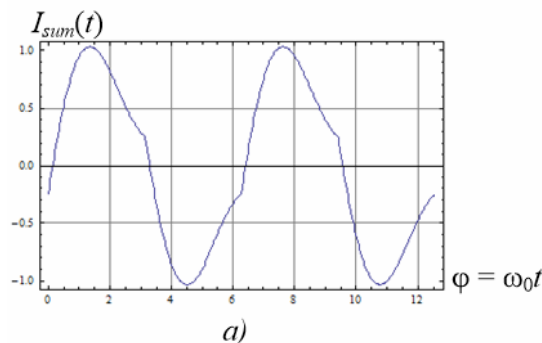
Вычислим интеграл в выражении (5) с подстановкой разложения (8).

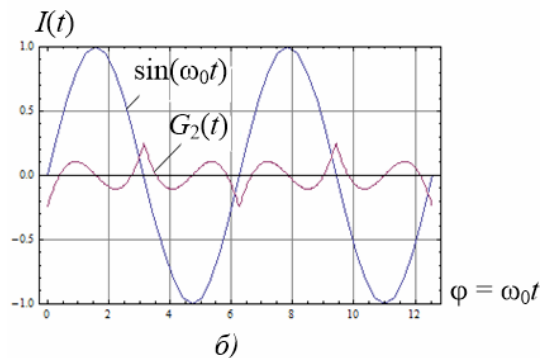
Пренебрегая бесконечно малыми слагаемыми порядка $\sim \delta_0$, после введения резонансных условий для первой гармоники входного сигнала получаем выражение для возбуждаемого тока с учётом всех гармонических составляющих спектра.

$$I_{sum}(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{E_m}{(R_0 + R)} \cdot \left(\sin(\omega_0 t) + \frac{1}{Q} \cdot G_2(t) \right); \quad (9)$$

$$\text{где } G_2(t) = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\sin\left(n \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{n} \cdot \cos\left(n \cdot \left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2}\right)\right).$$

Расчётные зависимости по формуле (9) представлены на графиках (рис. 3).





а) суммарный сигнал, включающий все гармонические составляющие; б) резонансная гармоника – $\sin(\omega_0 t)$, сумма высших гармоник – $G_2(t)$.

Рисунок 3. Временные зависимости тока, возбуждаемого последовательностью униполярных импульсов напряжения, с нормировкой на амплитуду резонансной гармоники

Примечание. Принятые формы возбуждающих напряжений как осциллирующие, так и униполярные, в своём спектральном разложении содержат различные гармонические временные функции [19]. Те из них, что обладают частотой, совпадающей с собственной частотой резонансного контура, возбуждают в нём синусоидальный ток, переменный во времени.

В той же последовательности, что и ранее, сформируем основные результаты анализа при возбуждении униполярными импульсами напряжения, следующими с частотой, равной частоте резонансного контура.

Первая гармоника определяет гармоническую составляющую тока с частотой, равной резонансной частоте, и амплитудой, равной отношению амплитуды первой гармоники возбуждающего напряжения и активного сопротивления последовательного резонансного контура.

Вклад высших гармоник так же, как и ранее, пропорционален функции $G_2(t)$ и обратно пропорционален добротности контура – Q . Но в отличие от предыдущего, следует отметить несколько большую эффективность униполярного возбуждения гармонических процессов в сравнении с возбуждением осциллирующими последовательностями периодических импульсов напряжения. Так суммарная амплитуда высших гармоник (при $Q = 1$) меньше аналогичной величины при возбуждении осциллирующими импульсами ($G_{1max} \approx 1$) и более чем в 4 раза меньше амплитуды резонансной гармоники ($|G_{2max}| \approx 0,25$ рис. 3б). То есть, в принятых условиях расчёта амплитудно-временная форма результирующего суммарного тока приближается к соответствующей строгой гармонической зависимости (рис. 3а).

Но так же, как и ранее для возбуждения осцил-

лирующими сигналами при условии – $\frac{1}{Q} \cdot |G_{2max}| \ll 1$

входное напряжение из серии униполярных импульсов возбуждает исключительно гармонический ток. Вклад высших гармоник в формирование возбуждаемого тока есть бесконечно малая величина порядка $\sim$

$$\left(\frac{1}{Q} \cdot |G_{2max}| \right).$$

В заключение следует отметить, что выбор того или иного способа возбуждения резонансной структуры, в конечном итоге, определяется конкретными техническими заданиями на её реализацию, включающими комплекс необходимых требований (например, конструктивная простота, компактность устройства, итоговая себестоимость и др.), в перечне которых вопрос об эффективности имеет смысл как одна из его составляющих.

V. ВЫВОДЫ

Получены аналитические амплитудно-временные зависимости возбуждаемых токов и численные оценки их характеристик при непосредственном возбуждении резонансного последовательного активно-реактивного контура периодическими сериями из прямоугольных униполярных или осциллирующих импульсов напряжения. Отмечена несколько большая эффективность униполярного возбуждения гармонических процессов в сравнении с возбуждением осциллирующими последовательностями периодических импульсов напряжения. Показано, что с увеличением добротности резонансного контура – Q вклад высших спектральных составляющих вне зависимости от вида входного напряжения существенно падает, и при $Q \gg 1$ возбуждаемый ток становится строго гармоническим. Работа проводилась кафедрой физики ХНАДУ в рамках Научного исследования: «Енергозберігаючі маловитратні технології живлення та ремонту транспортних засобів» 08-53-19, финансируемого Министерством образования и науки Украины.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Павлов, Г. В. Резонансные преобразователи в энергоэффективных электротехнических системах [Текст] / Г. В. Павлов, А. В. Обрубов // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – Харьков, 2014. – №9. – С. 13-23.
- [2] Agheb, E. A. On the Optimum Design of Air-Cored Tesla Transformers [Текст] / E. Agheb, A. Hayati Soloot, K. Niayesh, E. Hashemi, J. Jadidian // Acta Physica Polonica. – 2009. – №115. – С. 1152-1154.
- [3] Осипов, А. В. Резонансные преобразователи энергии солнечной батареи [Текст] / А. В. Осипов, Ю. А. Шиняков, М. М. Черная, А. А. Ткаченко // «Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования»: Решетневские

- чення. Т.1. – 2015. – №19. – С. 290-292.
- [4] Яворский, Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов [Текст] / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, А. К. Лебедев. – М.: «Оникс», 2006. – 1056 с.
- [5] Benenson, W. Handbook of Physics [Текст] / W. Benenson, J. W. Harris, H. Stoker, H. Lutz. – New York.: Springer, 2002. – 1186 с.
- [6] Denicolai, M. Tesla transformer for experimentation and research [Текст]: дис. канд. техн. наук / Denicolai M. – Helsinki university of Technology, 2001. – 96 с.
- [7] Резонансный усилитель мощности тока промышленной частоты [Электронный ресурс]: Материалы сайта – 2019. Режим доступа: <http://allpowr.ru/33>
- [8] Месяц, Г. А. Импульсная энергетика и электроника [Текст] / Г. А. Месяц. – М.: «Наука», 2004. – 705 с.
- [9] Бакалов, В. П. Основы теории цепей: учебн. для ВУЗов [Текст] / В. П. Бакалов, В. Ф. Дмитриков, Б. И. Крук. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 597 с.
- [10] Craven, R. M. Optimizing the secondary coil of a tesla transformer to improve spectral purity [Текст] / R. M. Craven, I. R. Smith, B. M. Novac // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2014. – №42(1), С. 143-148.
- [11] Naidu, M. S. High Voltage Engineering (Third edition) [Текст] / M. S. Naidu, V. Kamaraju. – Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2013. – 504 с.
- [12] Пат. 95481 України, F 23 Q 7/00. Спосіб індукційного нагріву металевих елементів автомобільних конструкцій / Батигін Ю. В., Гнатов А. В., Чаплигін Є. О., Сабокар О. С., заявник та патентовласник Харківський нац. автом. – дорожн. ун – т. – № u 2014 07576; заявл. 07.07.2014; опубл. 25.12.14, Бюл. №24.
- [13] Индуктор, индукционное оборудование [Электронный ресурс]: Материалы сайта – 2019. Режим доступа: inductor-auto.ru
- [14] Батыгин, Ю. В. Резонансный усилитель электрической мощности. Основные расчётные соотношения [Текст] / Ю. В. Батыгин, Г. С. Сериков, С. А. Шиндерук // Вісн. НТУ «ХПІ». Сер.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. Політехн. Ін-т». – Харків, 2018. – № 32. С. 59-63.
- [15] Батыгин, Ю. В. Резонансный усилитель электрической мощности. Экспериментальные исследования [Текст] / Ю. В. Батыгин, Г. С. Сериков, С. А. Шиндерук // Перспективні технології та прилади: зб. наук. пр. / Луцький нац. техн. ун-т. – Луцьк, 2018. – № 13. – С. 18-24.
- [16] Атабеков, Г. И. Основы теории цепей [Текст] / Г. И. Атабеков. – Л.: Энергия, 2006. – 220 с.
- [17] Батыгин, Ю. В. Резонансный усилитель реактивной электрической мощности. Анализ электромагнитных процессов [Текст] / Ю. В. Батыгин, Г. С. Сериков, С. А. Шиндерук, В. А. Стрельникова, Э. Р. Усмонов // Електротехніка та електроенергетика. – Запорожье, 2019. – № 2. – С. 34-42.
- [18] Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники [Текст] / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – Изд. 4-е. Том 1. – СПб. : «Питер», 2003. – 463 с. : ил.
- [19] Korn, G. A. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: definitions, theorems, and formulas, for reference and review [Текст] / G. A. Korn, T. M. Korn. – Mineola, N.Y.: Dover Publications, 2000, 1130 с.

Стаття надійшла до редакції 17.09.2019

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ ЗА БЕЗПОСЕРЕДНЬОГО ЗБУДЖЕННЯ ПОСЛІДОВНОГО РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРУ ПРЯМОКУТНИМИ ІМПУЛЬСАМИ НАПРУГИ

БАТИГІН Ю.В.

д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: yu.v.batygin@gmail.com;

ЧАПЛИГІН Є.О.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com;

ШИНДЕРУК С.О.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net;

СТРЕЛЬНИКОВА В.А.

аспірант, асистент кафедри фізики Харківського національного автомобільно-

дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: v.strelnikova91@gmail.com;

НЕСКРЕБА Е.Є.

студент автомобільного факультету Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: eeneskreba12@ukr.net;

Мета роботи. Отримання аналітичних амплітудно-часових залежностей струмів, що збуджуються і чисельних оцінок їх характеристик при безпосередньому збудженні резонансного послідовного активно-реактивного контуру періодичними серіями з прямокутних уніполярних або коливальних імпульсів напруги.

Методи дослідження. Математичний апарат теорії електричних ланцюгів в розрахунках перехідних процесів при підключенні послідовних резонансних контурів. Чисельні оцінки характеристик протікають електромагнітних процесів.

Отримані результати. Визначено амплітудно-часові форми струму в послідовному активно-реактивному контурі при його резонансному збудженні періодичними серіями з прямокутних уніполярних або коливальних імпульсів напруги з резонансною частотою їх слідування. Виконано чисельні оцінки характеристик порушуваних струмів. Відзначена дещо більша ефективність уніполярного збудження гармонічних процесів у порівнянні із збудженням осцилюючими послідовностями періодичних імпульсів напруги. Показано, що із підвищенням добротності резонансного контуру – Q внесок вищих спектральних складових незалежно від виду вхідної напруги істотно падає, та при $Q \gg 1$ струм, що збуджується стає строго гармонічним.

Наукова новизна. Наукова новизна представленої роботи полягає в отриманні аналітичних амплітудно-часових залежностей та чисельних оцінок для струмів, що збуджуються при безпосередньому підключенні джерела ангармонічної напруги до послідовного резонансного контуру і ініційована практичними завданнями в розробках електротехнічних пристроїв, реальна дієвість яких можлива тільки в умовах, досить близьких до резонансних.

Практична цінність. Отримані вирази для струмів, що збуджуються за безпосереднього підключення джерела ангармонічної напруги до послідовного резонансного активно-реактивного контуру, і результати проведеного аналізу необхідні для проектування електротехнічних пристроїв із резонансними компонентами. Доволі перспективним у напрямку подальших досліджень є рішення задачі та аналізу процесів у системі із двох індуктивно-пов'язаних послідовних резонансних контурів, що збуджуються часовою послідовністю ангармонічних сигналів.

Ключові слова: послідовний резонансний контур, прямокутні імпульси напруги; добротність активно-реактивного контуру; резонанс напруг.

ELECTROMAGNETIC PROCESSES WITH DIRECT EXCITATION OF SERIAL RESONANT CIRCUIT BY RECTANGULAR VOLTAGE PULSES

BATYGIN YU.V.

D.Sc. in engineering, professor, chief of the physics chair of Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, e-mail: yu.v.batygin@gmail.com;

CHAPLYGIN E.A.

Ph.D. in technical sciences, associate professor, associate professor of the physics chair of Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com;

SHINDERUK S.O.

Ph.D. in technical sciences, associate professor, associate professor of the physics chair of Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net;

STRELNIKOVA V.A.

P.G. student, assistant professor of the physics chair of Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine e-mail: v.strelnikova91@gmail.com;

NESKREBA E.YE.

Student of the automobile faculty of Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine e-mail: eeneskreba12@ukr.net

Purpose. Obtaining the analytical amplitude-time dependencies of exited currents and numerical estimations of their characteristics with direct excitation of resonant sequential active-reactive circuit by periodic series of rectangular unipolar or oscillating voltage pulses.

Methodology. The mathematical apparatus of the theory of electric circuit in transients calculations when connecting serial resonant circuits. Numerical estimations of the occurring electromagnetic processes characteristics.

Findings. The amplitude-time forms of current in a series active-reactive circuit are determined during its resonant excitation by the periodic series of the rectangular unipolar or oscillating voltage pulses with a resonant repetition

rate. Numerical estimates of the characteristics of the excited currents are performed. The somewhat higher efficiency of unipolar excitation of harmonic processes is noted in comparison with the excitation of periodic voltage pulses by oscillating sequences. It is shown that with an increase in the quality factor of the resonance circuit - Q , the contribution of the higher spectral components, regardless of the input voltage type, substantially decreases, and for $Q \gg 1$ the excited current becomes strictly harmonic.

Originality. The scientific novelty of the present work consists in obtaining analytical amplitude-time dependences and numerical estimates for the excited currents by directly connecting the anharmonic voltage source to a series resonant circuit and is initiated by practical tasks in the development of electrical devices, the real effectiveness of which is possible only under conditions close to resonant.

Practical value. The obtained expressions for the currents excited by directly connecting the anharmonic voltage source to the series resonant active-reactive circuit, and the results of the analysis are necessary for the design of electrical devices with resonant components. It seems very promising in the direction of further research to solve the problem and analyze processes in a system of two inductively coupled series resonant circuits excited by a time sequence of anharmonic signals.

Keywords: serial resonant circuit; rectangular voltage pulses; active-reactive circuit Q -factor; voltage resonance

REFERENCES

- [1] Pavlov, H. V., Obrubov, A. V. (2014). Rezonansnye preobrazovateli v energoefektivnykh elektrotehnicheskikh sistemakh [Resonant amplifiers in energy efficient electrical engineering systems]. Energoberezhenie, energetika, energoaudit. Sp. is. 1, 9 (128), 13-23.
- [2] Agheb, E., Hayati Soloot, A., Niayesh, K., Hashemi, E. & Jadidian, J. (2009). On the Optimum Design of Air-Cored Tesla Transformers. Acta Physica Polonica. 115 (6), 1152-1154.
- [3] Osipov, A. V., Shyniakov, Yu. A., Chernaya, Yu. A. & Tkachenko, A. A. (2015). Rezonansnye preobrazovateli energii solnechnoy batarei [Resonant energy transformers in solar battery] «Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya» Publ. Reshetnevskie chteniya. 1, 19, 290-292.
- [4] Iavorskii, B. M., Detlaf, A. A. & Lebedev, A. K. (2006). Spravochnik po fizike dlia inzhenerov i studentov VUZov. Moscow: Oniks Publ.
- [5] Benenson, W., Harris, J. W., Stoker, H., & Lutz H. (2002). Handbook of Physics. New York: Springer Publ.
- [6] Denicolai, M. (2001). Tesla transformer for experimentation and research. Helsinki university of Technology.
- [7] Rezonansnyy usilitel' moshchnosti toka promyshlennoy chastoty [Resonant power amplifier of industrial frequency current] (2019). Available at: <http://allpowr.su/ru/33>
- [8] Mesyats, G. A. (2004). Impul'snaya energetika i elektronika. M: Nauka.
- [9] Bakalov, V. P., Dmitrikov V. F., & Kruk B. I. (2007). Osnovy teorii tsepey 3rd ed. M: Goryachaya liniya – Telekom.
- [10] Craven, R. M., Smith, I. R. & Novac, B. M. (2014). Optimizing the secondary coil of a tesla transformer to improve spectral purity. IEEE Transactions on Plasma Science, 42 (1), 143-148.
- [11] Naidu, M. S. & Kamaraju, V. (2013). High Voltage Engineering 3rd edition. N. Y.: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- [12] Batygin, Yu. V., e.a. Sposib indukciynogo nagrivu metalevyh elementiv avtomobil'nyh konstrukcij [Method for induction heating of metal automobile construction elements]. Patent Ua, no. 95481, 2014.
- [13] Induktor, induktsionnoe oborudovanie [Inductor, induction equipment] (2019). Available at: induktor-avto.pf.
- [14] Batygin, Yu. V., Serikov, G. S., Sinderuk, S. A. (2018). Rezonansnyy usilitel' elektricheskoy moshchnosti. Osnovnye raschetnye sootnosheniya [Resonant amplifier. The main calculation relations]. Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KhPI». Seriya: Problemi udoskonalennya elektrichnikh mashin i aparativ. Teoriya i praktika.: zb.nauk. pr. 32(1308), 59-63.
- [15] Batygin, Yu. V., Serikov, G. S., Sinderuk, S. A. (2018). Rezonansnyy usilitel' elektricheskoy moshchnosti. Eksperimental'nye issledovaniya [Resonant amplifier. Experimental research]. Luts'k: LNTU. Zb.naukovikh prats': Perspektivni tekhnologii ta priladi, 13, 18-24.
- [16] Atabekov, G. I. (2006). Osnovy teorii tsepei. L: Energiia.
- [17] Batygin, Yu. V., Serikov, G. S., Sinderuk, S. A., Strelnikova, V. A. & Usmonov, E. R. (2019). Resonant reactive power amplifier. Analysis of electromagnetic processes. Electrical Engineering and Power Engineering, 2, 34-42.
- [18] Demirchyan, K. S., Neyman, L. R., Korovkin, N. V. & Chechurin, V. L. (2003). Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki 4th ed., 1, Spb.: «Piter».
- [19] Korn, G. A., Korn, T. M. (2000). Mathematical Handbook for Scientists and Engineers. Mineola, N.Y.: Dover Publications.

СПОСІБ СИНТЕЗУ РЕГУЛЯТОРА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННИМ ПРИВОДОМ МЕХАНІЗМІВ БЕЗ ПРЯМОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ШВИДКОСТІ

БОРОДАЙ В.А.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода Національного ТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: Boroday_va2@ukr.net;

БОРОВИК Р.О.

інженер, асистент, асистент кафедри електропривода Національного ТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: borovyk.r.o@nmu.one;

НЕСТЕРОВА О.Ю.

канд. пед. наук, доцент кафедри перекладу Національного ТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: olnesterova1@rambler.ru.

Мета роботи. Розробка способу синтезу регулятора напруги живлення енергоощадного управління асинхронним приводом механізмів тривалого режиму роботи із мало-змінним графіком навантаження і без потреби стабілізації швидкості.

Методи досліджень. Для проведення досліджень використані положення теорії електричних машин, методи синтезу автоматичних систем, математичне моделювання у пакеті Matlab, методи статистичного аналізу.

Отримані результати. Розроблено спосіб та синтезовано за його алгоритмом регулятор напруги енергоощадного керування асинхронним приводом за умови коливання навантаження через хаотичну зміну технологічної задачі із одночасним забезпеченням допустимого зниження динаміки. Надано рекомендації щодо послідовності і схем увімкнення автоматичної системи в режимах запуску та сталої роботи, а також вибрано інтервал обмеження раціонального значення ковзання, яке забезпечує максимальну можливу енергоефективність.

Наукова новизна. Запропоновано оригінальний спосіб визначення нелінійної перехідної функції регулятора напруги енергоощадного управління асинхронним приводом із забезпеченням допустимої динаміки в перехідних режимах та непрямою стабілізацією швидкості механізмів тривалого режиму роботи і мало-змінним графіком навантаження. Обґрунтовано вибір інтервалу обмеження раціонального значення ковзання і послідовності увімкнення схеми керування у залежності від поточного режиму роботи системи електроприводу.

Практична цінність. Використання запропонованого регулятора дозволить створити автоматичну систему асинхронного привода, завдяки якій можливо досягти збереження до 47 % активної потужності у випадку значного падіння навантаження.

Ключові слова: механізми тривалого режиму роботи, мало-змінний графік навантаження, пошук і обґрунтування енергоефективного управління асинхронним приводом, розробка оригінального методу синтезу регулятора напруги.

I. ВСТУП

Відомо, що економіка України забезпечена власними енергоносіями приблизно на половину від необхідної потреби [1]. При цьому імпорт таких корисних копалин, як вугілля, газ, нафта становить від 20 % до 85 %, що у випадку форс-мажорних ситуацій може становити загрозу обмеження енергогенерації. Одночасно слід зауважити, що промисловість та житлове комунальне господарство (ЖКГ) користуються застарілими технологіями із низькою енергоефективністю. Як наслідок, сьогодні Україна має найвищу в Європі енергоємність на одиницю ВВП, що в понад тричі перевищує показники розвинутих держав світу. Таким чином, питання енергоощадності та енергоефективності має виняткову актуальність.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Сучасні виробничі механізми переважно рухаються завдяки електричному приводу [2]-[4], який споживає приблизно до 70 % від усієї електроенергії, що виробляється генеруючими компаніями. Логічно

вважати, що напрям заснований на ресурсозбереженні засобами електропривода безумовно потребує подальшого розвитку.

Всебічний аналіз щодо енергоефективності та енергоощадності сучасного асинхронного електропривода може бути продемонстрований низкою відомих підходів [5]:

- залучення Європейського досвіду експлуатації нерегульованого привода із середнім коефіцієнтом завантаження в 0,6 відносних одиниць;

- впровадження двигунів із підвищеним вмістом активних матеріалів [6], [7], які забезпечують падіння витрат до 30 % та підвищення ККД машини до 5 %. Проте одночасно слід зазначити, що за наявності позитивного ефекту, витрати енергії у самій робочій машині можуть залишатися досить великими, а розрахункова економія матиме місце у разі мало-змінного навантаження і буде помітною при правильному налагодженому силовому каналі;

- зниження витрат в мережі живлення за рахунок компенсації реактивної потужності;

- інші способи передбачають зменшення тривалості режимів холостого ходу або перемикання схеми включення двигуна з трикутника на зірку на термін холостого ходу і незначної навантаженості [8] та використання режиму рекуперативного гальмування;

Найбільш енергоощадним, на теперішній час, вважається спосіб, який залучає регульований електропривод, де керування здійснюється за допомогою силових перетворювачів [9]-[11]. При цьому слід підкреслити, що намітилась світова тенденція до використання в керованих електроприводах переважно частотних перетворювачів. Але існують механізми тривалого режиму роботи із мало-змінним графіком навантаження (різноманітні насосні та вентиляторні установки [12], [13]), де використання частотного перетворювача є досить дорогим та не завжди виправданим. Тому у цих випадках на перший план можуть виходити перетворювачі напруги, вартість яких приблизно втричі менше за вартість перетворювачів частоти. Хоча слід зазначити, що при фазочастотному методі керування такі перетворювачі мають гірший коефіцієнт потужності, а його підвищення можливе завдяки приєднанню ємнісних фільтрів. Інший підхід підвищення ефективності – використання регуляторів напруги, що побудовані на базі IGBT транзисторів із широтно-імпульсним методом керування. На жаль, їх вартість має незначне зменшення в порівнянні з вартістю частотних перетворювачів через схожість конструкції.

В регульованих системах припустимо використання комбінованого способу підвищення енергоефективності. Так, робота системи вентиляції локомотива [14], що живиться від синхронного генератора із змінною швидкістю обертання, досягається шляхом залучення системи частотного керування приводу вентилятора та підбором його двигуна, який має знижені значення активного та реактивного опору ротора. Такі умови в сукупності підвищують ККД та $\cos(\varphi)$ системи, але в цьому випадку є адаптованими до бортової мережі залізничного тепловоза.

Отже, весь наданий огляд підводить до висновку, що для досягнення максимального ефекту енергоефективності поставлена задача повинна вирішуватись комплексно. Тобто, необхідно розглядати систему на ділянках енергетичного каналу, силового перетворювача, двигуна та робочої машини. Автори роботи на даному етапі претендують тільки на покращення енергетики електричного двигуна. Інші питання планується розглядати на подальших стадіях досліджень.

Відомо, що для систем, де об'єктом керування є асинхронний двигун, використовують різноманітні закони керування. Це стабілізація оптимального значення ковзання, мінімальних струму статора або живильної потужності двигуна, які функціонально залежать від навантаження [15], [16]. Реалізація кожного з них може бути за наявності синтезованих регуляторів, для яких, у загальному випадку, використовують класичні методи теорії автоматичного управління. Однак загально прийняті способи синтезу регуляторів не завжди є раціональними, і тому інженерна практика потребує пошуку більш зручних способів для виняткових умов використання.

