



*Науковий журнал*

# **ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА**

**№1'2020**

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

*Виходить 4 рази на рік*

Запоріжжя

2020

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, Кардіфф, 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 № 409 від 17.03.2020 р.)

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 університет 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 національний політехнічний університет, м. Одеса, Україна; **Андрієнко П. Д.**, д-р техн. наук, проф., НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; **Зіновкін В. В.**, д-р техн. наук, проф., НУ «Запорізька політехніка», 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., НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; **Яримбаш С. Т.**, канд. техн. наук, доц., НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; **Шило Г. М.**, д-р техн. наук, доц., НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; **Фурманова Н. І.**, канд. техн. наук, доц., НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; **Пархоменко А. В.**, канд. техн. наук, доц., НУ «Запорізька політехніка», 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, каталогів та систем пошуку:** *Index Copernicus, 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. Свідчення суб'єкта видавничої справи ДК №6952 від 22.10.2019р.  
Реєстрація журналу: Журнал зареєстровано у Міністерстві юстиції України. Свідчення про державну реєстрацію КВ №24219-14059 ПР від 07.11.2019р.  
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 14.05.2020 за рекомендацією вченої ради національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №4/20 від 02.03.2020 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 5,6. Тираж 300 прим. Зам. №530



*Scientific journal*

# **ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING**

**№1 '2020**

*Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999*

*4 issues per year*

Zaporizhzhia

2020

*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 № 409  
dated 17.03.2020)*

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 Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine; **V.V. Zinovkin**, Sc.D., prof., Zaporizhzhia Polytechnic National 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 Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine; **S. T. Yarymbash**, Ph.D, assoc. prof., Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine; **G. M. Shilo**, Sci.D., assoc. prof., Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine; **N. I. Furmanova**, Ph.D., assoc. prof., Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine; **A. V. Parkhomenko**, Ph.D., assoc. prof., Zaporizhzhia Polytechnic National 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, catalogs and search systems: Index Copernicus; 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 October 22, 2019.

Journal was registered: by the Ministry of Justice of Ukraine. Registration number KV № 24219-14059 PR dated November 7, 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](mailto:etae@ukr.net)

Computer layout Dyachenko O.O. Editor of English texts Voitenko S.V. The journal was signed on May 14, 2020 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No. 4/20 dated March 02, 2020). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 5,6. Number of copies printed 300. Rep. №530

# ЗМІСТ

## I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

*Луцин С.П., Золотаревский А.І.*

Дослідження частотної залежності електричної провідності п'єзокераміки ЦТС .....8

*Татарчук Т.В., Гавров А.І., Маслов С.О.*

Розрахунок магнітного демпферу.....16

## II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

*Кирик В.В., Білик А.В.*

Монополярний режим роботи передач постійного струму в складі магістральних електричних мереж України.....24

*Розен В.П., Демчик Я.М.*

Короткострокове прогнозування споживання електроенергії на об'єктах енергоринку з використанням метода «Гусеница» - SSA .....32

*Дрешняк Н.С.*

Системи контролю енергоефективності виробничих процесів та шляхи їх удосконалення.....40

# CONTENTS

## I ELECTRICAL ENGINEERING

***Lushchin S.P., Zolotarevskiy A.I.***

Investigation of the frequency dependence of the electrical conductivity in PZT piezoceramics ....8

***Tatarchuk T.V., Havrov A.I., Maslov S.O.***

Calculation of magnetic damper.....16

## II POWER ENGINEERING

***Kyryk V.V., Bilyk A.V.***

Monopolar mode of operation of hvdc in the main electric networks of Ukraine.....24

***Rozen V.P., Demchyk Ya.M.***

Short-term forecasting of electricity consumption at the objects of the energy market  
with the use of the "Gusenitsa" - SSA method.....32

***Dreshpak N.S.***

Energy efficiency control systems of technological processes and the ways to improve them.....40

# СОДЕРЖАНИЕ

## I ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

*Луцин С.П., Золотаревский А.И.*

Исследование частотной зависимости электрической проводимости пьезокерамики ЦТС ....8

*Татарчук Т.В., Гавров А.И., Маслов С.А.*

Расчет магнитного демпфера.....16

## II ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

*Кирик В.В., Билык А.В.*

Монополярный режим работы передач постоянного тока в составе магистральных электрических сетей Украины.....24

*Розен В.П., Демчик Я.М.*

Краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии на объектах энергорынка с использованием метода «Гусеница» - SSA.....32

*Дрешняк Н.С.*

Системы контроля энергоэффективности производственных процессов и пути их совершенствования.....40

УДК 666.655

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ ЦТС

ЛУЩИН С.П.

канд. физ.-матем. наук, доцент кафедры физики Национального университета "Запорожская политехника", Запорожье, Украина, e-mail: luschin@zntu.edu.ua;

ЗОЛОТАРЕВСКИЙ  
А.И.

ст. лаборант кафедры физики Национального университета "Запорожская политехника", Запорожье, Украина, e-mail: alek112@ukr.net.

**Цель работы.** Исследовать частотную зависимость электрической проводимости пьезокерамики на основе твердых растворов оксидов цирконата-титаната свинца.

**Методы исследования.** Для получения частотной зависимости электрической проводимости пьезокерамики на основе твердых растворов оксидов цирконата-титаната свинца использовалась методика измерения сопротивления образца с нанесенными на его противоположные грани электродами. По полученному значению сопротивления вычислялось значение электрической проводимости образца при различных частотах.

**Полученные результаты.** Авторами получена частотная зависимость удельной электрической проводимости пьезокерамики ЦТС-22 на основе твердых растворов оксидов цирконата-титаната свинца в диапазоне частот  $0 < \nu < 60$  кГц. Удельная электрическая проводимость пьезокерамики ЦТС-22 увеличивалась во всем диапазоне исследованных частот. При частотах до 20 кГц наблюдался резкий рост удельной электрической проводимости. При частотах  $\nu > 20$  кГц увеличение удельной электрической проводимости прекращалось, и при частотах  $\nu > 30$  кГц ее значение выходило на насыщение. Максимальное значение удельной электрической проводимости  $\gamma = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  было получено при частоте 60 кГц. Проведен анализ частотной зависимости удельной электрической проводимости пьезокерамики ЦТС-22 в диапазоне частот  $0 < \nu < 60$  кГц. Установлено, что в диапазоне частот  $0 < \nu < 10$  кГц удельная электрическая проводимость пьезокерамики ЦТС-22 увеличивается по степенному закону. Обсуждается механизм изменения электрической проводимости пьезокерамики ЦТС при увеличении частоты электрического поля. Получена формула, удовлетворительно описывающая экспериментальную зависимость удельной электрической проводимости пьезокерамики ЦТС-22 от частоты переменного напряжения в диапазоне частот  $0 < \nu < 10$  кГц и которая соответствует степенному закону А. Иончера. Удельная электрическая проводимость не поляризованной пьезокерамики ЦТС-19 увеличивается в диапазоне частот  $0 < \nu < 100$  кГц. В диапазоне частот  $0 < \nu < 20$  кГц наблюдается степенная зависимость, а при частотах  $\nu > 20$  кГц происходит нарушение степенного закона и удельная электрическая проводимость постепенно увеличивается, не выходя на насыщение.

**Научная новизна.** Исследована частотная зависимость электрической проводимости пьезокерамики ЦТС-22 в диапазоне частот  $0 < \nu < 60$  кГц. Установлено, что удельная электрическая проводимость пьезокерамики ЦТС-22 повышается с увеличением частоты электрического поля и в диапазоне частот  $0 < \nu < 10$  кГц характер ее изменения соответствует степенному закону А. Иончера. Механизм изменения электрической проводимости обусловлен прыжковой проводимостью ионов и поляронов в диэлектрике и объясняется запаздыванием медленных механизмов поляризации. Характер зависимости удельной электрической проводимости пьезокерамики ЦТС-19 обусловлен тем, что процессы поляризации не дают заметного вклада в дисперсию электрической проводимости не поляризованной пьезокерамики и запаздывания медленных механизмов поляризации не наблюдается.

**Практическая ценность.** При эксплуатации пьезокерамики на основе твердых растворов оксидов цирконата-титаната свинца необходимо учитывать существенную зависимость ее электрической проводимости от частоты переменного электрического поля. Результаты исследований могут быть использованы для изучения механизма электрической проводимости пьезокерамических материалов на основе твердых растворов оксидов цирконата-титаната свинца, эксплуатируемых в электротехнических и электронных изделиях при воздействии переменных электрических полей различных частот.

**Ключевые слова:** частотная зависимость; удельная электрическая проводимость; пьезокерамика; цирконат-титанат свинца; механизм электрической проводимости.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование электропроводности поликристаллических диэлектриков в зависимости от различных факторов представляет большой интерес для изучения

механизма электронных процессов и практического использования таких материалов в электротехнической и электронной промышленности [1]. Наиболее перспективным материалом, широко применяемым в современной промышленности, является пьезоэлек-



трическая керамика на основе твердых растворов оксидов цирконата-титаната свинца (ЦТС)  $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$  [2]-[4]. Пьезокерамика ЦТС является сегнетоэлектрическим материалом, обладающим рядом специфических свойств: высокое значение диэлектрической проницаемости, способность легко поляризоваться и реагировать на различные внешние воздействия [5]-[7]. В настоящее время пьезокерамика ЦТС является базовым промышленным материалом и используется для создания многослойных керамических конденсаторов с высоким значением электрической емкости, различных пьезоэлектрических приборов, работающих в качестве электромеханических преобразователей [8]-[10]. Эксплуатация пьезокерамических материалов в переменных электрических полях в широком частотном диапазоне вызывает необходимость учета и контроля изменения основных электрофизических параметров таких диэлектриков, одним из которых является удельная электрическая проводимость.

## II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Изменение электрической проводимости поликристаллических керамических материалов в зависимости от различных факторов являлось предметом исследований многих авторов. Исследовалось влияние температуры, влажности, давления, величины напряженности электрического поля и др. на электрическую проводимость различных диэлектриков [11]. В работе [12] рассматриваются возможные механизмы изменения электрической проводимости и отмечается, что в зависимости от физической природы носителей и свойств диэлектрика величина электрической проводимости при увеличении частоты электрического поля может как увеличиваться, так и уменьшаться. Повышение электрической проводимости обусловлено запаздыванием медленных механизмов поляризации. В настоящее время при рассмотрении механизмов электрической проводимости поликристаллических материалов используют модель, предложенную Моррисоном [13]. Согласно его модели структура спеченных при высоких температурах поликристаллических материалов представляет собой систему однородных частиц – кристаллитов, связанных между собой многочисленными контактами в виде тонких соединений в виде «шеек» (структура швейцарского сыра). Наличие таких контактов в значительной мере влияет на величину электрической проводимости на постоянном токе. Для описания электрической проводимости в таких поликристаллических структурах в настоящее время пользуются механизмом барьерной электропроводности, предложенной Слэтером и Петрицем [13]. В дальнейшем с целью получения информации об электропроводности самих кристаллитов были выполнены измерения электропроводности на высоких частотах в области СВЧ до  $\sim 10^{10}$  Гц [13].

Исследование электрической проводимости керамики ЦТС при различных температурах в диапазоне низких частот от 10 мГц до 10 кГц в зависимости от вида легирующей примеси были выполнены Моро-

зовым М.И. [14]. В этой работе показано влияние различных легирующих добавок на механизм электропроводности сегнетомягких и сегнетожестких керамических материалов системы ЦТС.

В работе [15] исследовалась температурная зависимость электропроводности керамики ЦТС на фиксированных частотах, модифицированной гадолинием  $\text{Gd}^{3+}$ . В ней показано увеличение электропроводности ЦТС на переменном токе с увеличением температуры, которая имеет активационный характер.

В работе [16] на основе терминов фрактальной структуры проводящих кластеров и механизма прыжковой проводимости интерпретируются результаты измерений электропроводности на переменном токе сегнетоэлектрической керамики ЦТС с легирующими добавками Fe, Sb.

В работе [17] исследована частотная зависимость электрического сопротивления цилиндрического пьезокерамического излучателя на основе пьезокерамики ЦТС от вида поляризации, состава пьезокерамики и других факторов.

Авторами работы [18] исследовалось влияние кислородных вакансий на электрическую проводимость керамики ЦТС на переменном токе.

Анализ вышеприведенных исследований и публикаций показывает, что исследованию частотной зависимости электрической проводимости пьезокерамических материалов системы ЦТС уделялось достаточно мало внимания. В этой связи существует необходимость исследования зависимости электрической проводимости пьезокерамических материалов системы ЦТС от частоты переменного напряжения в диапазоне, соответствующем условиям эксплуатации. Такие исследования дают возможность судить о механизме электронных процессов, ответственных за электрическую проводимость пьезокерамических материалов системы ЦТС.

## III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

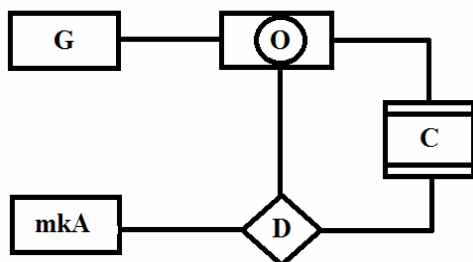
Ввиду широкого использования пьезокерамических материалов системы ЦТС в различных условиях эксплуатации целью данной работы является исследование частотной зависимости электрической проводимости пьезокерамики ЦТС в диапазоне частот  $0 < \nu < 60$  кГц. Значительное изменение удельной электрической проводимости при частотах до 60 кГц послужило основанием для выбора диапазона исследуемых частот. Изучение характера изменения удельной электрической проводимости диэлектриков в этой области частот дает возможность судить о вероятном механизме электронных процессов, ответственных за электропроводность пьезокерамических материалов системы ЦТС.

## IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Нами исследовалась частотная зависимость удельной электрической проводимости пьезокерами-

ки на основе твердых растворов оксидов цирконата-титаната свинца - пьезокерамика марки ЦТС-22, ЦТС-19 [19] в диапазоне частот  $0 < \nu < 60$  кГц. На поверхность пьезокерамики ЦТС-22 по промышленной технологии были нанесены серебряные электроды путем вжигания серебросодержащей пасты [2]-[3]. Образец пьезокерамики ЦТС-22 представлял собой диск толщиной 6 мм и диаметром 38 мм. Поляризация образца производилась по стандартной промышленной технологии [2]-[3]. Образец из пьезокерамики ЦТС-19 представлял собой квадратную пластину размерами  $6 \times 6 \times 1$  мм. На его поверхности наносились никелевые электроды с помощью термического вакуумного напыления. Поляризация этого образца не производилась. Для измерений электрической проводимости использовалась схема, позволяющая определять сопротивление образца с нанесенными на его противоположные грани электродами [8].

Для проведения измерений использовалась экспериментальная установка, блок-схема которой приведена на рис. 1. Экспериментальная установка состояла из генератора переменного тока ГЗ-56/1, осциллографа С1-65, ячейки для измерения сопротивления, диодных мостиков из высокочастотных диодов и микроамперметра М1200. Частота генератора изменялась в диапазоне  $0 < \nu < 100$  кГц. Напряжение генератора составляло 5 В.



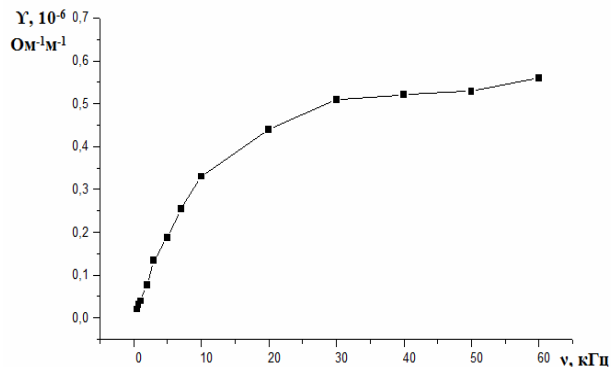
G – генератор, O – осциллограф, C – ячейка для измерения сопротивления с образцом, D – диодный мостик, mkA – микроамперметр.

**Рисунок 1.** Блок-схема экспериментальной установки

Из рис. 1 видно, что от генератора переменный электрический ток подавался на ячейку для измерения сопротивления, которая представляла собой два медных прижимных электрода, между которыми помещался исследуемый образец. На поверхность пьезокерамики ЦТС-22 по промышленной технологии были нанесены серебряные электроды путем вжигания серебросодержащей пасты. Образец пьезокерамики представлял собой диск толщиной 6 мм и диаметром 38 мм. Стабильность подаваемого напряжения контролировали с помощью осциллографа. Величину напряжения и тока на обкладках конденсатора после выпрямления диодными мостиками измеряли с помощью вольтметра и микроамперметра соответственно. Для расчета удельной электрической проводимости исследуемого образца использовалась формула

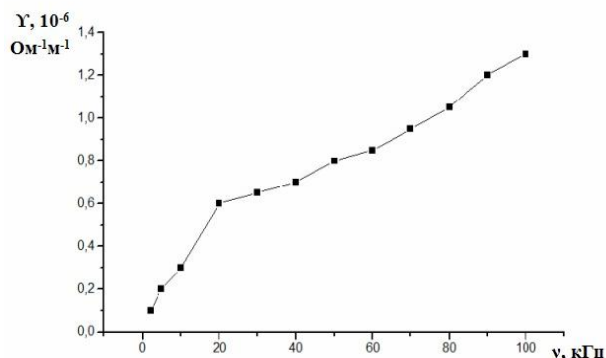
зависимости проводимости от геометрических размеров образца. Зависимость электрической проводимости пьезокерамики ЦТС-22 от частоты переменного напряжения была получена при атмосферном давлении и температуре  $T = 295$  К.

На рис. 2 приведена зависимость удельной электрической проводимости пьезокерамики ЦТС-22 от частоты переменного напряжения.



**Рисунок 2.** Зависимость удельной электрической проводимости пьезокерамики ЦТС-22 от частоты переменного напряжения

Для образца пьезокерамики ЦТС-19 зависимость удельной электрической проводимости от частоты переменного напряжения представлена на рис. 3.



**Рисунок 3.** Зависимость удельной электрической проводимости пьезокерамики ЦТС-19 от частоты переменного напряжения

Анализ полученной зависимости удельной электрической проводимости от частоты переменного напряжения (рис. 2) показал, что удельная электрическая проводимость пьезокерамики ЦТС-22 увеличивалась во всем диапазоне исследованных частот от 0 Гц до 60 кГц. При частотах до 20 кГц наблюдался резкий рост удельной электрической проводимости. При частотах  $\nu > 20$  кГц увеличение удельной электрической проводимости прекращалось, и при частотах  $\nu > 30$  кГц ее значение практически выходило на насыщение (рис. 2). Максимальное значение удельной электрической проводимости  $\gamma = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  было получено при частоте 60 кГц.

Анализ зависимости удельной электрической проводимости от частоты переменного напряжения для пьезокерамики ЦТС-19 (рис. 3) показал, что эта зависимость имеет другой характер и представляет собой два участка. Наблюдается увеличение удельной электрической проводимости во всем диапазоне исследованных частот от 0 Гц до 100 кГц. На частоте  $\nu = 20$  кГц наблюдается излом зависимости и с увеличением частоты при  $\nu > 20$  кГц удельная электрическая проводимость постепенно увеличивается, не выходя на насыщение.

Для описания пьезоэлектрического резонатора и определения его параметров обычно используют эквивалентную электрическую схему [10], которая состоит из двух ветвей (рис. 4).

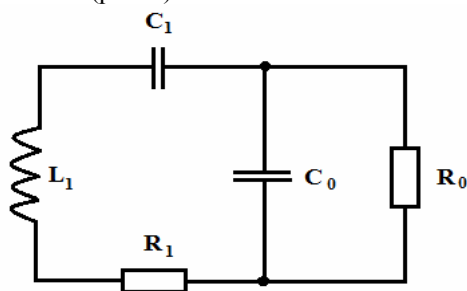


Рисунок 4. Эквивалентная электрическая схема пьезоэлектрического резонатора

Резистивно-индуктивно-емкостная ветвь  $R_1$ ,  $L_1$ ,  $C_1$  эквивалентной схемы учитывает резонансные свойства пьезоэлектрического резонатора и называется динамической. Вторая ветвь содержит параллельную статическую емкость  $C_0$ , которая характеризует емкость пьезоэлемента как конденсатора, а также емкость корпуса, держателя и монтажа. Емкость  $C_0$  для пьезокерамики заметно зависит от частоты переменного напряжения и ее изменение является предметом исследования для контроля параметров пьезоэлементов. Сопротивления  $R_1$  и  $R_0$  учитывают потери на переменном и постоянном токах соответственно. Пьезокерамика ЦТС в различных условиях эксплуатации может иметь заметную проводимость на постоянном токе, которую учитывает параллельное сопротивление  $R_0$  [10].

Эквивалентная электрическая цепь многофазной поликристаллической структуры пьезокерамики ЦТС может быть представлена комбинацией большого количества активных сопротивлений и емкостей, ввиду малых значений индуктивностей. С увеличением частоты переменного электрического поля электрическое сопротивление такой цепи должно уменьшаться и, соответственно, электрическая проводимость увеличиваться.

Явление дисперсии проводимости диэлектриков описывается с помощью универсального степенного закона, установленного А. Иончером [12]:

$$\sigma \sim \omega^n,$$

где показатель степенной функции  $0,7 < n < 1$ .

Такое соотношение характерно для многих механизмов движения заряженных частиц в переменном

электрическом поле. Повышение электрической проводимости диэлектриков с увеличением частоты электрического поля обусловлено движением ионов и поляронов при своем «прыжковом» движении под действием электрического поля, поворотом диполей, а также движением других заряженных частиц и комплексов. При увеличении частоты различные заряженные частицы не успевают реагировать на изменение электрического поля и, соответственно, достигают позиций локализации. В то же время они непрерывно движутся, следуя за изменением электрического поля, и тем самым способствуют увеличению электрической проводимости. При таком движении заряженных частиц отсутствует вклад в поляризацию образца и наблюдается дисперсия диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . Большое различие величины потенциальных барьеров и длины свободного пробега заряженных частиц объясняет непрерывный рост проводимости в широком частотном интервале. Нелинейный характер частотной зависимости электрической проводимости пьезокерамики ЦТС объясняется запаздыванием медленных механизмов поляризации [12].

Емкостной ток через пьезоэлектрик при переменном напряжении определяется формулой

$$I_C = \omega C U$$

где  $I_C$  – емкостной ток;  $\omega$  – циклическая частота;  $C$  – электрическая емкость;  $U$  – напряжение.

Необходимо учесть, что электрическая емкость  $C$  также зависит от частоты переменного напряжения, ввиду дисперсии диэлектрической проницаемости пьезокерамики. Ранее нами была получена степенная зависимость диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС-22 от частоты переменного тока [20]–[21]:

$$\epsilon = k \omega^{-\alpha},$$

где  $\alpha$  – показатель степенной функции;  $k$  – коэффициент пропорциональности для диэлектрической проницаемости.

Поэтому, подставляя ее в предыдущую формулу, мы получим:

$$I_C = \omega \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} U = \omega \frac{k \omega^{-\alpha} \epsilon_0 S}{d} U = A \omega^{1-\alpha},$$

где  $A = \frac{k \epsilon_0 S U}{d}$  – коэффициент пропорциональности для емкостного тока.

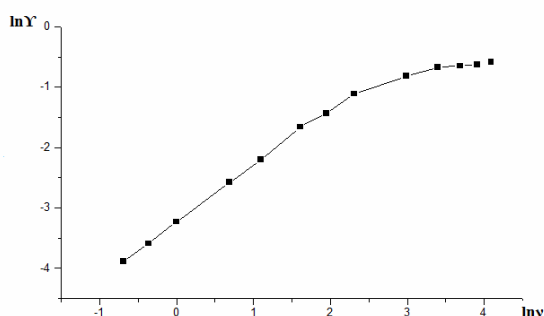
Учитывая, что характер зависимости емкостного тока отражает характер зависимости удельной электрической проводимости пьезокерамики ЦТС от частоты переменного тока, получим:

$$\gamma = B \omega^{1-\alpha} = B \omega^n,$$

где  $B$  – коэффициент пропорциональности для удельной электрической проводимости;  $1 - \alpha = n$  – показатель степенной функции.

