



*Науковий журнал*

# **ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА**

**№4'2020**

*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  
Тиховод С.М.  
Відповідальний  
секретар канд. техн. наук  
Коцур М. І.

Включено до переліку  
наукових фахових видань України  
(наказ МОНУ № 409 від 17.03.2020 р.,  
наказ МОНУ № 1471 від 26.11.2020 р.)

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ  
КОЛЕГІЇ

## ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (Україна)

**Yunus Biçen**, Ph.D, університет Дюздже, Туреччина;  
**Zgraja Jerzy**, Ph.D, професор Лодзького технологічного університету, Лодзь, Польща;  
**Biro, Oszkar**, Ph.D, професор інституту основ і теорії електротехніки Грацького технічного, Грац, Австрія;  
**Zurek Stan**, Ph.D., науковий співробітник, Кардіфський університет, Кардіф, Великобританія;  
**Sebastian Tomy**, Ph.D, професор університету Торонто, м. Торонто, Канада, технічний експерт корпорації "Motor Drives and Control Group", Бей-Сіті, Мічиган, США;  
**Arturi, Cesare Mario**, Ph.D., професор політехнічного університету Мілана, Італія;  
**Ronseero-Clemente Carlos**, Ph.D., професор факультету Електроенергетика та електронні системи, Університет Естремадури, м. Бадахос, Іспанія;  
**José Roberto Camacho**, PhD, професор електротехніки в Uberlandia федеральний університет, Бразилія;  
**Mohamed Ahmed Moustafa Hassan**, Ph.D., професор кафедри електротехніки та електроенергетики, Каїрський університет, Гіза, Єгипет.

**Загірняк М. В.**, д-р техн. наук, проф., Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна;  
**Зірка С. Є.**, д-р техн. наук, проф., Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна; **Міліх В. І.**, д-р техн. наук, проф., Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків, Україна; **Жильцов А. В.**, д-р техн. наук, проф., Національний університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна; **Паранчук Я. С.**, д-р техн. наук, проф., Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна; **Толочко О. І.**, д-р техн. наук, проф., Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського, м. Київ, Україна; **Бушер В. В.**, д-р техн. наук, проф., Одеський національного політехнічного університету, м. Одеса, Україна; **Андрієнко П. Д.**, д-р техн. наук, проф., 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. Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №6952 від 22.10.2019р.  
Реєстрація журналу: Журнал зареєстровано у Міністерстві юстиції України. Свідоцтво 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 02.12.2020 за рекомендацією вченої ради національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №4/20 від 08.12.2020 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 4,53. Тираж 300 прим. Зам. №1223

ZAPORIZHZHIA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY

---



*Scientific journal*

# **ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING**

**№4'2020**

*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,  
Order of the Ministry of Education and Science  
№ 1471 dated 26.11.2020)*

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**, PhD., 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 December 02, 2020 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No. 4/20 dated december 08, 2020). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 4,53. Number of copies printed 300. Rep. №1223

# ЗМІСТ

## I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

*Подус О.Р., Паталах Д.Г., Тиховод С. М.*

Гіраторно-конденсаторний метод моделювання електромагнітних процесів на основі магнітоелектричних схем заміщення.....8

## II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

*Хребтова О.А., Зачена Н.В.*

Аналіз систем електропривода для виконання рушання та пуску під навантаженням.....18

*Папайка Ю.А., Лисенко О.Г., Бубликов А.В., Олішевський І.Г.*

Оцінка надійності систем електропостачання з потужними нелінійними навантаженнями.....26

## III АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

*Анікін П.С., Шило Г.М., Куликовський Р.А., Молочков Д.Є.*

Система автоматизованого керування робототехнічною платформою 3D-друку з використанням технології електродугового зварювання.....35

# CONTENTS

## I ELECTRICAL ENGINEERING

*Podus A., Patalakh D., Tykhovod S.*

Gyrator-capacitor method for modeling of electromagnetic processes based on  
magnetolectric substitution circuits .....8

## II POWER ENGINEERING

*Khrebtova O.A., Zachepa N.V.*

Analysis of electric drive systems for performance of driving and starting under load.....18

*Papaika Yu. A., Lysenko O. H., Bublikov A.V., Olishevskiy I. H.*

Reliability assessment of power supply systems with powerful nonlinear loads.....26

## III AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

*Anikin P.S., Shilo G.M., Kulykovskiy R.A., Molochkov D.E.*

Automation control system of 3D printing robotic platform with implemented  
wire + arc welding technology.....35

# СОДЕРЖАНИЕ

## I ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

*Подус А.Р., Паталах Д.Г., Тиховод С. М.*

гираторно-конденсаторный метод моделирования электромагнитных процессов  
на основе магнитоэлектрических схем замещения.....8

## II ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

*Хребтова О.А., Зачена Н.В.*

Анализ систем электропривода для выполнения трогания и пуска под нагрузкой.....18

*Папаика Ю.А., Лысенко А. Г., Бубликов А.В., Олишевский И.Г.*

Оценка надежности систем электроснабжения с мощными нелинейными нагрузками.....26

## III АВТОМАТИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

*Аникин П.С., Шило Г.Н., Куликовский Р.А., Молочков Д.Е.*

Система автоматизированного управления робототехнической платформы  
3D-печати с использованием технологии электродуговой сварки.....35

УДК 621.316.13

## ГИРАТОРНО-КОНДЕНСАТОРНЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

- ПОДУС А.Р. Студент Национального университета «Запорізька політехніка», Запорожье, Украина, e-mail: [koldun290@gmail.com](mailto:koldun290@gmail.com);
- ПАТАЛАХ Д.Г. Аспирант Национального университета «Запорізька політехніка», Запорожье, Украина, e-mail: [patalakh.dmytro@gmail.com](mailto:patalakh.dmytro@gmail.com);
- ТИХОВОД С. М. д.т.н., доц. Национального университета «Запорізька політехніка», Запорожье, Украина, e-mail: [stikhovod@gmail.com](mailto:stikhovod@gmail.com).