сичні методи теорії автоматичного управління. Однак загально прийняті способи синтезу регуляторів не завжди є раціональними, і тому інженерна практика потребує пошуку більш зручних способів для виняткових умов використання.

III. МЕТА РОБОТИ

Розробка способу синтезу регулятора напруги живлення енергоощадного управління асинхронним приводом механізмів тривалого режиму роботи із мало-змінним графіком навантаження і без потреби стабілізації швидкості.

IV. ВИКЛАД ГОЛОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Відомості щодо моделі двигуна. Дослідницька частина роботи базується на математичній моделі асинхронного двигуна (АД), де трифазна векторна система зазвичай перетворюється у двофазну [17]. Далі виходячи з рівнянь Парка-Горева отримують електричну частину моделі АД.

$$\begin{cases} \bar{u}_1 = R_1 \bar{i}_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} + j\omega_k \bar{\Psi}_1; \\ \bar{u}_2 = R_2 \bar{i}_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt} + j\bar{\Psi}_2(\omega_k - \omega_r p_n); \end{cases} \quad (1)$$

де $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{i}_1, \bar{i}_2, \bar{\Psi}_1, \bar{\Psi}_2$ – результуючі вектори напруг, струмів, потокозчеплень відповідно; R_1, R_2 – активні опори обмоток статора та ротора; p_n – кількість пар полюсів двигуна; ω_r, ω_k – кутові швидкості ротора і поля статора.

Механічну частину двигуна визначають через рівняння руху

$$M - M_C = J \frac{d\omega_r}{dt},$$

де M_C – момент опору на валу АД, J – момент інерції електропривода, приведений до вала АД.

У цьому випадку електромагнітний момент АД дорівнює векторному добутку потокозчеплення та струму статора:

$$M = \frac{3}{2} p_n (\bar{\Psi}_1 \times \bar{i}_1) \quad (2)$$

а вектори потокозчеплень записуються відповідно:

$$\begin{cases} \bar{\Psi}_1 = L_1 \bar{i}_1 + L_m \bar{i}_2; \\ \bar{\Psi}_2 = L_2 \bar{i}_2 + L_m \bar{i}_1; \end{cases} \quad (3)$$

де $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$; $L_2 = L_{2\sigma} + L_m$ – повні індуктивності обмоток статора та ротора; L_m – взаємна індуктивність між цими обмотками; $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ – індуктивності розсіювання обмоток статора і ротора.

На практиці з метою спрощення математичного розв'язання системи рівнянь (1)-(3) користуються не векторними виразами, а записують їх у проєкціях. Так, для нерухомої системи координат, що пов'язана з обмотками статора, результуючі рівняння АД в проєкціях на дійсну та уявну осі системи координат « α - β », набувають такого вигляду:

$$\begin{cases} u_{1\alpha} = R_1 i_{1\alpha} + \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt}; \\ u_{1\beta} = R_1 i_{1\beta} + \frac{d\psi_{1\beta}}{dt}; \\ u_{2\alpha} = R_2 i_{2\alpha} + \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} + \omega_r p_n \psi_{2\beta}; \\ u_{2\beta} = R_2 i_{2\beta} + \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} - \omega_r p_n \psi_{2\alpha}; \\ M = \frac{3}{2} p_n L_m k_\sigma (\psi_{1\beta} \psi_{2\alpha} - \psi_{1\alpha} \psi_{2\beta}), \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{де } k_\sigma = \frac{L}{L_1 L_2 - L_m^2}.$$

Момент двигуна в рівняннях (4) визначається через проєкції векторів потокозчеплення статора та ротора. Запис диференціальних рівнянь через потокозчеплення забезпечує найкомпактніший їх вигляд. Але при цьому із системи рівнянь (3) додатково необхідно записати алгебраїчні вирази, котрі зв'язують струми з потокозчепленнями:

$$\begin{cases} i_{1\alpha} = k_\sigma (L_2 \psi_{1\alpha} - L_m \psi_{2\alpha}); \\ i_{1\beta} = k_\sigma (L_2 \psi_{1\beta} - L_m \psi_{2\beta}); \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} i_{2\alpha} = k_\sigma (L_1 \psi_{2\alpha} - L_m \psi_{1\alpha}); \\ i_{2\beta} = k_\sigma (L_1 \psi_{2\beta} - L_m \psi_{1\beta}). \end{cases}$$

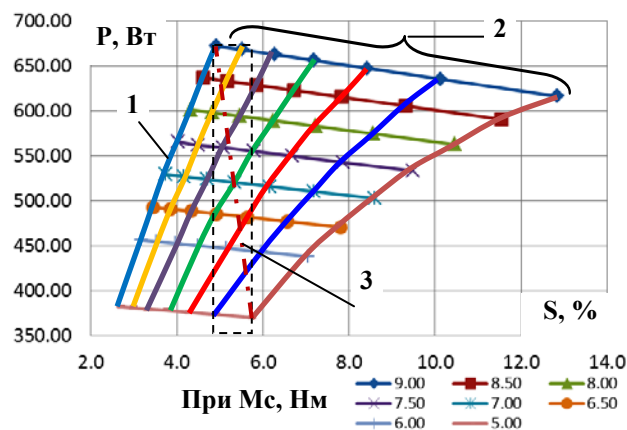
Параметри L_1 , L_2 , L_m двофазної моделі АД можливо розрахувати через параметри трифазного двигуна, що вказуються в каталогах і клієнтських формулярах за допомогою співвідношень:

$$L_1 = \frac{X_1 + X_\mu}{\omega_o}; \quad L_2 = \frac{X'_2 + X_\mu}{\omega_o}; \quad L_m = \frac{X_\mu}{\omega_o}, \quad (6)$$

де X_1 – індуктивний опір розсіювання обмотки статора; X'_2 – приведений до обмотки статора індуктивний опір обмотки ротора; X_μ – головний індуктивний опір.

Програма досліджень та алгоритм синтезу регулятора. Як згадувалось раніше, ідея роботи полягає у регулюванні напруги живлення двигуна у залежності від зміни навантаження за одним із законів – мінімального струму статора або мінімальної потужності живлення. Для реалізації цього модель АД потрібно

доповнити перетворювачем і регулятором напруги, де перехідна функція останнього може бути визначена за наступним алгоритмом. Для декількох фіксованих значень навантажень асинхронного двигуна у сталому режимі визначають потужність шляхом регулювання напруги завдання на вході перетворювача. Із даних джерела [15] напругу на виході перетворювача можливо знижувати до рівня 60 % від номінального значення. Виходячи з цього пошук мінімальних потужностей виконувався із врахуванням означених відомостей. Таким чином, програмою досліджень даного етапу передбачено, що момент навантаження регулюється у межах 0,9...0,5 від номінального з кроком 0,5 Н·м, а зміна завдання на перетворювач здійснювалась в інтервалі від 10 до 7 вольт із кроком в 0,5 вольт. Для попередньо виконаних дослідів двигуна 4A132M8Y3 встановленої потужності 5,5 кВт, номінальної швидкості обертання 750 об/хвил, напруги живлення 220 В отримано ряд механічних характеристик, вигляд яких зображено на рис. 1, (1, 2).



P – механічна потужність; s – поточне ковзання;
1 – природна, 2 – штучні механічні характеристики; 3 – зона бажаного ковзання при регулюванні

Рисунок 1. Ілюстрація до визначення інтервалу зміни ковзання

Їх побудова базується на експериментально отриманих залежностях пошуку раціональної потужності живлення при досягненні ефективного керування.

Аналіз форм поміжних залежностей потужності від напруги і навантаження не виявив екстремумів функції. Тому підхід до подальшого вирішення задачі пошуку раціонального живлення виконаний шляхом вибору мінімальної потужності в діапазоні ковзань лімітованих межами 5,0...5,9 % (рис. 1, зона 3). Запропонований діапазон ковзань обрано із міркувань реалізації автоматичною системою приводу номінального режиму роботи двигуна при навантаженні близькому до номінального і гарантії отримання мінімально-можливої потужності живлення за умови наявності найменшого навантаження.

Врешті цикл попередніх випробувань дозволив отримати низку раціональних напруг регулювання

завдання залежних від навантаження, які формують у вигляді зведеної таблиці. Наступний крок синтезу перехідної функції регулятора напруги – побудова на основі даних зведеної таблиці лінії тренда і на її базі отримання математичної залежності за одним із відомих законів апроксимації (рис. 2).

Із усіх доступних методів найбільш вдалим став поліноміальний

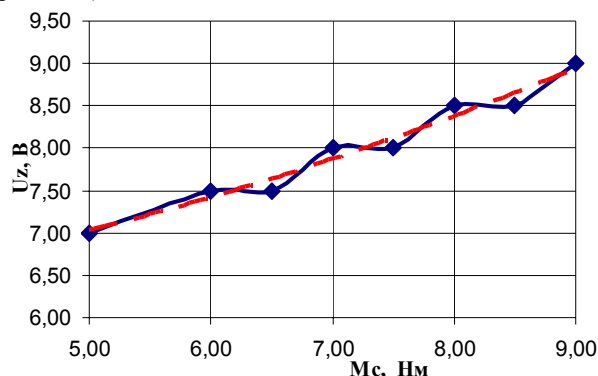
$$U_z = 0,028M_c^2 + 0,0868M_c + 5,8852, \quad (7)$$

де отримано максимальний коефіцієнт детермінації рівня $R^2 = 0,9673$.

За функцією рівняння (7) розроблено кінцеву Matlab модель (рис. 3). Її дослідження показали, що на етапі старту двигуна найбільш раціональним є робота системи від задавача інтенсивності, що фактично реалізує функцію пристрою плавного пуску, а після досягнення сталого режиму пропонується вмикати регулятор, де в якості зворотного зв'язку заведене поточне значення навантаження. Позитивну роль для зниження динаміки при зміні напруги вносить цей же задавач інтенсивності, який у режимі регулювання приєднується послідовно з регулятором до перетворювача напруги, що можливо бачити на рис. 3.

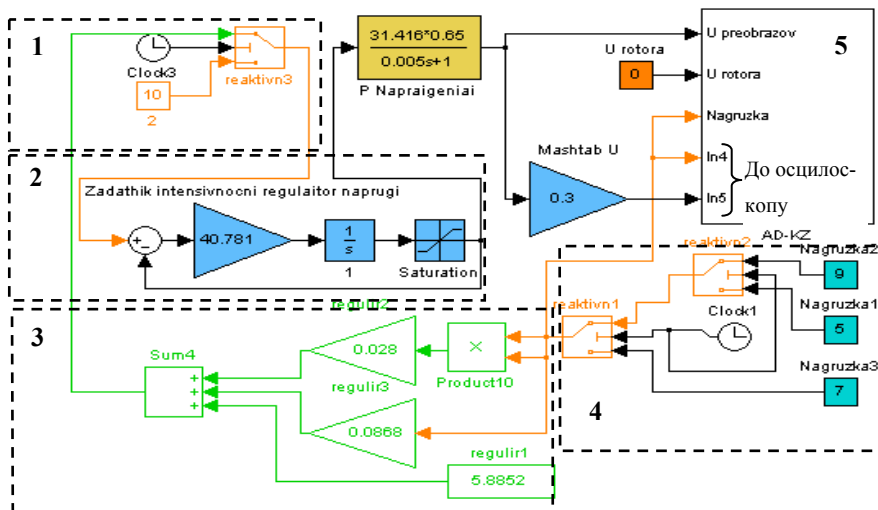
Аналіз результатів досліджень. Випробування системи енергоефективного управління із двигуном 4A132M8Y3 здійснювались в такій послідовності. Запуск системи від задавача інтенсивності під навантаженням в 7 Н·м, який триває приблизно 0,75 секунди, а далі протягом такого ж терміну підтримується сталий режим (рис. 4, а). Регулятор вмикався через

1,5 секунди після початку запуску і без зміни навантаження. Потім послідовно навантаження змінювалось на рівень 5 та 9 Н·м. Експоненціальні форми зміни напруги на виході перетворювача наглядно демонструють достатнє зниження динаміки системи при кожному переході від одного рівня навантаження до іншого. Практично незмінна величина швидкості свідчить, що при регулюванні напруги ковзання залишається у діапазоні, який було задекларовано вище. Кидки усіх фізичних величин мають практично задовільний рівень. Аналіз зменшення напруги при падінні навантаження дозволив зменшити активну потужність живлення до 47 %, а реактивну – до 51 % (рис. 4, б).



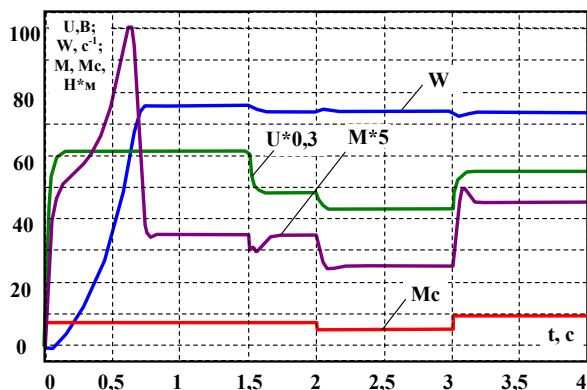
— вхідна функція; — лінія тренда;
 U_z – напруга завдання на перетворювачі;
 M_c – навантаження

Рисунок 2. Графік визначення лінії тренда



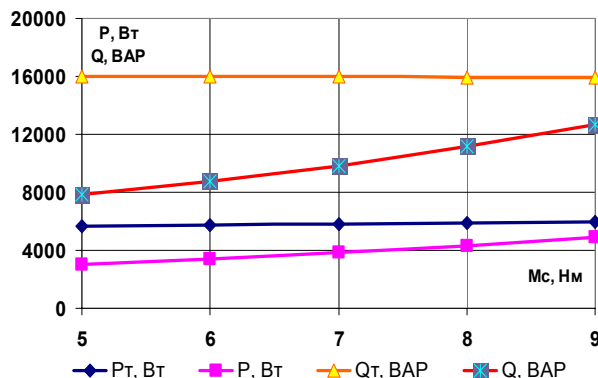
1 – блок комутації запуску та регулювання; 2 – задавач інтенсивності;
 3 – регулятор напруги; 4 – блок навантаження; 5 – АД-КЗ двигун

Рисунок 3. Модель автоматичної системи регулювання напруги живлення



W – швидкість обертання двигуна;
 U – напруга на виході перетворювача;
 M – електромагнітний момент двигуна;
 Mc – момент навантаження

а



активна та реактивна складові
 Pt, Qt – традиційного живлення;
 P, Q – керованого живлення

б

Рисунок 4. Графіки дослідження системи керування: а) – перехідних процесів; б) – потужностей живлення

V. ВИСНОВКИ

Не викликає сумніву, що управління асинхронним приводом засобами частотного керування дає найкращий результат енергетичної ефективності. Але у випадку електромеханічних систем тривалого режиму роботи із мало-змінним графіком навантаження пріоритетним може бути використання саме перетворювачів напруги, як альтернативи з позиції ціна-якість.

Оригінальний спосіб синтезу регулятора ефективного управління реалізується за алгоритмом, який передбачає:

- за відсутності автоматичного управління напруги для ряду фіксованих навантажень сталого режиму здійснюється пошук мінімальної потужності живлення шляхом зміни напруги завдання на перетворювачі;

- зважаючи на те, що залежності попереднього етапу досліджень носять монотонний характер, для досягнення мети отримання раціональної потужності живлення потрібно обмежити її вибір діапазоном ковзань, при якому забезпечується номінальний режим роботи системи приводу при навантаженні, близькому до номінального, з одного боку, і гарантії досягнення мінімально-можливої потужності за умови підтримки найменшого навантаження, з іншого боку;

- із отриманих зведених даних найменшої потужності для різних навантажень і за умови обраного ковзання будується лінія тренда, рівняння якої характеризується найбільшим коефіцієнтом детермінації.

Випробуваннями встановлено, що найбільш раціональним методом запуску системи є метод плав-

ного пуску, а вмикання регулятора рекомендується здійснювати у сталому режимі із послідовно увімкненим задавачем інтенсивності, який забезпечить потрібне зниження динаміки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Барский, В.А. Электропривод как энергосберегающий фактор в промышленности и ЖКХ Украины [Текст] / В.А. Барский, А.С. Бешта, Н.В. Горбачов и др. // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – Харьков: Наук. 2013. – №9 (115). – С. 2-11.
- [2] Стратегия энергосбережения в Украине: аналитически-справочные материалы в 2-х томах. Общие основы энергосбережения / за ред. В.А. Жовтнянского, М.М. Куліка, Б.С. Стогнія – К.: Академперіодіка, 2006. – Т. 1. – 510 с.
- [3] Клепиков, В.Б. О роли электропривода в решении проблемы энергоресурсосбережения в Украине / В.Б. Клепиков, В.Ю. Розов // Вестник НТУ «ХПИ»: Тем. вып. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – № 28. – С. 18–21.
- [4] Бешта, О.С., Економічні й екологічні аспекти комплексної генерації та утилізації енергії в умовах урбанізованих територій. Монографія. / О.С.Бешта, Г.Г. Півняк та ін. – Дніпропетровськ, НГУ, 2013. – 220 с.
- [5] Козярук, А.Е. Метод и средства повышения энергоэффективности машин и технологий с асинхронным электроприводом / А.Е. Козярук, Б.Ю. Васильев // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Энергетика». – 2015. – Т.15, №1. – С. 47-53. DOI: 10.14529 /

- power 150106.
- [6] <http://www.ruselprom.ru/support/biblioteka-polzovatelya/Elektrodvigateli-7ave-energoberegayushchie-resheniya-kontserna-ruselprom/>
- [7] Новая высокоэффективная серия асинхронных двигателей 7AVE, ее модификации и специализированные исполнения / В.Я. Беспалов, А.С. Кобелев, О.В. Кругликов, Л.Н. Макаров // Труды VIII Междунар. (XIX Всерос.) науч.-техн. конф. по автоматизир. электроприводу. – Саранск, 2014. – С. 239-243.
- [8] Бабокин, Г.И. Оценка экономии электрической энергии в нерегулируемом асинхронном электроприводе путем переключения обмоток статора // ГИАБ. 2005. №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekonomii-elektricheskoy-energii-v-nereguliruemom-asinhronnom-elektroprivoде-putem-pereklyucheniya-obmotok-statora> (дата обращения: 08.07.2019).
- [9] Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков: под ред. И.Я. Браславского. – М.: Академия. 2004 – 256 с.
- [10] Vasilev B. Structure and three-level inverter control algorithm electric power facilities transportation of hydrocarbons / B. Vasilev // Electrotechnic and computer systems. – 2014. – № 15(91). – P. 220-223.
- [11] Kozyaruk A. Structure, composition, and control algorithms of high-efficiency electric drives of gas-compressor units / A. Kozyaruk, B. Vasil'ev // Russian Electrical Engineering. February. – 2013. – Vol. 84. – Iss.2. – P.94-102. DOI: 10.3103/S1068371213020077
- [12] Лезнов, Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок / Б.С. Лезнов— М.: Машиностроение, 2013. — 176 с.
- [13] Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздушных установках / Б.С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 256 с.
- [14] Дзенис, С.Е. Выбор асинхронного двигателя привода вентилятора тепловоза с условием обеспечения его устойчивой работы // С.Е. Дзенис, В.В. Шевченко, О.О. Ханин – Харьков: Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил, Наук. – техн. зб. – Вип. 4(45) – 2015 – С. 92-96.
- [15] Казачковский, Н.Н. Сопоставление законов частотного управления на примере преобразователя частоты Altivar 21. / Н.Н. Казачковский // Гірничая електромеханіка та автоматика, Наук. – техн. зб. – Вип. 100. – 2018 – С. 69 – 72.
- [16] Бабокин, Г.И. Оценка экономии энергетической энергии в системе регулятор напряжения асинхронный двигатель // ГИАБ. 2006. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekonomii-energeticheskoy-energii-v-sisteme-regulyator-napryazheniya-asinhronnyy-dvigatel-1> (дата обращения: 08.07.2019).
- [17] Башарин, А.В. Управление электроприводам: Учебное пособие для вузов / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский – Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.

Стаття надійшла до редакції 26.06.2019

СПОСОБ СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ПРИВОДОМ МЕХАНИЗМОВ БЕЗ ПРЯМОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ

- БОРОДАЙ В.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электропривода Национального ТУ «Дніпровська політехніка», Днепр, Украина, e-mail: Boroday_va2@ukr.net;
- БОРОВИК Р.А. инженер, ассистент, ассистент кафедры электропривода Национального ТУ «Дніпровська політехніка», Днепр, Украина, e-mail: borovyk.r.o@nmu.one;
- НЕСТЕРОВА О.Ю. канд. пед. наук, доцент кафедры перевода Национального ТУ «Дніпровська політехніка», Днепр, Украина, e-mail: olnesterova1@rambler.ru.

Цель работы. Разработка способа синтеза регулятора напряжения питания энергосберегающего управления асинхронным приводом механизмов длительного режима работы с мало изменяющимся графиком нагрузки и без необходимости стабилизации скорости.

Методы исследования. Для проведения исследований использованы положения теории электрических машин, методы синтеза автоматических систем, математическое моделирование в пакете MatLab и методы статистического анализа.

Полученные результаты. Разработан способ и синтезирован по его алгоритму регулятор напряжения энергосберегающего управления асинхронным приводом при условии колебательности нагрузки из-за хаотического изменения технологической задачи с одновременным обеспечением допустимого уменьшения динамики.

Даны рекомендации к последовательности и схемному включению автоматической системы в режимах запуска и установившейся работы, а так же выбран интервал ограничения рационального значения скольжения, которое обеспечит максимально возможную энергоэффективность.

Научная новизна. Предложен оригинальный способ определения нелинейной переходной функции регулятора напряжения энергосберегающего управления асинхронным приводом с обеспечением допустимой динамики в переходных режимах и косвенной стабилизацией скорости механизмов длительного режима работы и с мало меняющимся графиком нагрузки. Обоснован выбор интервала ограничения рационального значения скольжения и последовательности включения схемы управления в зависимости от текущего режима работы системы электропривода.

Практическая ценность. Использование предложенного регулятора позволит создать автоматическую систему асинхронного привода, благодаря которой возможно достичь сбережения до 47 % активной мощности в случае значительного падения нагрузки.

Ключевые слова: механизмы длительного режима работы, мало меняющийся график нагрузки, поиск и обоснование энергоэффективного управления асинхронным приводом, разработка оригинального метода синтеза регулятора напряжения.

SYNTHESIS METHOD FOR ENERGY EFFICIENT CONTROL OF ASYNCHRONOUS DRIVE OF MECHANISMS WITHOUT DIRECT SPEED STABILIZATION

BORODAI V.A.

PhD in technical sciences, associate professor, associate professor of the Electric Drive department, the National Technical University «Dnipro polytechnic», Dnipro, Ukraine, e-mail: Boroday_va2@ukr.net;

BOROVYK R.O.

Engineer, assistant lecturer of the Electric Drive department, the National Technical University «Dnipro polytechnic», Dnipro, Ukraine, e-mail: borovyk.r.o@nmu.one;

NESTEROVA

O.YU.

PhD in Pedagogy, associate professor of the Translation Department, the National Technical University «Dnipro polytechnic», Dnipro, Ukraine, e-mail: olnesteroval@rambler.ru.

Purpose. Development of a method for the synthesis of power supply voltage regulator for energy-saving control of asynchronous drives of long-term operation mechanisms with a slightly varying load curve and without the need for speed stabilization.

Methodology. For the research, the provisions of the theory of electrical machines, methods of synthesis of automatic systems, mathematical modeling in the MatLab package and methods of statistical analysis were used.

Findings. The method was developed and the voltage regulator of energy-saving control of asynchronous drive was synthesized according to its algorithm under the conditions of load oscillation due to the chaotic change of the technological task and ensuring the permissible dynamics due to the intensity setter, which is installed in series with the regulator. Recommendations are given for the sequence and circuit switching on for the automatic system in the start-up and steady-state operation modes, and also the interval of limiting the rational slip value is selected, which will ensure the highest possible energy efficiency.

Originality. An original method is proposed for determining the transition function of voltage regulator for energy-saving control of an asynchronous drive with the provision of permissible dynamics in transient conditions and indirect stabilization of the speed of long-term operation mechanisms and with a low-variation load curve. The choice of the interval for limiting the rational slip value and the sequence of switching on the control circuit depending on the current mode of operation of the electric drive system is substantiated.

Practical value. The use of the proposed controller will allow the creation of the automatic asynchronous drive system, which can save you up to 47 % of power in case of significant load drop.

Keywords: the long-term operation mechanisms, little variable load schedule, search and justification of energy-efficient control of the asynchronous drive, development of the original method for the voltage regulator synthesis.

REFERENCES

- [1] Barsky, V.A., Beshta, A.S., Gorbachov, N.V., Zagirnyak, M.V., Klepikov, V.B., Lozinsky, O. Yu., Mekhovich, S.A., Peresada, S.M., Sadovoy, A.V., Tolochko, O.I. (2013). Jelektroprivod kak jener-

?sberegajushhij faktor v promyshlennosti i ZhKH Ukrainy [Electric drive as an energy saving factor in the industry and housing and public utilities of Ukraine]. *Energy saving. Energy. Energy audit*, 9(115), 2-11.