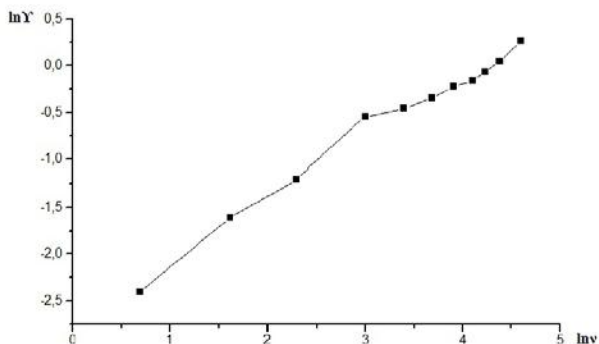
Полученная формула удовлетворительно описывает экспериментальную зависимость удельной электрической проводимости пьезокерамики ЦТС-22 от частоты

переменного напряжения в диапазоне частот  $0 < \nu < 10$  кГц и соответствует степенному закону А. Иончера. Подтверждением этому является то, что зависимость удельной электрической проводимости от частоты переменного напряжения в логарифмических координатах имеет линейный характер в интервале частот  $0 < \nu < 10$  кГц (рис. 5). Значение показателя степенной функции на этом участке составляет  $n = 0,5$ . Меньшее значение показателя степенной функции по сравнению с законом А. Иончера может быть связано с тем, что поляризованная керамика имеет доменную структуру и повороты стенок доменов при изменении частоты переменного поля затруднены. Линейность логарифмической зависимости удельной электрической проводимости от частоты нарушается при частотах  $\nu > 10$  кГц, что может быть связано с изменением механизма проводимости на более высоких частотах.



**Рисунок 5.** Зависимость удельной электрической проводимости пьезокерамики ЦТС-22 от частоты переменного напряжения в логарифмических координатах

Зависимость удельной электрической проводимости от частоты переменного напряжения для пьезокерамики ЦТС-19 в логарифмических координатах приведена на рис. 6 и состоит из двух участков.



**Рисунок 6.** Зависимость удельной электрической проводимости пьезокерамики ЦТС-19 от частоты переменного напряжения в логарифмических координатах

На первом участке в диапазоне частот  $0 < \nu < 20$  кГц наблюдается практически линейная зависимость, что подтверждает степенной характер частотной зависимости удельной электрической проводимости. Значение показателя степенной функции на этом участке составляет  $n = 0,8$ , что соответствует закону А. Иончера. На втором участке при частотах  $\nu > 20$  кГц проис-

ходит нарушение линейности и отклонение от степенного закона. Такой характер частотной зависимости удельной электрической проводимости вероятно связан с тем, что исследуемый образец был не поляризованным. Поэтому механизм электрической проводимости пьезокерамики ЦТС-19 в диапазоне частот  $0 < \nu < 20$  кГц обусловлен процессами прыжковой проводимости ионов и поляронов, при этом происходит запаздывание медленных механизмов поляризации. А при частотах  $\nu > 20$  кГц механизм электрической проводимости имеет другой характер, так как процессы поляризации не дают заметного вклада в дисперсию электрической проводимости не поляризованной пьезокерамики и запаздывания медленных механизмов поляризации не наблюдается.

## V. ВЫВОДЫ

Исследована частотная зависимость электрической проводимости пьезокерамики ЦТС-22 в диапазоне частот  $0 < \nu < 60$  кГц. Установлено, что удельная электрическая проводимость пьезокерамики ЦТС-22 повышается с увеличением частоты электрического поля и в диапазоне частот  $0 < \nu < 10$  кГц и характер ее изменения соответствует степенному закону А. Иончера. Механизм изменения электрической проводимости обусловлен прыжковой проводимостью ионов и поляронов в диэлектрике и объясняется запаздыванием медленных механизмов поляризации. Характер зависимости удельной электрической проводимости пьезокерамики ЦТС-19 обусловлен тем, что процессы поляризации не дают заметного вклада в дисперсию электрической проводимости не поляризованной пьезокерамики и запаздывания медленных механизмов поляризации не наблюдается.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов [Текст] / В.А. Головин, И.А. Каплунов, О.В. Малышкина и др. - М.: Техносфера, 2013. - 272 с. ISBN: 978-5-94836-352-3.
- [2] Глозман, И.А. Пьезокерамика [Текст] / И.А. Глозман. - М.: Энергия, 1972. - 288 с.
- [3] Яффе, Б. Пьезоэлектрическая керамика [Текст] / Б. Яффе, У. Кук, Г. Яффе. - М.: Мир, 1974. - 288 с.
- [4] Bell A.J. Ferroelectrics: The Role of Ceramic Science and Engineering / A.J. Bell // J. Eur. Ceram. Soc. - 2008. - Vol. 28(7). - P. 1307-1317.
- [5] Лайнс, М. Сегнетоэлектрики и родственные материалы [Текст] / М. Лайнс, А. Глас. - М.: Мир, 1981. - 736 с.
- [6] Физика сегнетоэлектрических явлений [Текст] / Г.А. Смоленский, В.А. Исупов, Р.Е. Пасынков и др. ; отв. ред. Г.А. Смоленский. - Л.: Наука: Ленингр. отд., 1985. - 396 с.
- [7] Физика сегнетоэлектриков: современный взгляд [Текст] / под ред. К.М. Рабе, Ч.Г. Ана, Ж.-М. Трискона; пер. с англ. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний,

2011. - 440 с.

[8] Трофимов, А.И. Пьезоэлектрические преобразователи статических нагрузок [Текст] / А.И. Трофимов. – М.: Машиностроение, 1979. – 95 с.

[9] Шарапов, В.М. Пьезоэлектрические датчики [Текст] / В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарпова; под ред. В.М. Шарпова. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с. ISBN 5-94836-100-4.

[10] Пьезоэлектрические резонаторы: Справочник [Текст] / В.Г. Андросова, Е.Г. Бронникова, А.М. Васильева и др.; Под ред. П.Е. Кандыбы и П.Г. Позднякова. – М.: Радио и связь, 1992. – 392 с. ISBN 5-256-00634-7.

[11] Тареев, Б.М. Физика диэлектрических материалов [Текст] / Б.М.Тареев. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.

[12] Поплавко, Ю.М. Физика диэлектриков [Текст] / Ю.М. Поплавко. – К.: Вища школа, 1980. – 400 с.

[13] Киселев, В.Ф., Электронные явления в адсорбции и катализе на полупроводниках и диэлектриках [Текст] / В.Ф. Киселев, О.В. Крылов – М.: Наука, 1979. – 112 с.

[14] Morozov, M.I. Charge migration in  $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$  ceramics and its relation to ageing, hardening and softening / M.I. Morozov, D. Damjanovic // J. of Applied Physics. – 2010. – Vol. 107, issue 3, 034106. <https://doi.org/10.1063/1.3284954>.

[15] Azad, Subhash Chandra. Study of Dielectric and Transport Properties of Gadolinium ( $\text{Gd}^{3+}$ ) Modified Lead Zirconate Titanate [PZT] Ceramics / Subhash Chandra Azad, R. Ranjan, N.K. Singh // Intern. J. of Research and Scientific Innovation. – 2016. – V. III, iss. XI. – P.

67-69. ISSN 2321-2705.

[16] Osak, Andrzej. AC low frequency conductivity in PZT PFS ferroelectric ceramics / Andrzej Osak // Technical Transactions. – 2017. – Vol. 1. – P. 173-185. DOI: 10.4467/1353737XCT.17.015.6112.

[17] Лейко, А.Г. Электрические свойства цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и компенсированной конструкции с окружной поляризацией [Текст] / А.Г. Лейко, Н.Д. Гладких, А.И. Нижин, Я.И. Старовойт // Electronics and Communication. – 2014, Vol. 19. – С.62-72.

[18] G. Deng, G. Li, A. Ding, Q. Yin. Evidence for oxygen vacancy inducing spontaneous normal-relaxor transition in complex perovskite ferroelectrics // Appl. Phys. Lett. – 2005, Vol. 87, Iss. 19, 192905. DOI: 10.1063/1.2125110.

[19] ОСТ II 0444-87. Материалы пьезокерамические. Технические условия [Текст]. – М.: 1987. – 144 с.

[20] Золотаревский, А.И. Исследование спектральной зависимости диэлектрической проницаемости некоторых полярных диэлектриков в диапазоне низких частот [Текст] / А.И. Золотаревский, С.П. Лушин // Електротехніка та електроенергетика. – №1. – 2017. – С. 5-10. DOI: 10.15588/1607-6761-2017-1-1.

[21] Золотаревский, А.И. Исследование частотно-температурной зависимости диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС в диапазоне низких частот [Текст] / А.И. Золотаревский, С.П. Лушин // Електротехніка та електроенергетика. – №1. – 2018. – С. 15-21. DOI: 10.15588/1607-6761-2018-1-2.

Стаття надійшла до редакції 18.02.2020

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ П'ЄЗОКЕРАМІКИ ЦТС

ЛУЩИН С.П.

канд. фіз.-матем. наук, доцент кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: luschin@zntu.edu.ua;

ЗОЛОТАРЕВСЬКИЙ  
О.І.

ст. лаборант кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: alek112@ukr.net.

**Мета роботи.** Дослідити частотну залежність електричної провідності п'єзокераміки на основі твердих розчинів оксидів цирконата-титанату свинцю.

**Методи дослідження.** Для отримання частотної залежності електричної провідності п'єзокераміки на основі твердих розчинів оксидів цирконата-титанату свинцю використовувалась методика вимірювання опору зразка з нанесеними на його протилежні грані електродами. За отриманого значення опору обчислювалося значення питомої електричної провідності зразка при різних частотах.

**Отримані результати.** Авторами отримана частотна залежність питомої електричної провідності п'єзокераміки ЦТС-22 на основі твердих розчинів оксидів цирконата-титанату свинцю в діапазоні частот  $0 < \nu < 60$  кГц. Питома електрична провідність п'єзокераміки ЦТС-22 збільшувалася у всьому діапазоні досліджених частот. При частотах до 20 кГц спостерігалось різке зростання питомої електричної провідності. При частотах  $\nu > 20$  кГц збільшення питомої електричної провідності припинялося, і при частотах  $\nu > 30$  кГц її значення виходило на насичення. Максимальне значення питомої електричної провідності  $\gamma = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  було отримано при частоті 60 кГц. Проведено аналіз частотної залежності питомої електричної провідності п'єзокераміки ЦТС-22 в діапазоні частот  $0 < \nu < 60$  кГц. Встановлено, що в діапазоні частот  $0 < \nu < 10$  кГц

питома електрична провідність п'єзокераміки ЦТС-22 збільшується за степеневим законом. Обговорюється механізм зміни електричної провідності п'єзокераміки ЦТС при збільшенні частоти електричного поля. Отримана формула, задовільно описує експериментальну залежність питомої електричної провідності п'єзокераміки ЦТС-22 від частоти змінної напруги в діапазоні частот  $0 < \nu < 10$  кГц і яка відповідає степеневому закону А. Іончера. Питома електрична провідність не поляризованої п'єзокераміки ЦТС-19 збільшується в діапазоні частот  $0 < \nu < 100$  кГц. В діапазоні частот  $0 < \nu < 20$  кГц спостерігається степенева залежність, а при частотах  $\nu > 20$  кГц відбувається порушення степеневого закону і питома електрична провідність поступово збільшується, не виходячи на насичення.

**Наукова новизна.** Досліджено частотну залежність електричної провідності п'єзокераміки ЦТС-22 в діапазоні частот  $0 < \nu < 60$  кГц. Встановлено, що питома електрична провідність п'єзокераміки ЦТС-22 підвищується зі збільшенням частоти електричного поля і в діапазоні частот  $0 < \nu < 10$  кГц характер її зміни відповідає степеневому закону А. Іончера. Механізм зміни електричної провідності обумовлений стрибковою провідністю іонів і поляронів в діелектрику і пояснюється запізненням повільних механізмів поляризації. Характер залежності питомої електричної провідності п'єзокераміки ЦТС-19 обумовлений тим, що процеси поляризації не дають помітного внеску в дисперсію електричної провідності не поляризованої п'єзокераміки і запізнювання повільних механізмів поляризації не спостерігається.

**Практична цінність.** При експлуатації п'єзокераміки на основі твердих розчинів оксидів цирконата-титанату свинцю необхідно враховувати суттєву залежність її електричної провідності від частоти змінного електричного поля. Результати досліджень можуть бути використані для вивчення механізму електричної провідності п'єзокерамічних матеріалів на основі твердих розчинів оксидів цирконата-титанату свинцю, що експлуатуються в електротехнічних і електронних виробках при впливі змінних електричних полів різних частот.

**Ключові слова:** частотна залежність; питома електрична провідність; п'єзокераміка; цирконат-титанат свинцю; механізм електричної провідності.

## INVESTIGATION OF THE FREQUENCY DEPENDENCE OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY IN PZT PIEZOCERAMICS

LUSHCHIN S.P. cand. phys-math. sci., associate professor of department of physics, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: luschin@zntu.edu.ua;

ZOLOTAREVSKIY A.I. senior assistant of the department of physics of National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine e-mail: alek112@ukr.net;

**Purpose.** To investigate the frequency dependence of the electrical conductivity in piezoelectric ceramics based on solid solutions of lead-zirconate titanate oxides.

**Methodology.** To obtain the frequency dependence of the electrical conductivity in piezoelectric ceramics based on solid solutions of lead-zirconate titanate oxides, we used a technique for measuring the resistance of a sample with electrodes deposited on its opposite faces. Using the obtained resistance value, the value of the electrical conductivity of the sample was calculated at various frequencies.

**Findings.** The frequency dependence of the specific electrical conductivity in PZT-22 piezoceramics based on solid solutions of lead-zirconate titanate oxides in the frequency range of  $0 < \nu < 60$  kHz has been obtained by the authors. The specific electrical conductivity in PZT-22 piezoceramics increased over the entire range of frequencies studied. A sharp increase in specific electrical conductivity was observed at frequencies up to 20 kHz. At frequencies of  $\nu > 20$  kHz the increase in specific electrical conductivity ceased and at frequencies of  $\nu > 30$  kHz its value reached saturation. The maximum value of specific electrical conductivity  $\gamma = 0.55 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  was obtained at a frequency of 60 kHz. The frequency dependence of the specific electrical conductivity in PZT-22 piezoceramics in the frequency range of  $0 < \nu < 60$  kHz is analyzed. It was found that the specific electrical conductivity in PZT-22 piezoceramics increases according to a power law in the frequency range of  $0 < \nu < 10$  kHz. The mechanism of changing the electrical conductivity in PZT piezoceramics with increasing frequency of the electric field is discussed. A formula is obtained that satisfactorily describes the experimental dependence of the specific electrical conductivity in PZT-22 piezoceramics on the frequency of an alternating voltage in the frequency range of  $0 < \nu < 10$  kHz and which corresponds to the power law of A. Ioncher. The specific electrical conductivity in the unpolarized PZT-19 piezoceramics increases in the frequency range of  $0 < \nu < 100$  kHz. In the frequency range of  $0 < \nu < 20$  kHz a power law dependence is observed and at frequencies of  $\nu > 20$  kHz a power law is violated and the specific electrical conductivity gradually increases without reaching saturation.

**Originality.** The frequency dependence of the electrical conductivity in PZT-22 piezoceramics in the frequency range of  $0 < \nu < 60$  kHz is studied. It is established that the specific electrical conductivity in PZT-22 piezoceramics



increases with increasing frequency of the electric field and in the frequency range of  $0 < \nu < 10$  kHz, the nature of its change corresponds to the power law of A. Ioncher. The mechanism of change in electrical conductivity is due to the hopping conductivity of ions and polarons in a dielectric and is explained by the delay of slow polarization mechanisms. The nature of the dependence of the specific electrical conductivity in PZT-19 piezoelectric ceramics is due to the fact that polarization processes do not make a noticeable contribution to the dispersion of the electrical conductivity of unpolarized piezoceramics and the delay of slow polarization mechanisms is not observed.

**Practical value.** When using piezoceramics based on solid solutions of lead-zirconate titanate oxides, it is necessary to take into account the significant dependence of its electrical conductivity on the frequency of an alternating electric field. The research results can be used to study the mechanism of electrical conductivity of piezoceramic materials based on solid solutions of lead-zirconate titanate oxides, which are used in electrical and electronic products under the influence of alternating electric fields of various frequencies.

**Keywords:** frequency dependence; specific electrical conductivity; piezoceramics; lead-zirconate titanate; electrical conductivity mechanism.

## REFERENCES

- [1] Golovnin, V.A., Kaplunov, I.A., Malyshkina, O.V. i dr., (2013). Fizicheskie osnovy, metody issledovaniya i prak-ticheskoe primeneniye p'ezomaterialov. Moscow: Tehnosfera, 272. ISBN: 978-5-94836-352-3.
- [2] Glozman, I.A. (1972). P'ezokeramika. M. Jenergiya, 288.
- [3] Jaffe, B., Kuk, U., Jaffe, G., (1974). P'ezojelektricheskaja keramika. Moscow.: Mir, 288.
- [4] Bell, A.J., (2008). Ferroelectrics: The Role of Ceramic Science and Engineering. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 28(7), 1307-1317.
- [5] Lajns, M., Glas, A., (1981). Segnetoelektriki i rodstvennye materialy. Moscow: Mir, 736.
- [6] Smolenskij, G.A., Isupov, V.A., Pasyukov R.E. i dr. Otv. red. G.A. Smolenskij, (1985). Fizika segnetoelektricheskikh yavlenij. Leningrad.: Nauka: Leningr. otd.-nie, 396.
- [7] Fizika segnetoelektrikov: sovremennij vzgljad / pod red. K.M. Rabe, Ch.G. Ana, Zh.-M. Triskona; per. s angl., (2011). Moscow: BINOM. Laboratoriya znanij, 440.
- [8] Trofimov, A.I. P'ezojelektricheskie preobrazovateli staticheskikh nagruzok, (1979). Moscow: Mashinostroenie, 95.
- [9] Sharapov, V.M., Musienko, E.V., Sharapova, M.P. Pod red. V.M. Sharapova, (2006). P'ezojelektricheskie datchiki. Moscow: Tehnosfera, 632. ISBN 5-94836-100-4.
- [10] Androsova, V.G., Bronnikova, E.G., Vasil'eva, A.M. i dr. Pod red. P.E. Kandyby i P.G. Pozdnjakova, (1992). P'ezojelektricheskie rezonatory: Spravochnik M.: Radio i svjaz', 392. ISBN 5-256-00634-7.
- [11] Tareev, B.M., (1982). Fizika dielektricheskikh materialov, Moscow: Energoizdat, 320.
- [12] Poplavko, Yu.M., (1980). Fizika dielektrikov K.: Visha shkola, 400.
- [13] Kiselev, V.F., Krylov, O.V., (1979). Elektronnye yavleniya v adsorbicii i katalize na poluprovodnikah i dielektrikah. Moscow: Nauka, 112.
- [14] Morozov, M.I., Damjanovic, D. (2010). Charge migration in  $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$  ceramics and its relation to ageing, hardening and softening. *J. of Applied Physics*, 107, 3, 034106. DOI: 10.1016/0893-6080(88)90334-6
- [15] Azad, Subhash Chandra, Ranjan, R., Singh, N.K., (2016). Study of Dielectric and Transport Properties of Gadolinium ( $\text{Gd}^{3+}$ ) Modified Lead Zirconate Titanate [PZT] Ceramics. *Intern. J. of Research and Scientific Innovation*, III, XI, 67-69. ISSN 2321-2705.
- [16] Osak, Andrzej., (2017). AC low frequency conductivity in PZT PFS ferroelectric ceramics. *Technical Transactions*, 1, 173-185. DOI: 10.4467/1353737XCT.17.015.6112.
- [17] Lejko, A.G., Gladkih, N.D., Nizhin, A.I., Starovojt, Ja.I., (2014). Jelektricheskie svojstva cilindricheskikh p'ezokeramicheskikh izluchatelej silovoj i kompensirovannoj konstrukcii s okruzhnoy poljarizaciej. *Electronics and Communication*, 19, 62-72. (in Russian)
- [18] Deng, G., Li, G., Ding, A., Yin, Q., (2005). Evidence for oxygen vacancy inducing spontaneous normal-relaxor transition in complex perovskite ferroelectrics. *Appl. Phys. Lett.*, 87, 19, 192905. DOI: 10.1063/1.2125110.
- [19] OST II 0444-87. Materialy pezoeramicheskije. Tehnicheskie usloviya. (1987). Moscow, 144.
- [20] Zolotarevskij, A.I., Lushchin, S.P., (2017). Issledovanie spektralnoj zavisimosti dielektricheskoy pronicaemosti nekotoryh polyarnih dielektrikov v diapazone nizkih chastot [The study of the spectral relationship of the dielectric permittivity of polar dielectrics in the low frequency range]. *Elektrotehnika i elektroenergetika*, 1, 5-10. (in Russian) DOI: 10.15588/1607-6761-2017-1-1.
- [21] Zolotarevskij, A.I., Lushchin, S.P., (2018). Issledovanie chastotno-temperaturnoj zavisimosti dielektricheskoy pronicaemosti pezoeramiki CTS v diapazone nizkih chastot [Investigation of the frequency-temperature relationship of the dielectric permittivity of the PZT piezoceramics in the low frequency range]. *Elektrotehnika i elektroenergetika*, 1, 15-21. (in Russian) DOI: 10.15588/1607-6761-2018-1-2.

## CALCULATION OF MAGNETIC DAMPER

TATARCHUK T.V.

PhD Tech., associate professor of Physics Department of National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: tanko.ho1@gmail.com;

HAVROV A.I.

student of the E-127sp group of National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: lordbusya@gmail.com

MASLOV S.O.

student of the E-127sp group of National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: ser.maslov.97@gmail.com.

**Purpose.** To investigate the dependence of the magnetic properties of a material on its chemical composition obtained at different pressures at certain temperatures. On the basis of the specific composition and properties of this material, to investigate how its operating points and loss of re-magnetization change, which in turn will affect the structural and operational characteristics of the magnetic damper of engine.

**Methodology.** Selection of the function extrema of the magnet energy dependence on induction and intensity through differentiation of expression, calculation of operating points of the magnet by the method of selection and using the MathCad medium, determination of the energy of re-magnetization through the integration of hysteresis loops, analytical calculation of magnetic forces in a magnetic damper using Beamer experiment formulas..

**Findings.** In the course of this task the operating points of the magnet hysteresis loop were determined, in which the magnetic energy is greatest by differentiating the expression of the dependence of the magnet energy on induction and intensity. On the basis of these data, the maximum magnetic induction was found to be the tertiary force of the magnetic field at these points. These points characterize the highest specific energy of the magnet, which is further used as intended. Then, based on the hysteresis loop, the energy of losses on the re-magnetization of the magnet was found by integration. According to these data, the unloading force of the magnetic damper was calculated.

**Originality.** More accurate analysis of magnetic processes in magnetic materials was conducted using a mathematical apparatus, software environments such as MathCad, OriginLaB. The dependence of the material magnetic properties on its chemical composition, energy and losses is analyzed, which in turn makes the use of a permanent magnet more efficient in engineering, apparatus and machines.