**Цель работы.** Разработка магнитоэлектрических схем замещения, использующих гираторно-конденсаторные модели

**Методы исследования.** Численные методы решения дифференциальных уравнений состояния, математический аппарат матричной алгебры, компьютерное программирование и методы теории электрических цепей.

**Полученные результаты.** В результате модификации известного метода расчета переходных электромагнитных процессов на основе магнитоэлектрических схем замещения, разработан метод, использующий гираторно-конденсаторные модели. На основании разработанного метода составлена компьютерная программа для расчета переходного процесса в однофазном трансформаторе, которая показала адекватность метода. Модифицирован универсальный программный комплекс моделирования магнитоэлектрических схем замещения *Colo*. Показан пример применения модифицированного программного комплекса *Colo* для расчета переходного процесса в трехфазном трансформаторе. Данный пример показал лучшую наглядность при составлении магнитоэлектрических схем замещения, а также сокращение времени компьютерного моделирования.

**Научная новизна.** Получено дальнейшее развитие методов расчета электромагнитных процессов на основе нелинейных магнитоэлектрических схем замещения. Модифицирована математическая модель, положенная в основу универсального программного комплекса *Colo* путем введения нового элемента - гиратора, чем достигнута системность применения гираторно-конденсаторного метода магнитоэлектрических схем замещения.

**Практическая ценность.** Предложенная модификация универсального программного комплекса *Colo* позволяет сократить время разработки модели, подготовки исходных данных и позволяет сократить процессорное время моделирования сложных нелинейных электромагнитных устройств.

**Ключевые слова:** переходный процесс; трансформаторы; магнитоэлектрические схемы замещения; численные методы; схемная модель; магнитные конденсаторы; гираторы

### I. ВВЕДЕНИЕ

Моделирование является неотъемлемой частью разработки электромагнитных устройств, например, трансформаторов. Динамические электромагнитные процессы, приводящие к броскам тока при коммутациях, представляют опасность для трансформаторов. В трансформаторах переходные процессы происходят также и в рабочих режимах, если трансформаторы нагружены на преобразовательные устройства. В настоящее время моделирование переходных процессов в электрических комплексах, связанных с электромагнитными устройствами целесообразно проводить методами теории электрических и магнитных цепей, которые взаимодействуют между собой. Объединенная магнитная и электрическая цепь составляют так называемую магнитоэлектрическую схему замещения (МЭСЗ), которая моделируется как единая цепь [1]-[2]. Для решения этой задачи используется ряд гото-

вых программных комплексов. Наиболее известными из них является EMTP, NAP, NRAFT, PSpice, Micro Cap, ЭЛТРАН, ЦУМПУ, Simulink. Характерной особенностью МЭСЗ является наличие многочисленных управляемых источников напряжения и тока. Управляемые источники создают так называемые «алгебраические петли», которые приводят к тому, что вычислительный процесс существенно затягивается, либо вообще прекращается. Программный комплекс *Colo* лишен этих недостатков. Однако требуется его модификация.

### II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В литературе широко известен метод расчета электромагнитных процессов на основе нелинейных магнитоэлектрических схем замещения [1]-[2]. В этих работах описана математическая модель, основанная на автоматическом составлении дифференциально-алгебраических уравнений состояния топологически-



ми методами по законам Кирхгофа [3]-[4]. Интегрирование уравнений выполняется численными методами [5]-[6]. Применению МЭСЗ посвящены работы [8], [9]. Появились новые работы, в которых показана эффективность применения гираторов при использовании магнитоэлектрических схем замещения [10]-[11]. Гираторно-конденсаторный метод моделирования МЭСЗ с использованием понятия «магнитный ток» - это шаг вперед в моделировании МЭСЗ. Это дает основание для модификации математической модели, которая положена в основу универсального программного комплекса Colo, а также доработки самого программного комплекса.

### III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

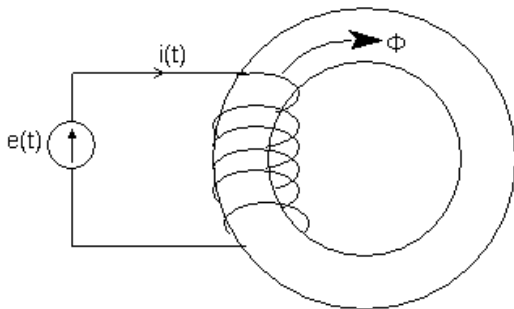
Целью работы является модификация разработанного метода расчета переходных процессов в магнитоэлектрических цепях [7] путем введения нового элемента – гиратора.

### IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для простоты изложения, рассмотрим замкнутый ферромагнитный магнитопровод с длиной средней линии  $\ell$ , на котором расположена катушка, содержащая  $N$  витков.