- [2] Zhovtnyansky, V.A., Kulik, M.M., Stogniya, B.S. (2006). Strategija jenergosberezhenija v Ukraine: analiticheskispravochnye materialy v 2-h tomah. Obshhie osnovy jenergosberezhenija [Energy saving strategy in Ukraine: analytical and reference materials in 2 volumes. General principles of energy saving]. *Academiperiodic*, 1, 510.
- [3] Klepikov, V.B., Rozov, V.Yu. (2010). O roli jelektroprivoda v reshenii problemy jenergoresursosberezhenija v Ukraine [On the role of the electric drive in solving the problem of energy saving in Ukraine]. *Bulletin of NTU "KPI": issue "Problems of an automated electric drive. Theory and practice"*, 28, 18-21.
- [4] Beshta, O.S., Pivnyak, G.G., etc. (2013). Ekonomichni j ekologichni aspekty kompleksnoi' generacii' ta utylizacii' energii' v umovah urbanizovanyh terytorij. Monografija [Economic and environmental aspects of integrated generation and utilization of energy in urbanized areas. Monograph]. *Dnipropetrovsk, NMU*, 220.
- [5] Kozaruk, A.E., Vasiliev, B.Yu. (2015). Metod i sredstva povyshenija jenergojeffektivnosti mashin i tehnologij s asinhronnym jelektroprivodom [Method and means of improving the energy efficiency of machines and technologies with asynchronous electric drive]. *Bulletin of SUSU. Ser. "Energy"*, 15, 1, 47-53. DOI: 10.14529/power150106. (in Russian).
- [6] <http://www.ruselprom.ru/support/biblioteka-polzovatelya/Elektrodvigateli-7ave-energoberegayushchie-resheniya-kontserna-ruselprom/> (in Russian).
- [7] Bepalov, V.Ja. (2014). Novaja vysokojeffektivnaja serija asinhronnyh dvigatelej 7AVE, ee modifikacii i specializirovannye ispolnenija [New high-performance series of 7AVE asynchronous motors, its modifications and specialized versions]. *Trudy VIII Mezunar. (HIH Vseros.) nauch.-tehn. konf. po avtomatizir. jelektroprivodu. – Saransk*, 239-243. Kobelev, A.S., Kruglikov, O.V., Makarov, L.N. (2014) (in Russian).
- [8] Babokin, G.I. (2005). Ocenka jekonomii jelektricheskoy jenerгии v nereguliruemom asinhronnom jelektro-privode putem pereklyuchenija obmotok statora [Estimation of electrical energy savings in unregulated asynchronous electric drive by switching the stator windings]. *GIAB*. 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekonomii-elektricheskoy-energii-v-nereguliruemom-asinhronnom-elektroprivode-putem-pereklyucheniya-obmotok-statora> (date of the application: 08.07.2019). (in Russian).
- [9] Braslavsky, AND I., Ishmatov, Z.Sh., Polyakov V.N. (2004). Jenergosberegajushhij asinhronnyj jelektroprivod [Energy saving asynchronous electric drive]. *Academy*, 256. (in Russian)
- [10] Vasilev, B. (2014). Structure and three-level inverter control algorithm electric power facilities transportation of hydrocarbons. *Electrotechnic and computer systems*, 15(91), 220-223.
- [11] Kozyaruk, A. (2013). Structure, composition, and control algorithms of high-efficiency electric drives of gas-compressor units. *Russian Electrical Engineering, February, 84, Iss.2., 94-102. DOI: 10.3103/S1068371213020077*. Vasilyev, B.Yu., Kozaruk, A.E. (2013).
- [12] Leznov, B.S. (2013). Chastotno-reguliruemyy jelektroprivod nasosnyh ustanovok [Variable Frequency Electric Pumping Units]. *Engineering*, 176. (in Russian)
- [13] Leznov, B.S. (2006). Jenergosberezhenie i reguliruemyy privod v nasosnyh i vozdushnyh ustanovkah [Energy saving and controlled drive in pump and air units]. *Energoatomizdat*, 256. (in Russian)
- [14] Dzenis, S.E., Shevchenko, V.V., Hanin, O.O. (2015). Vybory asinhronnogo dvigatelya privoda ventiljatora teplovoza s uslovijem obespechenija ego ustojchivoj raboty [Selection of asynchronous motor of drive of diesel locomotive fan with the condition of ensuring its stable operation]. *Collection of scientific works of Kharkiv University of Air Forces*, 4(45), 92-96.
- [15] Kazachkovsky, N.N. (2018). Sopostavlenie zakonov chastotnogo upravlenija na primere preobrazovatelya chastoty Altivar 21 [Comparison of the laws of frequency control. Case study of the frequency converter Altivar 21]. *Girnichaja elektromehaniika that automation*, 100, 69-72.
- [16] Babokin, G.I. (2006). Ocenka jekonomii elektricheskoy jenerгии v sisteme reguljator napryazhenija asinhronnyj dvigatel' [Evaluation of energy saving in the system voltage regulator - asynchronous motor]. *GIAB*. 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekonomii-energeticheskoy-energii-v-sisteme-regulyator-napryazheniya-asinhronnyj-dvigatel-1> (date of the application: 08.07.2019). (in Russian)
- [17] Basharin, A.V. (1982). Upravlenie jelektroprivodam: Uchebnoe posobie dlja vuzov [Drive Management: A Textbook for Universities]. *Energoizdat, Leningrad. Detachment*, 392. Basharin, A.V., Novikov, V.A., Sokolovskiy, G.G. (1982). (in Russian)

УДК 622.276.6:622.245.5:621.314

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ПОГРУЖНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СКВАЖИН

- ХВОЩАН О.В. канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев, Украина, e-mail: khvoshchan@gmail.com;
- ЖЕКУЛ В.Г. канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев, Украина;
- СМИРНОВ А.П. канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев, Украина, e-mail: smirnovap1978@gmail.com

Цель работы. Оценка современного состояния, особенностей конструкции и перспектив развития электроразрядных погружных устройств для обработки скважин.

Методы исследования. Анализ принципа действия и конструктивного исполнения электроразрядных погружных устройств для обработки скважин.

Полученные результаты. Обоснована необходимость использования многоступенчатых схем преобразования энергии электроразрядных погружных устройств для обработки скважин с учетом особенностей электроразрядного воздействия, критических условий обработки призабойной зоны скважины, повышенных требований надежности ко всем блокам погружной части комплекса и удаленности объекта обработки от источника электропитания. Рассмотрены особенности конструкции и характеристик электроразрядных погружных устройств ведущих мировых компаний (Новас (Россия), Blue Spark (Канада), I-Pulse (Франция), Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины), осуществляющих их производство и обработку нефтяных скважин. Установлено, что все действующие устройства имеют блочную структуру, причем непосредственно в зону нефтяного пласта на соединительном кабеле доставляются соединенные блоки зарядного устройства, емкостного накопителя энергии, высоковольтного коммутатора, электродной системы. Установлено, что параметры электрического разряда в установках разных компаний изменяются в широких пределах (разрядное напряжение от 2,5 до 30 кВ, энергия в импульсе от 1 до 2 кДж), коммутирование энергии в разрядной цепи может быть как управляемым, так и неуправляемым, а для преобразования электрической энергии в акустическую используется как электрический взрыв проводника, так и свободный искровой разряд в скважинной жидкости или специально приготовленном водном растворе с заданными в зависимости от условий в скважине электрическими характеристиками. Определены перспективы развития электроразрядного оборудования и технологии для повышения притока нефти в скважины. Выделены коммерческо-экономический, научно-технологический и технический аспекты перспектив развития данного направления в Украине.

Научная новизна. Обоснована необходимость использования многоступенчатых схем преобразования энергии при проектировании электроразрядных погружных устройств для обработки скважин. Определены коммерческо-экономический, научно-технологический и технический аспекты перспектив развития оборудования и технологии для повышения притока нефти в скважины.

Практическая ценность. Анализ технических разработок ведущих мировых компаний в области повышения притока нефти в скважины с использованием высоковольтного электрического разряда позволил определить дальнейшие пути совершенствования отечественной технологии и оборудования, что позволит внести существенный вклад в энергонеизависимость Украины.

Ключевые слова: высоковольтный электрический разряд; электроразрядные погружные устройства; нефтяная скважина; дебит; многоступенчатое преобразование энергии.

І. ВВЕДЕНИЕ

Значительным фактором, определяющим процветание экономики промышленно развитых стран мира, является стабильность рынка углеводородного сырья. Поэтому одной из основных целей, определенных государственной политикой Украины в сфере энергонеизависимости, является наращивание добычи отечественных энергоносителей [1]. Несмотря на это,

максимальная добыча нефти и газа в Украине наблюдалась в середине семидесятых годов прошлого века, после чего на протяжении десятков лет снижалась. В частности, добыча нефти с газоконденсатом в Украине в 2017 году составила 2,098 млн тонн при пиковом значении 14,4 млн тонн в 1972 году. Результатом явилось закрытие большинства отечественных нефтеперерабатывающих заводов и зависимость экономики Украины от поставок нефтепродуктов из стран ближ-

него и дальнего зарубежья.

Существенного увеличения добычи нефти можно достичь введением в эксплуатацию новых скважин. Кроме того, в мировой практике до 30 % текущей добычи нефти и газа достигается благодаря восстановлению недействующих скважин, включая бурение в них наклонных и горизонтальных ответвлений [1], поскольку более половины природных запасов нефти остается не извлеченной из пласта после уменьшения ее притока в действующую скважину.

Одним из многих методов восстановления скважин, достаточно распространенным в разных странах, является электроразрядный. Специальное оборудование позволяет осуществить высоковольтный электрический разряд в жидкости, а возникающие при этом волны давления и другие факторы разрушают и выносят в ствол скважины осадки физико-химического и органического происхождения, накапливающиеся в зоне перфорации скважин, повышая при этом их производительность (дебит) [2]. Данный способ воздействия на объект позволяет повышать производительность не только нефтяных, но и водозаборных, дегазационных, приемистость нагнетательных скважин.

Несмотря на опубликованный обзор [2] сорокалетней истории создания высоковольтных погружных скважинных установок Институтом импульсных процессов и технологий (ИИПТ) Национальной академии наук (НАН) Украины (г. Николаев), многие технические вопросы, касающиеся особенностей их проектирования, остались не освещены. Кроме того, остались нераскрытыми достижения других компаний мира, применяющих электроразрядную технологию для обработки скважин, что может дать ответ о положении отечественных разработок в данном направлении в мировом масштабе.

II. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является оценка современного состояния, особенностей конструкции и перспектив развития электроразрядных погружных устройств для обработки скважин.

III. ОСОБЕННОСТИ СКВАЖИННЫХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ УСТАНОВОК

Подводный электровзрыв [3] представляет собой процесс быстрого (от 1 до 100 мкс) преобразования энергии электрического поля заряженной конденсаторной батареи в механическую работу при подводном искровом разряде или подводном взрыве проводников. Технологический эффект при этом достигается за счет образования ударных волн, волн сжатия, электромагнитного излучения, кавитационных явлений, акустического поля. Как и в любом другом электроразрядном оборудовании, неотъемлемыми частями скважинных электроразрядных установок являются:

- блок емкостных накопителей (конденсаторов), способный заряжаться от источника энергии до но-

минального значения напряжения (от единиц до десятков киловольт) за времена порядка единиц секунд, а разряжаться в сотни тысяч раз быстрее, выдавая в нагрузку токи в десятки килоампер;

- электродная система, в которой осуществляется взрывное преобразование накопленной электрической энергии в акустическую, с требованиями высокого КПД преобразования, надежности контактных соединений, стойкости к воздействию механических возмущений, возникающих при электровзрыве, а также малых индуктивности и активного сопротивления протекающим импульсным токам килоамперного диапазона, как и для других блоков разрядной цепи;

- высоковольтный коммутатор (разрядник), осуществляющий надежное и стабильное подключение блока конденсаторов к электродной системе при достижении номинального напряжения его зарядки;

- зарядное устройство требуемой мощности, преобразующее электрическую энергию питающей сети либо автономного генератора с целью зарядки блока конденсаторов до номинального напряжения.

В то же время, разработка электроразрядного скважинного оборудования должна учитывать ряд особенностей:

- повышенные технические требования к работе блоков, погружаемых в зону нефтяного пласта. Так, в продуктивной зоне скважин рабочая температура может достигать 100 °С и более, гидростатическое давление – 50 МПа, а глубина залегания пласта может находиться в диапазоне от менее 3 до 7 км;

- диаметр нефтяных скважин может находиться в пределах от 75 до 400 мм, что накладывает ограничение к поперечному сечению погружных блоков электроразрядных устройств, имеющих цилиндрическую форму. Кроме того, в процессе эксплуатации в скважине располагается насос с насосно-компрессорными трубами, что также следует учитывать при проведении обработки скважин;

- скважина помимо металлической колонны труб включает в себя также цементное кольцо в заколонном (затрубном) пространстве, которое в процессе ремонтных работ не должно быть повреждено;

- при проведении электроразрядной обработки скважина должна быть заполнена жидкостью (водо-нефтяной эмульсией, водой, растворами поверхностно-активных веществ, кислот и т.д.), причем величина столба и состав жидкости в продуктивной зоне скважины может меняться;

- значительное удаление объекта обработки от места управления электроразрядным оборудованием препятствует визуальному контролю процесса обработки, а доставка погружных блоков устройства и передача энергии от источника к объекту обработки предполагает использование протяженной соединительной линии – кабеля длиной от 3 до 10 км.

Принимая во внимание рассмотренные требова-

ния и ограничения, можно сделать вывод о значительном усложнении конструкции погружных электроразрядных установок в сравнении с традиционными высоковольтными комплексами, что влечет за собой необходимость тщательной научной и конструкторской разработки каждого блока и всей установки в целом.

IV. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ УСТАНОВОК

Идея использования электрического разряда для обработки нефтяных скважин появилась в США в шестидесятых - семидесятых годах двадцатого века [4, 5]. Первые отечественные разработки научных основ электроразрядной обработки призабойной зоны нефтедобывающих скважин, оборудования и технологии, базирующихся на высоковольтном разряде в жидкости, берут свое начало в Институте импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины (бывшее Проектно-конструкторское бюро (ПКБ) электрогидравлики Академии наук УССР) с конца семидесятых годов прошлого столетия [2]. В дальнейшем развитие этого направления учеными США и СССР (а позднее России, Украины, Канады, стран Европы) велось параллельными путями, причем в условиях конкуренции возникали как сотрудничество между ними, так и игнорирование достижений соперников.

На протяжении нескольких десятков лет с разной степенью технической реализации рассматривались следующие концепции исполнения устройств.

В [6] предложено использование электроразрядной установки с расположением электродной системы специальной конструкции на устье скважины. При этом скважина до устья заполняется жидкостью, а насосное оборудование не требует демонтажа и извлечения. Авторы предполагают, что изменением электрических и частотных параметров разряда возможно получить импульсную кавитацию в зоне залегания нефтяного пласта, способствующую притоку нефти в скважину, однако экспериментального подтверждения данной гипотезы на сегодняшний день не существует.

Рассматриваемые ниже конструкции погружных электроразрядных устройств предполагают расположение части блоков непосредственно в зоне обработки скважин и требуют демонтажа стационарного оборудования, находящегося в ней. Поэтому часто электроразрядную обработку проводят в комплексе с другими операциями, сопровождающими капитальный ремонт скважины.

СКБ «Агроприбор» (Украина) [7] и ООО «ЗЕВС-технологии-Р» (Россия) [8] разработали электроразрядные установки для очистки водозаборных скважин (рис. 1), особенностью которых является расположение на поверхности зарядного устройства (ЗУ), емко-

стных накопителей энергии (ЕН) и высоковольтного коммутатора (ВК). Электродная система (ЭС) опускается в зону обработки скважины на специальном высоковольтном малоиндуктивном соединительном кабеле (СК). Недостатком данной конструкции является невозможность обработки продуктивных зон скважины на глубинах свыше 300 м (что исключает ее использование в условиях нефтяных скважин), поскольку коэффициент полезного действия (КПД) преобразования накопленной в ЕН электрической энергии в механическую, выделяющуюся в ЭС, снижается с увеличением активного и реактивного сопротивления, вносимого в разрядный контур кабелем СК. Следует отметить, что похожая идея была выдвинута ранее в [4], однако в качестве ЭС предлагалось использовать высоковольтный кабель со специальной разделкой.

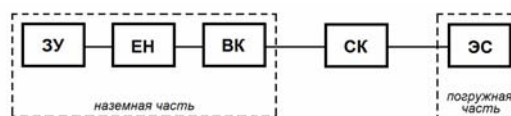


Рисунок 1. Блок-схема электроразрядной скважинной установки с расположением в ее погружной части лишь электродной системы

Значительного повышения КПД установки можно достичь, перенеся блок накопителей ЕН и коммутатор ВК в погружную часть (рис. 2), тем самым резко снизив величину индуктивности и активного сопротивления разрядного контура и увеличив амплитуду волн давления, образующихся в результате электрического разряда в электродной системе ЭС.

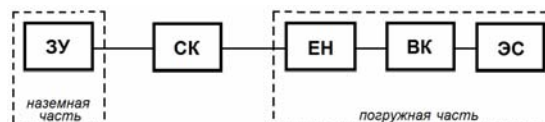


Рисунок 2. Блок-схема электроразрядной скважинной установки с соединением наземной и погружной части высоковольтным соединительным кабелем

В этом случае ЕН, ВК и ЭС должны работать в условиях повышенных скважинных температур и давлений, а также ограниченного объема, определяемого сечением скважины. Однако наибольшие сложности вызывает выбор соединительного кабеля СК, который должен быть высоковольтным (обеспечивать заряд ЕН до номинального напряжения), грузонесущим, работать при высокой температуре и гидростатическом давлении скважинной жидкости с широким диапазоном физико-химических характеристик. Кроме того, барабан с бухтой такого кабеля должен быть долговечным, иметь возможность беспрепятственно доставляться к скважине и обеспечивать возможность многократной доставки погружных блоков устройства на глубину залегания продуктивного пласта. Разработка такого кабеля является дорогостоящей, поэтому

желательно использование наиболее близкого по предъявляемым требованиям грузонесущего кабеля с удовлетворительными электрическими и технологическими характеристиками при некотором усложнении конструкции скважинных установок.

Опыт показал, что из существующих вариантов целесообразно использовать геофизические каротажные кабели, входящие в состав геофизических станций, осуществляющих обслуживание нефтяных скважин в разных странах мира. При необходимости обеспечения напряжения зарядки ЕН от единиц до нескольких десятков киловольт современные геофизические кабели могут передавать напряжение до 1500 В, а зарядную часть установок следует выполнять с использованием многоступенчатой схемы преобразования энергии (рис. 3).

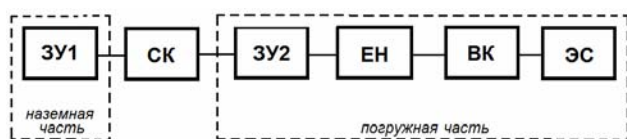


Рисунок 3. Блок-схема электроразрядной скважинной установки с многоступенчатым преобразованием энергии в зарядной цепи

В этом случае в наземном зарядном устройстве ЗУ1 электрические параметры источника входного напряжения преобразуются в выходные, не превышающие номинальные характеристики кабеля СК (напряжение, мощность). Далее электрический сигнал через СК передается в погружное зарядное устройство ЗУ2, повышающее напряжение до номинальной величины зарядки конденсаторов ЕН. На этом базовом принципе в настоящее время проектируются все известные электроразрядные устройства для обработки призабойных зон нефтяных скважин.

V. СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

За полувековой промежуток времени учеными разных стран были проведены различные теоретические исследования в области воздействия электрического разряда на продуктивную зону скважин, предложен ряд технических и технологических решений для его осуществления, изданы сотни патентов и научных статей в различных изданиях. Успешность электроразрядного метода обработки нефтяных скважин обусловила причины появления нескольких компаний, предлагающих использование своего высоковольтного оборудования для повышения их дебита. Коммерческая привлекательность метода вызвала желание большинства этих компаний максимально уменьшить объем технической информации о своих разработках, предлагая в качестве предоставляемых услуг лишь обработку скважин.

Удачный опыт совмещения научной и коммерче-

ской сфер деятельности показывает сотрудничество группы научно-исследовательских институтов Российской академии наук с инвестиционными фондами и крупными промышленными группами (например, ОАО «Газпром нефть», ОАО «Томскнефть-ВНК» и др.), что позволило образованной лишь в 2007 году фирме Novas Energy Services (ООО «Новас Ск», Россия) [9] быстро добиться серьезных успехов, привлечь финансирование государственных (грантовая поддержка национального фонда «Сколково») и международных организаций, провести успешные обработки сотен скважин в России, Европе, США с помощью технологии и оборудования (рис. 4), защищенных международными патентами.



Рисунок 4. Внешний вид погружного устройства фирмы Novas Energy Services [9]

Особенности устройства для реализации технологии плазменно-импульсного воздействия (ПИВ), правообладателем которой является Novas Energy Services [10]:

- электродная система ЭС (см. рис. 3) замыкается металлической проволокой, намотанной на барабане в погружной части устройства. Процесс подачи проволоки в промежуток регулируется с наземного пульта управления. Запаса проволоки хватает на 2000 импульсов без поднятия погружной части устройства на поверхность земли. Ударная волна в ЭС формируется за счет взрыва замкнутой проволоки и выделения энергии, запасенной в ЕН. Контроль качества разряда осуществляется поясом Роговского, подающего импульс на наземный пульт управления. Частота разрядов – не более 2 в минуту;

- запасаемая в ЕН энергия регулируется в диапазоне (1,5 – 2) кДж, номинальное напряжение зарядки (2,5 – 6) кВ;

- разрядник ВК выполнен управляемым. Сигнал поджига ВК подается с наземного источника питания, что позволяет регулировать величину энергии, запасенной в ЕН;

- передаваемое по кабелю СК напряжение варьируется в диапазоне (80 – 300) В, в качестве СК используется многожильный каротажный кабель;

- погружная часть устройства имеет внешний диаметр около 100 мм, длину порядка 2,5 м, массу до 70 кг.

Следующей организацией, применяющей ряд электроразрядных технологий в промышленности (в частности, для повышения притока нефти в скважины) является основанная в 2007 г. французская компания I-Pulse [11]. Специалистами компании выпущен ряд международных патентов (например, [12]), защищающих конструкцию электроразрядного устройства для обработки скважин и его блоков, а входящая в

состав I-Pulse канадская фирма Blue Spark [13], основанная в 2011 г., осуществляет услуги по обработке нефтяных скважин с применением технологии Wireline Applied Stimulation Pulse (WASP), декларируя ее успешность на более чем 300 проектах в Канаде, США, странах Африки, Европы. На сайтах компаний представлены демонстрации лабораторных (рис. 5) и промысловых испытаний, однако конструкция скважинного устройства, его параметры являются, по всей видимости, коммерческой тайной компаний. Практически во всех патентах на метод и устройство для повышения притока нефти в скважины, принадлежащих Blue Spark (например, [14]), по данным вопросам идет ссылка на работы [15, 16], что позволяет сделать некоторые предположения об особенностях разработанного устройства.



Рисунок 5. Внешний вид погружного устройства фирмы Blue Spark [13]

В [15] декларируются следующие особенности конструкции электроразрядного скважинного устройства:

- технологический эффект достигается за счет пробоя межэлектродного незамкнутого промежутка в жидкости, заполняющей ЭС открытого типа с фокусировкой волн давления, обладающей способностью вращения вокруг своей оси в процессе обработки, и выделения в образовавшемся плазменном канале энергии, запасенной в ЕН и передаваемой в погружную часть от наземного источника по СК;

- в случае расположения ЗУ в наземной части устройства [15], зарядка ЕН осуществляется постоянным напряжением через СК неизвестной марки с количеством жил не менее трех (рис. 2), а при размещении ЗУ в погружной части устройства СК подключа-

ют к источнику переменного напряжения 110/220 или 240 В;

- номинальное напряжение зарядки основной батареи ЕН – 3 кВ, емкость – 100 мкФ, в качестве управляемого разрядника ВК, подключающего основную батарею ВН к ЭС, предлагается игнитрон [15]. Пробой межэлектродного промежутка ЭС обеспечивается подключением к нему дополнительной батареи конденсаторов емкостью 4 мкФ с номинальным напряжением зарядки около 30 кВ, возможность осуществления синхронизации разряда двух батарей в микросекундном диапазоне времени не рассматривается. При необходимости величина напряжения зарядки обеих батарей может изменяться, однако способ осуществления такого изменения в промышленных условиях, когда высоковольтная часть оборудования находится в ограниченных условиях скважины на большой глубине, не предлагается.

В [16] более подробно раскрываются процессы, которые могут сопровождать созданный устройством [15] электрический взрыв, вызывающий так называемую авторами электрогидравлическую акустическую вибрацию. Для увеличения зоны воздействия с 1000 до 5000 футов (с 300 до 1500 м) авторы предлагают использовать многоэлектродную систему, каждая пара электродов которой присоединена к своему разрядному контуру в одной или разных скважинах. Для активации продуктивных зон пласта предлагается варьировать частотные характеристики вибрации (которые определены геофизическими исследованиями) путем изменения индуктивности разрядных контуров. ЭС может комплектоваться резиновым рукавом для ограничения попадания жидкости, заполняющей скважину, от воды, прокачиваемой через электродную систему для удаления образующихся в результате разряда газов. Кроме того, электроды ЭС предлагается покрывать специальными сплавами, а для инициирования разряда замыкать межэлектродный промежуток покрытой графитом нитью, намотанной на барабан, либо специально впрыскиваемым газом.

На поверхности в специальной грузовой машине располагают источник питания и устройство контроля установки [16], в скважину на глубину нахождения продуктивной зоны на СК опускают цилиндрический зонд, состоящий из блока гироскопа для контроля зоны проведения обработки, блока преобразования и кондиционирования, блока ЕН, разрядного блока с возможностью вращения вокруг оси.