**Practical value.** According to the obtained results of calculation of energy losses and operating points of the magnet, the optimal chemical composition, its geometric size is determined, which allows to reduce production losses, save materials while increasing the efficiency of magnetic material in engine design. This increases both operational life of the machines and their reliability. The optimum dimensions of the magnets in the windings provide the required air gaps, which in turn, due to the absence of friction, reduce losses increasing the unloading force.

**Keywords:** Magnet materials; hysteresis loop; operating point; energy loss; magnetic damper; magnetic induction, unloading force, saturation induction, tension, coercive force.

### I. INTRODUCTION

In the aviation industry, the main goal of turbojet engine developers is to create highly economical and reliable, low-specific power plants. The resource and reliability of modern machines with rotating elements to a large extent depend on the level of vibration, the longevity of the bearings, the magnitude of the dynamic loads caused by the rotor imbalance. One of the reasons that causes an increased level of vibration on the aircraft engine is the increased rotor (or rotors) imbalance, which can lead to the excitation of one or more critical velocities of its own oscillations of the rotor, as well as cause resonance phenomena in the supporting structure [1], [3], [6]. The most effective measures of reducing vibration and dynamic loads at engine nodes is to use damping supports. Rotor supports are separate modules that are part of the engine's power system. The designs of the damping supports are

quite diverse, however they have the following basic functions: to reduce the stiffness of the rotor support, which leads to change of the elastic dynamic system of the engine (thus reducing the frequencies of natural oscillations of the system, eliminating resonances in operating modes) and to absorb energy of engine dynamic system oscillations, converting it to heat, which does not allow the development of large amplitudes of oscillations, dynamic loading and stress in the engine parts.

At the Ivchenko-Progress State Enterprise, when the D-436T1 engine was adjusted (carrying out a special check on the fan wheel), at the fan speeds of 5900... 6100 rpm, increased vibrations of the engine at rotor frequencies were caused by resonant vibrations of the fan shaft. These oscillations caused the fan shaft to bend and touch the stator and rotor parts of the low pressure compressor. Changing the fan shaft design to eliminate



the resonance was impossible. The fan wheel extensions and the elasto-oil damper available in the fan design did not provide resonance. In order to solve the aforementioned problem, in cooperation with the Ivchenko-Progress SE, in accordance with the cooperation agreement, the following task was set: to develop a design of such a damper that would allow the existing geometric dimensions not to change the engine assembly technology and ensure the efficiency of the engine in all modes of operation.

To solve this problem it is necessary to use a mathematical apparatus and modeling, with which you can quite accurately investigate the characteristics of the magnetic material. Increasing the coercive force will make it possible to obtain higher operating points at which the specific energy of the magnet is the highest. Larger operating points allow more energy to be generated from permanent magnet operation. Accordingly, if you know the maxima of the working range of these materials, it is possible to achieve a reduction in the dimensions of the magnetic material in the design of equipment or device. This will save on materials and make their production more ergonomically advantageous and cheaper. In turn, reducing the size will lead to the development of industries such as nanotechnology, robotics and micro-processor technology. In addition, the reduction of re-magnetization losses can be achieved by calculating the operating points of the magnet, analyzing the residual induction and coercive force. It is also possible to develop methods for extending the life of magnetic materials and storing residual induction without re-magnetization.

## II. ANALYSIS OF EXPERIMENTS AND PUBLICATIONS

With the development of aircraft construction, design of turbine engines, etc., the issues of modernization and increase of their reliability were considered. In scientific-educational institutions, design bureaus were engaged to improve aircraft engines, first of all their vibration resistance by various methods including damping. There are publications by such authors as: Ponomarev Yu.K., Pronichev Yu.N., Chehodaev D.E., Kyrylyn A.N., Vershyhorov V.M. Works and books of these authors are devoted to the topic of damping aircraft engines. They illustrated important issues of using multi- and single-layer dampers, corrugated dampers, investigated hydrodynamic damping, structural features of dampers, etc. And the issue of magnetic properties, chemical composition, received little attention. No correlation was found between the magnetic properties and the composition of the magnet used to make the damping windings. This work, in comparison with others, by mathematical analysis of magnetic properties, energy and losses of magnets helps to achieve optimal geometric dimensions, find a certain chemical composition of the permanent magnet, which will more efficiently perform functions in aircraft engines, compressors, etc. and will be more cost-

effective. For conventional electric motors, generators with a damping winding, the issues of better quenching of short-circuit currents and eddy currents will be solved..

## III. FORMULATION OF THE WORK PURPOSE

**Purpose of the study.** Calculate the operating points of permanent magnets consisted of  $\text{Nd}_{15,2}\text{Fe}_{74,99}\text{B}_{6,6}\text{C}_{0,51}\text{Cu}_{1,57}\text{Ti}_{1,38}$ , obtained under different conditions, by direct point selection and using the MathCad environment, as well as the re-magnetization energy for these samples.

**Assignment of the study.**

1. To calculate the operating points of permanent magnets consisted of  $\text{Nd}_{15,2}\text{Fe}_{74,99}\text{B}_{6,6}\text{C}_{0,51}\text{Cu}_{1,57}\text{Ti}_{1,38}$ , obtained under different conditions, by direct point selection, using the demagnetizer part of the hysteresis loops.

2. To calculate the operating points of permanent magnets consisted of  $\text{Nd}_{15,2}\text{Fe}_{74,99}\text{B}_{6,6}\text{C}_{0,51}\text{Cu}_{1,57}\text{Ti}_{1,38}$ , obtained under different conditions and by and using the MathCad environment.

3. To calculate the re-magnetization energy for the permanent magnets consisted of  $\text{Nd}_{15,2}\text{Fe}_{74,99}\text{B}_{6,6}\text{C}_{0,51}\text{Cu}_{1,57}\text{Ti}_{1,38}$ , obtained under different conditions, by the method of integration along the contour of the maximum hysteresis loop.

4. To calculate the magnetic forces acting in a magnetic damper.

*Subject of the study* is the material  $\text{Nd}_{15,2}\text{Fe}_{75,5}\text{B}_{6,6}\text{C}_x\text{Cu}_{1,57}\text{Ti}_{1,38}$  and its magnetic characteristics.

*Object of the study* are magnetic forces acting in a magnetic damper

**Methods of the study:** modelling.

**Expected results.** The calculation of operating points makes it possible to use the finished products more efficiently for their intended purpose in the future, and the calculation of re-magnetization energy (energy of losses) will allow to use energy resources more economically.

## IV. PRESENTATION OF THE BASIC MATERIAL AND ANALYSIS OF THE OBTAINED RESULTS

### 4.1 Materials and methods of the study.

**Requirements for magnetic materials:**

- high coercive power;
- low specific gravity;
- low cost;
- stability of characteristics over a wide temperature and time range;
- high electrical resistance.

The use of permanent magnets with high values of coercive force, which characterizes the resistance to demagnetization, the following appears from the peculiarity of this suspension: a magnet in the field of another magnet. The required values of the unloading force can be achieved provided that there is no significant mutual demagnetization of the supporting elements. Cobalt alloys

and Nd-Fe- (B, C) alloy composites meet this condition. When considering the second type of alloys, the third condition is also fulfilled i.e. low cost compared to cobalt alloys. The specific gravity of the obtained sintered magnets is  $9375 \text{ kg/m}^3$ .

High electrical resistance of magnetic materials is required to minimize the eddy current losses that occur when the shaft rotates.

In developing the design of the magnetic damper, the then-known magnetic material based on the Sm-Co alloy with known characteristics was used. However, the high cost of Sm, high energy costs for cobalt and the need to preserve the basic characteristics for a long time does not give them a wide enough application. You can use magnets based on alloys of Fe-Nd-B and Fe-Nd-C to reduce the cost of such magnets.

In the table 1 a comparative characteristic of magnets based on the Sm-Co, Fe-Nd-B and Fe-Nd-C systems ( $T_K$  is Curie temperature,  $I_S$  is spontaneous magnetization,  $H_A$  is anisotropy field,  $(BH)_{\max}$  is maximum magnetic energy) is presented. Operating temperatures are about 470 K.

**Table 1.** Comparative characteristics of magnets based on Sm-Co, Fe-Nd-B and Fe-Nd-C systems [10, 11]

Composition	$T_C$ , K	$I_S$ , T	$B_r$ , T	$H_A$ , MA/m	$(BH)_{\max}$ , kJ/m <sup>3</sup>
SmCo <sub>5</sub>	1020	1,14	0,77	1,3	140
Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> C	535	1,5	0,8	7,6	450
Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	585	1,6	1,2	5,4	512

In this study, permanent magnets of the same composition, which were obtained under different conditions, were investigated (see Table 2).

**Table 2.** Conditions for obtaining permanent magnets consisted of Nd<sub>15,2</sub>Fe<sub>74,99</sub>B<sub>6,6</sub>Cu<sub>0,51</sub>Ti<sub>1,38</sub> [25]

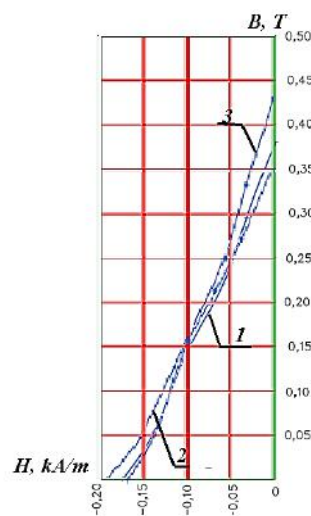
Examp le No.	Chemical composition of permanent magnet	Initial pressure, P, MPa	Sintering / annealing temperature, K.
1	Nd <sub>15,2</sub> Fe <sub>74,99</sub> B <sub>6,6</sub> Cu <sub>0,51</sub> Ti <sub>1,38</sub>	0,5	1323 /
2		3	
3		9,5	

According to the obtained demagnetizing parts of the hysteresis loop, the operating points were calculated. The values of the intensity H and the induction B of the magnetic field, at which the specific magnetic energy of the permanent magnet is maximum. The calculation was performed by direct point selection (see Fig. 1a) and using the MathCad environment (see Fig. 1b). To determine the re-magnetization energy, it is necessary to find the hysteresis loop area by integrating along the loop path.

#### 4.2 Determination of the operating point of a permanent high-energy magnet.

For calculations in MathCad environment [12] the

following assumptions were used: if the type of function of dependence  $W = f(H, B)$  is known, then, after differentiation of the expression, extremes can be found, which will correspond to the operating points (see Table 3). To determine the type of function of the dependence of the magnetic energy W on the induction B and the intensity of the magnetic field H ( $W = f(H, B)$ ), first, it is necessary to determine the dependence of the induction B on the magnetic field strength H ( $B = f(H)$ ) in as an n-degree polynomial. To solve this problem, splines were constructed in the MathCad environment at the starting points for the samples and a set of H-B points was obtained (Fig. 1).



**Figure 1.** Splines received in MathCad environment

Then, the energy product  $W = f(H, B)$  was calculated, the dependence was constructed, and the maximum energy value was determined. The results are shown in Fig. 2 and in Table 3.

Simultaneously with the obtained set of points H-B in Excel we received polynomials of the third degree. To determine the operating point of a permanent magnet, we must find a derivative of the expression:

$$W = \frac{B \cdot H}{2}$$

and solve the equations obtained.

Example No. 1:

$$B = 1 \cdot 10^{-8} H^3 + 7 \cdot 10^{-6} H^2 + 0,003H + 0,3847;$$

$$W = 0,5 \cdot 10^{-8} H^4 + 3,5 \cdot 10^{-6} H^3 + 1,5 \cdot 10^{-3} H^2 + 0,19235H;$$

$$\frac{dW}{dH} = 2 \cdot 10^{-8} H^3 + 10,5 \cdot 10^{-6} H^2 + 0,003H + 0,19235.$$

Example No. 2:

$$B = -6 \cdot 10^{-9} H^3 - 2 \cdot 10^{-7} H^2 + 0,002H + 0,3472;$$

$$W = -3 \cdot 10^{-9} H^4 - 1 \cdot 10^{-7} H^3 + 0,001H^2 + 0,1736H;$$

$$\frac{dW}{dH} = -12 \cdot 10^{-9} H^3 - 3 \cdot 10^{-7} H^2 + 0,002H + 0,1736.$$

Example No. 3:

$$B = 2 \cdot 10^{-8} H^3 + 8 \cdot 10^{-6} H^2 + 0,0035H + 0,4353;$$

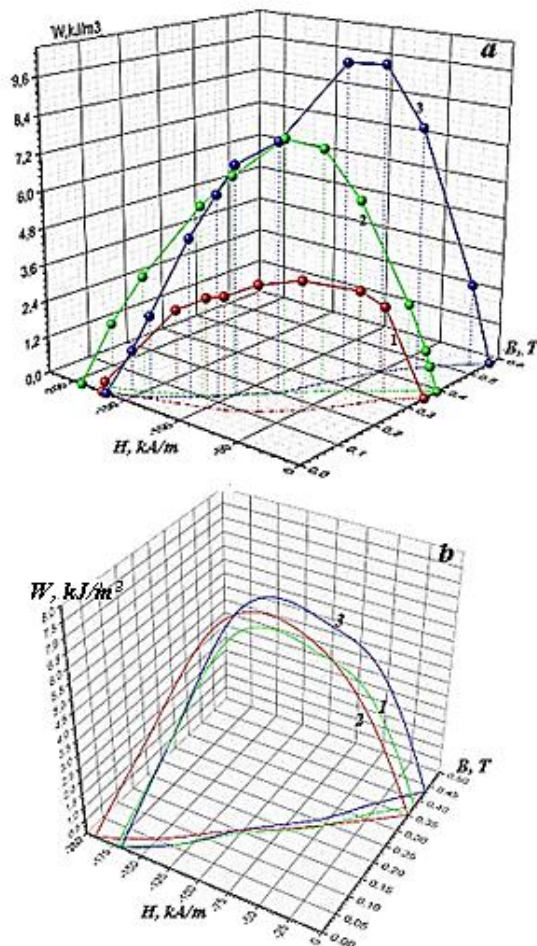
$$W = 1 \cdot 10^{-8} H^4 + 4 \cdot 10^{-6} H^3 + 1,75 \cdot 10^{-3} H^2 + 0,21765H;$$

$$\frac{dW}{dH} = 4 \cdot 10^{-8} H^3 + 12 \cdot 10^{-6} H^2 + 0,0035H + 0,21765.$$

Through the polynomial			
B, T	0,136	0,140	0,181
H, kA/m	-85,57	-85,60	-77,44
W, kJ/m <sup>3</sup>	5,8176	6,0075	7,0233

#### 4.3 Determination of the re-magnetization energy of a permanent high-energy magnet

The magnetization energy of the examples was calculated as the hysteresis loop area (see Fig. 2).

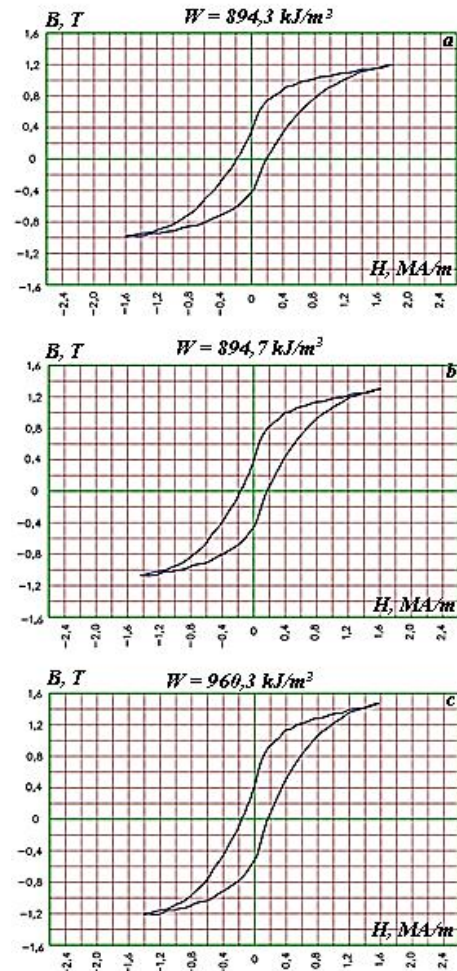


**Figure 2.** Dependencies  $W = f(H, B)$  for examples 1, 2, 3: a) on points, b) in MathCad environment

The results of calculating the operating point for all methods are presented in Table. 3.

**Table 3.** The result of calculating the operating points of a permanent magnet for all methods

Example No.	1	2	3
B, T	0,17	0,21	0,33
H, kA/m	-49,5	-77,5	-61,8
W, kJ/m <sup>3</sup>	4,21	8,14	10,2
In MathCad environment			
B, T	0,1627	0,1622	0,184
H, kA/m	-89,88	-95,17	-87,81
W, kJ/m <sup>3</sup>	7,3094	7,7193	8,0797



a – 0,5 MPa; b – 3 MPa; c – 9,5 MPa

**Figure 3.** Hysteresis loops for samples consisted of  $\text{Nd}_{15,2}\text{Fe}_{74,99}\text{B}_{6,6}\text{C}_{0,51}\text{Cu}_{1,57}\text{Ti}_{1,38}$  caused under different conditions

To accomplish this task, splines were obtained and the area of the figures was calculated by numerical methods. Given that the samples under study were in the shape of a cylinder  $h = 5 \text{ mm}$  and  $d = 9 \text{ mm}$  ( $S = 3,18 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ ), it is possible to find the real re-magnetization energy for each sample. The results of the calculations are presented in Table. 4.

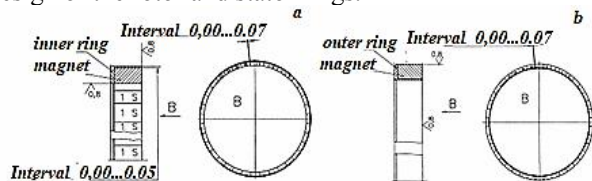


**Table 4.** The value of the specific and real energy of the re-magnetization of the samples

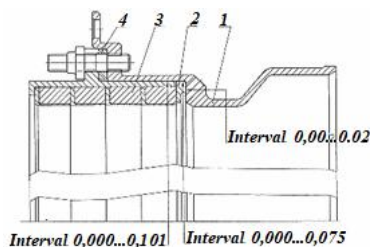
Example No.	1	2	3
Numerical Methods			
$W_{\text{пнт}}$ , kJ/m <sup>3</sup>	894,3	894,7	960,3
$W$ , J	0,2844	0,2845	0,3054
By points			
$W_{\text{пнт}}$ , kJ/m <sup>3</sup>	784,5	792,6	869,7
$W$ , J	0,2495	0,2521	0,2766

#### 4.4 Calculation of magnetic forces in a magnetic damper

Magnetic damper is a device that provides protection of precision apparatus, equipment against external forces such as vibration, shock, rotational oscillations due to energy imbalance, etc. The magnetic damper belongs to the field of electrical engineering and can be used to dampen vibrations and kinetic energies. Fig. 3 shows the design of the rotor and stator rings.

**Figure 4.** Design of rotor and stator rings

The developed magnetic damper consists of rotating part i.e. rotary and fixed part (stator). The rotary part of the magnetic damper consists of a set of radially magnetized sectors, assembled in a ring of non-magnetic steel (EP 33-W) and mounted in a clamp of magnetic steel (EP 609-W) with alternating magnetic poles of each pair of segment rings. The fixed part of the damper is assembled from segments of radially magnetized permanent magnets assembled in a ring of non-magnetic steel (EP 33-W) and mounted in a clamp of magnetic steel (EP 609 - W) with alternating magnetic poles of each pair of segment rings. Thus, the rotor and stator magnet poles create a repulsive force around the circle. Fig. 4 presents a sleeve with magnets.

**Figure 5.** Magnet sleeve: 1 - sleeve, 2 - ring, 3 - magnet sleeve, 4 - adjusting ring

Earlier, according to the results of studies of Permanent Magnetic Damper Bearings the following conclusion was made: as the radius of the support increases, its load capacity increases linearly and the weight of the shaft increases squared. That is, under certain conditions, the support will only compensate for the weight of the shaft. Therefore, the shaft must be empty and the inner bearing rings are minimal [2].

The following formula was used to calculate the

unloading force:

$$F = \frac{\mu_0 \cdot J^2 \cdot l \cdot \left(r + \frac{x}{2}\right)}{2} \cdot e^{-\frac{\pi \cdot x}{d}} \cdot \sin \varphi \quad (1)$$

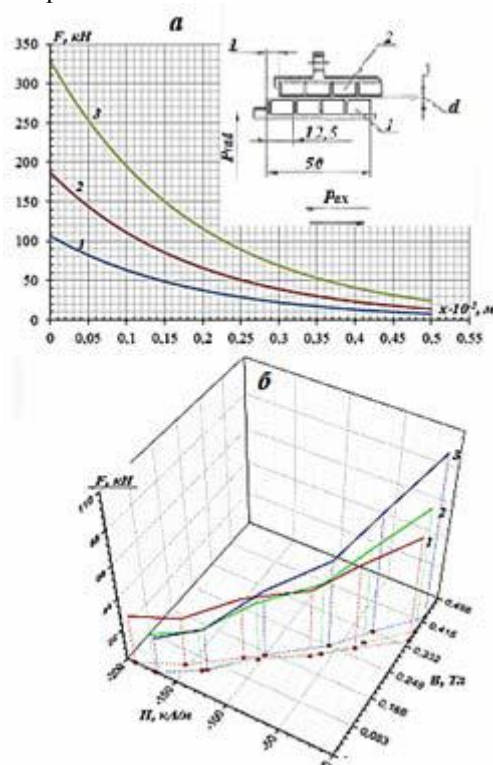
Magnetic saturation can be defined as follows:

$$J = \frac{B}{\mu_0} - H \quad (2)$$

Totally, 390 magnets are used in this design. The size of the magnets used in the construction is 6x12x16 mm, height is 6 mm, the working part of the magnet is 12x16 mm, so this plane can be divided into 12 elementary magnets square section. Thus, per one magnet, the value of the unloading force, obtained by the formula No. 7, must be increased by 12 times.

Using the data in Table. 3, we determine the unloading force according to the formula (1). To calculate the dependence of this force on the magnitude of the gap in the magnetic damper, it was considered that the sine of the angle of rotation is maximum [2].

It is known that the smaller the gap in the damper, the greater the unloading force can be achieved [4, 7-9]. It should be noted that the manufacturing features do not allow to reduce the gap to the minimum values. In the proposed design, the gap is 1 mm. Figure 5 presents the dependence of the unloading force on the gap in the magnetic damper. Figure 5b presents the dependence of the unloading (axial) force on the values of the intensity and induction of an external magnetic field for sintered magnets consisted of Nd-Fe-B doped with Cu, C, Ti in a magnetic damper.

**Figure 6.** The dependence of the unloading (axial) force on the gap (a) and on the values of the intensity and induction of the external magnetic field (b) in the magnetic damper for examples No. 1, 2, 3

## IV. CONCLUSION

1. The analysis of the obtained results showed that the values of the operating points of the permanent magnet, which are determined by direct selection of points and when using the MathCad environment, almost do not differ. This indicates the validity of the simulation results obtained in MathCad environment.

2. The calculation of the demagnetization energy showed that these values depend significantly on the method of obtaining a permanent magnet.

3. The design of the magnetic shaft of the fan shaft with a magnetic damper, which is engaged to test the possibility of using this type of damper additional support for long shafts of aircraft engines. This design of the support does not require the traditional supply of lubricant for cooling the bearing and is devoid of the typical disadvantages of shaft supports.

4. The dependence of the unloading (axial) force on the gap in the magnetic damper is presented. We can see that as the gap increases, the value of the unloading force decreases.

5. The dependence of the unloading (axial) force on the values of the intensity and induction of an external magnetic field for sintered magnets of Nd-Fe-B composition doped with Cu, C, Ti in a magnetic damper is presented. We can see that when the magnetic field is close to "0", the value of the unloading force decreases.