Если подключить к катушке источник переменного напряжения  $e(t)$ , то по виткам катушки потечет электрический ток  $i(t)$  и произойдет переходный процесс. Согласно закону полного тока можно записать:

$$H \cdot \ell = N \cdot i \quad (1)$$



**Рисунок 1.** Замкнутый ферромагнитный магнитопровод, на котором расположена катушка

В работах [8], [9] М.А. Шакировым предложено использовать понятие магнитного тока смещения  $i^m = d\Phi / dt$  по аналогии с электрическим током смещения плотностью  $dD / dt$ . Подобно электрическому току смещения, протекающему через емкостной элемент, магнитный ток смещения должен протекать через магнитный емкостной элемент  $C_m$ . При этом магнитному потоку отводится роль магнитного заряда  $q_m = \Phi$ . В дальнейшем магнитный ток смещения будем называть просто магнитным током. Как утверждает Джеймс Клерк Максвелл в работе [12] термин маг-

нитный ток впервые был предложен Оливером Хевисайдом. Метод, предложенный Шакировым, усовершенствован в работе [13].

Продифференцируем выражение (1) по времени:

$$\frac{dH}{dB} \frac{dB}{dt} \ell = N \frac{di}{dt}$$

Преобразуем выражение (1), используя обозначение дифференциальной магнитной проницаемости:

$$\mu^d = dB / dH :$$

$$\frac{\ell}{S \mu^d} \frac{d\Phi}{dt} = N \frac{di}{dt}, \quad (2)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения магнитопровода.

Уравнение (2) представим в другом виде, обозначив производную по времени штрихом:

$$R^d \Phi' = Ni', \quad (3)$$

где введено дифференциальное магнитное сопротивление

$$R^d = \frac{\ell}{\mu^d S} \quad (4)$$

Согласно выражению (3) можно записать:

$$\Phi' = \frac{Ni'}{R^d} = i^m \quad (5)$$

Выполним формальное преобразование выражения (5), вводя дифференциальную емкость, получим:

$$i^m = \Phi' = C_m^d \frac{d\Phi}{dt}, \quad (6)$$

где  $C_m^d$  – дифференциальная емкость так называемого магнитного конденсатора:

$$C_m^d = \frac{\mu^d S}{\ell}, \quad \mu^d = dB / dH.$$

Согласно (3) получен:

$$R^d \Phi' = Ni' = \Phi' / C_m^d \quad (7)$$

Тогда МДС и магнитное напряжение выражаются как:

$$Ni = U_{C_m}; \quad Ni = \Phi / C_m^d. \quad (8)$$

Взаимное влияние электрической и магнитной цепей осуществляют с помощью гираторов. Гиратор впервые предложен Теледженом [14]. Гиратор является элементом цепи и имеет два порта (рис.2).

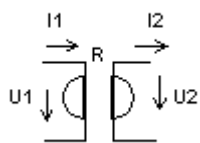


Рисунок 2. Обозначение гири на схеме

Ток и напряжение на входе и выходе гири связаны соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= R \cdot I_2 \\ U_2 &= R \cdot I_1 \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где  $R$  - коэффициент гирации, имеющий размерность сопротивления.

Будем интерпретировать выражение (8) следующим образом. В схеме замещения магнитной ветви имеется магнитный ток, равный производной магнитного потока  $d\Phi/dt$ . В магнитную ветвь включен магнитный конденсатор с дифференциальной емкостью  $C_m^d$ .

Таким образом, влияние катушки на магнитную ветвь учтено включением в магнитную ветвь источника напряжения, управляемого током катушки с коэффициентом управления  $N$ . Влияние магнитной ветви на катушку учтено включением вместо катушки источника напряжения, управляемого магнитным током с коэффициентом управления  $N$ .

Гири играют важную роль в модели гири-конденсатора как преобразователи между областью электрической цепи и областью магнитной цепи. В последнее время появились работы, в которых описан гири-конденсаторный подход моделирования магнитоэлектрических схем замещения [10]-[11].

Катушке (рис. 1) соответствует магнитоэлектрическая схема замещения, показанная на рис. 3.

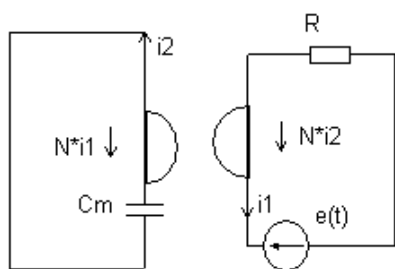


Рисунок 3. Схема замещения катушки (рис. 1)

Следует отметить, что в выражении (6) дифференциальная емкость магнитного конденсатора  $C_m^d$  не входит под знак производной по времени. Это дает основания рассматривать напряжение на магнитном конденсаторе как самостоятельную переменную состояния. Переменная состояния при коммутации не

должна изменяться скачком, то есть ее производная по времени всегда ограничена.