Согласно опубликованным рекламным материалам, последней разработкой Blue Spark является устройство WASP®212 с внешним диаметром цилиндрического корпуса около 54 мм, работающее при температуре до 130 °С, другие параметры не приводятся.

Единственной организацией, предлагающей услуги по разработке, изготовлению, поставке электроразрядных погружных установок сторонним отечественным и иностранным заказчикам, является ИИПТ

НАН України [2, 17]. Наличие серьезного бюджетного и внебюджетного финансирования в период с восьмидесятых годов прошлого столетия до начала нашего века позволило завершить ряд научно-исследовательских работ, посвященных как исследованию физических процессов, сопровождающих электрический разряд в условиях скважин, так и созданию высокотехнологичного оборудования для их обработки. Результаты работ изложены в ряде отчетов, десятках патентов и научных статей, защищены в диссертациях, воплощены в электроразрядном оборудовании, приобретенном разными заказчиками и эксплуатировавшемся на сотнях скважин во многих странах мира (Украина, Россия, Китай, США, Казахстан и др.).

Изначально остановившись на концепции многоступенчатого преобразования электрической энергии (рис. 3), исследователями ИИПТ были разработаны, испытаны и предложены научно обоснованные конструкции отдельных блоков и всего электроразрядного погружного комплекса в целом.

Результатом комплекса теоретических и экспериментальных исследований высоковольтного разряда в жидкости при повышенных температуре и гидростатическом давлении стала разработка электродных систем закрытого типа с обоснованием параметров заполняющей их жидкости [18]. Анализ электростатических полей, температурных и электродинамических режимов работы [19] дал возможность гарантировать стабильную и надежную работу высоковольтного неуправляемого разрядника, заполненного газообразным азотом. Многолетний опыт конструкторской деятельности с глубоким пониманием физических процессов, сопровождающих заряд и разряд диэлектрических систем, позволил разработать ряд высоковольтных конденсаторов для погружных установок [20]. Согласование параметров наземного и погружного зарядных устройств с характеристиками соединительного кабеля, исследование электрических процессов в зарядных цепях, содержащих протяженную кабельную линию, и тепловых процессов в отдельных элементах позволили снизить массогабаритные показатели электроразрядных погружных комплексов [21].

Первая обработка нефтяных скважин установкой «Скиф-3» произошла в 1983 году в Татарстане (СССР). Современные электроразрядные погружные комплексы типа «Скиф», разработанные в ИИПТ НАН Украины, способны обрабатывать продуктивную зону нефтяных скважин с внутренним диаметром более 124 мм, заполненную любой рабочей жидкостью с температурой в зоне обработки до 100 °С при гидростатическом давлении до 40 МПа. Конструктивно установки состоят из наземной и погружной части. Наземная часть массой не более 20 кг может располагаться в стандартной геофизической станции, подключается к питающей сети либо генератору, которые обеспечивают стандартное для разных стран мира

переменное напряжение от 220 до 480 В частотой 50 или 60 Гц и мощность до 4 кВА. В состав наземной части помимо силового блока преобразования энергии входят системы управления, контроля, индикации текущих параметров. Соединение наземной и погружной частей комплекса может осуществляться одножильным или многожильным стандартным геофизическим кабелем, по которому в зависимости от конструкции комплекса и параметров кабеля может передаваться постоянное или переменное (с частотой 3 кГц) регулируемое напряжение от 300 до 800 В.

Погружная часть имеет блочную цилиндрическую структуру с внешним диаметром корпуса 102 мм, длиной до 4,6 м и массой до 130 кг в сборе. Блок ЕН энергоемкостью 1 кДж заряжается до 30 кВ. В зависимости от конструкции комплекса и параметров скважины, устройство может осуществлять обработку призабойных зон с частотой от 12 до 60 импульсов в минуту.

Внешний вид блоков современного устройства «Скиф-100М» приведен на рис. 6.



Рисунок 6. Электроразрядное погружное устройство «Скиф-100М»

VI. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРИТОКА НЕФТИ В СКВАЖИНЫ

Как показал анализ, успешность использования высоковольтного электрического разряда в нефтяной промышленности многих стран мира не подвергается сомнению. Однако, несмотря на высокую текущую потребность Украины в углеводородных энергоносителях и наличие разработанного отечественного электроразрядного оборудования для повышения добычи нефти из остановленных на ремонт или эксплуатируемых скважин, в настоящее время это направление незаслуженно забыто в нашей стране. Периодическая покупка установок частными фирмами (в основном, зарубежными) не позволяет проводить серьезные исследования, направленные на усовершенствование как технологии, так и оборудования. Поэтому перспективы дальнейшего развития данного направления в Украине состоят из нескольких аспектов.

Коммерческо-экономический аспект. Успешность компаний Новас и I-Pulse (Blue Spark) связана с сотрудничеством научно-технических подразделений

и заинтересованных фирм, осуществляющих добычу нефти и обслуживание нефтяных скважин, с привлечением финансирования, достаточного для осуществления серьезных научных проектов, и реальной поддержкой государства. Поэтому необходимым фактором конечного успеха является активная реклама разработчика оборудования своих проектов и успехов в данной сфере, обсуждение условий взаимовыгодного сотрудничества с отечественными и зарубежными компаниями, владеющими и обслуживающими скважины, подготовка необходимых бизнес-планов с привлечением грантового и других видов бюджетного и внебюджетного финансирования, а также не декларируемое, а реальное содействие соответствующих отечественных государственных структур развитию перспективных научных разработок и науки в целом.

Научно-технологический аспект. Несмотря на успешные в мировой практике проекты, существует ряд слабо изученных вопросов, связанных с дальнейшим развитием технологии добычи неизвлеченной нефти из остановленных на ремонт или снизивших свой дебит скважин. Выполнение совместных теоретических и экспериментальных научно-исследовательских работ с ведущими учеными профильных организаций НАН Украины может вывести отечественную науку на лидирующие мировые позиции в рамках этой технологии. Теоретические исследования взаимного влияния параметров импульсного нагружения, возникающего при электрическом взрыве в жидкости, электрических характеристик погружных установок и самого разряда, комплексной обработки с другими методами, резонансных свойств пористых пород, содержащих нефть, на структуру пласта и реологические параметры нефти, лабораторные испытания на стендах и промышленные на скважинах дадут возможность разработать технологический регламент обработки любой нефтяной скважины.

Технический аспект. Электроразрядные погружные установки, созданные и используемые компаниями в настоящее время, имеют как преимущества, так и недостатки. Поэтому важно, используя мировой опыт, продолжать их усовершенствование. Перспективными выглядят следующие направления модернизации:

- разработка новой конструкции погружной части с уменьшенным внешним диаметром корпуса, устройством определения положения интервала перфорации любого типа скважины (вертикальной, горизонтальной, наклонной) и способа доставки технологического узла комплекса к объекту обработки;

- предложение новых блоков высоковольтного коммутатора и электродной системы с иницированием электрического пробоя для повышения надежности и эффективности обработки скважины;

- разработка новых импульсных конденсаторов с обоснованными электрическими характеристиками на базе современных диэлектрических материалов;

- внедрение систем мониторинга и контроля зарядных и разрядных процессов с возможностью гибкого регулирования технологических параметров процесса обработки;

- поиск путей снижения потребляемой погружным комплексом мощности за счет внедрения систем компенсации ее реактивной составляющей и обоснованного уменьшения времени обработки скважины при усовершенствовании как технологического регламента обработки, так и зарядного устройства комплекса.

ВІІ. ВІСВІДКИ

1. Электроразрядный способ обработки нефтяных скважин является эффективным в использовании и экономически выгодным, что доказано коммерческой успешностью компаний, которые его используют в нефтедобывающей промышленности многих стран мира. Обработку скважин электроразрядным методом собственным оборудованием проводят компании Новас (Россия) и подразделение Blue Spark (Канада) компании I-Pulse (Франция). Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины разрабатывает и продает электроразрядные погружные установки конечным фирмам-заказчикам.

2. Учитывая особенности электроразрядного воздействия и критические условия обработки призабойной зоны скважины, ко всем блокам погружной части комплекса предъявляются повышенные требования надежности, а удаленность объекта обработки от источника электропитания вызывает необходимость использования многоступенчатых схем преобразования энергии при проектировании таких комплексов.

3. Опираясь на научно-технические достижения ведущих мировых компаний в области разработки электроразрядного погружного оборудования, определены дальнейшие пути усовершенствования высоковольтных комплексов для обработки нефтяных скважин, что позволит расширить сферу их применения.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Крижанівський, Є.І. Про наукове забезпечення видобутку вуглеводневої сировини / Є.І. Крижанівський, Д.О. Єгер // Вісн. НАН України. – 2019. – № 6. – С. 48–56.
- [2] Жекул, В.Г. Погружные электроразрядные установки для интенсификации добычи полезных ископаемых / В.Г. Жекул, В.В. Литвинов, Ю.И. Мельхер [и др.] // Нафтогазова енергетика. – 2017. – № 1. – С. 23–31.
- [3] Гулый, Г.А. Научные основы разрядноимпульсных технологий / Г.А. Гулый. – К. : Наук. думка, 1990. – 208 с. – ISBN 5-12-001640-5.
- [4] Pat. No 3180418 USA. Casing Descaling Method and Apparatus / N.A. MacLeod. Patented Apr. 27, 1965.

- [5] Pat. No 4074758 USA. E21B 43/25. Extraction Method and Apparatus / H.W. Scott; Assignee Oil Recovery Corporation. Patented Feb. 21, 1978.
- [6] Малюшевский, П.П. К вопросу о механизме электроразрядной интенсификации притока флюидов в скважины / П.П. Малюшевский, А.П. Малюшевская // Электронная обработка материалов. – 2014. – № 50 (6), С. 66–73.
- [7] Рядов, В.П. Исследование технологических процессов в добыче газа, основанных на электрогидравлическом эффекте / В.П. Рядов, А.П. Агишев, А.Г. Муха, Г.Г. Горovenko // Электрический разряд в жидкости и его применение в технологии машиностроения и металлообработке : [Тезисы докладов I Всесоюзной научно-технической конференции], (Николаев, сентябрь 1976 г.). – К. : Наук. думка. – 1976. – ч. 2. – С. 32.
- [8] ZEVS-tehnologii-R [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.zevs-r.ru>.
- [9] Novas Energy Services [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://novas-energy.ru>.
- [10] Pat. No 2014/018868 A2 WO. H05H 1/24, E21B 43/00. Plasma Source for Generating Nonlinear, Wide-band, Periodic, Directed Elastic Oscillations and a System and Method for Stimulating Wells, Deposits and Boreholes Using the Plasma Source / P.G. Ageev, A.A. Molchanov; Applicant Novas Energy Group Limited. Patented 30.01.2014.
- [11] I-Pulse. Oil-well production optimization [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ipulse-group.com/Oil_Well_Optimization.
- [12] Pat. No 10309206 B2 USA. E21B 28/00, E21B 43/26, E21B 36/04, E21B 43/00, E21B 43/24, E21B 17/00. Well Stimulation Tool Comprising an Articulated Link / M. Delchambre, L. Feriol, G. Onquiert; Assignee ENE29 S.AR.L. Patented Jun. 4, 2019.
- [13] Blue Spark [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bluesparkenergy.com>.
- [14] Pat. No 2016/0348475A1 USA. E21B 41/00, E21B 36/04. Method for Sealing an Opening of a Wellbore Equipment / T. Parker, S. Carroll; Applicant Blue Spark Energy Inc. Patented Dec. 1, 2016.
- [15] Pat. No 4345650 USA. E21B 43/25. Process and Apparatus for Electrohydraulic Recovery of Crude Oil / R.H. Wesley. Patented Aug. 24, 1982.
- [16] Pat. No 6227293 B1 USA. E21B 43/25, E21B 28/00. Process and Apparatus for Coupled Electromagnetic and Acoustic Stimulation of Crude Oil Reservoirs Using Pulsed Power Electrohydraulic and Electromagnetic Discharge / A.R. Huffman, R.H. Wesley; Assignee Conoco Inc. Patented May 8, 2001.
- [17] Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine. Immersion Electrodischarge Device "SKIF-100M". [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ipt.com.ua/dep43_e_4.html.
- [18] Жекул, В.Г. Электроразрядные погружные установки со стабилизированными рабочими параметрами / В.Г. Жекул, И.С. Швец, С.Г. Поклонов // Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 2. – С. 89–91.
- [19] Жекул, В.Г. Исследования стабильности работы высоковольтных газонаполненных неуправляемых разрядников электроразрядных погружных установок / В.Г. Жекул, Ю.И. Мельхер, С.Г. Поклонов [и др.] // Вісник НТУ"ХП". Зб. наук. праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – 2014. – № 21 (1064). – С. 23–31.
- [20] Гребенников, И. Ю. Оценка достигнутого уровня и перспективы создания высоковольтных импульсных конденсаторов погружных электроразрядных комплексов / И.Ю. Гребенников, В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин [и др.] // Электротехника. – 2007. – № 8. – С. 48–51.
- [21] Хвошчан, О. В. Создание высоковольтных погружных систем для повышения дебита скважин / О.В. Хвошчан. – LAP Lambert Academic Publishing, 2018. – 224 с. – ISBN 978-6-139-82519-6.

Стаття надійшла до редакції 03.10.2019

СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ КОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ ЗАГЛИБНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ОБРОБКИ СВЕРДЛОВИН

ХВОЩАН О.В.

канд. техн. наук, старший науковий співробітник Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв, Україна, e-mail: khvoshchan@gmail.com;

ЖЕКУЛ В.Г.

канд. техн. наук, старший науковий співробітник Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв, Україна;

СМІРНОВ О.П.

канд. техн. наук, старший науковий співробітник Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв, Україна, e-mail: smirnovap1978@gmail.com

Мета роботи. Оцінка сучасного стану, особливостей конструкції і перспектив розвитку електророзрядних заглиблених пристроїв для обробки свердловин.

Методи дослідження. Аналіз принципу дії і конструктивного виконання електророзрядних заглиблених при-

строїв для обробки свердловин.

Отримані результати. Обґрунтовано необхідність використання багатоступеневих схем перетворення енергії електророзрядних заглибних пристроїв для обробки свердловин з урахуванням особливостей електророзрядного впливу, критичних умов обробки привибійної зони свердловини, підвищених вимог надійності до всіх блоків заглибної частини комплексу і віддаленості об'єкта обробки від джерела електроживлення. Розглянуто особливості конструкції і характеристик електророзрядних заглибних пристроїв провідних світових компаній (Новас (Росія), Blue Spark (Канада), I-Pulse (Франція), Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України), які здійснюють їх виробництво і обробку нафтових свердловин. Встановлено, що всі діючі пристрої мають блочну структуру, причому безпосередньо в зону нафтового пласта на сполучному кабелі доставляють з'єднані блоки зарядного пристрою, ємнісного накопичувача енергії, високовольтного комутатора, електродної системи. Встановлено, що параметри електричного розряду в установках різних компаній змінюються в широких межах (розрядна напруга від 2,5 до 30 кВ, енергія в імпульсі від 1 до 2 кДж), комутація енергії в розрядному колі може бути як керованою, так і некерованою, а для перетворення електричної енергії в акустичну використовують як електричний вибух провідника, так і вільний іскровий розряд у рідині свердловини або спеціально приготованому водному розчині з заданими в залежності від умов в свердловині електричними характеристиками. Визначено перспективи розвитку електророзрядного обладнання і технології для підвищення припливу нафти в свердловини. Виділено комерційно-економічний, науково-технологічний і технічний аспекти перспектив розвитку цього напрямку в Україні.

Наукова новизна. Обґрунтовано необхідність використання багатоступеневих схем перетворення енергії при проектуванні електророзрядних заглибних пристроїв для обробки свердловин. Визначено комерційно-економічний, науково-технологічний і технічний аспекти перспектив розвитку обладнання та технології для підвищення припливу нафти в свердловини.

Практична цінність. Аналіз технічних розробок провідних світових компаній в області підвищення припливу нафти в свердловини з використанням високовольтного електричного розряду дозволив визначити подальші шляхи вдосконалення вітчизняної технології та обладнання, що дозволить зробити істотний внесок в енергонезалежність України.

Ключові слова: високовольтний електричний розряд; електророзрядні заглибні пристрої; нафтова свердловина; дебіт; багатоступеневе перетворення енергії.

CURRENT STATE AND PERSPECTIVES OF DEVELOPMENT OF DESIGN OF ELECTRIC DISCHARGE SUBMERSIBLE DEVICES FOR TREATMENT OF WELLS

KHVOSHCHAN O.V. Ph.D. in technical sciences, senior researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolayiv, Ukraine, e-mail: khvoshchan@gmail.com;

ZHEKUL V.G. Ph.D in technical sciences, senior researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolayiv, Ukraine;

SMIRNOV A.P. Ph.D in technical sciences, senior researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolayiv, Ukraine, e-mail: smirnovap1978@gmail.com

Purpose. Assessment of the current state, design features and development prospects of electric-discharge submersible devices for well treatment.

Methodology. Analysis of the principle of operation and design of electric-discharge submersible devices for well treatment.

Findings. The necessity of using the multi-stage energy conversion schemes for the electric-discharge submersible devices for well treatment is justified, taking into account the features of electric-discharge effects, critical conditions for processing the bottom-hole zone of the well, increased reliability requirements for all units of the submersible part of the complex and the remoteness of the processing object from the power source. The design features and characteristics of the electric-discharge submersible devices of leading world companies (Novas (Russia), Blue Spark (Canada), I-Pulse (France), the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine engaged in its production and processing of oil wells are considered. It has been established that all operating devices have a block structure, herewith the connected blocks of a charge system, a capacitive energy storage device, a high-voltage switch, and an electrode system are delivered directly to the zone of the oil reservoir on the connecting cable. It was found that the parameters of the electric discharge in the installations of different companies vary within wide limits (discharge voltage from 2.5 to 30 kV, pulse energy from 1 to 2 kJ), energy switching in the discharge circuit can be either controlled or uncontrolled, and to convert electric energy into acoustic energy, an electric explosion of a conductor is used, as well as a free spark discharge in a borehole fluid or a specially prepared aqueous solution with electrical characteristics specified depending on the conditions in the borehole. The prospects for the development of electric discharge equipment and technology to increase the inflow of oil into the wells are determined. The

commercial-economic, scientific-technological and technical aspects of the prospects for the development of this trend in Ukraine are highlighted.

Originality. The necessity of using the multi-stage energy conversion schemes for the design of the electric-discharge submersible devices for well treatment is justified. The commercial-economic, scientific-technological and technical aspects of the prospects for the development of equipment and technology to increase the inflow of oil into the wells are determined.

Practical value. The analysis of the technical developments of leading world companies in the field of increasing oil inflow into wells using a high-voltage electric discharge made it possible to identify further ways to improve domestic technology and equipment, which will make a significant contribution to Ukraine's energy independence.

Keywords: high voltage electrical discharge; electro-discharge submersible devices; oil well; inflow rate; multistage energy conversion

REFERENCES

- [1] Kryzhanivskiy Ye. I., Yeher D. O. (2019) On the Scientific Support of Hydrocarbon Raw Materials Extraction. *Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*, No 6, pp. 48–56.
- [2] Zhekul V. H., Lytvynov V. V., Melkher Yu. I., Smirnov O. P., Taftai E. I., Khvoshchan O. V. and Shvets I. S. (2017) Submersible Electric Discharge Devices for the Intensification of Mining Operations. *Oil and gas power engineering*, No 1, pp. 23–31.
- [3] Gulyy G. A. (1990) Scientific foundations of discharge-pulse technologies. Kyiv, Naukova dumka, 208 p.
- [4] MacLeod N. A. (1965) Casing Descaling Method and Apparatus. Pat. USA No 3180418.
- [5] Scott H. W. (1978) Extraction Method and Apparatus. Pat. USA. No 4074758.
- [6] Malyushevskiy P. P., Malyushevskaya A. P. (2014) To the question of the mechanism of electric-discharge intensification of fluid inflow into wells. *Elektronnaya obrabotka materialov*, Vol. 50, Iss. 6, pp. 66–73.
- [7] Ryadov V. P., Agishev A. P., Mukha A. G., Gorovenko G. G. (1976) Study of technological processes in gas production based on electrohydraulic effect. Abstracts of the I All-Union Scientific and Technical Conference (September 1976). Part 2. Elektricheskiy razryad v zhidkosti i yego primeneniye v tekhnologii mashinostroyeniya i metalloobrabotke, p. 32.
- [8] ZEVS-tehnologii-R [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.zevs-r.ru>.
- [9] Novas Energy Services [Electronic resource]. – Access mode: <http://novas-energy.ru>.
- [10] Ageev P. G., Molchanov A. A. (2014) Plasma Source for Generating Nonlinear, Wide-band, Periodic, Directed Elastic Oscillations and a System and Method for Stimulating Wells, Deposits and Boreholes Using the Plasma Source. Pat. WO No 2014/018868 A2.
- [11] I-Pulse. Oil-well production optimization [Electronic resource]. – Access mode: https://www.ipulse-group.com/Oil_Well_Optimization.
- [12] Delchambre M., Feriol L., Onquiert G. (2019) Well Stimulation Tool Comprising an Articulated Link. Pat. USA No 10309206 B2.
- [13] Blue Spark [Electronic resource]. – Access mode: <https://bluesparkenergy.com>.
- [14] Parker T., Carroll S. (2016) Method for Sealing an Opening of a Wellbore Equipment. Pat. USA No 2016/0348475A1.
- [15] Wesley R. H. (1982) Process and Apparatus for Electrohydraulic Recovery of Crude Oil. Pat. USA No 4345650.
- [16] Huffman A. R., Wesley R. H. (2001) Process and Apparatus for Coupled Electromagnetic and Acoustic Stimulation of Crude Oil Reservoirs Using Pulsed Power Electrohydraulic and Electromagnetic Discharge. Pat. USA No 6227293 B1.
- [17] Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine. Immersion Electrodischarge Device "SKIF-100M" [Electronic resource]. – Access mode: http://www.ipt.com.ua/dep43_e_4.html.
- [18] Zhekul V. G., Shvets I. S., Poklonov S. G. (2006) Discharge submersibles installations with stabilization of operating parameters. *Oil Industry*, No 2, pp. 89–91.
- [19] Zhekul V. G., Melkher Yu. I., Poklonov S. G., Smirnov A. P., Shvets I. S. (2014) Research of the stability of high-voltage gas-filled uncontrolled dischargers of electric-discharge submersible devices. *Visnyk NTU KhPI. Tekhnika ta elektrofizyka vysokykh napruh*, No 21, pp. 23–31.
- [20] Grebennikov I. Ju, Gunko V. I., Dmitrishin A. Ja., Onischenko L. I., Shvets I. S. (2007) Assessment of the achieved level and prospects for the creation of high-voltage impulse capacitors for downhole electric discharge complexes. *Electrical engineering*, No. 8, pp. 48–51.
- [21] Khvoshchan O. V. (2018) Creation of high-voltage submersible systems to increase well production. LAP Lambert Academic Publishing, 224 p.

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ СВАРОЧНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ПЛАЗМЕННОЙ ДУГИ

ВЕРЕЩАГО Е.Н.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры морского приборостроения Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: venmkua@gmail.com;

КОСТЮЧЕНКО В.И.

канд. техн. наук, доцент кафедры судовых электроэнергетических систем Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: vikmkua@gmail.com;

Цель работы. Рассмотрение вопросов, касающихся проблемы устойчивости системы «источник питания – электрическая дуга» при малых возмущениях и её решение в рамках метода малых колебаний. Обсуждение выбора математической модели, изложение эффективного подхода к решению задач устойчивости, основанного на использовании для аналитического описания цепей переменного тока общих уравнений квазистационарных режимов.

Методы исследования. В методологическом плане статья базируется на известных классических положениях общей теории устойчивости. В основном рассматривается устойчивость при малых возмущениях и используются методы, которые базируются на анализе дифференциальных уравнений первого (линейного) приближения, получившие плодотворное применение и развитие в теории автоматического регулирования.

Полученные результаты. Примеры решения конкретных задач устойчивости в аналитической, а также в графической или графоаналитической форме имеют важное значение в становлении и утверждении теоретических положений. В отличие от численных решений они более наглядно иллюстрируют все характерные стороны проблемы. В частности, они являются хорошей иллюстрацией той отличительной стороны задачи об апериодической устойчивости, что её решение зависит исключительно от статических характеристик элементов системы и может быть получено в рамках лишь конечных уравнений, а в качестве критерия устойчивости можно использовать коэффициент сопротивления.

Научная новизна. Получил дальнейшее развитие известный метод применительно к новому объекту исследования – преобразователю с мягким переключением, работающему на электрическую дугу. Уделено отдельное внимание более чёткой постановке задачи и более дифференцированной оценке её приемлемости для заданной технической системы.

Практическая ценность. В связи с непрерывным развитием отдельных систем электропитания значение проблемы их устойчивой работы ещё больше возрастает. Статья может служить реальной основой для конструктивного решения вопросов общей теории устойчивости новых источников питания технологических нагрузок, способствовать созданию благоприятных условий для дальнейшего плодотворного её развития, а также для разработки новых эффективных методов решения конкретных задач, интересующих специалистов в области систем электропитания электротехнологических установок.

Ключевые слова: устойчивость; система электропитания; электрическая дуга; инертность дуги.

1. ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые источники питания большинства современных электротехнологических установок широкого назначения должны обладать характеристиками источников тока [1]–[3]. Практическая их реализация с учётом специфики и режимов работы заставляют по-новому, комплексно решать вопросы разработки систем электропитания технологических установок, уделяя существенное внимание формированию требуемых выходных характеристик, обеспечивающих устойчивую работу системы источник питания – нагрузка.