## REFERENCE

- [1] Martynenko, G.Y. (2007) *Determination of the stiffness characteristics of the radial magnetic bearings in two circular permanent magnet* [Opredelenie zhestkostnykh kharakteristik radialnykh magnitnykh podshipnikov na dvukh koltsevykh postoiannykh magnitakh]. *Visnyk NTU «KPI»*. Tem. vyp. «Dynamika i micnist' mashyn» – Bulletin of NTU "KHPI". The vol. "Dynamics and strength of machines", 38, 83-95. [in Russian]
- [2] Metlin, V.B. (1968) *Magnetic and magnetohydrodynamic support* [Magnitnye i magnitogidrodinamicheskie opory]. Moscow: Energy. [in Russian]
- [3] Design-schematic solution (*Konstruktivno-shemnoe reshenie*) [Electronic resource]. – URL access mode: <http://www.aviagazoturbina.ru/index.php/konstruktivno-shemnoe-reshenie>. [in Russian]
- [4] Bolotov A. N. & Fuching V. L. (2008) *Tribology magnetoactive bearings: monograph*. Tver: TSTU. [in Russian]
- [5] Patent No. RU2287729C1. *Electromagnetic damper* [Electronic resource] / E. V. Sidorov, G. S. Tyukavin. – Mode of access URL: <http://www.findpatent.ru/patent/228/2287729.html>. [in Russian]
- [6] Gulyaeva T. V., Gulyaeva L. V., Tatarchuk O. V. (2018) Magnetic damper for aircraft engine-436T. *Science and Education a New Dimension: Natural and Technical Sciences, VI (18), Is: 158, P. 51-55: <https://doi.org/10.31174/NT2018-158VI18-13>* (in English)
- [7] Zhuravlev Yu. N. (2003) *Active magnetic bearings: Theory, calculation, application. (Aktivnyie magnitnyie podshipniki: Teoriya, raschet, primeneniye)* SPb.: Polytechnic. [in Russian]
- [8] Petzold O. (2006) Hybridmagnete für einen magnetisch gelagerten Rundtisch. *Technische mechanik*, Band 26, Heft 2, P. 85–86. (in English)
- [9] Neumann L.R., Demyrchan K. S. (1981) Theoretical foundations of electrical engineering (*Teoreticheskie osnovy elektrotehniki*), 250 p. [in Russian]
- [10] Krynychk H.S. (1976) Physics of magnetic phenomena (*Fizika magnitnyih yavleniy*), 262 p. (Russian)
- [11] Vonsovskiy S.V. (1971) Magnetism (*Magnetizm*), 1032 p. [in Russian]
- [12] Makarov E.H. (2005) Engineering calculations in MathCad. Training course (*Inzhenernye raschety v MathCad. Uchebnyiy kurs*), 448 p. [in Russian]
- [13] Brekharya G. P., Kharitonova E. A., Gulyaeva T. V. (2014) *Properties of the permanent magnets Nd-Fe-B alloy with Cu, Ti, C, obtained by a powder method or sintering of the films at high pressure*. Progress in physics of metals. IMF, 15, 35-53. [in Russian]
- [14] Gulyaeva T. V., Kolomoets A. E., Gulyaev V. S., Behara N. V. (2007) *Obtaining magnetic materials needed for the magnetic dampers of aircraft engines*, Bulletin of the engine. Zaporozhye JSC "Motor Sich", № 2, 189 – 193. [in Russian]
- [15] Gulyaeva T. V. (2015) *Proposed rational leguana Reimu Spinna econome-legovini Shvidko hologenit splavu Nd-Fe-B-Ti-C-Cu for pavement magnetic feature*: dis. on zdobuttya Sciences. Stupina candidate. tech. SC.: spec. 05.16.01 "Metaloplast Termona obrobka metalu" / T. V. Gulyaeva – Zaporizhzhya, 175 p [in Ukrainian]
- [16] *Read more about gas turbine engines of the family of D-436*. State enterprise "Zaporozhye machine-building design Bureau "Progress" named after academician A. G. Ivchenko [Electronic resource]. – Mode of access URL: <http://www.zmkb.com/welcome.do?id=146> guidance for those operating. [in Russian]

The article was received 01.03.2020

## РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО ДЕМПФЕРУ

ТАТАРЧУК Т.В.

канд. техн. наук, доцент кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: tanko.ho1@gmail.com;

ГАВРОВ А.І.

студент гр. Е-127сп Національного університету «Запорізька політехніка»,  
Запоріжжя, Україна, e-mail: lordbusya@gmail.com;

МАСЛОВ С.О.

студент гр. Е-127сп Національного університету «Запорізька політехніка»,  
Запоріжжя, Україна, e-mail: ser.maslov.97@gmail.com.

**Мета роботи.** Дослідити залежність магнітних властивостей матеріалу від його хімічного складу, що отриманий за різного тиску при певних температурах. На основі певного складу та властивостей цього матеріалу дослідити, як змінюються його робочі точки та втрати на перемагнічення, що в свою чергу впливатиме на конструкційні та експлуатаційні особливості магнітного демпфера двигуна.

**Методи дослідження.** Вибір екстремумів функції залежності енергії магніту від індукції та напруженості через диференціювання виразу, розрахунок робочих точок магніту методом підбору та за допомогою середовища MathCad, визначення енергії перемагнічення через інтегрування петлі гістерезису, аналітичний розрахунок магнітних сил у магнітному демпфері, використовуючи формули з дослідів демпферних опор Бекерса.

**Отримані результати.** У ході виконання поставленого завдання було визначено робочі точки петлі гістерезису магніту, у яких магнітна енергія найбільша шляхом диференціювання виразу залежності енергії магніта від індукції та напруженості. На основі цих даних було виявлено максимальну магнітну індукцію такої ерцитувальної сили магнітного поля у цих точках. Ці точки характеризують найбільшу питому енергію магніта, яку надалі використовують за призначенням. Далі, спираючись на петлю гістерезису, шляхом інтегрування було знайдено енергію втрат на перемагнічення магніту. За цими даними було розраховано розвантажуючу силу магнітного демпфера.

**Наукова новизна.** Було проведено більш точний аналіз магнітних процесів у магнітних матеріалах за допомогою математичного апарату, з використанням програмних середовищ, такі як MathCad, OriginLaB. Проаналізована залежність магнітних властивостей матеріалу від його хімічного складу, енергії та втрат, що в свою чергу робить більш ефективним використання постійного магніту у техніці, апаратах та машинах.

**Практична цінність.** За отриманими результатами розрахунку енергії втрат та робочих точок магніту визначається оптимальний хімічний склад, його геометричний розмір, що дозволяє знизити втрати на виробництво, зекономити матеріали при цьому підвищити корисну дію магнітного матеріалу у конструкції двигунів. При цьому збільшується експлуатаційний строк роботи машин, їх надійність. Оптимальні розміри магнітів в обмотках забезпечують потрібні повітряні проміжки, що в свою чергу через відсутність тертя зменшують втрати, що збільшуює розвантажувальну силу.

**Ключові слова:** магнітні матеріали; петля гістерезису; робоча точка; енергія втрат; магнітний демпфер; магнітна індукція, розвантажувальна сила, індукція насичення, напруженість, коерцитувальна сила.

## РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ДЕМПФЕРА

ТАТАРЧУК Т.В.

канд. техн. наук, доцент кафедри фізики Національного університету  
«Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: tanko.hol@gmail.com;

ГАВРОВ А.И.

студент гр. Е-127сп Національного університету «Запорожская политехника»,  
Запорожье, Украина, e-mail: lordbusya@gmail.com;

МАСЛОВ С.А.

студент гр. Е-127сп Національного університету «Запорожская политехника»,  
Запорожье, Украина, e-mail: ser.maslov.97@gmail.com.

**Цель работы.** Исследовать зависимость магнитных свойств материала от его химического состава, полученный за разного давления при определенных температурах. На основе определенного состава и свойств этого материала исследовать, как меняются его рабочие точки и потери на перемагничивания, что в свою очередь повлияет на конструктивные и эксплуатационные особенности магнитного демпфера двигателя.

**Методы исследования.** Выбор экстремумов функции зависимости энергии магнита от индукции и напряженности из-за дифференцировки выражения, расчет рабочих точек магнита методом подбор и с помощью среды MathCad, определения энергии перемагничивания через интегрирование петли гистерезиса, аналитический расчет магнитных сил в магнитном демпфере, используя формулы из опытов демпферных опор Бекерса.

**Полученные результаты.** В ходе выполнения поставленной задачи были определены рабочие точки петли гистерезиса магнита, в которых магнитная энергия самая путем дифференцирования выражения зависимости энергии магнита от индукции и напряженности. На основе этих данных было обнаружено максимальную магнитную индукцию такоерцитувальної сили магнитного поля в этих точках. Эти точки характеризует наибольшую удельную энергию магнита, которую в дальнейшем используют по назначению. Далее, опираясь на

петлю гистерезиса, путем интегрирования был найден энергию потерь на перемагничивания магнита. По этим данным было рассчитано разгружая силу магнитного демпфера.

**Научная новизна.** Было проведено более точный анализ магнитных процессов в магнитных материалах с помощью математического аппарата, с использованием программных сред, такие как MathCad, OriginLaB. Проанализирована зависимость магнитных свойств материала от его химического состава, энергии и потерь, в свою очередь делает более эффективным использование постоянного магнита в технике, аппаратах и машинах.

**Практическая ценность.** По полученным результатам расчета энергии потерь и рабочих точек магнита определяется оптимальный химический состав, его геометрический размер, что позволяет снизить потери на производство, сэкономить материалы при этом повысить полезное действие магнитного материала в конструкции двигателей. При этом увеличивается эксплуатационный срок работы машин, их надежность. Оптимальные размеры магнитов в обмотках обеспечивают нужны воздушные промежутки, в свою очередь из-за отсутствия трения уменьшают потери, избыточную развантажующую силу.

**Ключевые слова:** магнитные материалы; петля гистерезиса; рабочая точка; энергия потерь; магнитный демпфер; магнитная индукция, разгрузочная сила, индукция насыщения, напряженность, коэрцитивная сила.

УДК 621.316.9

## МОНОПОЛЯРНИЙ РЕЖИМ РОБОТИ ПЕРЕДАЧ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В СКЛАДІ МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ УКРАЇНИ

КИРИК В.В.

д-р техн. наук, професор, зав. каф. електричних мереж та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна, e-mail: vkyryk@ukr.net;

БІЛИК А.В.

аспірант кафедри електричних мереж та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна, e-mail: abheatplus@gmail.com.

**Мета роботи.** Виконати аналіз умов роботи вставок постійного струму в монополярному режимі розміщених в межах підстанцій змінної напруги та провести дослідження виникнення постійного струму намагнічування в обмотках силових трансформаторів змінного струму, котрі попадають в зону дії наведеного потенціалу.

**Методи дослідження.** В основу роботи покладено теоретичні дослідження питань пов'язаних з роботою силового обладнання змінної напруги в зоні дії наведеного потенціалу у зарубіжних країнах. Обробка результатів дослідження виконувалася з використанням сучасного прикладного програмного забезпечення: MathCAD, Power Factory.

**Отримані результати.** В процесі виконання роботи було отримано результати, які свідчать про понаднормовані значення постійного струму намагнічування обмоток автотрансформаторів на підстанції Вінницька 750 кВ, при розташуванні перетворювальної підстанції в Західноукраїнській енергосистемі України, на підстанції Західноукраїнська 750 кВ. При роботі напівпровідникових перетворювачів в уніполярному режимі, постійний струм намагнічування перевищує допустимі норми на 13% для підстанцій 330 кВ і більше ніж в 7 разі для підстанцій 750 кВ.

**Наукова новизна.** Авторами проведено теоретичне дослідження, одного із можливих варіантів реалізації передачі постійного струму в Україні й визначено ризики пов'язані з монополярним режимом роботи передачі постійної напруги.

**Практична цінність.** Результати роботи можуть бути використанні при проектуванні нових передач постійного струму (вставок постійного струму) в енергосистемі України з метою збільшення її експортних можливостей, а також при дослідженні можливих режимів роботи передач постійного струму в складі систем змінної напруги.

**Ключові слова:** передачі постійного струму; монополярний режим; заземлюючий електрод; вставка постійного струму; силові трансформатори.

### І. ВСТУП

Зі зростанням рівнів потужності споживання в останні роки, перед електроенергетикою постають нові задачі. Недостатня пропускна здатність міжсистемних зв'язків (з малим запасом стійкості) в ситуаціях підвищення навантаження, короткого замикання, раптового відключення генеруючих і передавальних елементів системи може призвести до порушення статичної стійкості (при малих збуреннях) і динамічної стійкості (при різких і глибоких порушеннях нормального режиму). Внаслідок порушення стійкості відбувається випадання генераторів із синхронізму, що призводить до розпаду енергосистеми на несинхронні частини і як наслідок до економічних збитків [1].

### ІІ. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Одним із перспективних шляхів подолання даної проблеми є використання передач високої напруги постійного струму. Дане технічне рішення має широкий ряд переваг в порівнянні з системами змін-

ного струму [2]. Інтеграція ОЕС України в ENTSO-E шляхом спорудження комерційних передач постійного струму (ППС) є реальним шляхом для суттєвого збільшення експорту електроенергії до європейських країн. В той же час, як для забезпечення можливості паралельної роботи ОЕС України з енергетичним об'єднанням країн Європи на змінному струмі необхідно виконати значний обсяг організаційно-технічних заходів, спрямованих на модернізацію та впровадження сучасних технологій в енергосистемі.

По оцінкам експертів [16] України в даному разі можуть бути задіяні існуючі ПЛ 750 кВ Західноукраїнська - Альбертирша (Угорщина), Хмельницька АЕС - Жешув (Польща), і Південноукраїнська - Ісакча (Румунія). Пропускна здатність зазначених ПЛ 750 кВ дозволяє встановити від одного до трьох модулів паралельних модулів вставок постійного струму, потужністю по 600 МВт в кожній із ліній.

Реалізовувати до трьох модулів вставок постійного струму (ВПС) по 600 МВт на кожній лінії.



Варто відзначити, що в Україні вже є досвід використання ППС високої напруги (HVDC) в російському напрямку. В 1962 році в дію була введена перша міждержавна лінія постійного струму 800 кВ Волгоград - Донбас [16], котра початково була споруджена з використанням ртутних вентильних перетворювачів, які на тому етапі стану техніки (до появи пристроїв силових електроніки) були єдиним можливим рішенням для перетворення великих струмів. Після 40 років експлуатації ППС її передавальна потужність знизилася до 200 МВт через зношеність ртутних вентилів. І у сукупності з іншими чинниками до 2000 року передача постійного струму втратила своє міжсистемне значення. На той час, глибокого дослідження і вивчення питань впливу режимів роботи ППС на сусідні системи змінного струму ніхто не проводив.

Більшість досліджень пов'язаних з питаннями підмагнічування магнітопроводів постійним струмом, що протікає через нейтраль заземлених силових трансформаторів, внаслідок роботи перетворювальних підстанцій в однополюсних монополярних режимах, проводяться за кордоном і присвячені вивченню китайської енергосистеми, так як на сьогодні вона є однією з найбільших розгалужених гібридних енергосистем в світі [4 - 13]. Варто відмітити, що процес намагнічування силових трансформаторів, які розташовані поблизу перетворювальних підстанцій, споріднений з явищем геомагнітних індукційних струмів при геомагнітних збуреннях в земній атмосфері, хоча останнє має іншу природу виникнення [3].

### III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є дослідження і аналіз процесів, пов'язаних з ефектом підмагнічування постійним струмом силових трансформаторів змінної напруги в гібридних електричних мережах зі вставками (передачами) постійного струму, які можуть мати місце в ОЕС України.

### IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

В даній роботі розглядаються Західна і Південно-Західна енергосистеми України в умовах перспективного введення двох модулів ППС 2 x 600 МВт у напрямку Венгрії на підстанції 750 кВ Західноукраїнська. Відомо, що біполярні електропередачі постійного струму високої напруги (ППС ВН) можуть працювати в режимах уніполярної передачі, коли один з полюсів знаходиться в плановому ремонті або відключений в результаті аварії. Відтак, постійний струм проходить по землі, що безпосередньо впливає на сусідні системи змінного струму, зокрема на силові трансформатори, котрі працюють в режимі з заземленою нейтраллю. В [2] аналізується схема і шлях проходження постійного струму в петлі: земля - трансформатор - лінія електропередавання (ЛЕП) - транс-

форматор. Постійний струм через нейтраль трансформатора збуджується напругою внаслідок різниці потенціалів між місцем заземлення нейтралі трансформатора і розміщенням заземлення ППС. Він залежить від структури ґрунту та відстані до електроду заземлення ППС, а також від величини струму через нього.

Відомо, що в енергетичній системі України на високих напругах 110/220/330/750 кВ використовуються силові трансформатори та автотрансформатори котрі, працюють з глухо-заземленою нейтраллю на стороні високої напруги (ВН). Відповідно при складанні математичної розрахункової моделі дослідження, схеми заміщення для трансформаторів і автотрансформаторів будуть мати різне представлення, так як останні не мають гальванічної розв'язки між обмотками ВН та середньої напруги (СН), рис. 1.

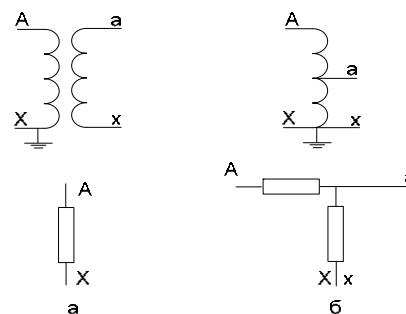


Рисунок 1. Схема заміщення по постійному струму: а - трансформатора, б - автотрансформатора

Топологію Західної і Південно-Західної енергосистеми України 220 - 750 кВ можна представити графом електричної мережі, який показано на рис.2.

На рис.2 точкою 1 позначено місце розташування підстанції 750/330 кВ Західноукраїнська, на котрій в перспективі може бути встановлено силове напівпровідникове обладнання перетворювальної підстанції (ПП). Необхідно відмітити, що в радіусі 50км від перетворювальної підстанції (ПП) розташовано 2 ПС напругою 330 кВ і 4 ПС напругою 220 кВ.

Для спрощення аналізу, виокремимо з даної області дві підстанції 330 кВ: ПС Львів Південна (точка 2) і ПС Львів Західна (точка 3). На даних підстанціях встановлені силові автотрансформатори типу АТДЦТН-200000/330. Однолінійна схема заміщення даної частини електричної мережі представлена на рис.3. Наявність в електричній мережі автотрансформаторів дещо ускладнює процес розрахунку струму намагнічування  $I_N$  в нейтралі автотрансформаторів (АТ), внаслідок того, що між обмотками ВН та СН немає гальванічної розв'язки. Виходячи з цього, при розгляді сегменту електричної мережі в склад якої входить більше двох автотрансформаторів одного класу напруги, для визначення постійного струму, що протікає по загальній обмотці необхідно виконувати еквівалентування методом "зірка-трикутник", при

умові, що величина струму намагнічування в обмотці НН співставна із величиною струму намагнічування обмотки ВН.

Доцільно припустити, що для точного розрахунку намагнічуючих струмів на ділянках мережі, що містять в своєму складі і автотрансформатори і силові

трансформатори, необхідно виконувати еквівалентування загальної схеми заміщення, однак постає питання, трансформатори якого класу напруги, крім базового, слід враховувати при перетворенні мережі?

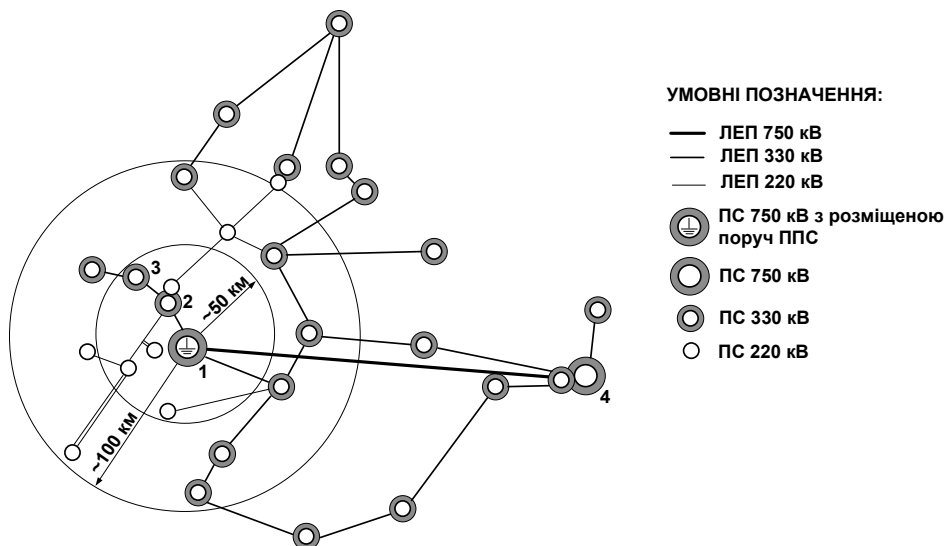


Рисунок 2. Граф електричної мережі 220 - 750 кВ України Західної і Південно-Західної енергосистем

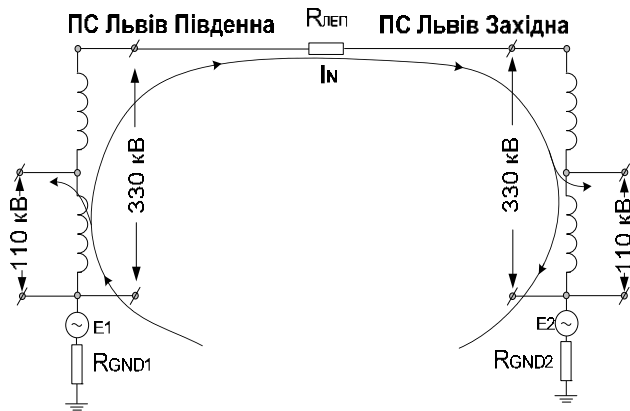


Рисунок 3. Однолінійна схема заміщення ділянки мережі 330

Для відповіді на вище поставлене запитання виконаємо спрощення розглядаємої ділянки мережі, шляхом обмеження радіуса зони, в котрій буде проводитись дослідження наведеного потенціалу, до 50 км на напрузі 330 кВ і до 300 км на напрузі 750 кВ.

Відповідно, при умові розміщення перетворювальної підстанції ППС на ПС 750 кВ Західноукраїнська, в радіус 50 км від неї попадають дві підстанції 330 кВ, а саме ПС Львів західна і Львів південна, а в радіус 300 км попадає одна підстанція 750 кВ – Вінницька.

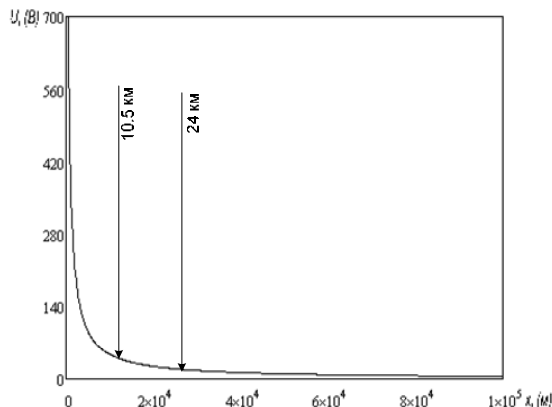
Значення потенціалу в точці заземлення нейтралі силового трансформатора, при роботі ППС в уніполярному режимі визначається відстанню від заземлюючого електроду і відповідно структурою ґрунту. Відповідно до аналізу, проведеного в [4] при розтіканні струму в багатошарових структурах ґрунту, для попереднього розрахунку допустимо приймати: 100 Ом·м - для однорідних ґрунтів і 1000 Ом·м - для неоднорідних.