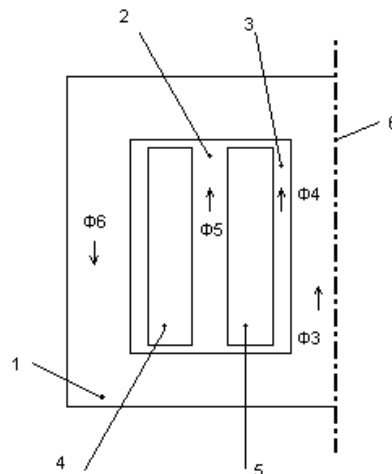
Покажем, что напряжение на магнитном конденсаторе не изменяется скачком. Энергия однородного магнитного поля  $W$  в объеме  $V$  определяется выражением:  $W = V \cdot BH/2$ . Тогда скорость изменения энергии магнитного поля – мощность  $P$  всегда ограничена:

$$P = \frac{dW}{dt} = \left[ \frac{dB}{dH} \frac{dH}{dt} H + B \frac{dH}{dt} \right] \frac{V}{2} = \left[ \mu^d \frac{dH}{dt} H + B \frac{dH}{dt} \right] \frac{V}{2}. \quad (10)$$

Следовательно, ограничены все члены выражения (10). Отсюда следует, что ограничено значение магнитного тока (6), а, следовательно, и значение  $du_{cm}/dt$ . То есть магнитное напряжение  $u_{cm}$  не может изменяться скачком. Уравнение (3) можно интерпретировать следующим образом. По магнитопроводу протекает «магнитный ток», значение которого равно производной по времени магнитного потока  $\Phi$  (рис. 3).

Левая часть уравнения (8) интерпретируется как источник МДС, управляемый током катушки. Электрическая цепь содержит источник ЭДС  $e(t)$ , некоторое сопротивление  $R$ , и гири, управляемый магнитным током  $i_2$  с коэффициентом гирации  $N$  (рис. 3).

В качестве примера применения рассмотренной схемы замещения с включенными магнитными конденсаторами с дифференциальной емкостью рассмотрим моделирование переходного процесса при включении однофазного трансформатора, показанного на (рис. 4).



1 – магнитопровод; 2 – зазор между обмотками (канал рассеяния). 3 – зазор между обмоткой и стержнем; 4 – первичная обмотка; 5 – вторичная обмотка; 6 – ось симметрии

Рисунок 4. Конструкция двухобмоточного однофазного трансформатора в разрезе:

МЭСЗ однофазного трансформатора представлена на рис. 5.



- линейные резистивные (R), индуктивные (L) и емкостные (C) элементы;
- независимые источники ЭДС (E) и тока (J), функционально зависящие от времени по заданному закону;
- зависимые источники ЭДС (E) и тока (J), управляемые током или напряжением любой ветви;
- нелинейные резистивные элементы с кусочно-линейными (RN), или гладкими характеристиками (Rn);
- диоды (D) и тиристоры (S), для которых учтен ряд важных параметров, не предусмотренных в существующих системах моделирования;
- ветвь ферромагнитного магнитопровода, в которой протекает магнитный ток, характеристика которой задана дифференциальной магнитной емкостью (Cm), зависящей от напряженности магнитного поля, причем резистивный элемент этой ветви отвечает за потери в стали;

В основу программного комплекса Colo положен метод переменных состояния с применением уравнений токов и напряжений Кирхгофа, полученных автоматически топологическими методами. Программный комплекс Colo разработан в системе Matlab [16].

Входные данные задаются в m-файле DataColo. Файл DataColo помещается в одну папку со всеми подпрограммами и основной программой Colo. Основной массив Param\_ish в m-файле DataColo, в который заносится топология цепи и основные параметры элементов, формируется по следующим правилам:

- Каждая ветвь описывается отдельной строкой массива. Количество строк массива равно количеству ветвей  $b$  схемы;
- Каждая строка содержит шесть числовых параметров, разделенных пробелами или запятой. В конце строки ставится символ «точка с запятой» и троеточие;
- В каждой строке первый параметр – целое число задает номер ветви на схеме;
- Вторым параметром – целое число определяет номер узла, из которого исходит данная ветвь;
- Третьим параметром – целое число определяет номер узла, в котором заканчивается данная ветвь;
- Четвертым параметром строки определяет тип ветви.
- Пятым параметром строки определяет следующее: для пассивных линейных компонентов схемы – это величина сопротивления, индуктивности или емкости; для независимых источников ЭДС и тока этот параметр равен нулю; для элементов замещения нелинейных резисторов – это номер нелинейного элемента, дающий ссылку на заданную характеристику нелинейного элемента;
- Шестым параметром определяет начальные условия переменных состояния. Для особой «дифференциальной» магнитной ветви этот параметр задает начальное значение магнитного потока (остаточная намагниченность). Для остальных ветвей этот параметр равен

нулю.

Математическая модель, положенная в основу программного комплекса Colo, и сам программный комплекс модифицированы авторами данной работы введением нового элемента – гиратора.

Во входных данных массива Param\_ish файла DataColo каждой ветви с гиратором соответствует строка, в которой четвертый параметр строки определяет тип ветви (G). Пятым параметром строки определяется номер управляющей ветви. Шестым параметром строки определяется коэффициент гирации. Гираторы определяются только в магнитных цепях. В электрических цепях магнитоэлектрических схем замещения гираторы специально во входных данных не задаются. Они определяются программой автоматически по данным гираторов магнитной цепи.

С помощью модифицированного программного комплекса Colo выполнено моделирование переходного процесса при включении трехфазного пяти-стержневого трансформатора. МЭСЗ трансформатора представлена на рис. 6-8. Все магнитные токи обозначены символом “ $i$ ” с номером ветви.