Наиболее характерный способ построения источников питания средней и большой мощности – это компенсационная стабилизация построением замкну-

тых систем регулирования по току [3] (создание источников тока на основе управляемого преобразователя напряжения). При большом коэффициенте усиления замкнутой системы можно с заданной точностью поддерживать требуемое значение выходного тока при любых внешних воздействиях (изменение параметров нагрузки, напряжения питания и т.д.), а при моделировании импульсного источника питания с управлением по току рассматривать выходную индуктивность как управляемый источник тока и использовать усовершенствованную усреднённую модель источника тока [10], [14]. Это является основой широко используемых моделей [10], [14]. Подчёркнём, что в некоторых приложениях при определённых режимах работы система становится неустойчивой, а простая модель [11]–[14] не предсказывает колебания.

Анализ устойчивости в цепях с электрической дугой можно осуществлять двумя различными способами. В одном случае для дуги можно применять дифференциальное уравнение [13], [14], а для остальной электрической цепи выводить дифференциальные уравнения по общим законам электротехники или же, в другом случае, представить дугу в виде эквивалентной схемы [14]-[16], а цепь в целом рассматривать как некоторую структуру, состоящую из ёмкостей, индуктивностей и сопротивлений. Оба пути могут приводить в разных случаях к наглядному представлению проблем.

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В целом по проблеме устойчивости имеется большое число публикаций как отечественных, так и зарубежных авторов. Так, например, в отечественной литературе широко известны работы Б.Е. Патона, И.В. Волкова, И.В. Пентегова, В.К. Лебедева и др. Интересны работы Г.А. Белова, В.И. Мелешина, О.Г. Булатова. В этих работах заложены теоретические основы проблемы устойчивости преобразователей, работающих на существенно нелинейную нагрузку с резкопеременными параметрами.

Проблема устойчивости системы источник питания – дуга по отношению к малым возмущениям напряжения (тока) неоднократно исследовалась [5]-[9], [11], [12]. При этом большинство известных работ, связанных с расчётом устойчивости, основано на применении статической вольт-амперной характери-

стики дуги [5]-[7]. Такой подход к решению задачи устойчивости не учитывает динамические свойства электрической дуги. Учитывая вышесказанное, остановимся теперь более подробно на устойчивом и неустойчивом состоянии электрической дуги с учётом её динамического состояния и её влияния на электрическую цепь. При этом основные условия с $\theta = 15$ мкс, $R_{дф0} = -0,49$ Ом и $C = C_{кр}$ выбираем так, чтобы могли возникать неустойчивости.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Решение многогранной и весьма сложной проблемы устойчивости системы «источник питания – дуга» в предположении о малости внешних возмущений и допустимости линеаризации. Оценка точности выполняемых расчётов для принятия ответственных инженерных решений.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Поэтому с целью исследования влияния неустойчивости дуги на электрическую цепь рассмотрим цепь, изображённую на рис. 1. Последняя в данном случае состоит из источника тока управляемого напряжением (ИТУН), сопротивления R и ёмкости C , соединённых параллельно с электрической дугой Z_d .

На рис. 1 изображена схема силовой части преобразователя [11], [12], где для общности показано сопротивление R , включенное параллельно конденсатору C .

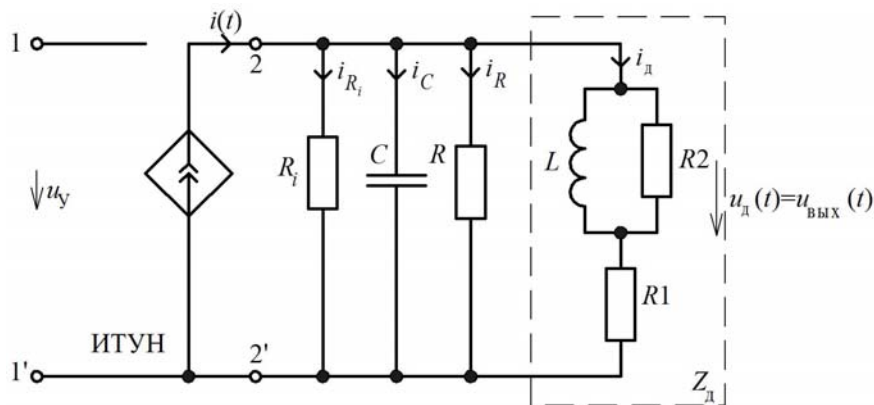


Рисунок 1. Схема замещения цепи «источник тока - дуга» (эквивалентная схема с разомкнутой цепью обратной связи): ИТУН – источник тока, управляемый напряжением; $R_1 = R_{дф0}$; $R_2 = R_{ст0} - R_{дф0}$; $L = \theta(R_{ст0} - R_{дф0})$

Так как рабочая точка находится на падающем участке ВАХ дуги в расчётной схеме – схеме замещения для исследования устойчивости она имитирована в соответствии с [3] дифференциальным сопротивлением $R_{дф0}$ и последовательно с ним включенной паразитной индуктивностью L , зашунтированной активным сопротивлением R_2 .

Составив эквивалентную схему замещения для электрической цепи со сварочной или плазменной

дугой, возбуждаемой током в неразветвленной части цепи (рис. 1), замечаем, что роль частотного коэффициента передачи системы играет комплексное сопротивление (входное сопротивление на переменном токе), включенное параллельно источнику тока:

$$K(j\omega) = Z(j\omega) = -\frac{k_0[j\omega(L/R_{1эк}) + 1]}{A + j\omega B}, \quad (1)$$

где $A = [1 + R_1 / R_{\text{ЭК}} - \omega^2 (1 + R_1 / R_2) LC] ;$
 $B = \{R_1 C + [1 / R_2 + (1 + R_1 / R_2) / R_{\text{ЭК}}] L\} ;$
 $R_{\text{ЭК}} = R_i \parallel R = R_i R / (R_i + R); \quad R_{1\text{ЭК}} = (-R_{\text{дф0}}) \parallel R_2 \square 0;$
 $R_{\text{ЭК}} \gg |R_1|; K(0) = k_0 = |R_1| -$ модуль коэффициента передачи на нулевой частоте или динамические свойства цепи с потерями можно описать, задав её полную проводимость

$$Y_{\Sigma} = \frac{1}{R_i} + j\omega C + \frac{1}{R} + \frac{j\omega\theta + 1}{j\omega R_{\text{ст0}}\theta + R_{\text{дф0}}}.$$

На нулевой частоте частотная передаточная функция (1) отрицательна: $K(0) = -k_0$. Отрицательный знак указывает на то, что при увеличении напряжения на входе ток i возрастает и выходное напряжение уменьшается. Наличие резистора $R_{\text{ЭК}}$ учитывает все виды потерь в системе – неидеальность реактивных элементов, конечное (хотя и достаточно большое) выходное сопротивление источника тока, а также влияние внешних цепей.

Обратим внимание, что в цепи, изображенной на рис. 1, могут возникать периодические автоколебания и хаотические, мало отличающиеся от периодических [8].

Равенство $U_d(s) = Z(s)I(s)$ указывает на то, что передаточной функцией (ПФ) в данном случае служит операторное сопротивление контура.

Для определения характера переходного процесса и записи уравнения свободной составляющей независимой (динамической) переменной $u_{\text{вых}}(t) = u_d(t)$ необходимо располагать характеристическим уравнением цепи. Это уравнение может быть получено из анализа её операторной проводимости относительно зажимов источника тока $Y_{\Sigma}(s) = I(s)/U_{\text{вых}}(s) = 1 / Z(s)$. Последнее может быть получено, если в уравнении для комплексной проводимости цепи $Y_{\Sigma}(j\omega)$ сделать подстановку $j\omega = s$ и приравнять его к нулю.

Для цепи, изображённой на рис. 1, имеем

$$(1 + R_1 / R_2) LC s^2 + \{R_1 C + [1 / R_2 + (1 + R_1 / R_2) / R_{\text{ЭК}}] L\} s + 1 + R_1 / R_{\text{ЭК}} = a_0 s^2 + a_1 s + a_2 = 0.$$

Через a обозначены коэффициенты, зависящие от параметров системы и её режима:

$$a_0 = (1 + R_1 / R_2) LC ;$$

$$a_1 = R_1 C + [1 / R_2 + (1 + R_1 / R_2) / R_{\text{ЭК}}] L ; \quad a_2 = 1 + R_1 / R_{\text{ЭК}}.$$

Легко видеть, что поскольку $R_{\text{ЭК}} \gg |R_{\text{дф0}}|$ (в частности $R_{\text{ЭК}}$ отсутствует, т.е. $R_{\text{ЭК}} \rightarrow \infty$) и поэтому свободный член положителен. Из условия $\text{Re}Z(j\omega) > 0$ при $\omega \rightarrow \infty$ следует, что $R_2 > |R_1|$ ($R_{\text{ст0}} - R_{\text{дф0}} > |R_{\text{дф0}}| > 0$), поэтому коэффициент при s^2 тоже положителен. Система будет устойчивой, если

$$a_1 = R_{\text{дф0}} C + (1 + R_{\text{ст0}} / R_{\text{ЭК}}) \theta > 0,$$

откуда следует

$$|R_{\text{дф0}}| < \theta (1 + R_{\text{ст0}} / R_{\text{ЭК}}) / C. \quad (2)$$

Иными словами, условие, при котором состояние равновесия будет устойчивым сводится к требованию $C < \theta / |R_{\text{дф0}}|$. Величина C должна иметь значение, тем меньше, чем больше $|R_{\text{дф0}}|$. Нарушение условия $a_1 > 0$ приводит к нарушению устойчивости системы, имеющему характер самораскачивания. Очевидно, что рассматриваемая система будет самопроизвольно возбуждаться, если имеющееся в ней отрицательное сопротивление $-R_{\text{дф0}} > -R_{\text{дф0 кр}}$. Отсюда находим критическое значение отрицательного сопротивления:

$$R_{\text{дф0 кр}} = -(\theta / C)(1 + R_{\text{ст0}} / R_{\text{ЭК}}) \approx -\theta / C.$$

В этом случае система находится на границе колебательной устойчивости (корни чисто мнимые). При этом собственные колебания есть гармонические функции вида

$$u_{\text{собр}}(t) = \frac{\sin(\omega_0 t)}{\cos(\omega_0 t)}.$$

Из основного дифференциального уравнения свободного движения для малых колебаний данной цепи, составленного относительно напряжения на дуге $u_d(t)$

$$(1 + R_1 / R_2) LC d^2 u_d / dt^2 + \{R_1 C + [1 / R_2 + (1 + R_1 / R_2) / R_{\text{ЭК}}] L\} du_d / dt + (1 + R_1 / R_{\text{ЭК}}) u_d = 0 \quad (3)$$

можно определять частоту колебания дуги.

Если учесть, что коэффициент при s в начальной точке неустойчивости становится равным нулю, то уравнение (3) даёт уравнение колебания с частотой

$$\omega = \sqrt{1 / (R_{\text{ст0}} C \theta)}.$$

Подставив сюда $\frac{1}{C} = \frac{|R_{\text{дф0}}|}{\theta}$, получим

$$\omega = \frac{1}{\theta} \sqrt{\frac{|R_{\text{дф0}}|}{R_{\text{ст0}}}}. \quad (4)$$

В частном случае, когда статическая ВАХ (СВАХ) дуги описывается уравнением [8]

$$U(i_{\theta}) = U_0 \left(\frac{i_{\theta}}{I_0} \right)^n,$$

либо

$$U(i_{\theta}) = P_0 / i_{\theta},$$

где U_0 и I_0 – координаты одной из фиксированных точек СВАХ дуги; $n = -1 \dots 0$; i_{θ} – ток состояния дуги; P_0 – константа, то, например, для дуги постоянной мощности ($n = -1$)

$$|R_{\text{дф0}}| / R_{\text{ст0}} = 1.$$

Так что уравнение (4) даёт

$$\omega = 1/\theta.$$

Следовательно, напряжение дуги с постоянной времени 15 мкс [5], [6] колебалось бы в случае неустойчивости приблизительно с частотой 10 кГц. Однако это верно только для начальной точки неустойчивости, а в дальнейшем может изменяться как частота, так и форма кривой колебаний [5], [6].

Условие неустойчивости цепи (2) можно записать в приведённом виде

$$-dy/dz = -R_{дф0} > C_*^{-1}, \quad (5)$$

$$\text{где } y = u / U_0; \quad z = i_0 / I_0; \quad R_{дф0} = \frac{R_{дф0} I_0}{U_0};$$

$$C_* = \frac{CU_0}{\theta I_0}.$$

Начиная с момента, когда крутизна динамической характеристики становится настолько большой, что выполняется неравенство (5), нарушается устойчивость. Возникающая неустойчивость приводит к колебаниям как напряжения, так и тока дуги [8].

Очевидно, что наилучшую устойчивость система при данном поддержании тока будет иметь тогда, когда самораскачивание будет устранено.

Из (3), полагая, что внутреннее сопротивление источника $R_i \rightarrow \infty$ и не учитывается влияние внешних цепей, получим

$$R_{ст0} C \theta s^2 + (R_{дф0} C + \theta) s + 1 = 0 \quad (6)$$

или

$$T_1 T_2 s^2 + \left(T_1 + \frac{R_{дф0}}{R_{ст0}} T_2 \right) s + 1 = 0,$$

$$\text{где } T_1 = \theta; \quad T_2 = R_{ст0} C.$$

Введём два обобщенных безразмерных параметра

$$m = T_1 / T_2; \quad b = R_{дф0} / R_{ст0}.$$

Тогда характеристическое уравнение системы (6) приобретает вид

$$T_1 T_2 s^2 + T_2 (m + b) s + 1 = 0, \quad (7)$$

а два его корня имеют значения

$$s_{1,2} = \pm \sqrt{-\left[\frac{m}{T_1^2} - \left(\frac{m+b}{2T_1} \right)^2 \right]} + \frac{-(m+b)}{2T_1} = \pm \gamma_D + \alpha,$$

$$\text{где } \alpha = -\frac{(m+b)}{2T_1} \text{ — коэффициент затухания;}$$

$$\gamma_D = \sqrt{\frac{m}{T_1^2} - \alpha^2} \text{ — частота колебаний.}$$

Колебательный характер переходных процессов в цепи соответствует комплексным значениям корней, что, в свою очередь, справедливо при

$$(m+b)^2 - 4m < 0. \quad (8)$$

Условие (8) выполняется, если выполняются неравенства

$$b > -m - 2\sqrt{m}; \quad b < -m + 2\sqrt{m},$$

что в плоскости параметров b и m соответствует внутренней области, ограниченной кривой на рис. 2. Вне этой области и на её границе корни характеристического уравнения действительные, а переходные процессы имеют аperiodический характер. Коэффициент при втором члене равенства (7) превращается в нуль, если $b = -m$ или $b/m = -1$. Это означает: система консервативна, если значения параметров b и m определяются точками, которые принадлежат прямой OB .

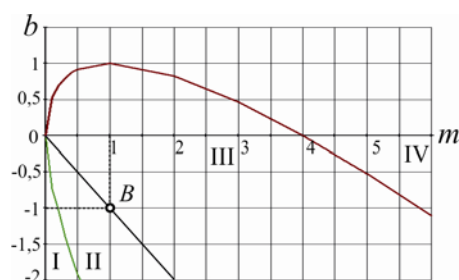


Рисунок 2. Протекание процесса в системе $u_d = f(t)$ после отклонения напряжения на дуге на y_0 : I, II — неустойчивость системы; III, IV — при демпфировании

Кривая разбивает плоскость на четыре области — I, II, III и IV. Особые прямые:

а) $\omega = 0$; отсутствует;

б) $\omega = \infty$; $m = 0$.

При отрицательных вещественных корнях или отрицательных вещественных частях комплексных корней возмущения, характеризующиеся y , с нарастающими на них колебаниями затухают и дуга остаётся устойчивой. Для области колебательных режимов такие процессы имеют место при условии, что $m + b > 0$ или $b/m > -1$, т.е. когда точка статического равновесия, обусловленная параметрами b и m , лежит правее от прямой OB (область III). Левее от прямой OB лежит область расходящегося колебательного процесса — II (самораскачивания). Возмущения со временем усиливаются, дуга отклоняется от квазиустойчивой характеристики и становится неустойчивой. Область IV является действительно областью устойчивости, а область I соответствует расходящимся аperiodическим процессам.

Характер процессов в системе. Возвращаясь к

рассмотрению уравнения системы (3) заметим, что система, определяемая исключительно статическими характеристиками всегда будет собственно статически (апериодически) устойчива. В такой системе малые возмущения не приводят к прогрессирующему изменению (сползанию) параметров её режима. Нарушение устойчивости будет в этом случае носить лишь колебательный характер и определяться из условия: $\theta > -\frac{C}{s_{дф}}$ ($s_{дф} = 1/R_{дф0}$) и только колебатель-

ная устойчивость может иметь самостоятельное прикладное значение.

Применение логарифмических частотных характеристик позволяет внести существенные упрощения при конкретных исследованиях устойчивости. На рис. 3 изображены амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики для рассматриваемой системы.

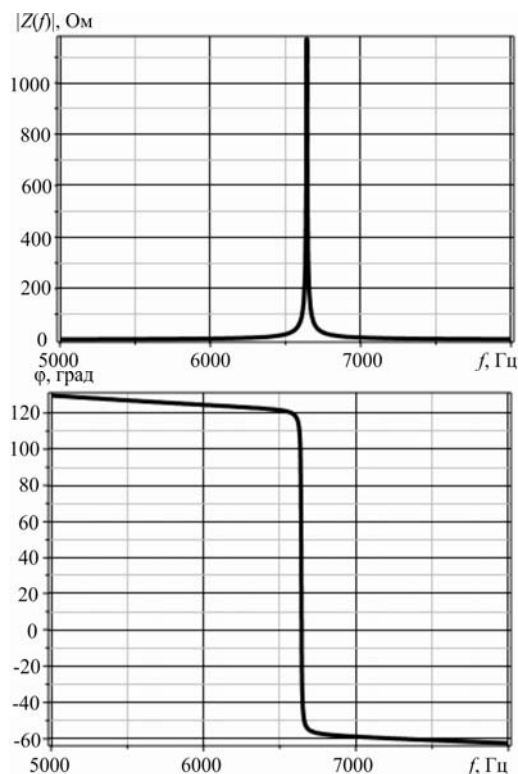


Рисунок 3. Диаграммы Бode: $L = 0,261 \cdot 10^{-4}$ Гн; $R_2 = 1,74$ Ом; $R_1 = -0,49$ Ом; $R = 1000$ Ом; $C = 0,3061 \cdot 10^{-4}$ Ф

Вариация элемента автоматической системы приводит к изменению его передаточной функции, а это в свою очередь вызывает изменение ПФ всей автоматической системы, а значит в конечном итоге, и изменение величин, характеризующих её состояние. Для количественного учёта всех этих изменений служат функции чувствительности [11], [12]. Нетрудно видеть, что чувствительность ПФ (1), например, по параметру C равна

$$S_C^Z(s) = \frac{\partial Z(s)}{\partial C} \frac{C}{Z(s)} = -\frac{s^2(1 + R_1/R_2)LC + sR_1C}{D + E + 1 + R_1/R_{экв}},$$

$$\text{где } D = s^2(1 + R_1/R_2)LC,$$

$$E = s[R_1C + L/R_2 + L(1 + R_1/R_2)/R_{экв}].$$

На рис. 4 приведены характеристики $S_{x_j}^Z(s)$.

В цепях, содержащих электрическую дугу, как отмечалось выше, возможно возникновение автоколебаний. Первая причина их возникновения – многозначность ВАХ дуги [3]. Её можно исключить, если нагрузочная прямая источника питания будет пересекать ВАХ дуги только в одной режимной точке, т.е. при крутой внешней характеристике источника питания, что соответствует как известно [3], [8], неравенству (критерий собственно статической (апериодической) устойчивости):

$$k_c = R_{дф0} - (\partial U / \partial I)_0 > 0, \quad (9)$$

где $\partial U / \partial I = R_{дф и}$ – дифференциальное сопротивление источника питания; k_c – коэффициент сопротивления и по нему можно судить об устойчивости

или в безразмерных переменных $R_{дф и}^* = (dU/dI)_0 / R_{дф0} \ll -1$ ($R_{дф0} < 0$).

Выше показано, что условие (9) заведомо выполняется.

Второе условие принимает вид

$$-R_{дф0}^* < \theta^* \quad (\theta^* = \frac{\theta I_0}{CU_0}).$$

Диаграмма устойчивости показанная на рис. 2 позволяет на этапе проектирования прогнозировать качество функционирования и выбирать соотношения параметров системы для обеспечения устойчивости работы транзисторного преобразователя напряжения.

Заметим, что ответ на вопрос, останется ли процесс хаотическим или установятся периодические субгармонические автоколебания имеет чисто теоретическое значение, поскольку оба этих режима должны быть исключены при расчёте контура.

V. ВЫВОДЫ

Рассматривая структуру свободного члена (3), можно видеть, что режим рассматриваемой системы всегда апериодически (собственно статически) устойчив, т.е. процесс нарушения, имеющий апериодический характер, отсутствует.

Нарушение устойчивости будет в этом случае носить лишь колебательный характер. Если медленное апериодическое нарушение устойчивости в системе невозможно, то достаточно ограничиться только одним этапом в решении полной задачи устойчивости и тем самым сократить объём вычислений.

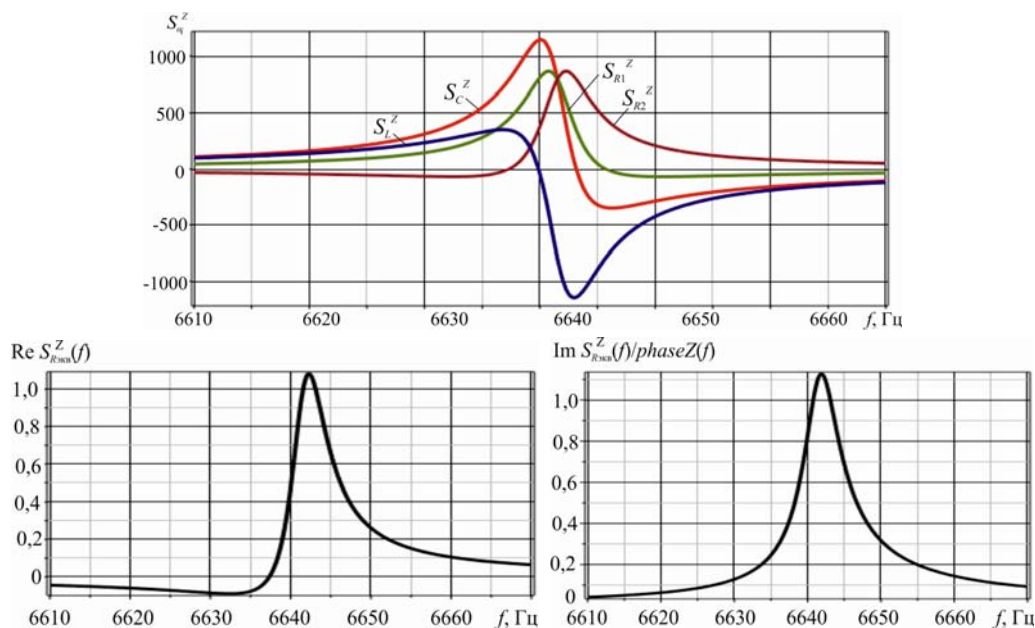


Рисунок 4. Чувствительность передаточной функции к параметрам элементов

Простое дополнение к обычным моделям может значительно улучшить точность и полноценность моделирования управления по току. Это позволяет проектировать источники питания с наивысшими параметрами.

Динамический режим системы «источник питания - дуга» определяется совокупностью значений двух обобщённых параметров: b (отношением дифференциального сопротивления дуги к сопротивлению дуги постоянному току) и m (отношением постоянной времени дуги к электромагнитной).

В пространстве обобщённых параметров b и m в общем случае существуют четыре характерных области динамических режимов (две колебательных и две апериодических).

В работе предложен простой способ графической оценки области устойчивости системы «источник питания - дуга».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Верещаго, Е.Н. Квазирезонансные инверторы в устройствах электропитания для воздушно-плазменной резки [Текст] / Е.Н. Верещаго, И.Ф. Фельдшер, В.И. Костюченко // Технічна електродинаміка. - 2007. Ч. 4. С. 8-11.
- [2] Верещаго, Е.Н. Анализ электромагнитных процессов в FB-ZVS-PS DC-DC конвертере с LCC-контурами [Текст] / Е.Н. Верещаго, В.И. Костюченко, И.Ф. Фельдшер // Вісник Хмельницького національного університету. - 2007. - № 2. - Т. 1. - С. 225-229.
- [3] Верещаго, Е.Н. Схемотехника инверторных источников питания для дуговой нагрузки: [учеб. пособие] / Е.Н. Верещаго, В.Ф. Квасницкий, Л.Н. Мирошниченко, и др. - Николаев: УГМТУ, 2000. - 283 с.
- [4] Костюк, О.М. Элементы теории устойчивости энергосистем [Текст] / О.М. Костюк. - Киев: Наукова думка, 1983. - 296 с.
- [5] Корсунов, К.А. Анализ динамических условий устойчивости электрической дуги в канале плазмотрона / К.А. Корсунов, Г.С. Калужный, Е.Ю. Лыштван // Успехи прикладной физики. Москва. 2015. - Т.3. - №3. - С. 250-253.
- [6] Устойчивость горения электрической дуги [Текст]. - Новосибирск: Ин-т теплофизики АН СССР, 1973. - 151 с.
- [7] Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга [Текст] / Г.И. Лесков. - М.: Машиностроение, 1970. - 335 с.
- [8] Сидорец, В.Н. Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой [Текст] / В.Н. Сидорец, И.В. Пентегов. - Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. - 272 с.
- [9] Mayr O. Uber die Stabilitatsgrenze des Schaltlichtbogens. Report of the international symposium on electrical discharges in gases. Delft, 1955, pp. 1-64.
- [10] Heuvel W.M.C. van den. Interruption of small inductive currents in A.C. circuits. - Diss., Eindhoven, 1966. pp. 99-122.
- [11] Vereshchago Y.N., Kostyuchenko V.I. A physical-mathematical model of the power circuit of a plasma torch. Welding International. 2014. Vol. 28. № 2. Pp. 133-139. DOI: 10.1080/09507116.2013.796664
- [12] Vereshchago E.N., Kostyuchenko V.I. A Simulation Model of Electric Arc. Russian Electrical Engineer-

- ing. 2014. Vol. 85. № 6. Pp. 376-381. DOI: 10.3103/S106837121406011X
- [13] Deisch C.W. Simple switching control method changes power converter into a current Source. IEEE Power Electronics Specialist Conf. 1978 Record. – PP. 300-306.
- [14] Ridley R.B. New Small-Signal Model for Current-Mode Control PhD Diss. Virginia Polytechnic Inst. And State Univ. November, 1990. – 325 p.
- [15] Horowitz I.M. Synthesis of Feedback Systems, Academic Press, 1963. – 740 p.
- [16] Wildrick C.M., Lee F.C., Cho B.M., Choi B. A method of defining the load impedance specification for stable distributed power system // IEEE Transactions on power electronics. – 1995. – Vol.10. – №3. – P. 280-284.