Базуючись на параметрах ґрунту, значення потенціалу напруги в нейтралі трансформаторів змінного струму визначається за наступним виразом [14]:

$$U(x) = \begin{cases} \frac{\rho \cdot I}{2\pi(x+R)}, & \text{якщо } x \geq R \\ \frac{\rho \cdot I}{4\pi^2 \cdot R} \cdot \ln \left[ \frac{128 \cdot R^2 \cdot h \cdot r}{(h^2 + z^2 + x^2)} \right], & \text{якщо } x < R \end{cases}, \quad (1)$$

де,  $U(x)$  – значення потенціалу напруги в точці віддаленій від електроду заземлення ППС на відстань  $x$ ;  $\rho$  – питомий опір ґрунту;  $I$  – значення струму електроду заземлення при роботі ППС в уніполярному режимі;  $R$  – радіус контуру заземлення, в випадку виконання його в вигляді кола;  $r$  – радіус заземлюючого електроду;  $h$  – глибина встановлення заземлюючих електродів,  $z$  – точка, на глибині якої визначається значення потенціалу.

Для моделювання процесу приймаємо початкові значення для вхідних величин, а саме: значення струму заземлюючого електрода двох модулів ВПС потужністю по 600 МВТ кожен, на напрузі  $\pm 400$  кВ величиною 3000 А,  $R = 200$  м,  $r = 0,1$  м,  $h = 2$  м,  $z = 1$  м,  $\rho = 1000$  Ом·м. Відповідно до (1) епюра розподілу потенціалу на відстань 100 км від електрода заземлення матиме вигляд рис.4



**Рисунок 4.** Епюра розподілу потенціалу напруги навколо заземлюючого електрода ППС на відстань 100 км

В більшості випадків, контур заземлення ППС виносять за межі перетворювальної підстанції на деяку відстань. Для прикладу, на лінії Волгоград - Донбас контур заземлення було виведено приблизно на 30 км від перетворювальної підстанції [15].

Визначивши значення потенціалу  $U(x)$  в точці заземлення силового трансформатора, постійний струм підмагнічування  $I_N$  розраховуємо за формулою:

$$I_{N(i-j)} = \frac{U_1 - U_2}{R_{GND1} + R_{GND2} + \frac{R_{T1} + R_{T2} + R_{ЛЕП}}{3}}, \quad (2)$$

де  $U_1, U_2$  - значення потенціалу напруги на підстанції (ПС) №1 і №2 відповідно;  $R_{GND1}, R_{GND2}$  - опір контуру заземлення ПС №1 і №2 відповідно;  $R_{T1}, R_{T2}$  - активний опір обмоток трансформаторів по котрим проходить постійний струм намагнічування;  $R_{ЛЕП}$  - активний опір ЛЕП між підстанціями 1 і 2. Коефіцієнт три в знаменнику враховує той факт, що постійний струм намагнічування проходить по трьом фазам і на виході підсумовується в нульовій точці.

Виконуємо розрахунок потенціалів напруги по фактичних даних трансформаторів і ліній електропередавання, а також усереднених даних параметрів ґрунту виконавши підстановку в вирази (1) та (2) для двох пар автотрансформаторів: ПС 330 кВ Львів південна і Львів західна; ПС 750 кВ Західноукраїнська - Вінницька (рис.2, точка 4). Результати розрахунку

показано в таблиці 1.

При розрахунку прийнято, що опір ґрунту дорівнює, як для неоднорідного типового; еквівалентування мережі виконувалось без врахування мереж сусіднього класу напруги; місце встановлення заземлюючого електрода прийнято на відстані 10 км від підстанції.

У відповідності до чинних стандартів мереж з HVDC [15] граничний постійний струм кожної обмотки силового трансформатора повинен бути: для однофазних трансформаторів менше 0,3% від номінального струму; для трифазного трансформатора з сердечником з п'яти стержнів менше 0,5%; для трифазного трансформатора з трьохстержневим сердечником повинен бути менше 0,7%.

Аналіз даних представлених в таблиці 2, показує, що при заданих умовах, струм намагнічування на ПС 330 кВ перевищує допустимі норми на 13%, а на ПС 750 кВ - на 742%.

Очевидно, що величина струму намагнічування на віддалених від заземлюючого електрода підстанціях залежить від величини потенціалу напруги на поруч розташованих ПС.

Аналізуючи вхідні параметри для розрахунку при прийнятих припущеннях, відповідно до (1), суттєве зниження напруги  $U_1$  фактично можливе лише за рахунок зменшення сили струму заземлюючого електрода, що теоретично можливо за рахунок виконання силових перетворювачів на більш високих класах напруги. Також варто відзначити параметр  $R$  у виразі (2). Змінна відстані від заземлюючого електрода до точки заземлення силового автотрансформатора, також сильно впливає на величину наведеної напруги, в той час, як змінна параметрів контуру заземлення перетворювальної підстанції не призводить до значних змін значення наведеного потенціалу.

В країнах з специфічним кліматом і ландшафтом, проводять також дослідження впливу параметрів ґрунту на значення напруги розтікання від заземлюючого електрода перетворювальної підстанції. Наприклад в Фінляндії із-за наявності значної кількості фіордів, а також із-за відносно низьких температур, через що відбувається сильне промерзання ґрунту, внаслідок чого величина струму намагнічування змінюється майже в 2 рази, в залежності від пори року [6].

Перевищення нормативних значень постійного струму намагнічування в нейтралі силових трансформаторів змінного струму може призводити до таких порушень:

- насичення магнітної системи трансформатора і як наслідок появи додаткового напівперіодного струму збудження трансформатора;
- генерація значної кількості високочастотних гармонік, самим же трансформатором;
- збої в релейному захисті трансформатора;
- підвищення акустичного шуму, вібрації і локального перегріву обмоток трансформатора, що в свою чергу прискорює старіння ізоляції.

Таблиця 1. Результати оцінки струму намагнічування на ПС 330 і 750 кВ

Параметри	Ділянка мережі 330 кВ		Ділянка мережі 750 кВ	
	Львів західна	Львів південна	Західноукраїнська	Вінницька
Відстань до заземлюючого електроду ППС, км	38	53	10	323
Струм заземлюючого електроду в монополярному режимі ППС, А	3000			
$R_{T_1}$ , Ом	0.613	-	2.93	-
$R_{T_2}$ , Ом	-	0.613	-	2.93
$R_{GND_1}$ , Ом	0.25	-	0,25	-
$R_{GND_2}$ , Ом	-	0,25	-	0,25
$R_{ЛЕП}$ , Ом	2.31		6.41	
$U_i$ , В	12.499	8.975	23.637	1.477
$I_{N(i-j)}$ , А	2.099		9.874	
$I_{N(допустиме)}$	1.818		1.332	

## V. ВИСНОВКИ

Аналіз спрощеної моделі ділянки електричної мережі 330 кВ ПС Львів Південна - ПС Львів Західна і 750 кВ ПС Вінницька - ПС Західноукраїнська, при умові перспективного встановлення передачі постійного струму на останній, показав що при прийнятій конфігурації електричної мережі і потужності передачі постійного струму 2 x 600 МВт, при роботі напівпровідникових перетворювачів в уніполярному режимі, постійний струм намагнічування на ПС 330 кВ перевищує допустимі норми на 13%, а на ПС 750 кВ - більше ніж в 7 разів. Таке перевищення допустимих норм на напрузі 750 кВ пов'язане з низьким активним опором, а також з значною протяжністю таких ліній.

Встановлено, що суттєве зниження напруги  $U_i$  фактично можливе лише за рахунок зменшення сили струму заземлюючого електроду, що теоретично можливо за рахунок виконання силових перетворювачів на більш високих класах напруги. Змінна відстані від заземлюючого електроду до точки заземлення силового автотрансформатора, також сильно впливає на величину наведеної напруги, в той час, як змінна параметрів контуру заземлення перетворювальної підстанції не призводить до значних змін значення наведеного потенціалу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Кирик В.В., Білик А.В. Передачі постійного струму як інструмент розвитку енергооб'єднань. Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», 29-30 вересня 2016 р., м. Київ, НТУУ КПІ. –С.145-148.

[2] Білик А.В. Особливості інтеграції систем постійного в магістральні мережі змінної напруги - Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України.-2017.-№46.-с.30-34

[3] Винокурова Є.В., Ворона С.С., Кирик В.В., Дремов В.В. Оцінка наведеної напруги на лінії електропередавання напругою 10 кВ / Гідроенергетика України. – 2014. – №4. – с. 42-43.

[4] Guihua Mei, Yuanzhang Sun, Yancun Liu Simulation on DC Current Distribution in AC Power Grid under HVDC Ground-Return-Mode – Scientific Research J. Electromagnetic Analysis & Applications, DOI: 10.4236/jemaa.2010.27054, vol. 2, ISSN 1727-9895, 2010, pp. 418-423.

[5] Jin Enshu, Yu Kuiying, Chai Fangsen Effects of DC magnetic bias on differential protection of transformer – The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, DOI: 10.1109/APAP.2011.6180789, 2011, pp. 2182-2186.

[6] Yang Yongming, Liu Xingmou, Yang Fan Soil Structure Effect on Transformer DC Bias – IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), DOI: 10.1109/ICIT.2014.6894954, Feb. 26 - Mar. 1, 2014, Busan, Korea, pp. 535-540

[7] Yan Li, Yanchao gao, Longnv Li, Di Zhang, Fangxu Han Effects of DC Magnetic Bias on the Magnetic and Sound Fields of Transformer – Energy and Power Engineering, doi:10.4236/epe.2013.54B209, 2013, 5, 1097-1100

[8] Xuesong Zhou, Zhihao Zhou and Youjie Ma Research on DC magnetic Bias of Power Transformer – International Workshop on Information and Electronics Engineering (IWIEE), 2012, pp. 452-455

- [9] Zhang Bo, Zhao Jie, Zeng Rong, et al. Estimation of DC Current Distribution in AC Power System Caused by HVDC Transmission System in Ground Return Status – Proceedings of the CSEE. 2006, pp.84-88.
- [10] Bo Zhang, Jie Zhao, Rong Zeng Numerical Analysis of DC Current Distribution in AC Power System Near HVDC System – IEEE Transactions on power delivery, DOI: 10.1109/TPWRD.2007.908748, vol. 23, no. 2, April 2008, pp. 960-965
- [11] Jin Enshu, Yu Kuiying, Chai Fangsen Effects of DC magnetic bias on differential protection of transformer – The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, DOI: 10.1109/APAP.2011.6180789, October 2011, pp.2182-2186
- [12] Rong Zeng, Zhanqing Yu, Jinliang He Study on Restraining DC Neutral Current of Transformer During HVDC Monopolar Operation. – IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, DOI: 10.1109/TPWRD.2011.2161345, VOL. 26, NO. 4, October 2011, pp.2785-2791
- [13] José Eduardo Telles Villas and Carlos Medeiros Portela Calculation of Electric Field and Potential Distributions Into Soil and Air Media for a Ground Electrode of a HVDC System – IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, DOI: 10.1109/TPWRD.2003.809741, VOL. 18, NO. 3, JULY 2003, pp.867-873
- [14] Зубов К.Н., Немировский А.Е. Метод расчета заземляющих устройств произвольной конфигурации в неоднородных грунтах – Технические науки, NovaInfo.ru, №2, 2010. – С.1-7
- [15] Лейф Энглунд, Матс Лагерквист, Ребати Дасс Магистраль HVDC в Китае – ABB Power Technologies, no. 4, 2003 С.14-20
- [16] НТЦЕ НЕК «Укренерго» Світовий досвід та економічна ефективність застосування електропередач і вставок постійного струму для забезпечення паралельної роботи несинхронізованих енергосистем Міністерство енергетики та вугільної промисловості України НЕК «Укренерго» Науково-технічний центр електроенергетики, Київ, 2012, – С.1-72

Стаття надійшла до редакції 11.10.2018

## МОНОПОЛЯРНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ПЕРЕДАЧ ПОСТОЯННОГО ТОКА В СОСТАВЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ УКРАИНЫ

КИРИК В.В.

*д-р техн. наук, профессор, зав. каф. электрических сетей и систем Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Киев, Украина, e-mail: vkyryk@ukr.net;*

БИЛЫК А.В.

*аспирант кафедры электрических сетей и систем Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Киев, Украина, e-mail: abheatplus@gmail.com.*

**Цель работы.** Выполнить анализ условий работы передач постоянного тока в монополярном режиме расположенных в пределах подстанций переменного напряжения и провести исследования возникновения постоянного тока намагничивания в обмотках силовых трансформаторах переменного тока, которые попадают в зону действия приведенного потенциала.

**Методы исследования.** В основу работы положены теоретические исследования вопросов связанных с работой силового оборудования переменного напряжения в зоне действия наведенного потенциала в зарубежных странах. Обработка результатов исследования выполнялась с использованием современного прикладного программного обеспечения: MathCAD.

**Полученные результаты** В процессе выполнения работы были получены результаты, которые свидетельствуют о сверхнормированных значениях постоянного тока намагничивания обмоток автотрансформаторов на подстанции Винницкая 750 кВ, при расположении преобразовательной подстанции в Западноукраинской энергосистеме Украины, на подстанции Западно 750 кВ. При работе полупроводниковых преобразователей в униполярном режиме постоянный ток намагничивания превышает допустимые нормы на 13% для подстанций 330 кВ и более чем в 7 раз для подстанций 750 кВ.

**Научная новизна.** Авторами проведено теоретическое исследование, одного из возможных вариантов установки передачи постоянного тока в Украине и определены риски для оборудования переменного напряжения связанные с монополярным режимом работы передачи постоянного тока.

**Практическая ценность.** Результаты работы могут быть использованы при проектировании новых передач постоянного тока (вставок постоянного тока) в энергосистеме Украины с целью увеличения ее экспортных возможностей, а также при исследовании возможных режимов работы передач постоянного тока в

составе систем переменного напряжения.

**Ключевые слова:** *передачи постоянного тока; монополярный режим; заземляющий электрод; вставка постоянного тока; иловые трансформаторы.*

## MONOPOLAR MODE OF OPERATION OF HVDC IN THE MAIN ELECTRIC NETWORKS OF UKRAINE

KYRYK V.V.

*Sci.D, Professor, head of the department of electrical networks and systems of the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine, e-mail: vkryk@ukr.net;*

BILYK A.V.

*Postgraduate student of the Department of Electrical Networks and Systems of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute. Igor Sikorsky, Kiev, Ukraine, e-mail: abheatplus@gmail.com.*

**Purpose.** *Perform an analysis of the conditions of the direct-current transmission in a monopolar mode in the conditions near the alternating voltage substation located and to conduct a study of the occurrence of a direct current of dc bias in the windings of power transformers of an alternating current that fall into the zone of the induced potential.*

**Methodology.** *The basis of the work is based on theoretical studies of the problems related to the operation of power equipment of alternating voltage in the zone of action of the given potential in foreign countries. The results of the research were processed using modern software applications: MathCAD.*

**Findings.** *In the course of the work, overtime values of the direct current of magnetization of windings of autotransformers for the Vinnytsia 750 kV substations were obtained, with the location of a transformation substation in the Western Ukrainian Power System of Ukraine, at a 750 kV Western-Ukrainian substation. When operating semiconductor converters in unipolar mode, the direct magnetizing current exceeds the permissible norms by 13% for 330 kV substations and more than 7 times for 750 kV substations.*

**Originality.** *The authors carried out a theoretical study, one of the possible options for establishing the transmission of DC in Ukraine, and identified the risks associated with the monopolar mode of operation of the transducer of constant voltage.*

**Practical value.** *The results of the work can be used in the design of new DC transmissions (DC inserts) in the power grid of Ukraine in order to increase its export capabilities and also at research of possible operating modes of transfers of a direct current as a part of systems of alternating voltage.*

**Keywords:** *direct current transmission; monopolar mode; grounding electrode; dc link; power transformers.*

### REFERENCES

- [1] Kyryk V.V., Bilyk A.V. Transmitters of DC as an instrument for the development of power interconnections. Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the 21st Century", September 29-30, 2016, Kyiv, NTUU KPI. -pp.145-148.
- [2] Bilyk AV Features of integration of systems of permanent-th in the main networks of alternating voltage - Proceedings of the Institute of electrodynamics of the National academy of sciences of Ukraine.-2017.- №46.-pp.30-34
- [3] Vinokurova Ye.V., Vorona S.S., Kyryk VV, Dremov V.V. Assessment of the induced voltage on the power transmission line with voltage of 10 kV / Hydroelectric power station of Ukraine. - 2014 - # 4. - pp. 42-43.
- [4] Guihua Mei, Yuanzhang Sun, Yancun Liu Simulation on DC Current Distribution in AC Power Grid under HVDC Ground-Return-Mode – Scientific Research J. Electromagnetic Analysis & Applications, DOI: 10.4236/jemaa.2010.27054, vol. 2, ISSN 1727-9895, 2010, pp. 418-423.
- [5] Jin Enshu, Yu Kuiying, Chai Fangsen Effects of DC magnetic bias on differential protection of transformer – The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, DOI: 10.1109/APAP.2011.6180789, 2011, pp. 2182-2186.
- [6] Yang Yongming, Liu Xingmou, Yang Fan Soil Structure Effect on Transformer DC Bias – IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), DOI: 10.1109/ICIT.2014.6894954, Feb. 26 - Mar. 1, 2014, Busan, Korea, pp. 535-540
- [7] Yan Li, Yanchao gao, Longnv Li, Di Zhang, Fangxu Han Effects of DC Magnetic Bias on the Magnetic and Sound Fields of Transformer – Energy and Power Engineering, doi:10.4236/epe.2013.54B209, 2013, 5, 1097-1100
- [8] Xuesong Zhou, Zhihao Zhou and Youjie Ma Research on DC magnetic Bias of Power Transformer –

- International Workshop on Information and Electronics Engineering (IWIEE), 2012, pp. 452-455
- [9] Zhang Bo, Zhao Jie, Zeng Rong, et al. Estimation of DC Current Distribution in AC Power System Caused by HVDC Transmission System in Ground Return Status – Proceedings of the CSEE. 2006, pp.84-88.
- [10] Bo Zhang, Jie Zhao, Rong Zeng Numerical Analysis of DC Current Distribution in AC Power System Near HVDC System – IEEE Transactions on power delivery, DOI: 10.1109/TPWRD.2007.908748, vol. 23, no. 2, April 2008, pp. 960-965
- [11] Jin Enshu, Yu Kuiying, Chai Fangsen Effects of DC magnetic bias on differential protection of transformer – The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, DOI: 10.1109/APAP.2011.6180789, October 2011, pp.2182-2186
- [12] Rong Zeng, Zhanqing Yu, Jinliang He Study on Restraining DC Neutral Current of Transformer During HVDC Monopolar Operation. – IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, DOI: 10.1109/TPWRD.2011.2161345, VOL. 26, NO. 4, October 2011, pp.2785-2791
- [13] José Eduardo Telles Villas and Carlos Medeiros Portela Calculation of Electric Field and Potential Distributions Into Soil and Air Media for a Ground Electrode of a HVDC System – IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, DOI: 10.1109/TPWRD.2003.809741, VOL. 18, NO. 3, JULY 2003, pp.867-873
- [14] Zubov K.N., Nemirovsky A.E. The method of calculating permalling devices of arbitrary configuration in non-sodic soils - Technical sciences, Novaisfo.ru, №2, 2010. -pp.1-7
- [15] Leaf Englund, Mats Lagerquist, Rebati Dass Highways HVDC in China - ABB Power Technologies, no. 4, 2003 pp.14-20
- [16] STCU NEC "Ukrenergo" World experience and economic efficiency of the use of power converters and DC inserts for parallel operation of non-synchronized power systems Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine NEC "Ukrenergo" Scientific and Technical Center for Electricity, Kyiv, 2012, -pp.1-72

УДК 621.316.13

## КОРОТКОСТРОКОВЕ ПРОГНОЗУВАННЯ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОБ'ЄКТАХ ЕНЕРГОРИНКУ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДА «ГУСЕНИЦА»-SSA

РОЗЕН В.П.

д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації управління електротехнічними комплексами Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, Київ, України e-mail: demchyk14@dmil.com;

ДЕМЧИК Я.М.

асистент, кафедри автоматизації управління електротехнічними комплексами Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, Київ, України e-mail: demchyk14@dmil.com.

**Мета роботи.** Основною метою проведеного дослідження є підвищення ефективності режиму роботи енергосистеми за рахунок прогнозування споживання електричної енергії споживачами шляхом використання методу «Гусениця»-SSA для зниження похибки прогнозування електричної енергії на об'єктах енергоринку.

**Методи дослідження.** Досліджується використання методу "Гусениця"-SSA прогнозування споживання електричної енергії промислового об'єкта енергоринку.

**Отримані результати.** В даній статті досліджується використання методу "Гусениця"-SSA прогнозування споживання електричної енергії промислового об'єкта енергоринку. Основою проведеного дослідження є підвищення ефективності режиму роботи енергосистеми за рахунок прогнозування споживання електричної енергії споживачами, постачальниками та виробниками. Використання сучасних способів збору статистичної інформації дозволяє приймати правильні рішення в плануванні та управлінні енергооб'єктами. В статті представлено метод сингулярного спектрального аналізу, який дозволяє використання статистичних даних нестационарного ряду. Використання методу сингулярного спектрального аналізу-SSA дозволяє отримати похибку прогнозування електричної енергії на об'єктах енергоринку в межах допустимого. Отримане прогнозне електричне споживання за деякий період дозволить управляти електроенергетичною системою за допомогою пристроїв збору даних. Пристрої збору даних в автоматичному режимі будуть передавати статистичну інформацію, а програмне забезпечення корегувати прогнозні значення електричної енергії замовленні споживачем, постачальником. Дане дослідження дозволяє використовувати метод сингулярного спектрального аналізу в простому прогнозуванні на тиждень, добу, годину наперед при використанні статистичних інструментів. Результати можуть використовуватися в електроенергетиці при попередньому прогнозуванні споживання електроенергії та плануванні об'ємів виробництва електричної енергії та ціни на неї. Запропонований метод показує як правильно використовувати сингулярний спектральний в прогнозуванні електричної енергії.

**Наукова новизна.** Дослідження в області прогнозування електроспоживання дозволить знизити похибку прогнозування не застосовуючи методів аналізу на стаціонарність часових рядів електроспоживання.

**Практична цінність.** Дозволить замовляти електричну енергію в постачальників з меншою похибкою це збільшить економію коштів споживачів.

**Ключові слова.** електроспоживання; промисловий об'єкт енергоринку; «Гусениця»-SSA; прогнозування; сингулярний аналіз.

### I. ВСТУП

У сучасних умовах одним з важливих завдань є формування відносин між суб'єктами енергоринку, зокрема між споживачем та енергопостачальною компанією. Прогнозування електроспоживання підприємств є одним моментів планування діяльності всього підприємства, а також промисловості в цілому. Для виробника електричної енергії прогноз потрібний для оптимізації поставки і резервування електроенергії, проведення профілактичних робіт і забезпечення безпеки функціонування електроенергетичної системи (ЕЕС). Споживачу прогноз необхідний для мінімізації похибок, пов'язаних з платою штрафів при перевищенні лімітів по потужності і з передплатою за заяв-

лену, але не використану потужність, а також з простом технологічного обладнання в випадку дефіциту потужності в ЕЕС

Прогнозування режимних параметрів і техніко-економічних показників є одним із важливих завдань, як при прогнозуванні, так і при веденні діючих режимів енергообладнання підприємства. Складаючи плани за різними показникам на наступну добу, тиждень, місяць, квартал, рік, служба головного енергетика підприємства повинна вирішувати задачу прогнозування енергобалансу - співвідношення між потребою в електроенергії (потужності) і засобами її задоволення. Одним з показників при прогнозуванні є рівень очікуваного електроспоживання в цілому по підпри-



емству. У цьому сенсі величина прогнозу електроспоживання є опорним показником для прогнозування балансів електроенергії та потужності. Необхідність точного прогнозування споживання електроенергії обумовлена технологічними і економічними причинами підприємства.