Результаты моделирования представлены на рис. 9-10. На рис. 9 в крупном масштабе показано начало переходного процесса, а на рис. 10 в более мелком масштабе показано продолжение переходного процесса. Рис. 10 показывает, что переходный процесс при включении мощного трансформатора весьма длительный, поэтому сокращение времени моделирования является ценной особенностью модифицированного программного комплекса.

## V. ВЫВОДЫ

В модифицированном методе расчета переходных электромагнитных процессов на основе магнитоэлектрических схем замещения, используются гираторно-конденсаторные модели. Составленная компьютерная программа для расчета переходного процесса в однофазном трансформаторе, показала адекватность метода.

Показанный пример применения модифицированного программного комплекса Colo для расчета переходного процесса в трехфазном трансформаторе показал лучшую наглядность при составлении магнитоэлектрических схем замещения, а также показал сокращение времени компьютерного моделирования.

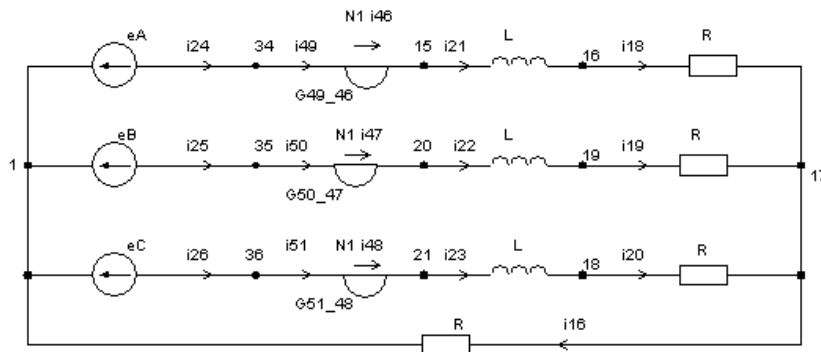


Рисунок 6. Первичная обмотка с трехфазным источником ЭДС.