Стаття надійшла до редакції 14.10.2019

АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ І ПЛАЗМОВОЇ ДУГИ

- ВЕРЕЩАГО Є. М. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри морського приладобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: venmkua@gmail.com;
- КОСТЮЧЕНКО В. І. канд. техн. наук, доцент кафедри суднових електроенергетичних систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: vikmkua@gmail.com;

Мета роботи. Розгляд питань, що стосуються проблеми стійкості системи «джерело живлення - електрична дуга» при малих збуреннях і її вирішення в рамках методу малих коливань. Обговорення вибору математичної моделі, викладення ефективного підходу до вирішення завдань стійкості, оснований на використанні для аналітичного опису ланцюгів змінного струму загальних рівнянь квазістаціонарних режимів.

Методи дослідження. У методологічному плані стаття базується на відомих класичних положеннях загальної теорії стійкості. В основному розглядається стійкість при малих збуреннях і використовуються методи, які базуються на аналізі диференціальних рівнянь першого (лінійного) наближення, які отримали плідне застосування і розвиток у теорії автоматичного регулювання.

Отримані результати. Приклади розв'язання конкретних завдань стійкості в аналітичній, а також в графічній або графоаналітичній формі мають важливе значення в становленні і затвердженні теоретичних положень. На відміну від числових рішень вони більш наочно ілюструють всі характерні сторони проблеми. Зокрема, вони є хорошою ілюстрацією тієї відмінної сторони завдання про аперіодичну стійкість, що його рішення залежить виключно від статичних характеристик елементів системи і може бути отримано в рамках лише кінцевих рівнянь, а в якості критерію стійкості можна використовувати коефіцієнт опору.

Наукова новизна. Отримав подальший розвиток відомий метод стосовно нового об'єкту дослідження - перетворювача з м'яким перемиканням, що працює на електричну дугу. Приділено окрему увагу більш чіткій постановці завдання і більш диференційованій оцінці її прийнятності для заданої технічної системи.

Практична цінність. У зв'язку з безперервним розвитком окремих систем електроживлення значення проблеми їх стійкої роботи ще більше зростає. Стаття може служити реальною основою для конструктивного вирішення питань загальної теорії стійкості нових джерел живлення технологічних навантажень, сприяти створенню сприятливих умов для подальшого плідного її розвитку, а також для розробки нових ефективних методів вирішення конкретних завдань, що цікавлять фахівців в області систем електроживлення електротехнологічних установок.

Ключові слова: стійкість; система електроживлення; електрична дуга; інертність дуги.

ANALYSIS OF THE STABILITY OF THE ELECTRICAL POWER SUPPLY SYSTEM OF THE WELDING ELECTRIC AND PLASMA ARC

- VERESHCHAKHO YE.M. PhD in technical sciences, associate professor, associate professor of the Marine Instrument Department of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv, Ukraine, e-mail: venmkua@gmail.com;
- KOSTIUCHENKO V.I. PhD in technical sciences, associate professor of the Marine Electric Power Systems Department of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv, Ukraine, e-mail: vikmkua@gmail.com;

Purpose. Consideration of issues related to the stability problem of the "power source - electric arc" system with

small disturbances and its solution in the framework of the method of small oscillations. Discussion of the choice of a mathematical model, the presentation of an effective approach to solving stability problems, based on the use of general equations of quasistationary modes for the analytical description of AC circuits.

Methodology. In methodological terms, the article is based on the well-known classical principles of the general theory of stability. Basically, stability under small perturbations is considered and methods are used that are based on the analysis of differential equations of the first (linear) approximation, which have received fruitful application and development in the theory of automatic control.

Findings. Examples of solving specific problems of stability in analytical, as well as in graphic or graphoanalytic form, are important in the formation and approval of theoretical principles. Unlike numerical solutions, they illustrate more clearly all the characteristic aspects of the problem. In particular, they are a good illustration of the distinctive side of the aperiodic stability problem that its solution depends solely on the static characteristics of the system elements and can be obtained within the framework of only finite equations, and the resistance coefficient can be used as a stability criterion.

Originality. The well-known method was further developed in relation to a new object of study - a soft-switching converter operating on an electric arc. Special attention has been paid to a clearer formulation of the problem and a more differentiated assessment of its acceptability for the given technical system.

Practical value. In connection with the continuous development of individual power supply systems, the importance of the problem of their sustainable operation is growing even more. The article can serve as a real basis for a constructive solution to the problems of the general theory of stability of new power supplies for technological loads, contribute to the creation of favorable conditions for its further fruitful development, as well as for the development of new effective methods for solving specific problems of interest to specialists in the field of power supply systems of electrotechnological installations.

Keywords: stability; power supply system; electric arc; the arc inertia

REFERENCES

- [1] Vereshhago, E.N., Fel'dsher, I.F., Kostjuchenko, V.I. (2007). Kvazirezonsantnye invertory v ustrojstvakh jelektropitanija dlja vozdušno-plazmennoj rezki [Quasiresonant inverters in power-supply devices for air-plasma cutting]. *Technical electrodynamics*. Ch. 4, 8-11.
- [2] Vereshhago, E.N., Fel'dsher, I.F., Kostjuchenko, V.I., (2007). Analiz jelektromagnitnyh processov v FB-ZVS-PS DC-DC konvertore s LCC-konturami [Analysis of electromagnetic processes in FB-ZVS-PS DC-DC converter with LCC circuits]. *Bulletin of Khmelnytsky National University*. 2 (1), 225-229.
- [3] Vereshhago, E.N., Kvasnickij, V.F., Miroshnichenko, L.N., Pentegov, I.V. (2000). Shemotehnika invertornyh istochnikov pitaniya dlja dugovoj nagruzki. Nikolaev: UGMTU, 283.
- [4] Kostjuk, O.M. (1983). Jelementy teorii ustojchivosti jenergosistem. Kiev. Naukova dumka, 296.
- [5] Korsunov, K.A., Kaljuzhnyj, G.S., Lyshtvan, E.Ju. (2015). Analiz dinamicheskikh uslovij ustojchivosti jelektricheskoy dugi v kanale plazmotrona [Analysis of the dynamic stability conditions of the electric arc in the plasma torch channel]. *Advances in Applied Physics*. Moscow. Ch. 3, 3, 250-253.
- [6] Ustojchivost' gorenija jelektricheskoy dugi (1973). Novosibirsk: In-t teplofiziki ANSSR, 151.
- [7] Leskov, G.I. (1970). Jelektricheskaja svarochnaja duga. Moscow. Mashinostroenie, 335.
- [8] Sidorec, V.N., Pentegov, I.V. (2013). Determinirovannyj haos v nelinejnyh cepjah s jelektricheskoy dugoj. Kiev. Mezhdunarodnaja asociacija «Svarka», 272.
- [9] Mayr, O. (1955). Uber die Stabilitatsgrenze des Schaltlichtbogens. Report of the international symposium on electrical discharges in gases. Delft, 1-64.
- [10] Heuvel, W.M.C. (1966). Interruption of small inductive currents in A.C. circuits. Diss., Eindhoven, 99-122.
- [11] Vereshchago, Y.N., Kostyuchenko, V.I. (2014). A physical-mathematical model of the power circuit of a plasma torch. *Welding International*, 28, 2, 133-139. DOI: 10.1080/09507116.2013.796664
- [12] Vereshchago, E.N., Kostyuchenko, V.I. (2014). A Simulation Model of Electric Arc. *Russian Electrical Engineering*. 85, 6, 376-381. DOI: 10.3103/S106837121406011X
- [13] Deisch, C.W. (1978). Switching control method changes power converter into a current source. *IEEE Power Electronics Specialist Conf.*, 300-306.
- [14] Ridley, R.B. (1990). New Small-Signal Model for Current-Mode Control PhD Diss. *Virginia Polytechnic Inst. And State Univ.*, November, 325.
- [15] Horowitz, I.M. (1963). Synthesis of Feedback Systems, Academic Press, 740.
- [16] Wildrick, C.M., Lec, F.C., Cho, B.M., Choi, B., (1995). A method of defining the load impedance specification for stable distributed power system. *IEEE Transactions on power electronics*. 10, 3. 280-284.

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КОГЕНЕРАЦІЇ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

БЕШТА О.С.

д-р техн. наук, професор, проректор з наукової роботи Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: beshtaa@nmu.one

АЗЮКОВСЬКИЙ О.О.

канд. техн. наук, професор, перший проректор Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», e-mail: azalex@nmu.one

ХУДОЛІЙ Є.П.

молодший науковий співробітник кафедри електропривода Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: eugeniya@ukr.net

ХУДОЛІЙ С.С.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: khudolii.s.s@nmu.one

БАЛАХОНЦЕВ О.В.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: balakhontsev.o.v@nmu.one

Мета роботи. Оцінити економічну привабливість альтернативної енергетики, і, зокрема технології «Vehicle-to-grid» (V2G), тобто використання батарей електромобіля для когенерації в мережу. Визначити економічні показники та умови, за якими ця технологія стане привабливою для власників електромобілів.

Методи дослідження. Для розрахунку економічних показників використані прогнози Національної комісії регулювання електроенергетики України, дані аналітики та виробників електромобілів.

Отримані результати. Виконаний огляд тенденцій в галузі альтернативної енергетики в Україні і, зокрема, електричної мобільності в контексті їх економічної доцільності. Проведено аналіз тарифів на електроенергію, отриману від відновлених джерел і зроблений прогноз щодо частки альтернативної енергетики України в майбутньому. Розглянуті аспекти технології V2G – використання батарей електромобілів як проміжного накопичувача енергії, заряджання їх під час низького нічного тарифу на електроенергію і віддачі в енергомережу для часткового покриття пікового навантаження. Показано, що скорочення терміну служби батарей через збільшення циклів заряду-розряду робить цю ідею непрацездатною за сучасним рівнем тарифу на когенерацію.

Наукова новизна. Доведено, що для забезпечення привабливості технології V2G для власника електромобіля необхідне збільшення ємності акумуляторів електромобілів, підвищення потужності пристроїв заряджання і розряджання та підвищення рівня «зеленого» тарифу або встановлення спеціального тарифу для когенерації від електромобілів.

Практична цінність. Надані числові значення тарифів на електроенергію та параметри заряду-розряду батарей електромобілів, необхідні для техніко-економічного обґрунтування технології когенерації з батареями електромобілів в енергомережу. Визначені межі тарифів та параметри системи, за якими технологія V2G стане самоопукною.

Ключові слова: відновлювана енергетика; зелений тариф; електромобілі; когенерація; техніко-економічне обґрунтування.

І. ВСТУП

Відновлювані джерела та електричні транспортні засоби (ЕТЗ) широко обговорюються у всьому світі. Обидві ці технології часто називають «зеленими», «чистими» або «екологічними». Скорочення викидів CO₂ також є одним з пріоритетів міжнародних організацій, таких як Програма розвитку Організації Об'єднаних Націй.

Тим часом, визнається, що частка відновлювальних джерел енергії в загальному обсязі виробництва

енергії все ще невелика. Більшість країн забезпечують себе енергією шляхом спалювання газу та вугілля, тобто викопного палива, у рідкісних випадках, як у Франції чи Україні, головним енергоресурсом є ядерна енергетика. Електричні транспортні засоби насправді не є «100% зеленими» – вони живляться електроенергією, отриманою від «не зелених» електростанцій. Щоб зробити наше середовище дійсно чистішим, відновлювані джерела енергії повинні бути розгорнуті в набагато більших масштабах, ніж це є зараз.

Відомо, що обидві технології, про які йдеться,

дуже дорогі. Вітрогенератори та фотоелектричні панелі (Photovoltaic panels, PV) не можуть конкурувати з тепловими станціями, коли мова йде про ціну кіловат-годин електроенергії. Ціна на електромобілі стрімко падає, але їх акумулятори все ще залишаються слабкою ланкою. Вони (акумулятори) дорогі, деградують з часом швидше, ніж інші компоненти транспортного засобу, і вимагають переробки.

Саме тому багато міжнародних фондів спільно з владою країн надають фінансові стимули для сприяння відновлюваної енергетики та електричної мобільності. Уряди купують кіловат-години, вироблені відновлюваними джерелами енергії, за високою ціною, а компанії з виробництва електромобілів, як Tesla або Nissan, забезпечують безкоштовну заміну батареї [1].

Україна в цьому відношенні є цікавим випадком – сонячна енергетика підтримується урядом, електромобілі – фактично ні, але обидві технології швидко поширюються. Головне питання – чи будуть відновлювані джерела енергії доцільними, коли державні стимули припиняться.

II. МЕТА РОБОТИ

Необхідно тверезо оцінити економічну віддачу від альтернативної енергетики і, зокрема, використання електромобіля для когенерації в мережу з боку

власника. Для цього слід розрахувати прибуток, який отримуватиме власник електромобіля від когенерації і порівняти його з додатковими витратами на обслуговування електромобіля. За даними розрахунків слід визначити умови окупності технології V2G.

III. ОГЛЯД СКЛАДОВИХ ЗАТРАТ ТА ТАРИФІВ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Що стосується виробництва енергії, то Україна має дещо специфічну позицію. Країна успадкувала важку промисловість та потужну енергетику від Радянського Союзу. Після розпаду останнього, а також економічних та політичних потрясінь, галузь важкої промисловості поступово занепадає [2].

Між тим, електростанції все ще існують. В Україні є потужна річка Дніпро з дев'ятьма гідроелектростанціями, потужність найбільшої з яких (Запорізька гідроелектростанція) – 1,5 млн. кВт. Крім того, є 4 атомні електростанції, в тому числі найбільша – в місті Енергодар, яка має 6 блоків потужністю 1 млн. кВт кожен – вона задовольняє близько 25% енергетичного попиту країни. На рис. 1 [6] показаний прогнозований розподіл виробничих потужностей до 2035 року.

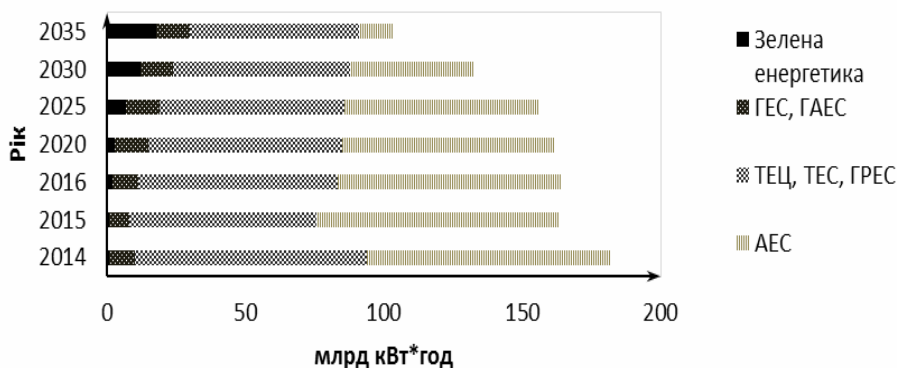


Рисунок 1. Прогноз виробництва енергії за типом в Україні

Саме тому електроенергія в Україні є однією з найдешевших у світі, ціна однієї кВт*год становить приблизно 0,06 євро [3]. Франція, що має найбільшу частку ядерної енергії у світі, також має низьку ціну на електроенергію – 0,1472 євро за кВт*год, що на 26,5% нижче, ніж у середньому в Євросоюзі (0,2002 євро за кВт*год) [4].

Без сумніву, відновлювані джерела енергії не можуть конкурувати з традиційною енергетикою в Україні. Окрім деяких віддалених районів, розташо-

ваних далеко від централізованої мережі, з фінансової точки абсолютно недоцільно встановлювати вітрогенератори або сонячні панелі. Українська влада вибрала свій курс на зелену енергетику та розробила фінансові механізми, що сприятимуть її широкому використанню. Але за певних причин ці механізми стали справді ефективними лише нещодавно, і це спричинило швидке зростання сонячних електростанцій (СЕС) в Україні, як це показано на рис. 2 [5], [6].

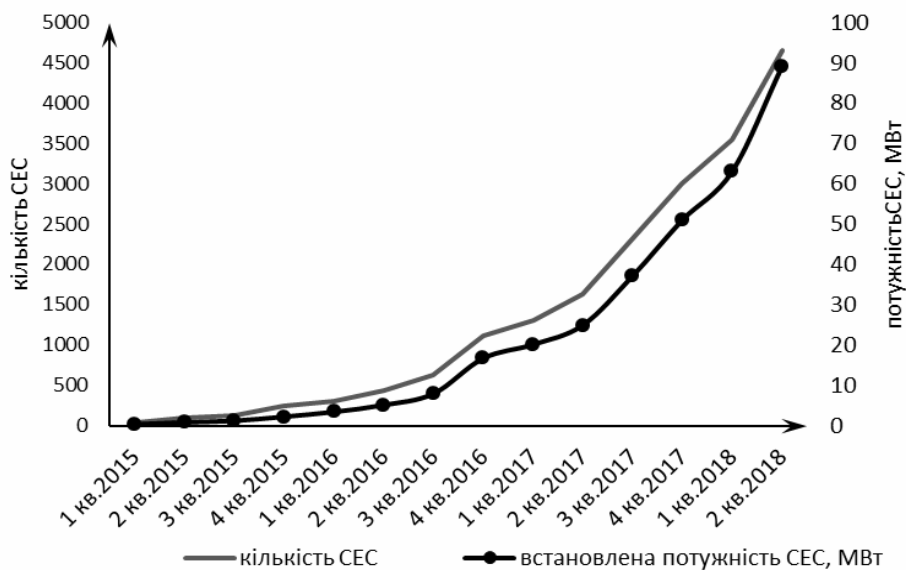


Рисунок 2. Зростання кількості сонячних станцій в Україні

В даний час невелика сонячна станція потужністю 10 кВт коштує приблизно 15 тис. євро, термін окупності становить близько 4-5 років.

З рис. 2 видно, що темпи приросту сонячних станцій в Україні виглядають дуже перспективно, але ситуація насправді не така оптимістична. Зелений тариф, що є основною причиною цього розвитку, поступово знизиться до рівня звичайного тарифу. Ідея полягала в тому, щоб поліпшити технологію відновлюваних джерел енергії завдяки її практичному використанню, і, таким чином, знизити ціни на сонячні та вітрові станції, сприяючи їх широкому виробництву. Тим не менш, слід розуміти, що така політика є фактично фінансовим тягарем для бюджету країни. Наприклад, у Німеччині ця стратегія не спрацювала в повній мірі як очікувалося - країна значною мірою інвестувала у розвиток технології сонячних панелей, але, по-перше, сонячні станції не згенерували стільки

енергії, як це було передбачено, оскільки погода в Німеччині є переважно хмарною, та, по-друге, китайські виробники перехопили технологічні досягнення і вийшли на ринок із нижчими цінами [7].

Тому, врешті-решт, уряди перестануть підтримувати відновлювані джерела енергії за допомогою зелених тарифів. Спочатку співвідношення «зеленого тарифу» та ціни на звичайні кВт*год було 10:1, в даний час воно становить близько 3:1. Очікується, що в певний момент собівартість (але не ціна) відновлюваних кВт*год буде конкурентоспроможною у порівнянні із ціною кВт*год, отриманих від викопного палива. Національна комісія регулювання енергетики та комунального господарства України [3] прогнозує, що це відбудеться у 2030 році. Зелений тариф знижуватиметься, тоді як ціна на звичайні кіловат-години зростатиме, як це показано на рис. 3 [6].

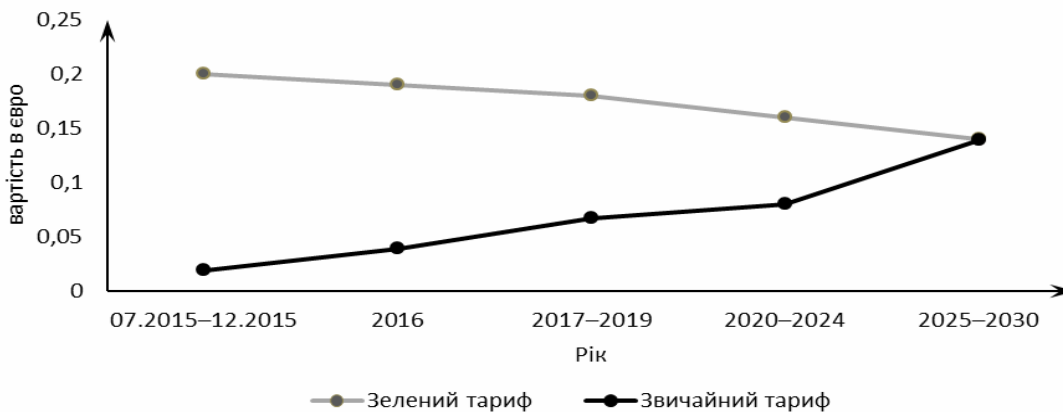


Рисунок 3. Зелений тариф і ціна на звичайну електроенергію в Україні до 2030 року

Таким чином, час спливає. За десять років у нас буде від 5 % до 8 % відновлюваних джерел енергії у загальному обсязі виробництва енергії України. Разом з гідроенергетикою це становитиме до 18% «зеленої» енергії в Україні.

IV. ЕКОНОМІКА ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Рух на електриці надзвичайно дешевий в Україні. Це тому, що 1 літр бензину коштує близько 1 євро, що приблизно дорівнює вартості палива в Європі, а 1 кВт*год електроенергії коштує приблизно 1/6-й її європейської ціни.

Автомобіль-седан середнього розміру потребує близько 16 кВт*год на 100 км, що означає, що проїзд 100 км на електроенергії коштує менше 1 євро, а проїзд на цю відстань на бензині становить 6-8 євро

в міському циклі. Навіть з урахуванням додаткових витрат на технічне обслуговування акумуляторів електромобілів, це ілюструє вражаючу різницю. Саме тому Україна демонструє таке стрімке зростання продажів електромобілів - +402 % у 2017 році (Європа - + 78 %, Китай - + 175 %) [8]. Тим часом продажі звичайних автомобілів скоротились на 68 %, частково через триваючу економічну рецесію, але, головним чином, завдяки очевидним перевагам електромобілів.

Лева частка ринку електромобілів (76 %) належить Nissan Leaf - одному з найдешевших електричних транспортних засобів, хоча ця цифра має тенденцію до зниження (у 2016 році вона становила 87 %), що зображено на рис. 4.

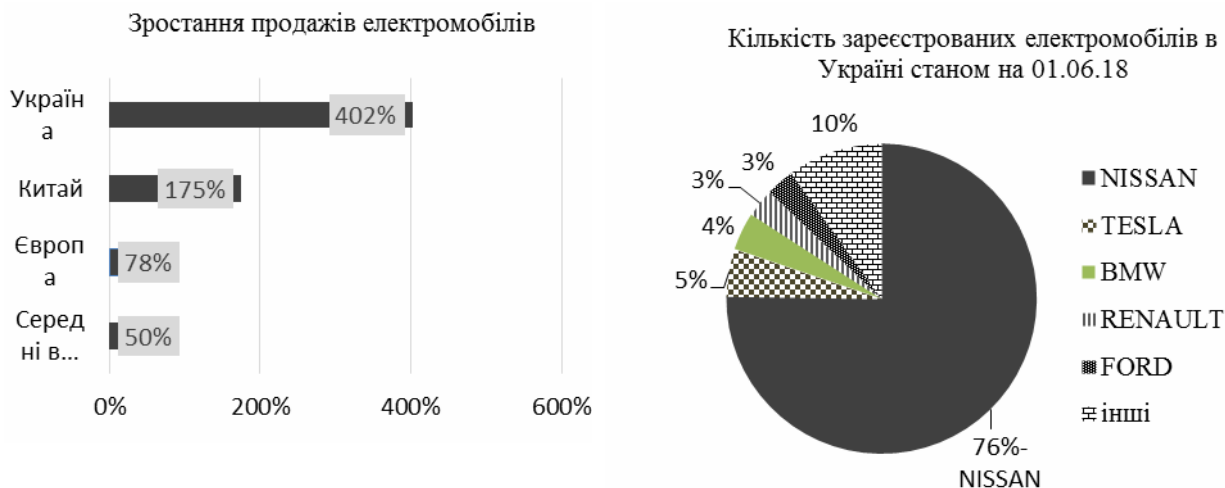


Рисунок 4. Продажі електромобілів в Україні в 2018 році

Слід врахувати, що інфраструктура зарядних станцій в Україні просто не існує. У великих містах є лише декілька станцій швидкої зарядки, а також кілька станцій повільної зарядки. Крім того, уряд не надає ефективної фінансової підтримки для розвитку електричної мобільності в країні. Не зважаючи на це, впевнене зростання кількості електромобілів на дорогах України показує, що електрична мобільність в Україні є де-факто самоокупною.