Точність прогнозних розрахунків визначається відповідністю застосовуваних математичних моделей процесу коливань споживання електроенергії. В цілому дані коливання являють собою складний нестационарний випадковий процес, який має певні циклічності (регулярні коливання). При застосуванні математичних моделей і програмних засобах фахівці служби головного енергетика підприємства зазвичай обмежуються усередненими за минулі періоди значеннями. Таку методику розрахунків очікуваних планових величин називають зазвичай «ручним прогнозом». Спрощене, «ручне» прогнозування споживання може давати досить високі значення математичного очікування помилок, широкий довірчий інтервал і практично не застосовується для швидких оперативних розрахунків в темпі процесу.

Необхідність прогнозування електроспоживання обумовлена технологічними, економічними причинами та механізмом функціонування оптового ринку електроенергії. В Україні промислові об'єкти повинні дотримуватися граничних величин споживання електричної енергії та електричної потужності. Розрахунок граничних величин необхідно проводити на основі відомих методів прогнозування споживання енергії та потужності. Прогнозування дозволяє забезпечити адекватний, з економічної точки зору, розподіл навантажень між промисловими об'єктами та сприятиме здійсненню економічно доцільних операцій з купівлі та продажу електроенергії. На основі прогнозів споживання здійснюється підготовка балансів потужностей і електроенергії, які відзначають рівень власного споживання і можливості її покриття [1]. Суб'єкт оптового ринку бере на себе деякий ризик, який зв'язаний з неможливістю планування заявки на споживання електроенергії. Відхилення фактичного споживання від заявлених значень більше відповідного відсотка приводить до купівлі електроенергії з балансууючого ринку за більшою ціною. Споживач сплачує постачальнику вартість недоврахованої електроенергії, розраховану виходячи із приєднаної потужності струмоприймачів та кількості годин їх використання відповідно до методики визначення обсягу та вартості електричної енергії, не облікованої внаслідок порушення споживачами правил користування електричною енергією, затвердженою постановою НКРЕ від 04.05.2006 №562 за тарифами, що діяли протягом споживання енергії з порушенням [4]. Таким чином, висока точність прогнозу дозволяє знизити фінансові втрати суб'єкта оптового ринку [2].

Під час вирішення задачі прогнозування споживання електроенергії постає питання вибору математичної моделі прогнозування. Адекватність цієї

моделі впливає на точність визначення планового електроспоживання під час формування цінової заявки куплі-продажу електроенергії на оптовому ринку [2].

Похибка прогнозних оцінок визначає адекватність використовуваних математичних моделей процесу коливання споживання електроенергії. В цілому процес споживання електроенергії являє собою нестационарний випадковий процес, має визначення циклічності [4], [6].

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Оцінка енерговитрат під час заявки електроенергії повинна визначатись за адекватними математичними моделями об'єктів дослідження, які враховують внутрішні матеріальні та інформаційні потоки. Це дозволяє здійснити аналізування моделей і на основі отриманої інформації виконувати оптимальне короткострокове управління та прогнозування. Класичні методи прогнозування зазвичай використовують лінійні та стаціонарні часові ряди, але статистичні ряди електроспоживання, як правило, такими не являються. Тому потрібно шукати розв'язок задачі прогнозування в іншому напрямку. В цьому випадку ефективно використовувати алгебраїчні, детерміновані, а не статистичні методи прогнозування, особливо для малих нестационарних часових рядів [7]. Сингулярний спектральний аналіз (SSA) є одним з найбільш ефективних методів для аналізу часових рядів. Методи «Гусениця»-SSA почали розвиватись незалежно один від одного в Росії, Великобританії та США [8]. SSA став використовуватись як метод для аналізування трендів, циклічності та інших складових часових рядів [9]. В статті запропоновано застосування методу «Гусениця»-SSA для прогнозування споживання електроенергії. Таким чином, аналіз публікацій дозволяє зробити висновок, що в теперішній час відбувається відхід від використання статистичних методів прогнозування нестационарних часових рядів за допомогою методів декомпозиції. Перевагою метода «Гусениця»-SSA являється відсутність вимоги апріорного задавання моделі ряду, а також можливість виділення гармонічних складових з змінними амплітудами та частотами, що вигідно відрізняє його від методів, в основі якого лежить метод Фур'є.

Аналіз досліджень електричних споживань показує як правильно вибирати параметри моделі для прогнозування при різних видах прогнозу (достроковий, середньостроковий, короткостроковий).

Прогнозування електроспоживання ідеальним рішенням є застосування часових рядів математичних моделей, заснованих на використанні апарата SSA, що включає в себе розвинену методологію структурного моделювання й методів навчання, оснований на добре розвинутій теорії сингулярного спектрального аналізу [15].

Прогнозування обсягів електроенергії (наванта-

ження, споживання), яке необхідне для вирішення завдань планування та оперативного управління режимами функціонування підприємств, проводиться в наступних часових діапазонах: оперативне (доба); короткострокове (доба-тиждень-місяць); довгострокове (місяць-квартал-рік).

Розроблено велику кількість методів і моделей прогнозування навантаження. Традиційні статистичні моделі можуть бути умовно розділені на регресивні моделі і моделі на основі часових рядів.

Особливий інтерес представляє використання SSA (сингулярного спектрального аналізу) в якості моделі виконує прогноз. Перевага SSA перед традиційними моделями зумовлена тим, що не потрібно будувати модель об'єкта, не губиться працездатність при неповній вхідній інформації, у SSA висока стійкість до перешкод і швидкодія. Дані прогнозів за різні періоди зберігаються в базі даних. Важливим етапом синтезу SSA прогнозування є вибір, формування і нормування вектора вхідних даних [11], [12].

Мета та задачі дослідження. Метою проведеного дослідження є підвищення ефективності режиму роботи енергосистеми за рахунок прогнозування споживання електричної енергії споживачами шляхом використання методу «Гусениця»-SSA для зниження похибки прогнозування електричної енергії на об'єктах енергоринку.

### III. МЕТА РОБОТИ

Основною метою проведеного дослідження є підвищення ефективності режиму роботи енергосистеми за рахунок прогнозування споживання електричної енергії споживачами шляхом використання методу «Гусениця»-SSA для зниження похибки прогнозування електричної енергії на об'єктах енергоринку.

### IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Метод «Гусениця»SSA базується на динамічній модифікації метода головних компонент і який не потребує стаціонарності часового ряду [13, 14]. Побудуємо математичну модель часового ряду електроспоживання промислових об'єктів енергоринку. Для цього використаємо вихідний ряд електричного споживання який представлений в табл.1. Вибрано 174 значення часового ряду електроспоживання  $W(t), t \in [1, N]$ , де  $N$  - рівностоящі значення електричних споживань функцій  $f(t)$

$$x_t = f((i-1)\Delta t),$$

де  $i = 1, 2, \dots, 174$  - кількість спостережень електричного проживання,  $t$  - час за який було проведено спостереження,  $\Delta$  - деякий часовий інтервал за яким проводилося спостереження,  $N$  - довжина часового ряду електричного спостереження,  $N = 1, n, L$  - довжина

вікна використаного для аналізу часового ряду електричного споживання  $L = 1, n$ .

Таблиця 1. Вихідний ряд електричного споживання

Кількість спостережень	1	2	...	173	174
Дні	01.01.11	02.01.11	...	22.06.11	23.06.11
Електроспоживання, кВт*год	6956567	7005432		5696426	5750054

Алгоритм методу «Гусениця»-SSA складається з чотирьох етапів [16]:

Крок 1. *Вложення*. Данна процедура переводить часовий ряд електричних споживань в послідовність багатомірних векторів.

Процедура вложення утворюється за формулою 1,  $K = N - L + 1$  - векторів вложення, які мають розмірність  $L$ :

$$X_i = (f_{i-1}, \dots, f_{i+L-2})^T, 1 \leq i \leq K, \quad (1)$$

В результаті обчислення даного кроку отримаємо  $L$  - траєкторну матрицю вихідного ряду електричного споживання  $F$ .

Крок 2. *Сингулярне розкладання*. Матриця  $X$  може бути записано за формулою 2:

$$X = X_1 + X_2 + \dots + X_d, \quad (2)$$

$$X_i = \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T; U_1 \dots U_L. \quad (3)$$

Кожен з ортонормальних систем власних векторів матриці яка визначається за формулою 3;  $S(S = X \cdot X^T); \lambda_1 \dots \lambda_L$  - власні числа матриці  $S$ ;  $d = \max \{i, \lambda_i > 0\}$

В стандартній термінології  $\sqrt{\lambda_i}$  називаються сингулярними числами,  $U_i$  і  $V_i$  - лівими та правими сингулярними векторами матриці  $X$  відповідно. Кожна з матриць  $X_i$  має ранг 1. Тому їх можна називати елементарними матрицями. Набір  $\sqrt{\lambda_i}, U_i, V_i$  ми будемо називати власною трійкою сингулярних розкладань.

Крок 3. *Відбір головних компонент*. Розкладання може бути записано за формулою 4 в наступному

згрупованому вигляді:

$$X = X_{I_1} + X_{I_2} + \dots + X_{I_m} \quad (4)$$

де  $m$  підмножини множин  $I_1 \dots I_m$ .

Результатом цього кроку являються наступна згрупована множина яка формується за формулою 5:

$$\begin{aligned} I_1 &= X_1 + X_2 + X_3 + X_5 \\ I_2 &= X_4 + X_6 + X_8 \\ I_3 &= X_7 + X_9 + X_{10} \end{aligned} \quad (5)$$

Крок 4. *Діагональне усереднення*. На останньому кроці базового алгоритму кожна матриця згрупованого розкладання формується новий ряд довжини  $N$  за формулою 6:

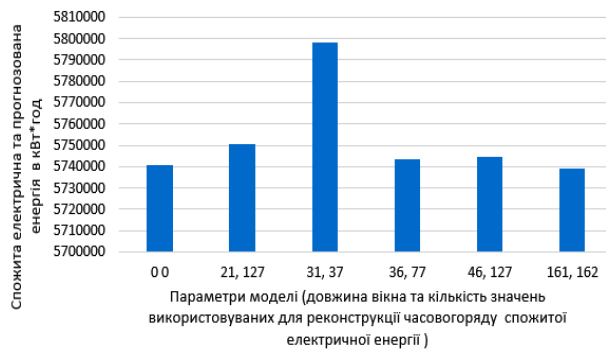
$$g_k = \begin{cases} \frac{1}{k+1} \sum_{m=1}^{k+1} y_{m,k-m+2}^*, & 0 \leq k < L^* - 1 \\ \frac{1}{L} \sum_{m=1}^{L^*} y_{m,k-m+2}^*, & L^* - 1 \leq k < K^* \\ \frac{1}{N-1} \sum_{m=k-K+2}^{N-K+1} y_{m,k-m+2}^*, & K^* \leq k < N \end{cases} \quad (6)$$

Задачею дослідження є оцінка за рахунок використання методу «Гусениця»-SSA, похибки прогнозу електроспоживання об'єкту енергоринок  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Величина похибки прогнозування часового ряду електроспоживання промислових об'єктів від довжини вікна та кількості значень використовуваних для реконструкції часового ряду спожитої електричної енергії наведено в табл. 2, 3, 4.

**Таблиця 2.** Результати розрахунків величини похибки часового ряду електроспоживання на добу наперед

Метод прогнозування	Параметри моделі	Фактичне та прогнозне значення	Похибка прогнозування
Метод «Гусениця»-SSA	0 0	5740629	0
	21 127	5750569	0,17
	31 37	5797921	0,027
	36 77	5743640	0,05
	46 127	5744545	0,068
	161 162	5739020	0,028



**Рисунок 1.** Залежність параметрів моделі від фактичних та прогнозних значень (на добу наперед)



**Рисунок 2.** Залежність параметрів моделі від похибки MAPE (відповідно до прогнозних на добу наперед)

**Таблиця 3.** Результати розрахунків величини похибки часового ряду електроспоживання на тиждень наперед

Метод прогнозування	Параметри моделі	Фактичне та прогнозне значення	Похибка прогнозування
Метод «Гусениця»-SSA	0 0	38142531	0
	11 47	37511734	3,17
	11 62	37084686	3,066
	16 127	38383294	2,89
	16 132	39000853	2,8
	26 132	38121826	2,94



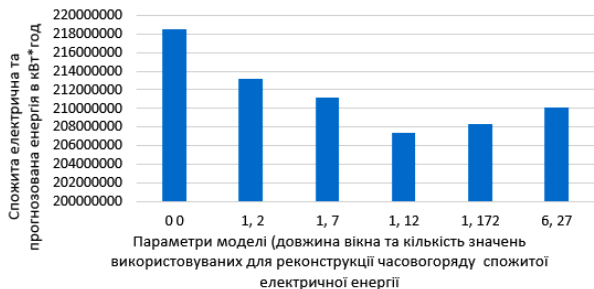
**Рисунок 3.** Залежність параметрів моделі від фактичних та прогнозних значень (на тиждень наперед)



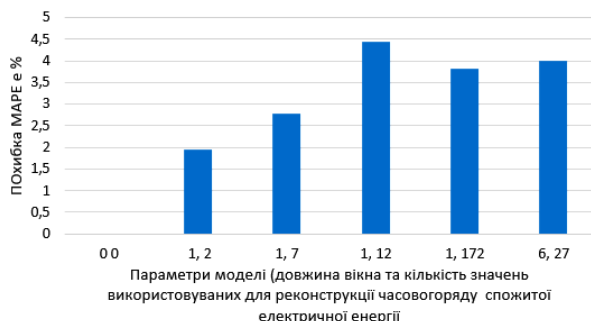
**Рисунок 4.** Залежність параметрів моделі від похибки MAPE (відповідно до прогнозу на тиждень наперед)

**Таблиця 4.** Результати розрахунків величини похибки часового ряду електроспоживання на місяць наперед

Метод прогнозування	Параметри моделі	Фактичне та прогнозне значення	Похибка прогнозування
Метод «Гусениця»-SSA	0 0	218558759,4	0
	1 2	213152543,2	1,94
	1 7	211127271,4	2,79
	1 12	207352132,7	4,43
	1 172	208325282,1	3,82
	6 27	210129537,2	3,99



**Рисунок 5.** Залежність параметрів моделі від фактичних та прогнозних значень (на місяць наперед)



**Рисунок 6.** Залежність параметрів від похибки MAPE (відповідно до прогнозу на місяць наперед)

На рисунках 1, 3 та 5 показано залежності параметрів моделі з прогнозними та фактичними значеннями

електроспоживання. З рисунків видно яким чином краще вибирати параметри моделі відповідно до довжини прогнозованого значення (доба, тиждень, місяць). На рисунках 2, 4 та 6 показано величини похибок MAPE від параметрів моделі. Модель краще вибирати в відповідності до величини похибки та довжини часового ряду який потрібно прогнозувати. Промисловий об'єкт як правило замовляє величину електроенергії, але з врахуванням умов які сформовані правилами куплі-продажу електроенергії. З економічної точки зору необхідно, щоб величина відхилень замовлень електричної енергії від фактичної спожитої електричної енергії була мінімальною.

Результати прогнозування та графіка точності прогнозування за різними моделями SSA наведено на рисунку 2.

Метод «Гусениця»-SSA дозволяє дослідити структуру часового ряду електроспоживання, виділити окремі його складові та прогнозувати як сам ряд, так і тенденції розвитку його складових.

Особливістю метода являється такі його властивості як інтерактивність та візуалізація результату обчислення.

Недоліком метода, обмежуючим можливості його використання, являється припущення про лінійність моделі досліджуваного часового ряду електроспоживання.

Використання метода дозволить знизити похибку результатів прогнозування.

Метод не передбачає знання порядку параметричної моделі ряду та працює з зашумленим нестационарним часовим рядом.

## V. ВИСНОВКИ

Прогнозування електроспоживання значною ступінню залежить від добового та сезонного електроспоживання. В енергооб'єднаннях де спостерігається висока нерівномірність графіків споживання електроенергії і при цьому спостерігається суттєве відхилення споживання від сезонного тренду, похибки прогнозування не є значним. Під час організації ринкових операцій по куплі-продажу електроенергії і потужності енергооб'єднань з високою нерівномірністю графіків електричного споживання похибка прогнозування буде високою, і вони в більшій степені будуть піддаватися штрафним санкціям за перевищення або заниження величин споживання. Взаємозв'язок між нерівномірністю та похибкою прогнозів дозволяє використовувати лінійні рівняння регресії. Найбільш кращі результати прогнозування електроспоживання отримані у разі використання спеціально розроблених моделей прогнозування з врахуванням метеофакторів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Макоклюев Б. И. Прогнозирование потребления электроэнергии АО Мосэнерго / Б.И. Макоклюев,

- А.И. Владимиров // Журнал ТЭК №4. – Москва – 2001.
- [2] Соломкин А.В. Краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии с помощью нейросетевых методов / А.В. Соломкин // ГОУВПО Мордовский государственный университет им Н.П. Огарева. – Саранск: 2012.
- [3] Обработка многомерных временных рядов с помощью метода «Гусеница». Главные компоненты временных рядов метод «Гусеница» / под. ред. Н.Э. Голядина, Д.Л. Данилова, А.А. Жиглявского: Санкт-Петербург: 1997. – С.105-131.
- [4] Цветков Е.И. Нестационарные случайные процессы и их анализ / И.Е. Цветков. – М: Энергия, 1973. – 128 с.
- [5] «Про затвердження Методики визначення обсягу та вартості електричної енергії, не облікованої внаслідок порушення споживачами правил користування електричною енергією» Постанова Національної комісії регулювання електроенергетики України від 4 травня 2006 року N 562
- [6] Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования / Е.М. Четыркин – М: Статистика, 1977. – 263 с.
- [7] Бэнн Д.В. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки / Д.В. Бэнн, Е.Д. Фармер; пер. с англ. – М: Энергоатомиздат, 1987. – 200с.
- [8] Broomhead D.S. Extracting qualitative dynamics from experimental data / D.S. Broomhead, G.P. King; Physica D. – 1986. – Vol. 20, Issue 2-3. – P. 217-236.
- [9] Fraedrich K. Estimating the dimension of weather and climate attractor / K. Fraedrich; J. Atmos Sci. – 1986. Vol. 43. – P. 419-432.
- [10] Vautard R. Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series / R Vautard, M. Ghil; Physica D. – 1989. – Vol. 35, Issue 3. – P. 395-424.
- [11] Ghil M. Interdecadal oscillations and the warming trend in global temperature time series / M. Ghil, R. Vautard // Nature. – 1991. – Vol. 350, Issue 6316. – P.324-327.
- [12] Щелкалин В.Н. Трендовый подход прогнозирования временных рядов на основе метода «Гусеница»-SSA / В.Н. Щелкалин // Материалы 14-й Международной научно-технической конференции SAIT 2012, Киев, 24 апреля 2012г. / УНК «ИПСА» НТУУ «КПИ». – К.: УНК «ИПСА» НТУУ «КПИ», 2012. – С. 258 – 259.
- [13] Щелкалин В.Н. Декомпозиционный подход прогнозирования временных рядов на основе метода «Гусеница»-SSA / В.Н. Щелкалин // Материалы 14-й Международной научно-технической конференции SAIT 2012, Киев, 24 апреля 2012г. / УНК «ИПСА» НТУУ «КПИ». – К.: УНК «ИПСА» НТУУ «КПИ», 2012. – С. 260 – 261.
- [14] Голядина. Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: прогноз временных рядов: уч. пос. / Н.Э. Голядина. – СПб: 2003. – 55 с.
- [15] Солнцев В.Н. Главные Компоненты Временных Рядов: Метод “Гусеница”/ В. Н.Солнцев, Д. Л. Данилов, А. А. Жиглявский. // С.-Петербургский государственный университет, 1997.
- [16]Александров Ф. И. Выделение аддитивных компонент временного ряда на основе метода "Гусеница" / Ф. И. Александров // С.-Петербургский госудаственнй университет, 2003.

Стаття надійшла до редакції 04.02.2020

## КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГОРЫНКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА «ГУСЕНИЦА» -SSA

РОЗЕН В.П.

*д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации управления электротехническими комплексами Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорського, Киев, Украина e-mail: demchyk14@gmail.com;*

ДЕМЧИК Я.М.

*аспирант, кафедры автоматизации управления электротехническими комплексами Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорського, Киев, Украина e-mail: demchyk14@gmail.com;*

**Цель работы.** Основной целью проведенного исследования является повышение эффективности режима работы энергосистемы за счет прогнозирования потребления электрической энергии потребителями путем использования метода «Гусеница» -SSA для снижения погрешности прогнозирования электрической энергии на объектах энергорынка.

**Методы исследования.** Исследуется использование метода "Гусеница" -SSA прогнозирования потребления электрической энергии промышленного объекта энергорынка.

**Полученные результаты.** В данной статье исследуется использование метода "Гусеница" -SSA прогно-

зирования потребления электрической энергии промышленного объекта энергорынка. Основой проведенного исследования является повышение эффективности режима работы энергосистемы за счет прогнозирования потребления электрической энергии потребителями, поставщиками и производителями. Использование современных способов сбора статистической информации позволяет принимать правильные решения в планировании и управлении энергообъектами. В статье представлен метод сингулярного спектрального анализа, который позволяет использование статистических данных нестационарного ряда. Использование метода сингулярного спектрального анализа-SSA позволяет получить погрешность прогнозирования электрической энергии на объектах энергорынка в пределах допустимого. Полученное прогнозируемое электрическое потребление за некоторый период позволит управлять электроэнергетической системой за помощью устройств сбора данных. Устройства сбора данных в автоматическом режиме будут передавать статистическую информацию, а программное обеспечение корректировать прогнозные значения электрической энергии при заказе потребителем, поставщиком. Данное исследование позволяет использовать метод сингулярного спектрального анализа в простом прогнозировании на неделю, сутки, час в перед при использовании статистических инструментов. Результаты могут использоваться в электроэнергетике при предыдущем прогнозировании потребления электроэнергии и планировании объемов производства электрической энергии и цены на нее. Предложенный метод показывает как правильно использовать сингулярный спектральный анализ в прогнозировании электрической энергии.

**Научна новизна.** Исследования в области прогнозирования електроспоживання позволят снизить похику прогнозирования не применяя методов анализа на стационарность временных рядов электропотребления.

**Практическая ценность.** Позволит заказывать электрическую энергию у поставщиков с меньшей погрешностью это увеличит экономию средств потребителей.

**Ключевые слова.** электропотребления; промышленный объект энергорынка; «Гусеница»-SSA»; прогнозирование; сингулярный анализ.

## SHORT-TERM FORECASTING OF ELECTRICITY CONSUMPTION AT THE OBJECTS OF THE ENERGY MARKET WITH THE USE OF THE "GUSENITSA" -SSA METHOD

ROZEN V.P.

Dr. Tech. Sci., Professor, Head of the Department for Automation Management of Electrotechnical Complexes of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky, Kiev, Ukraine e-mail: demchyl14@gmail.com;

DEMCHYK  
Y.A.M.

Assistant, the Department for Automation Management of Electrotechnical Complexes of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky, Kiev, Ukraine e-mail: demchyl14@gmail.com.

**Purpose.** The main goal of the study is to increase the efficiency of the operating mode of the power system by predicting the consumption of electric energy by consumers using the "Gusenitsa" -SSA method to reduce the error in predicting the electrical energy at the energy market facilities.

**Methodology.** The use of the method "Gusenitsa" -SSA for forecasting the consumption of electric energy of an industrial facility of the energy market is investigated.