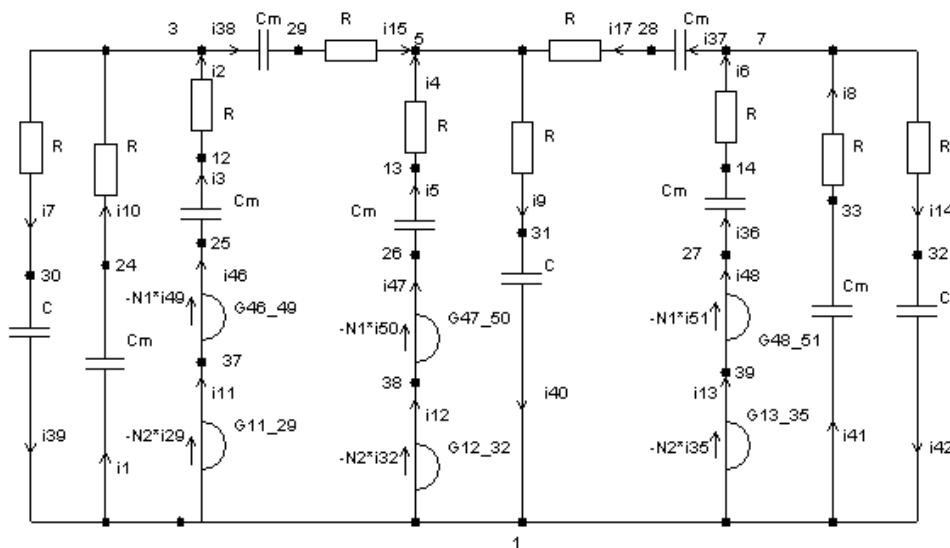


Рисунок 7. Магнитная цепь

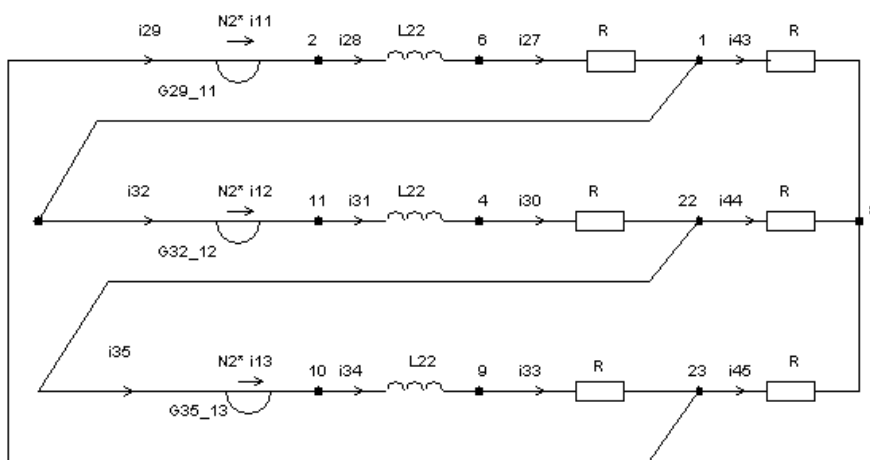


Рисунок 8. Вторичная обмотка с нагрузкой

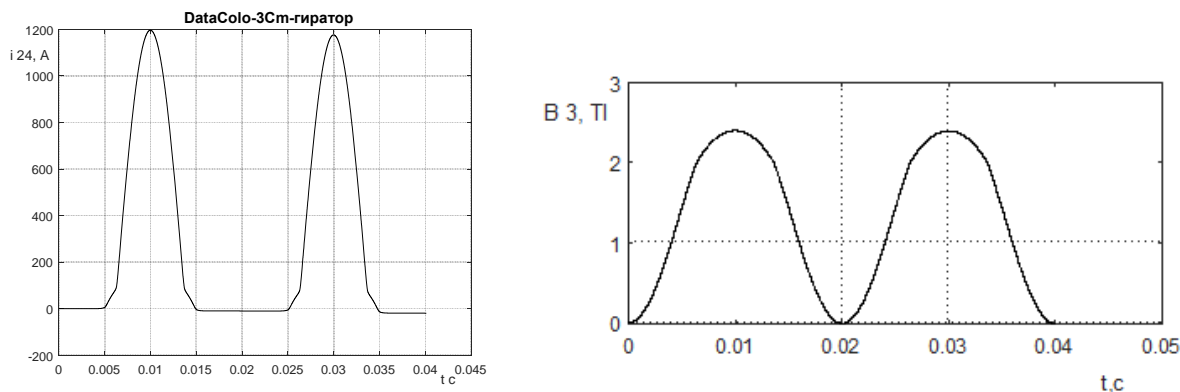


Рисунок 9. Начало переходного процесса тока первичной обмотки  $i_{24}$  и магнитной индукции  $B_3$  в стержне фазы А

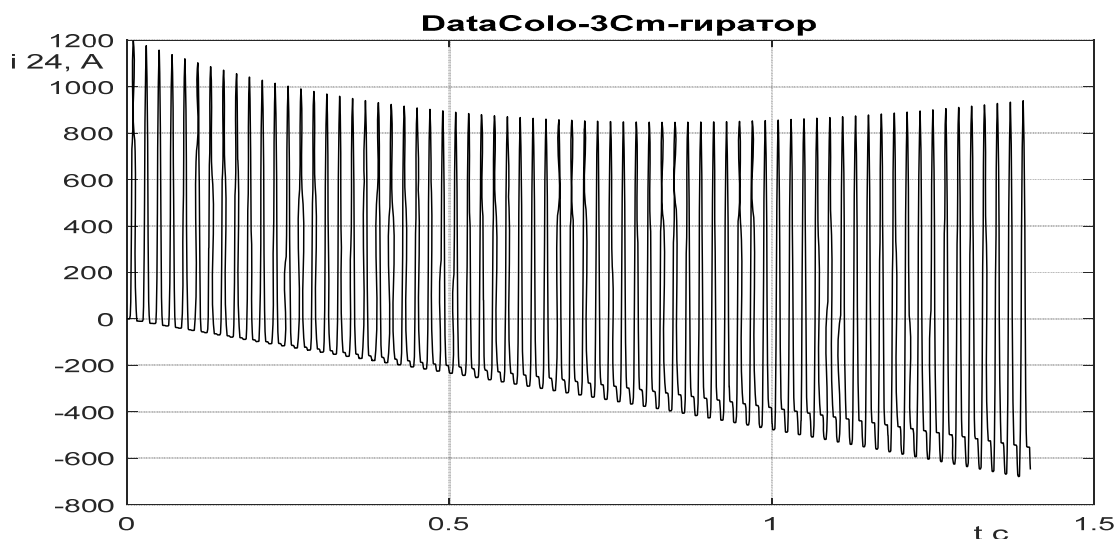


Рисунок 10. Переходный процесс тока первичной обмотки и магнитной индукции в стержне фазы А

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Тиховод С.М. Модификация магнитоэлектрических схем замещения электромагнитных устройств для анализа переходных процессов / С.М. Тиховод // Электричество . – 2014. – №2 . – С. 53-60. <http://elibrary.ru/item.asp?id=21094678>
- [2] Тиховод С. М. Моделювання перехідних електромагнітних процесів в трансформаторах на основі магнітоелектричних схем заміщення: Підручник / С.М. Тиховод. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. – 94 с.
- [3] Чахмахсазян Е.А. Машинный анализ интегральных схем. Вопросы теории и программирования / Е.А. Чахмахсазян, Ю.Н. Бармаков, А.Э. Гольденберг. – М.: Советское радио, 1974. – 272 с.
- [4] Чуа Л.О. Машинный анализ электронных схем: Алгоритмы и вычислительные методы / Л. О. Чуа, Пен-Мин. Лин; [пер. с англ.]. – М.: Энергия, 1980. – 640 с.
- [5] Бахвалов, Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – 9-е изд., электрон. - Москва : Лаборатория знаний, 2020. - 636 с.
- [6] Bansal R.K. Fundamentals of Numerical Methods. Oxford: Alpha Science International Ltd., 2018. — 574 p. — ISBN 1783323604.
- [7] Тиховод С. М. Система компьютерного моделирования динамических процессов в нелинейных магнитоэлектрических цепях / С.М. Тиховод //