Можливо, бензинові автомобілі є навіть екологічно чистіші за електричні - бортові каталітичні перетворювачі та інші заходи щодо зменшення шкідливих речовин у сучасних автомобілях часто працюють краще, ніж фільтрувальні пристрої на вугільних електростанціях. Незважаючи на це, електричні транспортні засоби мають одну основну перевагу – гальмування в рекуперативному режимі. Коли автомобіль уповільнюється, частина його кінетичної енергії може бути утилізована і повернута до батареї, що неможливо у випадку бензинових автомобілів. Саме тому електричні транспортні засоби завжди будуть потребувати менше еквівалентних кіло-

ват-годин, ніж звичайні транспортні засоби. Неминуче, звичайні автомобілі перестануть існувати.

V. КОНЦЕПЦІЯ «ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ ЗАСІБ – МЕРЕЖА» (V2G)

Ідея V2G (vehicle-to-grid, електричний транспортний засіб – мережа) полягає в тому, щоб використовувати батареї електричних транспортних засобів як тимчасове місце зберігання електричної енергії, щоб вирівнювати навантаження в електричних мережах [10]. Час стоянки електромобілів, як і більшості звичайних приватних автомобілів – 85 % [11]. Їхні акумулятори можуть бути заряджені в нічний час, коли навантаження на мережу є низьким (і електрика дешева), а потім енергію можна повернути до мережі протягом годин пікового попиту. Вибір часу підходить як для комунальників, так і для власників електромобілів. Енергогенеруючі підприємства можуть отримати користь від згладження кривої попиту, а власники електромобілів можуть заробляти гроші за різницю між тарифами на заряджання і генерацію.

Фактично, такі проекти, як Tesla Powerwall і Tesla Powerpack служать для такої ж мети. Такі великі інвестиції також повинні продемонструвати життєздатність концепції V2G; але справа в тому, що збільшення циклів заряджання знижує термін служби батареї. Питання полягає в тому, чи зможуть власники електромобілів окупити батареї за рахунок прибутку на різниці тарифів.

VI. ПРИКЛАД ДОСЛІДЖЕННЯ: ПРИВАТНА СОЛЯЧНА СТАНЦІЯ ТА КОГЕНЕРАЦІЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

Щоб оцінити рентабельність на стороні спожи-

вача, розглянемо типове господарство середнього класу в Україні. Взимку люди часто використовують електричне опалення на додаток до газових / вугільних або пелетних котлів, та, крім того, витрачають більше енергії на освітлення. Влітку кондиціонер є одним з основних споживачів. Середня широта в Україні становить 48°, а інтенсивність сонячного опромінення - близько 1380 кВт/м² [12]. Графік на рис. 5 ілюструє щоденне споживання у порівнянні з генерацією для типового господарства із сонячною станцією потужністю 10 кВт.

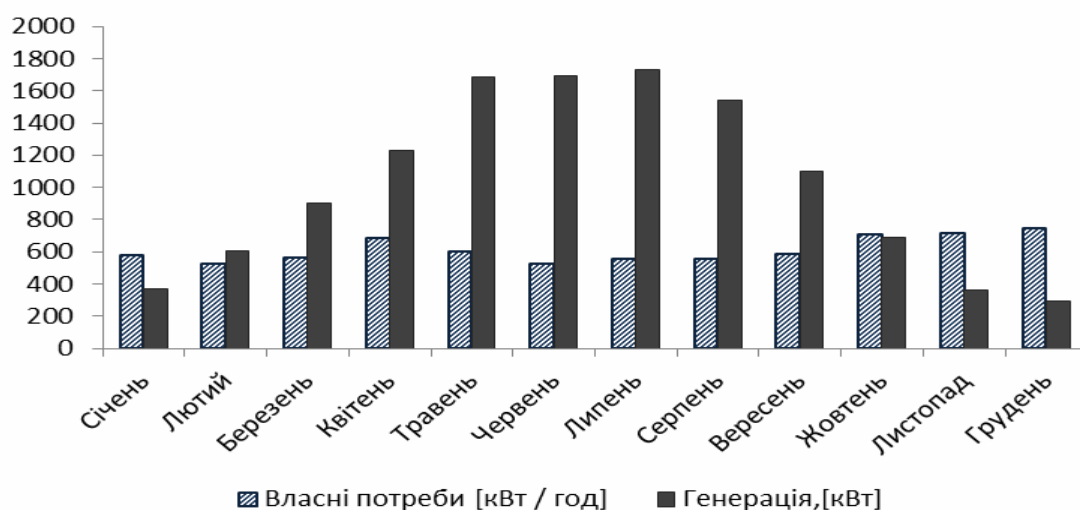


Рисунок 5. Середньодобове споживання типового домогосподарства та виробництво електроенергії (станція 10 кВт)

У табл.1 наведені індикативні фінансові показники для трьох сонячних станцій потужністю 10 кВт,

20 кВт та 30 кВт [3].

Таблиця 1. Окупність сонячних станцій

Індикатор	Потужність сонячної станції [кВт]		
	10	20	30
Вартість станції (з установкою) [EUR]	14489	24155	32500
Щорічне виробництво [кВт]	14747	26269	36657
Середньодобове виробництво [кВт]	72,2	144,4	216,6
Середньодобове споживання за власними потребами * [кВт]	12,1		
Середній валовий дохід за добу [EUR]	9,6	21,2	32,7
Валовий річний дохід [EUR]	3509,8	7726,3	11942,8
Окупність [років]	4,1	3,1	2,7

* Враховуються тільки денні години

Дані показують, що сонячна станція - це хороша інвестиція з періодом окупності 3-4 років. Чим більша потужність станції, тим більше щоденний дохід, оскільки споживання є постійним. Ось чому,

незважаючи на більші капітальні вкладення, окупність більш потужної станції є швидшою.

Щоб оцінити привабливість концепції V2G для типового власника електромобіля, ми припускаємо, що він або вона щодня їздить на роботу, середній

щоденний пробіг становить 68,5 км [11]. Таким чином, необхідно 11 кВт*год. 3 40 кВт-год батареї Nissan Leaf, власник електромобіля має у своєму розпорядженні 29 кВт-год., які можна отримати вночі за дешевим тарифом і продати в мережу під час паркування автомобіля (за умови що є зарядна станція, яка дозволяє когенерувати в енергосистемі). Оскільки зараз для цього немає спеціального

тарифу, ми припускаємо, що власник буде оплачувати за діючими зеленими тарифами. Табл.2 підсумовує розрахунки часу, енергії та грошей на стороні користувача. Зверніть увагу, що 11 кВт/год, необхідні для проїзду в дорогу, не враховуються, оскільки ця енергія, яку власник має використати для подорожі у будь-якому випадку.

Таблиця 2. Розрахунок показників V2G

Час		Потужність та енергія		Гроші	
Щоденне переміщення [год]	2	Ємність акумулятора [кВт*год]	40	Тариф [EUR / кВт*год]	0,03
Час перебування на стоянці [год]	10	Витрати на енергоносії для подорожі [кВт*год]	11	Зелений тариф [EUR / кВт*год]	0,18
Вільний час заряджання вночі [год]	12	Доступна енергія для генерації [кВт*год]	29	Щоденні витрати на оплату * [EUR]	0,87
Фактичний час генерації [год]	7	Потужність заряджання/генерації [кВт]	3	Щоденний прибуток від генерації [EUR]	5,22
Фактичний час заряджання вночі [год]	11	Фактична генерація [кВт*год]	29	Валовий річний дохід [EUR]	1131

* Енергія, необхідна для проїзду, не береться до уваги.

Ми прийняли потужність розряду на рівні 3 кВт, що дорівнює зарядці в «повільному» режимі.

Типовий представник середнього класу приїжджає працювати о 8:00 і виїжджає о 18:00. Це дає десять годин часу на стоянці, або 30 кВт*год, які можна генерувати до мережі. Але він цього не може собі дозволити, тому що потрібен заряд, щоб доїхати додому (не кажучи вже про те, що ніхто не погодиться повністю вичерпати акумулятор). Тому фактичний час генерації менше.

Таким чином, розрахунки показують, що ємність акумулятора є основним обмежуючим чинником. Якщо в автомобілі була б батарея більшої ємності та номінальна потужність була вищою, можна б було використовувати всі доступні вікна часу, і власник отримав би більше прибутку.

Однак, більш важливим є те, що валовий річний дохід не настільки великий, щоб зробити цю ідею привабливою для власника. Найважливішим аспектом, який слід враховувати, є зниження терміну служби батареї через збільшення річних циклів заряду/розряду. Залежність нелінійна, чим глибше розряд, тим швидше знижується акумулятор. За приблизною оцінкою, 300 циклів зарядки знижує ємність акумулятора на 20 % [13]. Припустимо, що власник буде змушений замінити батарею ЕМ, коли її потужність зменшиться до 80 % (що є досить реалістичним припущенням). Використовуючи електромобіль тільки для їзди, термін служби акумулятора становить 4,2 роки. Використовуючи акумулятор для V2G, власник

повинен повністю заряджати і повністю вичерпувати запас енергії щодня, термін служби не буде перевищувати 1,5 роки. Враховуючи високу ціну на акумулятор (приблизно 5000 євро для Nissan Leaf 40 кВт*год.), користувач не отримає ніякого прибутку - весь накопичений прибуток буде витрачено на покупку нової батареї.

Звичайно, це дуже грубий розрахунок. Ми прийняли багато припущень, наприклад, дуже низький тариф на заряджання та дуже вигідний зелений тариф, і все ж це показує, що ця ідея зараз не є життєздатною.

У майбутньому, коли в українських містах з'являться набагато більше електромобілів, що зможуть надати необхідну підтримку енергомережі для вирівнювання навантаження, а також, коли буде присутня інфраструктура заряджання/когенерації на місці, а акумулятори будуть дешевшими, тоді ідея V2G може стати життєздатною.

VII. ВИСНОВКИ

Привабливість відновлюваної енергетики в усьому світі та зокрема в Україні, залежить виключно від державної підтримки. Із зниженням зеленого тарифу, так само буде знижуватись і кількість нових сонячних станцій. Зрештою, вони займуть деяку невелику нішу у виробництві електроенергії в країні і будуть продовжувати повільно зростати.

Електричні транспортні засоби є вигідними для кінцевих користувачів навіть без підтримки уряду.

Незалежно від того, наскільки ціни на паливо/електроенергію зміняться у майбутньому, рекуперативне гальмування завжди буде вирішальною перевагою електромобілів. Усі технологічні тенденції сприяють розвитку електричної мобільності.

Життєздатність концепції V2G залишається сумнівною. Зокрема, в Україні це, швидше за все, не відбудеться через брак інфраструктури та державних стимулів. Коли інфраструктура буде розгорнута в достатньому масштабі, зелений тариф буде вже занадто низьким, щоб зробити його привабливим для власників електромобілів. Для цього необхідні такі тенденції:

- збільшення ємності акумулятора;
- покращення технології швидкої зарядки;
- зниження вразливості акумуляторів до циклів заряджання;
- підвищення різниці нічних та пікових тарифів або встановлення спеціального тарифу на електроенергію, отриману від електромобілів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Car Maintenance. (2019) [Електронний ресурс]. - Режим доступу https://www.tesla.com/en_EU/support/car-maintenance?redirect=no
- [2] Part 1: Instability in a Crucial Country: Stratfor geopolitical survey. (2019). [Електронний ресурс]. - Режим доступу <https://worldview.stratfor.com/article/part-1-instability-crucial-country>
- [3] Тариф на електроенергію в Україні: звіт НКРЕ (2017) [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.nerc.gov.ua/?id=30038>
- [4] Prices for electricity in France (2018) [Електронний ресурс]. - Режим доступу <https://en.selectra.info/energy-france/guides/electricity/cost>
- [5] Статистика по приватним сонячним електростанціям в Україні на кінець 2017 року: статистичний звіт компанії Altec Ltd. [Електронний ресурс]. - Режим доступу <https://altec.in.ua/about/news/korporativnye-novosti/215-statistika-po-chastnym-solnechnym-stanciyam-v-ukraine-na-konec-2017-goda>
- [6] Звіт державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України (2017) [Електронний ресурс]. - Режим доступу <http://saee.gov.ua/uk/ae/sunenergy>
- [7] Moves Toward Green Energy Hamper Germany's Economy. (2019). Retrieved from <https://worldview.stratfor.com/article/moves-toward-green-energy-hamper-germanys-economy>
- [8] Україна входить у Топ-10 країн з продажу електромобілів (2018). [Електронний ресурс]. - Режим доступу <https://www.epravda.com.ua/rus/news/2018/03/13/634925/>
- [9] Yazdanie, M., Noembrini, F., Dossetto, L., & Boulouchos, K. (2014). Corrigendum to «A comparative analysis of well-to-wheel primary energy demand and greenhouse gas emissions for the operation of alternative and conventional vehicles in Switzerland, considering various energy carrier production pathways» [Journal of Power Sources 249 (2014) 333–348]. *Journal Of Power Sources*, 256, 485-486. doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.088
- [10] Vehicle-to-grid. (2019) [Електронний ресурс]. - Режим доступу <https://en.wikipedia.org/wiki/Vehicle-to-grid>
- [11] Electric vehicles in Europe: report of the European Environment Agency (2016). Режим доступу <https://www.eea.europa.eu/publications/electric-vehicles-in-europe/download>
- [12] Енергія Сонця. (2019). [Електронний ресурс]. - Режим доступу <http://saee.gov.ua/uk/ae/sunenergy>
- [13] Arcus, C., & Arcus, C. (2019). Battery Lifetime: How Long Can Electric Vehicle Batteries Last? [Електронний ресурс]. - Режим доступу <https://cleantechnica.com/2016/05/31/battery-lifetime-long-can-electric-vehicle-batteries-last/>
- [14] Beshta, A. Combined power electronic converter for simultaneous operation of several renewable energy sources [Текст]/ Aziukovskyi, O., Balakhontsev, A., & Shestakov, A. (2017). 2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). doi:10.1109/mees.2017.8248898
- [15] Beshta, O. Design of electromechanical system for parallel hybrid electric vehicle. Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems [Текст]/ Balakhontsev, A. & Albu, A. (2013). 29–35. doi: 10.1201/b16355-5

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОГЕНЕРАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

БЕШТА А.С.

д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе Национального технического университета «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: beshtaa@nmu.one;

АЗЮКОВСКИЙ А.А.

канд. техн. наук, профессор, первый проректор Национального технического университета «Днепропетровская политехника», e-mail: azalex@nmu.one;

ХУДОЛЕЙ Е.П.

младший научный сотрудник кафедры электропривода Национального технического университета «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: eugeniax@ukr.net;

ХУДОЛИЙ С.С.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электропривода Национального технического университета «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: khudolii.s.s@nmu.one

БАЛАХОНЦЕВ О.В.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электропривода Национального технического университета «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: balakhontsev.o.v@nmu.one

Цель работы. Оценить экономическую привлекательность альтернативной энергетики и, в частности технологии «Vehicle-to-grid» (V2G), то есть использование батареи электромотовила для когенерации в сеть. Определить экономические показатели и условия, по которым эта технология станет привлекательной для владельцев электромотовилей.

Методы исследования. Для расчета экономических показателей использованы прогнозы Национальной комиссии регулирования електроэнергетики Украины, данные аналитики и производителей электромотовилей.

Полученные результаты. Выполнен обзор тенденций в области альтернативной энергетики в Украине и, в частности, электроической мобильности в контексте их экономической целесообразности. Сделан анализ тарифов на електроэнергию, полученную от возобновляемых источников энергии и сделан прогноз касательно доли альтернативной энергетики в энергогенерации Украины в будущем. Рассмотрены аспекты технологии V2G - использование батареи электромотовилей в качестве промежуточного накопителя энергии, зарядка их во время низкого ночного тарифа на електроэнергию и отдача в энергосеть для частичного покрытия пиковой нагрузки. Показано, что сокращение срока службы батарей из-за увеличения циклов заряда-разряда делает эту идею несостоятельной при текущих уровнях тарифов на електроэнергию.

Научная новизна. Доказано, что для обеспечения привлекательности технологии V2G для владельца электромотовила необходимо увеличение емкости аккумуляторов электромотовилей, повышение мощности заряда и разряда и уровня «зеленого» тарифа или введение специального тарифа для когенерации от электромотовилей.

Практическая ценность. Даны числовые значения тарифов на електроэнергию и параметры заряда-разряда батарей электромотовилей, необходимые для технико-экономического обоснования технологии когенерации от батарей электромотовилей в энергосеть. Определены граничные значения тарифов и параметры системы, при которых технология V2G может стать экономически оправданной.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика; зеленый тариф; электромотовилей; когенерация; технико-экономическое обоснование.

TECHNICAL AND ECONOMIC JUSTIFICATION OF COGENERATION TECHNOLOGY WITH THE USE OF ELECTROMOBILE

BESHTA A.S.

Doctor of technical sciences, professor, vice-rector for science of the National Technical University «Dnipro polytechnic», Dnipro, Ukraine, e-mail: BeshtaA@nmu.one

AZIUKOVSKI A.A.

PhD in technical sciences, professor, chief vice-rector of the National Technical University «Dnipro polytechnic», Dnipro, Ukraine, e-mail: azalex@nmu.one

KHUDOLII E.P.

Junior researcher of the National Technical University «Dnipro polytechnic», Dnipro, Ukraine, e-mail: eugeniax@ukr.net

KHUDOLII S.S.

PhD in technical sciences, associate professor of the National Technical University «Dnipro polytechnic», Dnipro, Ukraine, e-mail: khudolii.s.s@nmu.one

BALAKHONTSEV O.V.

PhD in technical sciences, associate professor of the National Technical University «Dnipro polytechnic», Dnipro, Ukraine, e-mail: balakhontsev.o.v@nmu.one

Purpose. To evaluate the economic attractiveness of alternative energetics, and in particular Vehicle-to-grid (V2G) technology, i.e. the use of an electric vehicle battery for cogeneration into the network. Determine the economic indicators and conditions under which this technology will be attractive to electric vehicle owners

Methodology. The forecasts of the National Electricity Regulatory Commission of Ukraine, analytics data and manufacturers of electric vehicles were used to calculate economic indicators

Findings. The overview of the trends in alternative energetic in Ukraine and, in particular, electric mobility in the context of their economic feasibility is completed. The analysis of electricity tariffs received from renewed sources is carried out and the forecast for the share of alternative energy of Ukraine in the future is made. Aspects of V2G technology are considered - the use of electric vehicle battery as an intermediate energy storage, charging them during low nightly electricity tariff and return to the grid for partial coverage of peak load. It is shown that the shortening of the battery life due to the increase of charge-discharge cycles makes this idea incapable at the current level of cogeneration tariff.

Originality. It is proved that to increase the attractiveness of V2G technology for the electric vehicle owner, it is necessary to increase the capacity of electric vehicle batteries, to increase the capacity of charging and discharging devices and to increase the level of the «green» tariff or set a special tariff for cogeneration from electric vehicles.

Practical value. The numerical values of electricity tariffs and the parameters of charge-discharge of electric vehicle batteries necessary for the feasibility study of cogeneration technology from electric vehicle batteries to the power grid are given. The tariff limits and system parameters for which the V2G technology will become self-sufficient are determined..

Keywords: renewable energy, green tariff, electric vehicles, co-generation, feasibility study

REFERENCES

- [1] Car Maintenance. (2019). Retrieved from https://www.tesla.com/en_EU/support/car-maintenance?redirect=no [Accessed 6 Jun. 2019].
- [2] Part 1: Instability in a Crucial Country: Stratfor geopolitical (2019). Retrieved from <https://worldview.stratfor.com/article/part-1-instability-crucial-country>
- [3] Electricity Tariff in Ukraine: NERC Report Retrieved from <http://www.nerc.gov.ua/?id=30038>
- [4] How Much Does Electricity Cost in France? (2019). Retrieved from <https://en.selectra.info/energy-france/guides/electricity-cost>
- [5] Report of the State Agency for Energy Efficiency and Energy Conservation of Ukraine (2017) Retrieved from <https://alteco.in.ua/about/news/korporativnye-novosti/215-statistika-po-chastnym-solnechnym-stanciyam-v-ukraine-na-konec-2017-goda - 2017>
- [6] Energy of the sun | Ukraine's State Energy Efficiency. (2019). Retrieved from <http://saee.gov.ua/uk/ae/sunenergy>
- [7] Moves Toward Green Energy Hamper Germany's Economy. (2019). Retrieved from <https://worldview.stratfor.com/article/moves-toward-green-energy-hamper-germanys-economy>
- [8] Ukraine is among the top 10 countries for the sale of electric motors <https://www.epravda.com.ua/rus/news/2018/03/13/634925/>
- [9] Yazdanie, M., Noembrini, F., Dossetto, L., & Boulouchos, K. (2014). Corrigendum to «A comparative analysis of well-to-wheel primary energy demand and greenhouse gas emissions for the operation of alternative and conventional vehicles in Switzerland, considering various energy carrier production pathways» [Journal of Power Sources 249 (2014) 333–348]. *Journal Of Power Sources*, 256, 485-486. doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.088
- [10] Vehicle-to-grid. (2019). Retrieved from <https://en.wikipedia.org/wiki/Vehicle-to-grid>
- [11] Electric vehicles in Europe: report of the European Environment Agency (2016). Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/publications/electric-vehicles-in-europe/download>
- [12] Energy of the Sun.. (2019). Retrieved from <http://saee.gov.ua/uk/ae/sunenergy>
- [13] Arcus, C., & Arcus, C. (2019). Battery Lifetime: How Long Can Electric Vehicle Batteries Last? | CleanTechnica. Retrieved from <https://cleantechnica.com/2016/05/31/battery-lifetime-long-can-electric-vehicle-batteries-last/>
- [14] Beshta, A., Aziukovskyi, O., Balakhontsev, A., & Shestakov, A. (2017). Combined power electronic converter for simultaneous operation of several renewable energy sources. *2017 International Conference On Modern Electrical And Energy Systems (MEES)*. doi: 10.1109/mees.2017.8248898
- [15] Beshta, O., Balakhontsev, A., & Albu, A. (2013). Design of electromechanical system for parallel hybrid electric vehicle. *Energy Efficiency Improvement Of Geotechnical Systems*, 29-35. doi: 10.1201/b16355-5

60 ЛЕТ УКРАИНСКОМУ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМУ ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКОМУ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ ИНСТИТУТУ ТРАНСФОРМАТОРСТРОЕНИЯ

Бурное развитие энергетики Советского Союза, начавшееся в пятидесятые годы прошлого столетия, предопределило создание института трансформаторостроения. Оно привело к необходимости создания трансформаторного оборудования повышенной надежности на новые ультравысокие классы напряжения – 750 и 1150 кВ переменного тока ± 400 и ± 800 кВ для ЛЭП постоянного тока.

Для выполнения этих задач 17 августа 1959 года решением Совета Министров СССР был создан Запорожский научно исследовательский институт трансформаторов и высоковольтной аппаратуры (ЗНИИТ-ВА).

В 1963 году институт был передан в подчинение Государственного комитета по электротехнике при Госплане СССР и получил статус Всесоюзного (ВИТ). В 1969 году утвержден научно-техническим центром страны в области трансформаторостроения.

В институте созданы уникальная научно-исследовательская база, экспериментальное производство и коллектив квалифицированных конструкторов, исследователей и технологов, обеспечивших отечественному трансформаторостроению ведущее место в мире.

Институтом совместно с заводами подотрасли создано трансформаторное оборудование предельной единичной мощности в трехфазном исполнении 1250 МВА на 330 кВ и 1000 МВА на 500 кВ;

- групповой мощности 1250 МВА на 750 и 1150 кВ и 2000 МВА на 1150 кВ;

- опытно-промышленные образцы и установочные серии трансформаторного оборудования для ЛЭП постоянного тока на 1500 кВ.

В настоящее время институт продолжает сотрудничать с трансформаторными заводами Украины, стран СНГ и рядом ведущих зарубежных компаний Азии, Европы и Америки.

За разработку и освоение производства современного электротехнического оборудования институт награжден Орденом Дружбы народов; научно-технический вклад ряда ученых и специалистов института отмечен присуждением премий: Ленинской, Государственной СССР, Совета Министров СССР и Государственных премий Украины.

В институте работали и защитили диссертации один доктор и 55 кандидатов наук.

Буквально в считанные годы институт начал интенсивно развиваться. В 1965 году Госпланом СССР и Госкомитетом по электротехнике были выделены необходимые средства и результаты не замедлили сказаться. Проведенные исследования, применение но-

вых материалов, совершенствование расчетных методов проектирования позволили внести радикальные изменения в конструкции трансформаторов. В 60-е годы были внедрены автоматические линии порезки трансформаторной стали, бесшпильная конструкция магнитопроводов, произошли существенные изменения в технологии обмоточного производства, усовершенствованы технологические процессы сушки, сборки, транспортировки и монтажа трансформаторного оборудования. Интенсивно внедрялись прогрессивные активные материалы – новые марки холоднокатанной электротехнической стали, новые виды обмоточных проводов и электроизоляционных материалов.