**Findings.** This article explores the use of the Gusenitsa -SSA method for forecasting the electricity consumption of an industrial facility in an energy market. The basis of this study is to improve the efficiency of the power grid mode by forecasting electricity consumption by consumers, contractors and producers. Using modern methods of gathering statistical information allows you to make the right decisions in the planning and management of energy objects. The article presents the method of singular spectral analysis that allows the use of statistics of a non-stationary series. The use of the method of singular spectral analysis-SSA allows to obtain the forecasting error of electric energy on the objects of the energy market within the acceptable range. The obtained forecast electric consumption for some period will allow to control the electric power system by means of data collection devices. Data collection devices in automatic mode will transmit statistical information, and the software will adjust the predicted values of electricity ordered by the consumer, the supplier. This study allows us to use the method of singular spectral analysis in simple forecasting for the week, day, and hour before using statistical instruments. The results can be used in electricity for the preliminary forecasting of electricity consumption and the planning of electricity production and prices. The proposed method shows how to use the singular spectral in the prediction of electrical energy.

**Originality.** Research in the field of power consumption forecasting will reduce the forecasting error without using methods of analysis for the stationarity of power consumption time series

**Practical value.** It will allow you to order electric power from suppliers with a lower margin, this will increase the economy of consumers' funds.

**Keywords.** power consumption; an industrial facility of the energy market; "" Gusenitsa -SSA" method; forecasting; singular analysis.

## REFERENCES

- [1] Makoklyuev, B.I., Vladimirov, A.I., (2001). Prediction of Power Consumption of Mosenergo JSC. *Journal of Fuel and Energy Complex*, No 4, Moscow.
- [2] Solomkin, A.V., (2012). Short-term forecasting of electricity consumption using neural network methods. State University of NPP Mordovian State University Ogareva, Saransk.
- [3] Golyadina, N.E., Danilova, D.L., Zhiglyavsky, A.A., (1997). Processing of multidimensional time series using the Caterpillar method. The main components of the time series are the Caterpillar method. ed., St. Petersburg, 105-131.
- [4] Tsvetkov, E.I., (1973). Non-stationary random processes and their analysis. Moscow, Energy, 128 p.
- [5] On Approval of the Methodology for Determining the Volume and Cost of Electricity Not Taken Due to Violation of Consumers' Rules of Electricity Utilization
- [6] Chetyrkin, E.M., (1977). Statistical methods of forecasting. Moscow, Statistics, 263
- [7] Bann, D.V., Farmer, E.D., (1987). Comparative models of electric load prediction. Moscow, Energoatomizdat, 200.
- [8] Broomhead, D.S., King, G.P., (1986). Extracting qualitative dynamics from experimental data. No 20, 2-3, 217-236.
- [9] Fraedrich, K. Atmos, J., (1986). Estimating the dimension of weather and climate attraction. No. 43, 419-432.
- [10] Vautard, R., Ghil, M., (1989). Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series. No. 35, 3, 395-424.
- [11] Ghil, M., Vautard, R., (1991). Interdecadal oscillations and the warming trend in global temperature time series. *Nature*, No. 350, 6316, 324-327.
- [12] Schelkalin, V.N., (2012). Trend approach of time series prediction based on Goose-Nice method -SSA / VN. Schelkalin // Proceedings of the 14th SAIT 2012 International Scientific and Technical Conference, Kiev, April 24, 2012. / IPSA UNC NTUU "KPI". - K: IPSA UNC NTUU "KPI", 258 - 259.
- [13] Shchekalin, V.N., (2012). A decomposition approach of time-series prediction based on the Track-SSA method / VN. Schelkalin // Proceedings of the 14th SAIT 2012 International Scientific and Technical Conference, Kiev, April 24, IPSA UNC NTUU "KPI". - K.: UNESCO "IPSA" NTUU "KPI", 260 - 261.
- [14] Feast, N.E. (2003). The caterpillar method -SSA: time series forecast: uch. pos. St. Petersburg, 55 p.
- [15] Solntsev, V.N., Danilov, D. L., Zhiglyavsky, A. A. (1997). The Main Components of the Time Series: The Caterpillar Method. St. Petersburg State University.
- [16] Aleksandrov, F.I., (2003). Isolation of additive components of the time series based on the Gusenitsa method. St. Petersburg State University.



## СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ ТА ШЛЯХИ ЇХ УДОСКОНАЛЕННЯ

ДРЕШПАК Н.С.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: nat.dreshpak@gmail.com.

**Мета роботи.** Визначити недоліки існуючих систем контролю енергоефективності виробничих процесів та причини їх виникнення, виконати аналіз вимог до сучасних систем контролю.

**Методи дослідження.** Аналіз недоліків існуючих систем контролю, співставлення і визначення їх можливостей в умовах ринкової економіки, узагальнення результатів.

**Отримані результати** Функціональні можливості існуючих систем контролю ефективності використання енергії не відповідають сучасним умовам протікання виробничих процесів, що створює проблеми для визначення змісту та упровадження управлінських дій в сфері енергозбереження. Низька оперативність систем контролю зумовлена обмеженими можливостями існуючих методів розрахунку нормованих значень енергоспоживання, відсутністю оперативної оцінки факторів впливу на кінцевий результат енергоефективності, суттєвою вартістю сучасних засобів обліку енергії. Обмеженість інформаційної складової контролю полягає в тому, що існує складність виділення із сукупності факторів впливу на досягнутий рівень енергоефективності складової, що пов'язана з активністю обслуговуючого персоналу в сфері впровадження заходів з енергозбереження. Існує необхідність підвищення точності розрахунку нормованих значень енергоспоживання. Шляхи усунення існуючих проблем полягають у визначенні закономірностей формування нормованих значень енергоспоживання в умовах оперативного контролю, застосуванні нових підходів до оцінки результативності дій факторів впливу, обґрунтуванні похибки розрахунку нормованих значень енергоефективності, створенні та визначенні критеріїв оцінки ефективності споживання енергії в періодах, пов'язаних зі звітністю підприємства. Реалізація цих дій передбачає суттєву зміну поглядів на організацію процедури контролю, технічне та інформаційне забезпечення його виконання.

**Наукова новизна.** Вперше запропоновано комплексне удосконалення існуючих систем контролю енергоефективності на основі підвищення їх оперативності, інформативності та достовірності даних. Вперше проаналізовані причини виникнення та прояву недоліків існуючих систем контролю в умовах сучасного виробництва.

**Практична цінність.** Полягає в тому, що визначені напрямки наукових досліджень, реалізація яких розширить функціональні можливості контролю енергоефективності в сучасних умовах, дозволить підвищити ефективність управління виробничим процесом.

**Ключові слова:** контроль енергоефективності; нормування енергоспоживання; оперативність; інформативність; достовірність.

### І. ВСТУП

Ефективне використання енергетичних ресурсів у промисловості передбачає зменшення витрат енергії на процес виробництва продукції. Це зменшення досягається зокрема використанням сучасних технологій виробництва, впровадженням ефективних заходів з енергозбереження. Реєстрація такого зменшення передбачає періодичне співставлення показників витрат енергії. Фактичні значення витрат порівнюють з плановими (нормованими) значеннями, які ураховують зміни, що відбулися в процесі виготовлення продукції у визначений термін. Якщо фактичні витрати енергії відрізняються від нормованих, то виникає необхідність визначення причин змін, що відбулися. Існує потреба виявлення чинників, що впливають на енергоспоживання, розрахунку рівня їх впливу на кінцевий результат, оцінки можливих управлінських рішень, виходячи з необхідності забезпечення енергоефективності виробничих процесів. Слід зазначити,

що доцільність виконання контролю показників енергоефективності ніколи не викликала і зараз не викликає сумніву. В умовах планової економіки Радянського Союзу нормуванню витрат енергії приділялася значна увага [1], [2]. Це, у першу чергу, пов'язувалося з плануванням обсягів видобутку та виробництва палива, необхідністю забезпечення технологічних процесів різними видами паливно-енергетичних ресурсів. Нормування питомих витрат енергії здійснювалось на різних рівнях (галузь промисловості, підприємство, цех, ділянка, агрегат) і передбачало застосування різних методів розрахунку питомих норм енергоспоживання. Відомо, що енергетична ефективність технологічних процесів значною мірою залежить від обсягів виробництва продукції [1], [3]-[5]. В умовах планової економіки ці обсяги були заздалегідь відомі, що дозволяло здійснювати нормування в чітко визначених умовах і забезпечувало прийнятну точність розрахунків. Обсяг видобутку продукції в умовах ринку може суттєво змінюватися, що вносить невизначеність в



процедуру нормування і потребує коригування її методики.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Незважаючи на те, що в умовах планової економіки процедура контролю енергоефективності виробництва існувала, ефективність її використання на підприємствах була низькою. У першу чергу це було зумовлено низькими цінами на паливно-енергетичні ресурси. В умовах низьких цін знижується економічна ефективність заходів з енергозбереження, а також результативність відповідних управлінських рішень, ініційованих за результатами контролю. Це стримувало пошук нових підходів до контролю, не сприяло удосконаленню існуючих методів. Виробництво продукції характеризувалося порівняно низькими темпами модернізації існуючих технологій та обладнання. Була практично відсутня мотивація персоналу підприємства до впровадження заходів з енергозбереження. Не були визначені правові аспекти енергозбереження.

Зараз ситуація змінилася. Характерні прояви стрімкого зростання цін на енергоносії, наявні достатньо високі темпи оновлення парку обладнання, широко застосовуються ефективні методи мотивації співробітників підприємства, активні кроки здійснено в напрямку створення законодавчої бази в сфері енергозбереження [6]-[9]. Ясно, що в умовах існуючих змін виникає необхідність підвищення ефективності управління енерговикористанням промислового підприємства і, відповідно, удосконалення існуючих систем контролю енергоспоживання як невід'ємних складових систем управління.

## III. МЕТА РОБОТИ

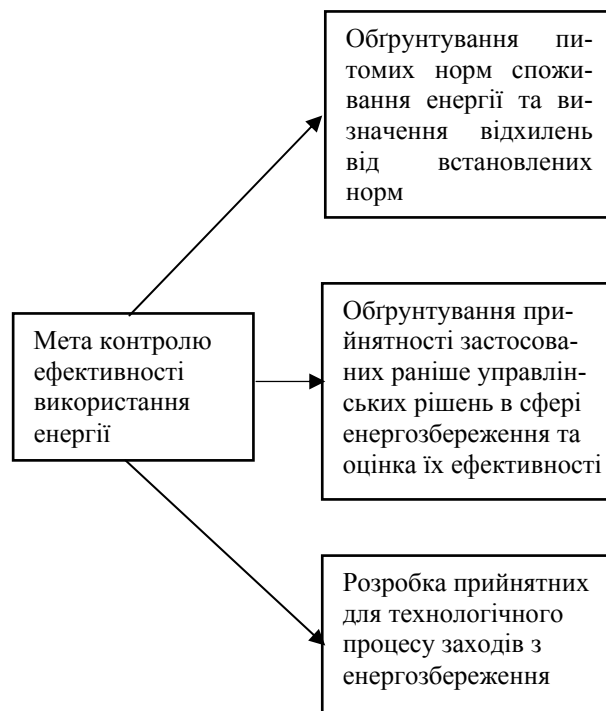
Визначити недоліки існуючих систем контролю енергоефективності виробничих процесів та причини їх виникнення, виконати аналіз вимог до сучасних систем контролю. Стаття розкриває підходи до вирішення цих завдань.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Контроль є однією з основних функцій управління системою. Він необхідний для коригування управлінських процесів у ситуації, коли результати енергоспоживання суттєво відрізняються від встановлених норм. Енергетична ефективність процесу виробництва продукції залежить від багатьох факторів, які змінюються в часі. Виникає необхідність широкої інформованості стосовно змін, що відбуваються, оцінці результатів цих змін з метою наступного реагування на нову ситуацію. Використання результатів контролю дозволяє прийняти оптимальні управлінські рішення.

Мета виконання контролю енергоефективності може бути викладена в роз'ясненні ряду позицій. Сформулюємо ці позиції для системи контролю ефективності використання енергії промисловим підприємством (рис.1).

емством (рис.1).



**Рисунок 1.** Мета контролю ефективності використання енергії

Аналіз сукупності позицій, що визначають мету контролю, свідчить про розгалуженість завдань, які при цьому виникають. Характерно те, що рішення деяких завдань стосуються конкретних об'єктів контролю і ураховують тільки їх особливості. Частина отриманих рішень можуть мати загальні риси і бути прийнятними для сукупності об'єктів контролю. На цій основі існує можливість створення загальних підходів до виконання контролю, які будуть мати характерні риси і застосовуватися для контролю значної кількості об'єктів з визначеними властивостями. Очевидно, що визначення цих характерних рис можливе при детальному аналізі об'єкту контролю з точки зору умов його функціонування. Зупинимось на характерних рисах об'єкту контролю, в межах якого передбачається виконання майбутніх досліджень у сфері контролю та управління енерговикористанням. Таким об'єктом має бути: підприємство, підрозділ підприємства (цех, ділянка), технологічна лінія, окремий енергоємний агрегат. Об'єкт орієнтований на випуск однотипної продукції, властивості якої в процесі контролю не змінюються. Існує можливість визначення обсягу випуску продукції в певний термін часу (робоча зміна, день, місяць, рік).

В сучасних умовах виконання контролю нормовані значення питомого енергоспоживання повинні розраховуватися з визначенням впливу окремих факторів на цей показник. Вплив факторів на нормовані значення може бути різним: можливе як зниження, так і збільшення енергоспоживання. Інтенсивність

впливу також може змінюватися. При виконанні функції управління енергоспоживанням необхідно знати ці особливості факторного впливу. Інформація дозволить вірно вибрати прийнятний фактор для реалізації управління, оцінити необхідну для реалізації оптимального процесу інтенсивність його дії. Необхідно також створити умови, щоб значення факторів впливу легко вимірювалися або розраховувалися в ситуації, характерній для конкретного виробництва. Це забезпечить достатньо високу оперативність розрахунку питомих норм, дозволить своєчасно коригувати значення факторів впливу при їхній зміні. В підсумку ці дії дозволять підвищити точність нормування, забезпечать достовірність нормованих значень. Важливо, щоб поряд з результатом розрахунку була зафіксована похибка його визначення, що дозволить уникнути двоякості тлумачення результатів співставлення даних. Принцип відповідності контролю передбачає відповідальність суб'єкта контролю за достовірність результатів.

Ураховуючи різноманіття існуючих методів нормування питомих норм енергоспоживання, необхідно проаналізувати їх з токи зору можливої області застосування, точності визначення норм та їх прийнятності для вирішення завдань контролю у визначеному вище об'єкті управління. Це окреме завдання, що потребує додаткового аналізу і обов'язкового вирішення.

Визначення відхилень фактичних значень енергоспоживання об'єкта від нормованих передбачає процедуру їх співставлення з фіксацією існуючих відмінностей в їх значеннях і урахуванням знаку отриманої різниці показника енергоспоживання. Очевидно, що наявність відхилень в бік перевищення нормованих значень енергоспоживання може мати важливі наслідки при формуванні управлінських дій. Тому повинна приділятися особлива увага до точності реєстрації фактичних значень і розрахунку нормованих значень енергоспоживання. Особливо це стосується нормованих значень, так як їх, як правило, отримують шляхом розрахунку із застосуванням математичних моделей. Так як будь-який розрахунок містить похибку, то важливо оцінити значення похибки. Тоді існує можливість виявлення зони, де наявність відхилень при співставленні є сумнівною (завдяки існуючій похибці). Характерно, що в детермінованих математичних моделях зазвичай визначають максимальне значення похибки моделювання [3]. В стохастичних моделях ця похибка визначається довірчими інтервалами з урахуванням заданої довірчої ймовірності [3]-[5]. Очевидно, що удосконалення методів контролю повинно передбачати можливість формування зон невизначеності, де зафіксовані відхилення від норм не будуть братися до уваги, а результати енергоспоживання будуть вважатися прийнятними для даних умов виробництва продукції. Завдання полягає в обґрунтуванні раціональної методики визначення цих зон. При використанні стохастичної залежності алгоритм розрахунку зони невизначеності

пов'язаний із структурною побудовою залежності нормованого значення від факторів впливу. Тому виникає необхідність обґрунтування раціональної структурної побудови такої залежності, яка дозволить використати ефективний алгоритм розрахунку довірчих інтервалів при умові забезпечення прийнятної точності результату нормування. При існуючих відхиленнях рівнів енергоефективності від встановлених норм необхідно фіксувати знаки відхилень, що відповідають перевищенню норми споживання, або наявній економії. Це необхідно здійснювати виходячи з того, що різні знаки відхилень повинні супроводжуватися різними управлінськими діями.

Характерною ознакою сучасного промислового підприємства є зростання його технологічного рівня. Упроваджуються як нові технології виготовлення продукції, так і нові засоби виробництва. Як правило, процеси модернізації обладнання, удосконалення режимів його експлуатації приводять до коливань значень енергоефективності. Цьому також сприяють часті зміни характеристик матеріалів та напівфабрикатів, властивостей застосованих енергетичних ресурсів, що є звичайною практикою виробничих процесів конкурентної ринкової економіки. Тому оперативність здійснення операції контролю енергоефективності є важливою ознакою сучасного управління енерговикористанням. Дійсно, процес визначення змісту та уведення в дію управлінського рішення потребує певного часу. Затримка прийняття рішень не дозволяє своєчасно реагувати на ситуацію в умовах швидкої зміни енергоемності. Ефективність управління процесом виробництва знижується.

Як приклад, розглянемо динаміку зміни енергоемності видобутку вугілля  $W$  (кВт\*г/тону) однієї із вугільних шахт Донбасу (рис. 2)



**Рисунок 2.** Графік щоденної енергоемності видобутку вугілля протягом місяця

Із залежності видно, що щоденні значення  $W$  суттєво різняться. Причини цих змін можуть бути зумовлені різними чинниками, пов'язаними з особливостями вуглевидобутку. Можливе застосування но-

вих технічних засобів, можливі швидкоплинні зміни режимів роботи обладнання, прояви наявності або відсутності застосування заходів з енергозбереження і т.п. Якщо здійснювати щотижневий або щомісячний контроль, то його оперативність буде порівняно низькою, рішення по поліпшенню ситуації будуть прийматися керівництвом шахти із запізненням, що суттєво знизить ефективність управління. Очевидно, що в існуючій ситуації доцільне використання оперативного контролю із щоденним аналізом ситуації.

Проміжок часу між операціями контролю значною мірою залежить від технічних засобів збору необхідної інформації. Він повинен коригуватися з прийняттям на виробництві графіком виконання робіт, прийнятими термінами підготовки звітної документації, заохочення співробітників за результатами їх діяльності. Слід зазначити, що сучасні засоби інформаційного забезпечення енергоспоживання мають достатньо високий рівень і в той же час існує можливість суттєвого розширення обсягу отриманої інформації, підвищення її точності, достовірності. Це буде сприяти підвищенню оперативності контролю, розширенню його інформативності, що забезпечить енергетичну ефективність процесу виробництва продукції. Оперативний контроль повинен мати достатню для прийняття поточних управлінських рішень інформаційну основу, побудовану на системі постійного спостереження [10]-[12]. Його здійснюють у визначені проміжки часу, протяжність яких залежить від динаміки розвитку контрольованого процесу.

З точки зору можливого розширення інформативності контролю енергоефективності процесів важливо чітко визначити фактори, за допомогою яких існуючі відхилення можуть бути ліквідовані, необхідно передбачити інтенсивність їх дії при впровадженні. Для цього необхідно отримати змістовну інформацію стосовно співвідношення різних факторів впливу і визначення в цій сукупності сумарної дії факторів, що будуть застосовані в процесі керування енергоефективністю.

Система контролю буде ефективною, якщо співставлення показників не буде разовою операцією, а буде здійснюватися постійно. Тільки постійні спостереження, що реалізують принцип неперервності контролю, і відповідні управлінські дії дозволять отримати стійкий ефект. Це повною мірою стосується і систем контролю енергоефективності, так як поняття «енергоефективність» передбачає зменшення витрат енергії, і, відповідно, співставлення рівнів цих витрат у різних проміжках часу. Разові співставлення показників витрат енергії не можуть повною мірою характеризувати загальну тенденцію енергоспоживання об'єкта. Інколи існуючі недоліки можуть бути ліквідовані за незначні проміжки часу завдяки вдалим управлінським діям. Як правило, для ліквідації відхилення потрібен більш тривалий час. Тому, на погляд авторів, існує необхідність уведення і використання в процесі контролю інтегральних характеристик енергоспоживання, діючих у певному проміжку часу, де

позитивні та негативні результати отримують загальну оцінку.

Відомо, що оперативний контроль включає систему заходів, організованих керівництвом підприємства (суб'єктом прийняття рішень за результатами контролю), і направлених на найбільш ефективне використання працівниками своїх обов'язків в процесі виробництва продукції [3]. Контроль енергоефективності здійснює фаховий персонал структурних підрозділів підприємства (особа або група осіб), який на основі отриманої в результаті контролю інформації ініціює виконання заходів з енергозбереження, що відповідають рівню відхилень фактичних значень енергоспоживання від планових завдань. Необхідно залучати до контролю також безпосередніх виконавців виробничих операцій, що дозволить виявити відхилення від норм в найкоротші проміжки часу [3],[6].

Для обґрунтування прийнятності застосованих раніше управлінських рішень необхідно проаналізувати рівні впливу різних факторів на ефективність споживання енергії і показати, які управлінські рішення були вдалими, а які не сприяли покращенню ситуації. Зрозуміло, що фактори впливу необхідно вимірювати, а їх зміна в процесі управління повинна бути зафіксована. Існують ситуації, де можливості управління процесом енергоспоживання обмежені, тому кінцевий результат може свідчити про збільшення (в порівнянні з минулим періодом) питомих витрат енергії. Але в цій ситуації слід впевнитися, що управлінські рішення, що сприяли зменшенню витрат енергії, були задіяні і сприяли зменшенню прояву негативного наслідку. Звідси виникає необхідність відокремлення результату зміни енергоефективності процесу, зумовленого дією управлінських рішень, від загального результату, досягненого зміною всієї сукупності факторів впливу. Виходячи з того, що існують декілька методів нормування показників енергетичної ефективності, загальної методики визначення ефективності управлінських рішень в умовах оперативного управління енергоспоживання не існує. У кожному випадку відокремлення результатів управлінських дій від впливу некерованих факторів (факторів, управління якими є неможливим в існуючій ситуації, або є неприйнятним, виходячи із суттєвих фінансових витрат) відбувається з урахуванням прийнятого методу нормування і виходячи із можливостей цього методу.

Відокремлення впливу управляючих факторів від впливу некерованих важливо не тільки з точки зору оцінки можливостей їх повторного застосування в майбутньому, а також виходячи з урахування кількісних характеристик такого впливу. Очевидно, що отримані кількісні характеристики позитивного впливу слід пов'язувати з мотивацією дій обслуговуючого персоналу в реалізації заходів з енергозбереження.

Відхилення фактичного енергоспоживання від нормованих значень повинно бути проаналізовано і за результатами аналізу розроблені прийнятні заходи з енергозбереження. В процесі контролю енергоефек-

тивності вибір відповідного заходу слід пов'язувати як із знаком відхилення нормованого значення так і зі значенням наявного відхилення. Якщо процес співставлення фіксує знижене значення енергоспоживання, то введення додаткових заходів з енергозбереження не є необхідним, але і не виключається. У випадку збільшення показника енергоспоживання аналіз повинен бути більш детальним. Необхідно визначити, яка доля збільшення пояснюється зміною некерованих факторів впливу, а яка частина пояснюється недостатньо чітким виконанням режимних вимог в процесі виробництва продукції. Задіяний при нормуванні значень енергоспоживання математичний апарат повинен бути реалізованим таким чином, щоб у процесі контролю відповідь на ці питання була конкретною і достовірною. Таким чином, виникає необхідність розширення інформативності процесу контролю в частині визначення причин наявності відхилень і ступеня впливовості на процес окремих факторів.