- Технічна електродинаміка . – 2008. – №3, С. 16-23.
- [8] Шакиров М.А. Магнітоелектрические схемы замещения катушек индуктивности и трансформаторов / М.А. Шакиров // Электричество. – 2003. – №11. – С. 34-45.
- [9] Шакиров М.А. Анализ неравномерности распределения магнитных нагрузок и потерь в трансформаторах на основе магнітоелектрических схем замещения / М.А. Шакиров // Электричество. – 2005. – № 11. – С. 15-27.
- [10] Guadalupe G Gonzalez and Mehrdad Ehsani «Power-Invariant Magnetic System Modeling». International Journal of Magnetism and Electromagnetism ,2018. 4 (1). DOI: 10.35840/2631-5068/6512. ISSN 2631-5068
- [11] Mathieu Lambert; Jean Mahseredjian; Manuel Martı́nez-Duró; Frédéric Siroi. (2015). «Magnetic Circuits Within Electric Circuits: Critical Review of Existing Methods and New Mutator Implementations». IEEE Transactions on Power Delivery . 30 (6): 2427–2434. DOI : 10.1109 / TPWRD.2015.2391231
- [12] Д.К. Максвелл. Статьи и речи. – М.: Наука. – 1968.– с. 312.
- [13] Тиховод С. М. Моделирование переходных процессов в электромагнитных устройствах на основе магнітоелектрических схем замещения с магнитными конденсаторами / С.М. Тиховод, И. Токмаков // Електротехніка та електроенергетика . – 2013. – № 1 . – С. 5-12. – Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/etee\\_2013\\_1\\_3.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/etee_2013_1_3.pdf)
- [14] B.D.H. Tellegen. The gyrator a new electric network element / Tellegen B.D.H. // Philips Res.Rep. –1948. –# 3.-p. 81-101.
- [15] Тиховод С.М. Расчет индуктивностей обмоток трансформатора, обусловленных магнитными потоками в воздухе / С.М. Тиховод, Г.Н. Романиченко, И.О. Афанасьева // Електромеханічні і енергозберігаючі системи . – №3. – С. 149-154.
- [16] Ануфриев И. Е., МАТЛАВ 7 / И. Е. Ануфриев, А. Б. Смирнов, Е. Н. Смирнова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.

Стаття надійшла до редакції 08.11.2020

## ГІРАТОРНО-КОНДЕНСАТОРНИЙ МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ НА ОСНОВІ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ

- ПОДУС О.Р. Студент Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: e-mail:koldun290@gmail.com;
- ПАТАЛАХ Д.Г. Аспірант Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: patalakh.dmytro@gmail.com;
- ТИХОВОД С. М. д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри теоретичної та загальної електротехніки Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: stikhovod@gmail.com.

**Мета роботи.** Розробка магнітоелектричних схем заміщення, що використовують гіраторно-конденсаторні моделі

**Методи дослідження.** Числові методи розв'язку диференціальних рівнянь стану, математичний апарат матричної алгебри, комп'ютерне програмування та методи теорії електричних кіл.

**Отримані результати.** В результаті модифікації відомого методу розрахунку перехідних електромагнітних процесів на основі магнітоелектричних схем заміщення, розроблений метод, який використовує гіраторно-конденсаторні моделі. На підставі розробленого методу складена комп'ютерна програма для розрахунку перехідного процесу в однофазному трансформаторі, яка показала адекватність методу. Модифікований універсальний програмний комплекс моделювання магнітоелектричних схем заміщення Solo. Показаний приклад застосування модифікованого програмного комплексу Solo для розрахунку перехідного процесу в трифазному трансформаторі. Даний приклад показав кращу наочність при складанні магнітоелектричних схем заміщення, а також скорочення часу комп'ютерного моделювання.

**Наукова новизна.** Виконано подальший розвиток методів розрахунку електромагнітних процесів на основі нелінійних магнітоелектричних схем заміщення. Модифікована математична модель, яка положення в основу універсального програмного комплексу Solo шляхом введення нового елемента - гіратора, чим досягнута сис-

темність застосування гіраторно-конденсаторного методу магнітоелектричних схем заміщення.

**Практична цінність.** Запропонована модифікація універсального програмного комплексу Colo дозволяє скоротити час розробки моделі, підготовки вихідних даних і скоротити процесорний час моделювання складних нелінійних електромагнітних пристроїв.

**Ключові слова:** перехідний процес; трансформатори; магнітоелектричні схеми заміщення; числові методи; схемна модель; магнітні конденсатори; гіратори

## GYRATOR-CAPACITOR METHOD FOR MODELING OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES BASED ON MAGNETOELECTRIC SUBSTITUTION CIRCUITS

- PODUS A. Student of National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: koldun290@gmail.com;
- PATALAKH D. Postgraduate student of National University " Zaporizhzhia Polytechnic ", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: patalakh.dmytro@gmail.com;
- TYKHOVOD S. Doctor technical sciences, Assoc. Prof., Chief of the department of the Theoretical and general electronics, National University " Zaporizhzhia Polytechnic", Ukraine, e-mail: stikhovod@gmail.com.

**Purpose.** Development of magnetolectric substitution circuits using gyrator-capacitor models

**Methodology.** Numerical methods for solving differential equations of state, mathematical apparatus of matrix algebra, computer programming and methods of electrical circuit theory.

**Findings.** As a result of modification of the known method of calculation of transient electro-magnetic processes on the basis of magnetolectric substitution circuits, the method using gyrator-capacitor models is developed.

On the basis of the developed method the computer program for calculation of transient process in the single-phase transformer which showed adequacy of a method is made. The universal software complex for modeling magnetolectric substitution circuits Colo was modified. An example of using a modified Colo software complex to calculate a transients in a three-phase transformer is shown. This example demonstrates additional clarity of compiled magnetolectric substitution circuits and reduction of the computer time modeling.