Это был период, когда большинство разработок института сопровождались словами «впервые в СССР», «впервые в Европе» или даже впервые в мире». В те годы страна переживала настоящий бум энергетического строительства. В исторически короткие сроки возводились крупные гидро- и тепловые электростанции, что требовало резкого повышения напряжения передачи и единичной мощности. В этот период были разработаны уникальные силовые трехфазные трансформаторы для Приднепровской ГРЭС, Братской и Красноярской ГЭС. Спроектированы и переданы в производство первые однофазные и трехфазные автотрансформаторы высокой мощности на напряжение 500 кВ. Для высоковольтных подстанций ЛЭП был разработан целый ряд автотрансформаторов 220, 330 и 500 кВ с использованием созданных институтом устройств регулирования напряжения. Были выполнены работы по освоению оборудования для первой в СССР ЛЭП постоянного тока напряжением ± 400 кВ «Волгоград – Донбас».

70-е и 80-е годы в истории страны принято называть годами застоя, однако именно в это время институт приобрел славу одной из наиболее высокопрофессиональных отраслевых научных организаций. Именно в это время было защищено более 50 кандидатских диссертаций, тематика которых была связана с высоковольтными, электромагнитными, тепловыми, механическими и экономическими исследованиями. Шел интенсивный обмен идеями и результатами исследований на многочисленных научных конференциях, в научно-технических журналах. Введение в строй крупнейшего в Европе высоковольтного зала создало условия для проведения работ по исследованию изоляции трансформаторного оборудования ультравысоких классов напряжения переменного и постоянного тока.

Взросший научно-технический потенциал института позволил приступить к решению новых задач по опережающему обеспечению проектируемых энергетических объектов современными трансформаторами, не уступающим по своим техническим парамет-

рам лучшим мировым образцам, а в ряде случаев и превосходящими их. На основе созданной уникальной научно-производственной базы (фото№1 и фото№2) в институте начались комплексные работы по оборудованию для ЛЭП постоянного тока напряжением ± 750 кВ и переменного тока напряжением 750 и 1150 кВ.



Фото 1. Большой высоковольтный зал ВИТ снаружи. Одна из крупнейших лабораторий мира

Путем создания прототипов трансформаторного

оборудования, прошедших специальные исследования (фото 3), исследователями, конструкторами и технологами института, впервые в мире была решена проблема создания блочных повышающих трансформаторов на напряжение 1150 кВ групповой мощностью 1250 МВА. Также не имели мировых аналогов преобразовательные трансформаторы мощностью 320 МВА и линейные реакторы на напряжение ± 750 кВ для электропередачи постоянного тока (фото 4).

Параллельно с этими перспективными разработками в институте продолжались работы по созданию подстанционных и блочных трансформаторов новых типов. Для мощных энергоблоков 500-1200 МВт были разработаны и поставлены трансформаторы единичной мощности в трехфазном исполнении до 1250 МВА на напряжение 330 кВ и до 1000 МВА на напряжение 220 и 500 кВ, а также в однофазном исполнении до 417 МВА напряжением 750 кВ и 533 МВА на 500 кВ. Для распределительных подстанций – разработана серия автотрансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой в широком сочетании напряжений от 220/110 кВ до 1150/500 кВ (фото 5).



Фото 2. Вид внутри Большого высоковольтного зала

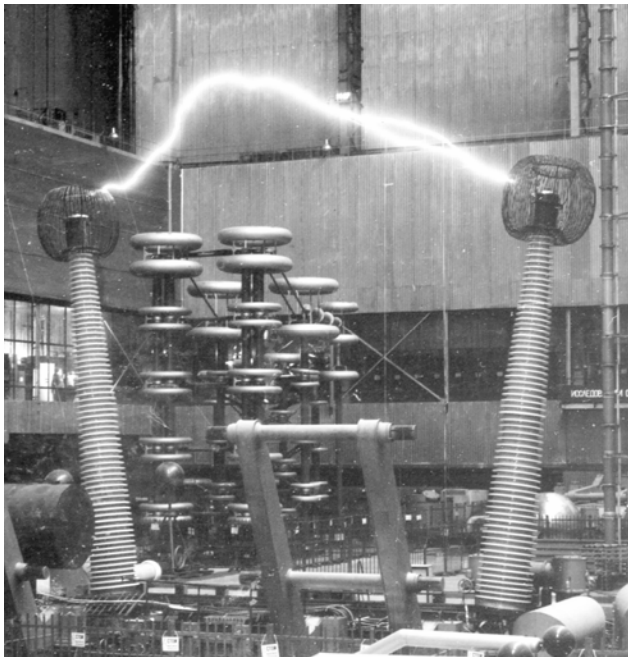


Фото 3. Пробой в воздухе между вводами 1150 кВ в ходе исследований

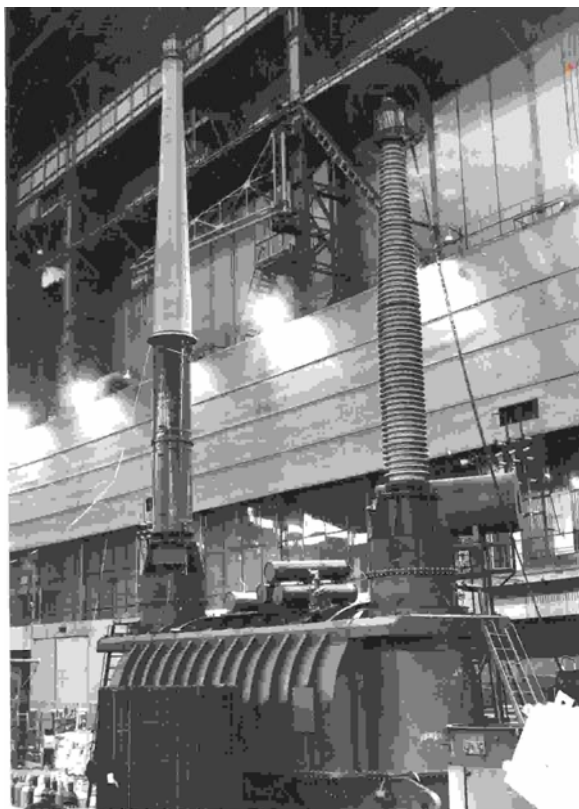


Фото 4. Реактор линейный типа РОЛДЦ - 1200/4/800 для передачи постоянного тока ± 750 кВ с элегазовыми и масляными вводами

Благодаря высокому профессионализму специалистов институт в короткие сроки стал признанным лидером отечественного трансформаторс-

троения (фото 6). Выполняя функции головной организации, ВИТ успешно проводил единую техническую политику путем разработки комплексов отраслевых и государственных стандартов. Особое внимание в 70-е и 80-е годы уделялось созданию математических моделей для расчета физических полей и процессов в силовых трансформаторах. Растущая номенклатура расчетных методик позволила приступить к созданию интегрированной системы автоматизированного проектирования трансформаторов с единой базой входных данных (САПР ТОН).

Значителен перечень партнеров института, привлекавшихся для решения особо сложных проблем, возникающих при разработке трансформаторов, прежде всего, это Всесоюзный электротехнический институт и старейший в стране Московский электрозавод, на котором стажировались молодые запорожские трансформаторщики еще в 50-е годы. По мере усложнения задач к исследовательским работам подключались ведущие научно-исследовательские организации и высшие учебные заведения. Среди них: институт электродинамики АН УССР, Киевский, Ленинградский и Новочеркасский политехнический институты, Всесоюзный институт электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ), Запорожский машиностроительный институт, Харьковский институт радиоэлектроники и ряд других. Тесное творческое взаимодействие осуществлялось с другими головными институтами Минэлектротехпрома.

Росло признание института и за рубежом, что выражалось в участии его специалистов в разработке стандартов и рекомендаций в рамках международных электроэнергетических организаций «ИНТЕР-электро», СИГРЭ и МЭК. В 1972 году конструкторами ВИТ был спроектирован и изготовлен на Запорожском трансформаторном заводе трехфазный автотрансформатор на напряжение 345 кВ для подстанции Ковентри «Дейтройт Эдисон Компани» (США). В 1979 году институт был награжден орденом Дружбы народов за разработку и освоение трансформаторного оборудования для ЛЭП 750 кВ переменного тока «Винница-Альбертирша» (Венгрия).

За почти тридцатилетний период своего существования в условиях социалистической системы хозяйствования и научно-технической политики ВИТ пережил немало структурных преобразований, выпавших на долю отраслевых институтов. Менялась подчиненность, менялись финансово-экономические условия оплаты научно-производственной деятельности, но руководство и коллектив института целенаправленно развивали и совершенствовали накопленный научно-технический потенциал и материальную базу. Такая политика полностью оправдала себя в начале 90-х годов, когда после распада СССР предприятия

и, в первую очередь, отраслевые институты оказались в совершенно новых социально-экономических условиях. Институт перешел в подчинение Министерства промышленной политики, а в 1995 году преобразован в открытое акционерное общество ОАО «ВИТ».

После прекращения централизованного финансирования объем бюджетных поступлений за три года снизился с 35% до 2%. Резко сократились заказы в страны ближнего и дальнего зарубежья. Формально ВИТ остался головной организацией в области разработки трансформаторного оборудования и высоковольтной аппаратуры. Кроме того, институт был аккредитован как Орган по сертификации трансформаторного и высоковольтного оборудования «ВИТ-СЕПРО». Но проблема заказов, а фактически проблема выживания стояла очень остро.

И тем не менее, накопленный научно-технический потенциал, наличие множественных научных и деловых связей как по вертикали, так и по горизонтали позволили институту преодолеть тяжелый период своей истории. Это была настоящая перестройка сознания, приобретение нового опыта существования и развития в рыночных конкурентных условиях. Прежде всего, потребовалось существенно пересмотреть номенклатуру проектно-конструкторских разработок, пользующихся спросом потребителей как в Украине, так и за рубежом. Так появились заказы на трансформаторы специального назначения, реакторы, масляные распределительные трансформаторы низкой мощности и напряжений, блоки открытых распределительных устройств для подстанций 35 и 110 кВ и другой высоковольтной аппаратуры. Затем институт стал получать заказы от энергетиков для решения задач обеспечения надежности функционирования энергетики. Институтские службы занимались ремонтом энергетического оборудования, параллельно совершенствуя их конструкции, поступали заказы и от других предприятий стран СНГ.

Но главным направлением деятельности ВИТа стало освоение зарубежных рынков научной продукции в области трансформаторного оборудования и высоковольтной аппаратуры. Вначале это были контакты со специалистами трансформаторных заводов Израиля, Германии и Китая. Сохранившийся научно-технический потенциал коллектива, предыдущий опыт разработки государственных и международных стандартов, наличие старых связей и приобретение новых на основе участия в различных конференциях и выставках позволили достаточно быстро преодолеть рыночные барьеры. За прошедшее время институт сотрудничал практически со всеми сохранившимися трансформаторными заводами стран СНГ, а также с рядом ведущих за-

рубежных компаний Австралии, Германии, Франции, Швейцарии, Чехии, Словакии, Ирана, Индии, Южной Кореи, Китая, США, Голландии, Австрии. Надежными партнерами института стали фирма «Сименс» (Германия), Хюндай (Корея), трансформаторные заводы в Китае (ТВЕА), фирмы «Кромптон Гривс» (Индия), «Смит» (Нидерланды), «Шнайдер Электрик» (Франция) и ряд других.

В номенклатуре разработок института появились электропечные трансформаторы, основными поставщиками которых во времена СССР были российские изготовители. Жесткая рыночная конкуренция требовала от специалистов ВИТ значительных усилий для разработки и изготовления целой гаммы таких изделий. В 90-е годы по разработке ВИТ были поставлены печные трансформаторы на металлургические предприятия Братска, Никополя, Старого Оскола, Темиртау. Печные комплексы в составе преобразовательных трансформаторов, совмещенных с тиристорными преобразовательными блоками, предназначенные для источников питания сталеплавильных печей постоянного тока были разработаны и поставлены на металлургические комбинаты Украины и России.

Кроме трансформаторов и реакторов возник спрос на другое высоковольтное оборудование. Еще в начале 90-х годов специалисты ВИТ разработали передвижные комплектные трансформаторные подстанции специально для работы в широком диапазоне температур от -50°C до $+40^{\circ}\text{C}$. Эти КТП оказались незаменимыми в экстремальных условиях для восстановления поврежденных участков электроснабжения. На основе предыдущего опыта разработки трансформаторов с элегазовой изоляцией специалисты института выполнили значительный объем работ по созданию новых типов измерительных трансформаторов, а также испытательного оборудования. За последние годы в институте разработаны, изготовлены и переданы заказчикам установки для испытания изоляции различного электротехнического оборудования.

Рыночная конъюнктура способствовала продолжению работ по созданию и освоению производства устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН). По разработкам института ОАО «ZTR» выпускал РПН на токи от 100 до 300 А и напряжения от 35 до 330 кВ, а ООО «Тольяттинский трансформатор» освоил производство устройств РПН на токи от 200 и 300 А для серии трансформаторов 110-220 кВ. На ферросплавных заводах Украины выполнена модернизация реакторных устройств РПН производства Московского электрозавода, увеличившая их ресурс в 30-40 раз за счет применения тиристорных коммутаторов.

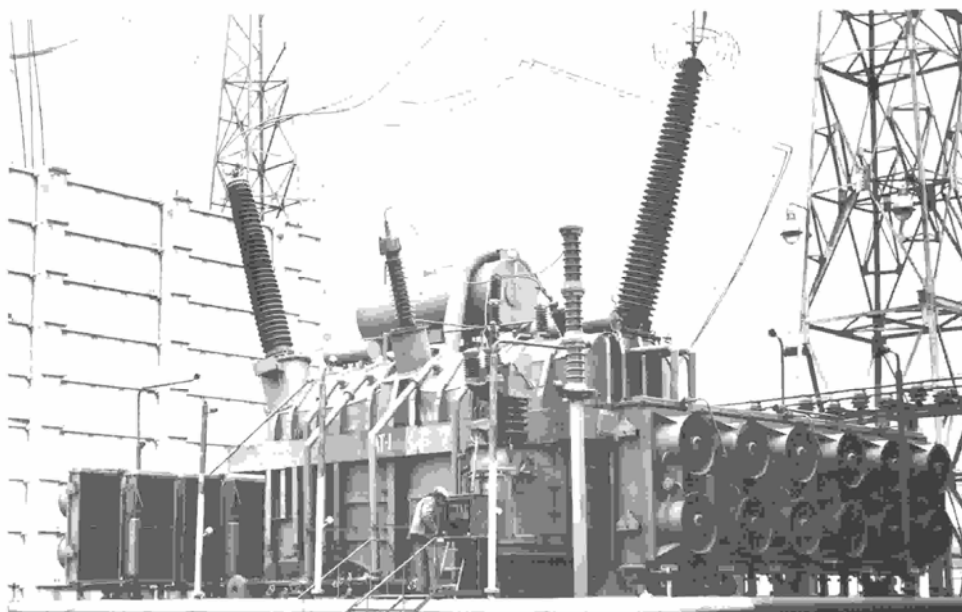


Фото 5. Автотрансформатор типа АОДЦТН-417000/750/500

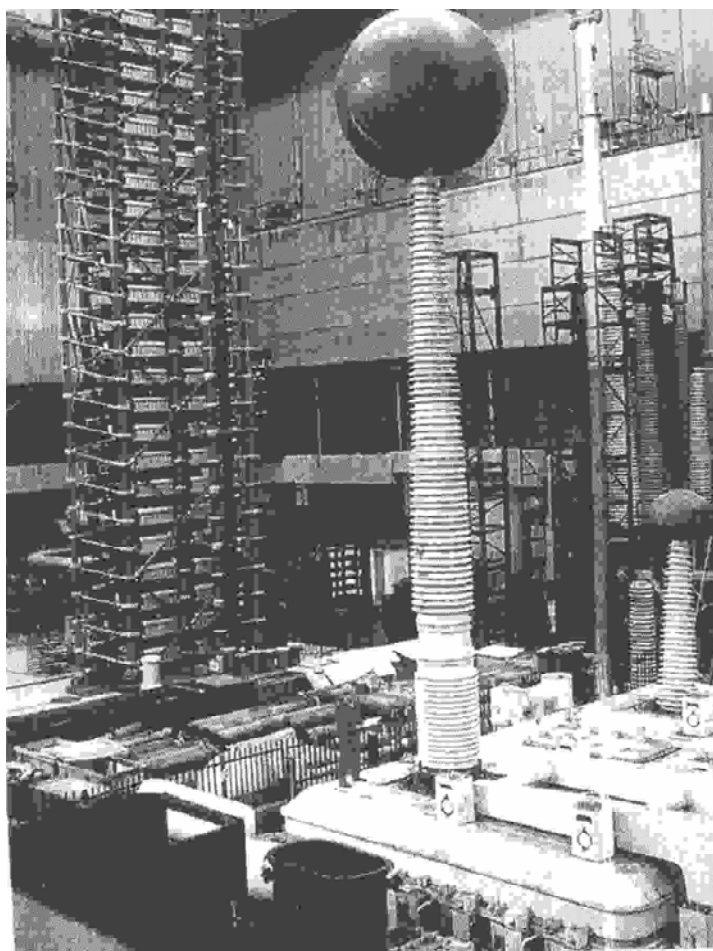


Фото 6. Макетный образец автотрансформатора 1800/500 кВ. Самое высокое напряжение ЛЭП в мире в будущем

В проектировании и освоении новых типов силовых трансформаторов определяющую роль сыграла система автоматизированного проектирования трансформаторов САПР ТОН. В наиболее тяжелые периоды выживания института поступления от продажи программного продукта составляли большую часть институтского бюджета. В начале 90-х годов она была передана по контрактам на трансформаторные заводы Израиля и Германии. Специалисты отдела по разработке САПР ТОН выполняли работы по созданию расчетной подсистемы проектирования трансформаторов по контракту с немецкой фирмой «Сименс». В настоящее время разработана новая версия автоматизированной системы проектирования трансформаторов, обладающая мощными диалоговыми средствами и предназначенная для оптимизации основных размеров активной части трансформатора и технических характеристик по заданной конструктивной схеме. Осуществлена стыковка с графической подсистемой для выпуска технических чертежей, что позволяет полностью автоматизировать процесс расчетного проектирования трансформаторов и автотрансформаторов общего и специального назначения в большом диапазоне напряжений и мощностей. В состав системы входит более 20 прикладных программ расчета электромагнитных, тепловых и электрических полей и процессов в трансформаторах. Специальное программное обеспечение включает программные модули для электромагнитных расчетов трансформаторов и реакторов. На основе интегрированного комплекса САПР ТОН и специального программного обеспечения за последние годы разработано значительное число силовых трансформаторов и реакторов напряжением 220-750 кВ, успешно выдерживавших типовые и приемо-сдаточные испытания.

Нашли свое место на современных рынках и технологи института, разработавшие ряд новых видов технологического оборудования. По заказу Раменского завода была создана автоматическая линия поперечного раскроя электротехнической стали. По заказу Минского трансформаторного завода разработаны и изготовлены модернизированные горизонтально-намоточные станки для намотки обмоток распределительных трансформаторов. ВИТ совместно с ООО «Энергетические технологические системы» разработал и внедрил в энергосистемах Украины и Кыргызстана установки для обработки трансформаторного масла.

Пережив драматические годы распада научно-технических и финансово-экономических связей, в 90-е годы существуя в основном только за счет высокого профессионализма кадров и интенсивной работы по поиску новых рынков сбыта своих раз-

работок, ВИТ к 2001 году предстал перед потенциальными инвесторами вполне работоспособной организацией. Из 90 докладов, представленных на Международной конференции по трансформаторостроению, авторами почти трети из них были специалисты ВИТ. Было очевидно, что коллектив института, преодолев кризисные явления, входил в новый век и новое тысячелетие с полной уверенностью в перспективах своего существования.

Но именно в этот период коллектив института подстерегало новое испытание, выразившееся в попытках рейдерского захвата активов научного центра. Однако на этот раз никакие ухищрения и отработанные на других предприятиях схемы не помогли. Это был, вероятно, самый тяжелый период в истории института, существование которого буквально висело на волоске. Но шумные и назойливые попытки скупить акции у работников института провалились, коллектив ВИТа выстоял и вышел из этой борьбы еще более сплоченным. Вновь сработала убежденность коллектива института и его руководства в правильности основной цели, которая была сформулирована экс-директором ВИТ И.Ю.Мелешко как сохранение, развитие научно-производственного потенциала института и получение портфеля заказов.

В борьбе за контрольный пакет акций руководство ВИТ отдало предпочтение Московской холдинговой компании «Электрозавод», с которой институт сотрудничает в области исследований и разработки нового трансформаторно-реакторного оборудования с момента своего создания. Решение о продаже акций было принято в январе 2006 года, и вскоре новый собственник начал реализовывать свои инвестиционные обязательства. Был заключен договор на проектирование технологического оборудования для строящегося в Уфе предприятия по производству силовых и распределительных трансформаторов. Кроме того, «Электрозавод» заказал институту разработку новых серий двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов.

Специалисты института разработали проекты трех типов силовых трансформаторов, по которым были изготовлены 50 трансформаторов для электрической сети 750 кВ переменного тока в Южной Корее (фото 7).

По разработкам ВИТ южнокорейский завод изготовил элегазовые трансформаторы 154 кВ и мощностью 20 МВА (фото 8). По заказам крупнейших электротехнических фирм мира проводились исследования, связанные с разработками трансформаторного и другого высоковольтного оборудования.



Фото 7. Автотрансформатор АОДЦН – 333350/765/500, изготовленный фирмой Hyundai (Южная Корея) по документации ВИТ



Фото 8. Силовой трансформатор 20 МВА, 154 кВ, заполненный элегазом под давлением

По контракту с английской компанией «AREVA» институт провел исследования электрической прочности тиристорных блоков для ультра-высоковольтной ЛЭП постоянного тока ± 800 кВ в Китае.

Исследования проводились при воздействии импульсного и постоянного напряжения при предельных для испытательного оборудования величинах напряжения 2500 кВ коммутационного импульса и 2000 кВ постоянного напряжения. В ходе испытаний проводилась доработка конструкции вентиля.

Существенный вклад в мировое трансформа-

торостроение институт внес в последнее десятилетие 2009 – 2019 гг. Это относится как к созданию крупнейших трансформаторов высоких классов напряжения, так и специальных трансформаторов.

Например, разработан и изготовлен преобразовательных трансформатор ТЦНПУД – 63000/10 – УХЛЗ, предназначенных для питания выпрямителя постоянного тока 180 кА для печей графитизации АО «УкрГрафит», г. Запорожье. Трансформатор установлен на самоходной платформе, в одном баке расположены 2 активные части, уравнильные реакторы и 2 устройства РПН (фото 9).



Фото 9. Группа испытателей ВИТ на фоне преобразовательного трансформатора ТЦНПУД 63000/10 для питания преобразователя 180 кА печей графитизации

Разработан преобразовательный трансформатор ТНЦП – 17000/10 – УХЛ4 с ПБВ для питания приводов насосных станций газопроводов. Разработка решала ряд проблем, т.к. трансформатор заполняется специальной негорючей жидкостью вместо масла, что потребовало совершенствования методик расчета изоляции и теплового расчета по причине существенного отличия свойств применяемой жидкости от трансформаторного масла.

Для компании «TADEO ZCHERWENY», Ар-

гентина, разработан трехфазный трехобмоточный трансформатор 300 МВА, 500 кВ при условиях максимально возможной локализации материалов и комплектующих, рационализации существующей технологии на заводе компании, ранее не изготавливавшей трансформаторов такого класса напряжения.

Существенные научно-технические проблемы решались при создании силового трансформатора с элегазовым заполнением ОРЭНЦН – 21000/220 –

У1. Бак трансформатора находился под существенным (0,4 МПа) избыточным давлением. Электрическая прочность конструкции и отвод тепла обеспечивался не жидкой, а газовой средой, что потребовало изменений в подходе при решении этих проблем. Условия и технология изготовления трансформатора также были весьма специфичными.

Институт разработал и изготовил групповой трехфазный трехобмоточный трансформатор с РПН ТДТН – 40000/150 для ветроэлектростанции. Определяющее конструктивное требование была максимальная надежность при эксплуатации в условиях ветроэлектростанции.

По заданию МЭЗ институтом была разработана серия двух и трехобмоточных трансформаторов 110 кВ с улучшенными технико-экономическими параметрами.

Серьезный прогресс в создании мощных силовых трансформаторов и автотрансформаторов высших классов напряжения представлен следующими работами:

- Разработан блочный трансформатор ТЦ – 630000/500 – У1 предназначенный для использования в составе блока АЭС. Трансформатор отличаются повышенной надежностью, повышенный уровень

испытательных напряжений при ограничении транспортной массы величиной 300 т.

- По заказу МЭЗ для нужд ФСК был разработан автотрансформатор АОДЦТ – 417000/750/500 – У1. Автотрансформатор предназначен для передачи мощности от ЛЭП 750 кВ в сеть 500 кВ, оснащен ПБВ. Изготовление автотрансформаторов на МЭЗ потребовало существенной рационализации технологических процессов изготовления и обработки активных частей на заводе.

- Для компании «Hyundai», Республика Корея, был разработан однофазный блочный трансформатор 623,5 МВА класса напряжения 765 кВ с ПБВ для эксплуатации в составе блока АЭС мощностью 1400 МВт. Этот трансформатор является самым мощным однофазным трансформатором класса напряжения 765 кВ в мировой практике.

Приближаясь к своему 60 летнему юбилею, руководство и коллектив института выражают удовлетворение объемом и содержанием работ проделанных за прошедшие годы, и надеются на то, что потребность в создании, модернизации ремонте трансформаторного оборудования будет увеличиваться и институт, как и ранее, будет успешно их решать.