Виходячи із рівня існуючих відхилень, необхідно вводити в дію заходи енергозбереження, що мають відповідні рівні ефективності. Наприклад, використання безвитратних або маловитратних заходів, що пов'язані в основному з режимами роботи обладнання, характеризується порівняно незначним рівнем економії енергоресурсів. Збільшення фінансових витрат на вирішення завдань енергозбереження дозволяє отримати більш суттєві результати, але слід пам'ятати, що, наприклад, заміна парку обладнання для випуску продукції потребує значного проміжку часу для введення його в дію. Тому ефективність прийняття такого рішення зміщується в часі. Важливо також, щоб використаний для нормування математичний апарат акумулював досягнуті раніше, як позитивні, так і негативні результати (збільшення або зменшення витрат енергії, зафіксовані у попередньому етапі контролю). Це дозволить чітко фіксувати як наявність, так і відсутність енергоефективності виробництва в контрольованому проміжку часу. На основі цих значень можуть бути сформовані інтегральні показники ефективності енергоспоживання.

Напрямки удосконалення існуючих систем контролю передбачають суттєві зміни в їх організаційному, технічному та інформаційному забезпеченні. Підвищення оперативності та забезпечення безперервності процесу контролю потребує упровадження систем обліку з розширеними функціональними можливостями, що забезпечують безперервність процедури, можливість реєстрації широкого переліку параметрів з певними проміжками часу, формування бази даних за результатами вимірювань. Автоматизовані системи комерційного обліку енергії (АСКОЕ) дозволяють автоматизувати процедуру збору інформації, забезпечивши при цьому багатоканальність обліку, що важливо у випадку, коли одночасно здійснюється контроль ефективності споживання енергії в різних технологічних процесах промислового виробництва [13]-[15]. АСКОЕ орієнтовані на облік різних видів енергетичних ресурсів, що розширює область їх можливо-

го застосування, дозволяє вести облік енергії і складати енергетичні баланси підприємства в умовах різноплановості їх енергетичного забезпечення. Очевидно, що ці системи можуть забезпечити системи контролю енергоефективності достовірною інформацією про фактичні значення енергоспоживання в певних проміжках часу. В той же час, системи контролю енергоефективності, що підлягають аналізу, передбачають наявність нормованих значень енергоспоживання. В умовах оперативного контролю швидкоплинна зміна параметрів технологічного процесу повинна фіксуватися і без затримок у часі знаходити безперервне відображення у коригованих значеннях нормованого енергоспоживання. Це неможливо здійснити без застосування комп'ютерної техніки з відповідним програмним забезпеченням. Таким чином, приходимо до висновку про необхідність поєднання інформаційних потоків із системами АСКОЕ з вихідною інформацією комп'ютерних програм, що забезпечують визначення нормованих значень енергоспоживання, співставлення фактичних показників з плановими, розрахунку характеристик, що розширюють інформативність системи контролю. Поєднання інформаційних потоків може здійснюватися як без участі оператора (в автоматичному режимі), та і за його участю [16]-[18]. Зазвичай ці функції на підприємстві виконує енергоменеджер. При цьому увесь обсяг додаткових функцій, пов'язаних з контролем енерговикористання, покладається на нього.

Виконаний в роботі аналіз дозволяє сформулювати характерні недоліки існуючих систем контролю та визначити причини їх виникнення. Результати аналізу наведені в табл. 1.

Перелічені недоліки функціонування систем контролю енергоефективності і їх безпосередній вплив на якість управління процесом енергоспоживання можуть мати різні негативні наслідки. Недостатня обґрунтованість прийнятих управлінських рішень супроводжується суттєвими фінансовими збитками. Їх рівень залежить від сукупності факторів, але для потужних енергоємних підприємств навіть незначні недоліки в управлінні енергоефективністю мають відчутні наслідки. Як приклад, розглянемо ситуацію із щоденними коливаннями питомого енергоспоживання вугільної шахти, наведену на рис.1. Граничні значення енергоємності процесу вуглевидобутку протягом місяця склали  $W_{\max}=30 \text{ кВт}\cdot\text{г/тону}$  та  $W_{\min}=21 \text{ кВт}\cdot\text{г/тону}$ . Відповідно, різниця в енергоємності процесу  $\Delta W=9 \text{ кВт}\cdot\text{г/тону}$ . Якщо врахувати, що місячний видобуток вугілля склав 129.7 тисяч тон, то різниця у вартості спожитої електроенергії при видобутку з максимальною та мінімальною енергоємностями процесу близька до 1 млн. грн. Якщо, навіть частина цих коштів буде заощаджена завдяки вдалим управлінським рішенням у сфері енергозбереження, то удосконалення системи контролю буде мати чудову фінансову перспективу.

**Таблиця 1.** Аналіз недоліків існуючих систем контролю ефективності використання енергії

Недоліки системи контролю енергоефективності	Причини їх виникнення
Низька оперативність контролю	<ul style="list-style-type: none"> <li>- низькі темпи упровадження заходів з енергозбереження;</li> <li>- відсутність методів, адаптованих до оперативного контролю;</li> <li>- складність оперативного визначення внеску факторів впливу в показники енергоефективності;</li> <li>- обмеженість використання автоматизованих систем обліку енергії, комп'ютерних систем оперативної обробки та збереження інформації.</li> </ul>
Відсутність оцінки похибки розрахунку нормованих значень енергоспоживання	<ul style="list-style-type: none"> <li>- низькі вимоги до точності розрахунку питомих норм енергоспоживання в період планової економіки;</li> <li>- відсутність досліджень в області підвищення точності розрахунку шляхом розробки нової методики визначення похибки.</li> </ul>
Обмежена інформативність контролю	<ul style="list-style-type: none"> <li>- однобокість у визначенні факторів впливу на показник енергоефективності;</li> <li>- відсутність підходів до оцінки енергоефективності процесів у тривалих проміжках часу;</li> <li>- не повною мірою задіяні зворотні зв'язки системи контролю.</li> </ul>

Результати аналізу свідчать про те, що управління процесом енергозабезпечення сучасного промислового підприємства потребує суттєвого удосконалення існуючих систем контролю енергоефективності технологічних процесів на основі підвищення їх оперативності та інформативності, обґрунтування похибки розрахунку норм енергоспоживання. Вплив цих складових на процеси контролю та управління є значущим, що свідчить про існування наукової проблеми, яку необхідно вирішувати. Визначені в статті причини існуючих недоліків дозволяють сформулювати пріоритетні напрямки наукових досліджень, пов'язаних з вирішенням цієї проблеми. Дослідження стосуються широкого переліку різнопланових завдань, передбачають використання сучасних методів аналізу, розробку нових та удосконалення існуючих

методів контролю.

## V. ВИСНОВКИ

1. Недоліки існуючих систем контролю енергетичної ефективності полягають у наступному:

- Наявна низька оперативність контролю, що зумовлена
    - ігноруванням факту прискорення темпів зміни показника енергоефективності значної кількості виробничих процесів;
    - обмеженістю досліджень в сфері формування прийнятних для оперативного контролю методів розрахунку нормованих значень ефективності споживання енергії;
    - складністю оперативної реєстрації реальних значень факторів впливу на показник енергоефективності;
    - відсутністю оперативної оцінки впливу кожного із сукупності факторів на показник енергоефективності з окремим виділенням управлінських дій в сфері енергозбереження;
    - обмеженістю застосування сучасних засобів обліку енергії, систем обробки та збереження інформації.
  - Характерна порівняно низька інформативність контролю, яка полягає в тому, що
    - в процесі контролю, як правило, акцентується увага на визначення впливу технологічних факторів на показник енергоефективності, отримання енергетичних балансів процесів виробництва продукції. Меншою мірою аналізується вплив управлінських дій в сфері енергозбереження, умотивованість дій обслуговуючого персоналу;
    - відсутні інтегральні критерії оцінки енергоефективності виробничих процесів у тривалих проміжках часу та не розроблені методики їх визначення;
    - не достатньо інформативні канали зворотного зв'язку в системах контролю.
  - Відомі методики розрахунку питомих норм енергоспоживання не забезпечують визначення рівня похибки розрахунку нормованого значення, що вносить елемент невизначеності в результат співставлення фактичних і нормованих значень енергоспоживання, ускладнює або унеможливає прийняття раціональних управлінських рішень.
2. В умовах швидкоплинної зміни показника енергоефективності існує необхідність підвищення оперативності контролю шляхом збільшення кількості контролюючих дій, обґрунтування раціональної структурної побудови математичних моделей для нормування енергоспоживання, визначення точності прогнозованих значень з метою підвищення достовірності контролю, розширення його інформативності на основі оцінки результативності впровадження заходів з енергозбереження, створення механізму оцінки енергоефективності виробництва в тривалих проміжках часу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Кудрин, Б.И. Электроснабжение потребителей и режимы: учебное пособие [Текст]/ Б.И. Кудрин, Б.В. Жилин, Ю.В. Матюнина. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 412 с.
- [2] Гофман, И.В. Нормирование потребления энергии и энергетические балансы промышленных предприятий [Текст]/ И.В. Гофман; под ред. акад. Л.А.Мелентьева. – М.: Энергия, 1966. – 319 с.
- [3] Системи енергоменеджменту та їх математичне забезпечення: навч. посібник [Текст]/ Г.Г. Півняк, С.І. Випанасенко. О.І. Хованська, Ю.В. Хацкевич, Н.С. Дрешпак. – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 214 с.
- [4] Vypanasenko, S., Dreshpak N. (2013) The features of energy efficiency measurement and control of production processes *Energy efficiency improvement of geotechnical systems*, 1, 71-78.
- [5] Vypanasenko, S., Dreshpak N. (2015) Informational and methodological support for energy efficiency control *Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems*, 2, 53-57.
- [6] Родионова, В.Н. Современные тенденции развития организации производственной деятельности на предприятии [Текст]/ В.Н. Родионова, И.С. Владимиров// Организатор производства.– 2007. –№2. –С.4-8.
- [7] «Про енергозбереження» [Електронний ресурс]: Закон України [Прийнятий постановою Верховної Ради України № 75/94-ВР від 01.07.94.– Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74/94-%D0%B2%D1%80>.
- [8] Rambabu Pothina, Vladislav Kecojevic (2007). A Gyratory Crusher Model and Impact Parameters Related to Energy Consumption. *Minerals and Metallurgical Processing*, 24(3), 170-180.
- [9] M. Silva, A. Casali. (2015) Modelling SAG milling power and specific energy consumption including the feed percentage of intermediate size particles *Minerals Engineering*, 70, 156-161.
- [10] Нападовська, Л.В. Внутрішньогосподарський контроль в ринковій економіці [Текст]/ Л.В. Нападовська: монографія. – Дніпропетровськ, 2000, – 224 с.
- [11] Пантелеев, В.П. Концепція внутрішньогосподарського контролю діяльності підприємств: методологія, організація, розвиток [Текст]: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра екон. наук: 08.00.09 /Пантелеев Володимир Павлович. –К., 2009. – 42 с.
- [12] Donovan J. (2003) Fracture toughness-based models for the prediction of power consumption, product size, and capacity of jaw crushers. Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in mining and minerals engineering. Blacksburg, 211. – Режим доступу: <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/28544/Dissertation.pdf?sequence=1>
- [13] Ожегов, А.Н. Системы АСКУЭ [Текст]: учебное пособие/ А.Н. Ожегов. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2006. –102 с.
- [14] Adamatzky A. (2017) Advantages in unconventional computing. Prototypes, Models and Algorithms. Springer International Publishing, 812.
- [15] Albers V., Still B. (2011) Usability of complex information systems. Evaluation of user interaction. CRS press, 392.
- [16] Aslaksen E. (2008) Designing complex systems. Foundations of design in the functional domain. Auerbach publications, 176.
- [17] Barrera D., Diaz M. (2011) Communicating systems with UML 2. Modelling and analysis of network protocols. ISTE ltd, 268.
- [18] Boehm B. (2010) A spiral model of software development and enhancement. Object management group, 180.

Стаття надійшла до редакції 28.02.2020

## СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И ПУТИ ИХ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

ДРЕШПАК Н.С.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электротехники Национального технического университета «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: nat.dreshpak@gmail.com.

**Цель работы.** Определить недостатки существующих систем контроля энергоэффективности производственных процессов и причины их возникновения, выполнить анализ требований к современным системам контроля.

**Методы исследования.** Анализ недостатков существующих систем контроля, сопоставление и определение их возможностей в условиях рыночной экономики, обобщение результатов.

**Полученные результаты.** Функциональные возможности существующих систем контроля эффективно-

сти использования энергии не соответствуют современным условиям протекания производственных процессов, что создает проблемы для определения содержания и внедрения управленческих действий в сфере энергосбережения. Низкая оперативность систем контроля обусловлена ограниченными возможностями существующих методов расчета нормированных значений энергопотребления, отсутствием оперативной оценки факторов влияния на конечный результат энергоэффективности, существенной стоимостью современных средств учета энергии. Ограниченность информационной составляющей контроля состоит в том, что существует сложность выделения из совокупности факторов влияния на достигнутый уровень энергоэффективности составляющей, связанной с активностью обслуживающего персонала в сфере внедрения мероприятий по энергосбережению. Существует необходимость повышения точности расчета нормированных значений энергопотребления. Пути устранения существующих проблем заключаются в определении закономерностей формирования нормированных значений энергопотребления в условиях оперативного контроля, применении новых подходов к оценке результативности действия факторов влияния, обосновании погрешности расчета нормированных значений энергоэффективности, создании и определении критериев оценки эффективности потребления энергии в периодах, связанных с отчетностью предприятия. Реализация этих действий предусматривает существенное изменение взглядов на организацию процедуры контроля, техническое и информационное обеспечение его исполнения.

**Научная новизна.** Впервые предложено комплексное усовершенствование существующих систем контроля энергоэффективности на основе повышения их оперативности, информативности и достоверности данных. Впервые проанализированы причины возникновения и проявления недостатков существующих систем контроля в условиях современного производства.

**Практическая ценность.** Заключается в том, что определены направления научных исследований, реализация которых расширит функциональные возможности контроля энергоэффективности в современных условиях, позволит повысить эффективность управления производственным процессом.

**Ключевые слова:** контроль энергоэффективности; нормирования энергопотребления; оперативность; информативность; достоверность.

## ENERGY EFFICIENCY CONTROL SYSTEMS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND THE WAYS TO IMPROVE THEM

DRESHPAK N.S. Ph.D, Associate professor, Associate professor of electrical engineering department of Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: nat.dreshpak@gmail.com.

**Purpose.** To identify the disadvantages of the existing systems of energy efficiency control of production processes and the reasons for their occurrence, to analyze requirements for modern control systems.

**Methodology.** Analyzing disadvantages of the existing control systems, comparing and determining their capabilities in a market economy, generalizing the received results.

**Findings.** The functionalities of the existing energy efficiency control systems do not correspond to the current conditions of production processes, that create problems for determining the content and implementation of energy saving measures. Low efficiency of the control systems is caused by the limited capabilities of the existing methods of calculating the normalized values of energy consumption, the lack of prompt assessment of the factors affecting the final result of energy efficiency, as well as the significant cost of modern energy metering. The limitation of the information component of control is that there is a difficulty in identifying from the set of factors influencing the achieved level of energy efficiency component, which is associated with the activity of service personnel in the implementation of energy saving measures. There is a need to improve the accuracy of calculating the normalized values of energy consumption. The ways to eliminate existing problems are to determine the patterns of formation of normalized values of energy consumption in terms of operational control, application of new approaches to assessing the effectiveness of impact factors, justification of errors in calculating normalized values of energy efficiency, creating and determining criteria for energy consumption in the periods related to the reporting of the enterprise. The implementation of these actions involves a significant change in views on the organization of the control procedure, technical and information support for its implementation.

**Originality.** For the first time, a comprehensive improvement of the existing energy efficiency control systems, basing on increasing their efficiency, information content and the reliability of data, are proposed. For the first time, the causes and demonstration of the disadvantages of the existing control systems in modern production are analyzed.

**Practical value.** Certain areas of research are identified, their implementation will expand the functionality of energy efficiency control in modern conditions and will increase the efficiency of production process management.

**Keywords:** energy efficiency control; rationing of energy consumption; efficiency; informational content; accuracy.

## REFERENCES

- [1] Kudrin, B.I., Zhilin B.V., Matinina U.V. (2013) Elektrosnabzhenie potrebitel'ey i rezhimy. M.: Izdatelskiy dom MEI, 412. (in Russian)
- [2] Gofman, I.V. (1966) Normirovaniye potrebleniya energii i energeticheskiye balansy promyshlennykh predpriyatiy .M.: Energiya, 319.(in Russian)
- [3] Pivnyak, G.G., Vypanasenko, S.I., Hovanskaya O.I., Hatskevych U.V., Dreshpak, N.S. (2013). Systemy enerhomenedzhmentu ta yikh matematychno zabezpechennia. D.: Natsionalnyi hirnychiy universytet, 214. (in Ukrainian)
- [4] Vypanasenko, S., Dreshpak N. (2013) The features of energy efficiency measurement and control of production processes *Energy efficiency improvement of geotechnical systems, 1, 71-78.*
- [5] Vypanasenko, S., Dreshpak N. (2015) Informational and methodological support for energy efficiency control *Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems, 2, 53-57.*
- [6] Rodionova, V.N., Vladymirova, I.S (2007). Sovremennyye tendentsii razvitiya organizatsii proizvodstvennoy deyatel'nosti na predpriyatii. *Organizator proizvodstva*, 4-8 (in Russian)
- [7] «Pro energoberezhennya» [Elektronnij resurs]: Zakon Ukrayini [Priinyatij postanovo Verkhovnoyi Radi Ukrayini № 75/94-BP від 01.07.94.– Rezhim dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74/94-%D0%B2%D1%80>. (in Ukrainian)
- [8] Rambabu Pothina, Vladislav Kecojevic (2007). A Gyratory Crusher Model and Impact Parameters Related to Energy Consumption. *Minerals and Metallurgical Processing*, 24(3), 170-180.
- [9] M. Silva, A. Casali. (2015) Modelling SAG milling power and specific energy consumption including the feed percentage of intermediate size particles *Minerals Engineering*, 70, 156-161.
- [10] Napadovska, L.V.(2000) Vnutrishnohospodarskyi kontrol v rynkovii ekonomitsi. Dnipropetrovsk, 224. (in Ukrainian)
- [11] Panteliev, V.P. (2009) Kontsepsiia vnutrishnohospodar-skoho kontroliu diialnosti pidpriemstv: meto-dolohiia, orhanizatsiia, rozvytok: avto-ref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia d-ra ekon. nauk: 08.00.09 , 42. (in Ukrainian)
- [12] James G. Donovan. (2003) Fracture toughness-based models for the prediction of power consumption, product size, and capacity of jaw crushers. Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in mining and minerals engineering. Blacksburg, 211. – Режим доступу: <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/28544/Dissertation.pdf?sequence=1>
- [13] Ozhegov, A.N. Sistemy ASKUE (2006). Kirov: Yzd-vo ViatHU, 102 .(in Russian).
- [14] Adamatzky A. (2017) Advantages in unconventional computing. Prototypes, Models and Algorithms. Springer International Publishing, 812.
- [15] Albers V., Still B. (2011) Usability of complex information systems. Evaluation of user interaction. CRS press, 392.
- [16] Aslaksen E. (2008) Designing complex systems. Foundations of design in the functional domain. Auerbach publications, 176.
- [17] Barrera D., Diaz M. (2011) Communicating systems with UML 2. Modelling and analysis of network protocols. ISTE ltd, 268.
- [18] Boehm B. (2010) A spiral model of software development and enhancement. Object management group, 180.



**7 березня на 78-році пішов з життя**  
**професор, доктор технічних наук**  
**КЛИМЕНКО БОРИС ВОЛОДИМИРОВИЧ**



Борис Володимирович народився 14 лютого 1943 року у місті Кемерово. У 1964 році з відзнакою закінчив Харківський політехнічний інститут за спеціальністю «Електричні машини і апарати» і отримав кваліфікацію інженера-електромеханіка. Працював на посадах інженера, старшого інженера науково-дослідного відділу у Харківському політехнічному інституті (ХПІ). У 1968 році він вступив до аспірантури і в 1971 році захистив кандидатську дисертацію. Працював асистентом, доцентом, у період з 1995 по 2004 рік та з 2012 року знов працював на посаді завідувача кафедри «Електричні апарати». У 1994 році захистив докторську дисертацію. У 2000 році йому було присуджено вчене звання професора.

Борис Володимирович як дослідник користувався заслуженим авторитетом та великою повагою у вищих навчальних закладах, підприємствах і фірмах України й зарубіжжя. Він є автором трьох монографій, близько 200 друкованих праць й 70 авторських свідоцтв і патентів. Його монографія «Форсовані електромагнітні системи», видана у видавництві «Енергоатомиздат» у 1990 році, широко відома серед спеціалістів у галузі електричних апаратів. Великі термінологічні посібники, що видані у 2008 та 2009 роках з грифом Міністерства освіти і науки України, також стали широко відомими за межами НТУ «ХПІ». Окремо слід відзначити навчальний посібник «Електричні апарати. Загальний курс», який увійшов до бібліотечного фонду майже усіх вищих навчальних закладів України, де ведеться підготовка з галузі знань «Електрична інженерія», а також десятків промислових підприємств та комерційних установ.

Як головний спеціаліст він приймав участь у розробці конструкцій електромагнітних контакторів постійного струму. Був керівником ряду науково-дослідних робіт, результати яких впроваджені у промислове виробництво на декількох підприємствах України.

Під керівництвом Бориса Володимировича було підготовлено сім кандидатських і одна докторська дисертації. Понад 40 років він працював членом спеціалізованої Вченої ради по захисту кандидатських та докторських дисертацій. Багато уваги і сил приділяв він організаційно-методичній роботі, питанням змісту вищої освіти. Він був членом науково-методичної комісії Міністерства освіти і науки України з електромеханіки, членом робочої групи з розробки стандартів освіти, очолював комісію Методичної ради університету з питань змісту освіти. За його ініціативою на кафедрі було розпочато підготовку спеціалістів за спеціальністю «Електропобутова техніка».

Будучи лектором від природи, він викладає базові дисципліни для студентів кафедри «Електричні апарати», розробив оригінальні курси «Електромеханічні апарати низької напруги», а також «Електромеханічні апарати високої напруги та комплектні пристрої».

Борис Володимирович приклав багато зусиль до розширення зв'язків кафедри «Електричні апарати» з провідними закладами вищої освіти України та зарубіжних країн. Завдяки його цілеспрямованості і наполегливості на кафедрі «Електричні апарати», був створений експозиційний зал, у якому демонструються сучасні електричні апарати, суттєво модернізовано та розширено обчислювальний центр. Багато уваги він приділяв удосконаленню й оновленню лабораторної бази кафедри сучасним обладнанням

У 1998 році за його ініціативою розпочав регулярну роботу міжнародний симпозіум SIEMA з проблем удосконалення електричних машин і апаратів, у якому приймають участь провідні вчені та спеціалісти України, Росії, Польщі, Азербайджану, Латвії, Німеччини і США, які зв'язали своє життя з електротехнікою. Завдяки його організаторському почину у 2002 році вийшов перший номер науково-практичного журналу «Електротехніка і електромеханіка», в якому він був головним редактором. Журнал набув визнання не тільки в Україні, але й за кордоном, увійшов до переліку фахових видань України, а також багатьох провідних наукометричних баз, включаючи Web of Science

Професор Б.В. Клименко брав активну участь у національних й міжнародних наукових, технічних та методичних конференціях і семінарах з питань електротехніки, педагогічної майстерності та змісту освіти.

Серед колег Борис Володимирович користувався заслуженою повагою і авторитетом.

Колектив кафедри «Електричні та електронні апарати» НУ «Запорізька політехніка»