**Originality.** Further development of methods for calculating electromagnetic processes based on nonlinear magnetolectric substitution circuits was carried out. The mathematical model, which is taken as a principle of the universal Colo software complex, was modified by the way of a new element application - a gyrator. It is allow to achieve the systemic application of the gyratory-capacitor method of magnetolectric substitution circuits.

**Practical value.** The proposed modification of the universal software complex Colo allows to reduce the time of model development, preparation of initial data and to reduce the processor time of modeling of complex nonlinear electromagnetic devices.

**Keywords:** transient; transformers; magnetolectric substitution circuits; numerical methods; schematic model; magnetic capacitors; gyrators.

### REFERENCES

- [1] Tikhovod, S.M. (2014). Modifikatsiya magnitoelektricheskikh skhem zamescheniya elektromagnitnykh ustroystv dlya analiza perekhodnykh protsessov. *Elektrichestvo*. No 2, 53-60. <http://elibrary.ru/item.asp?id=2109467>
- [2] Tikhovod, S.M. (2017). Modelyuvannya perekhodka elektromagnitnykh protsessiv v transformatorakh na osnovi magnitoelektricheskikh skhem zamescheniya: pdruchnik. Zaporizhzhya: ZNTU, 94.
- [3] Chakhmakhshyan, E.A., Barmakov, Yu.N., Goldenberg, A.E. (1974). Mashinnyy analiz integralnykh skhem. voprosy teorii i programmirovaniya. Moscow: Sovetskoe radio, 272.
- [4] Chua, L.O. Pen-Min. (1980). Mashinnyy analiz elektronnykh skhem: algoritmy i vychislitelnye metody. Moscow, Energiya, 640.
- [5] Bakhvalov, N. S., Zhidkov, G. M., Kobelkov, N. P., (2020). Chislennyye metody. 9-e izd., elektron, Moskva : laboratoriya znaniy, 636.
- [6] Bansal, R.K. (2018). Fundamentals of numerical methods. Oxford: alpha science international ltd, 574
- [7] Tikhovod, S.M. (2008). Sistema kompyuternogo modeli-rovaniya dinamicheskikh protsessov v neline-



- jnykh magnitoelektricheskikh tsepyakh. Tekhnichna elektrodinamka, No 3, 16-23.
- [8] Shakirov, M.A. (2003). Magnitoelektricheskie skhemy zamescheniya katushek induktivnosti i transformatorov. *Elektrichestvo*, No 11, 34-45.
- [9] Shakirov, M.A. (2005). Analiz neravnomernosti raspredeleniya magnitnykh nagruzok i poter v transformatorakh na osnove magnitoelektricheskikh skhem zamescheniya. *Elektrichestvo*, No 11, 15-27.
- [10] Guadalupe G Gonzalez and Mehrdad Ehsani «Power-Invariant Magnetic System Modeling». *International Journal of Magnetism and Electromagnetism*, 2018. 4 (1). DOI: 10.35840/2631-5068/6512. ISSN 2631-5068
- [11] Mathieu Lambert; Jean Mahseredjian; Manuel Martí'nez-Duró; Frédéric Siroi. (2015). «Magnetic Circuits Within Electric Circuits: Critical Review of Existing Methods and New Mutator Implementations». *IEEE Transactions on Power Delivery*. 30 (6): 2427–2434. DOI : 10.1109 / TPWRD.2015.2391231
- [12] Максвелл, Д.К. (1968). *Стати і речі*. Moscow. Nauka, 312.
- [13] Tikhovod, S.M., Tokmakov, I. (2013). Modelirovanie perekhodnykh protsessov v elektromagnitnykh ustrojstvakh na osno-ve magnitoelektricheskikh skhem zamescheniya s magnitnymi kondensatorami. *Elektrotekhnika ta elektroenergetika*, No 1, 5-12. rezhim dostupu: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/etee\\_2013\\_1\\_3.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/etee_2013_1_3.pdf)
- [14] B.D.H. Tellegen. (1948). The gyrator a new electric network element. *Philips Res.Rep.* No 3, 81-101.
- [15] Tikhovod, S.M., Romanichenko, G.N., Afanaseva, I.O. Raschet induktivnostej obmotok transformatora, obuslovlennykh magnitnymi potokami v vozdukh. *Elektromekhanichn energozbergayuch sistemi*. No 3. 149-154.
- [16] Anufriev, I. E., Smirnov, A. B., Smirnova, E. N. (2005). *Matlab 7*. SPb.: bkhv-Peterburg, 1104 s.

УДК 621.3.072.85

## АНАЛІЗ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РУШАННЯ ТА ПУСКУ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ

**ХРЕБТОВА О.А.** канд. техн. наук, доцент кафедри системи автоматичного керування і електроприводу Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна. e-mail: 34092@ukr.net;

**ЗАЧЕПА Н.В.** канд. техн. наук, доцент кафедри системи автоматичного керування і електроприводу Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна. e-mail: zachepa.nataliia@ukr.net.

**Мета роботи.** Виконати аналіз чинних систем автоматизованого керування електропривода і методів формування моменту пуску для визначення відповідності обраної системи і метода до вимог щодо виконання безаварійного режиму рушання та пуску технологічного механізму в важких умовах або рушання та пуску під навантаженням.

**Методи дослідження.** Порівняння енергетичних показників і можливостей систем і методів керування щодо формування пускового моменту, математичні розрахунки, аналіз властивостей систем і методів відповідно до вимоги виконання технологічних операцій під час рушання.

**Отримані результати.** Для отримання результатів аналізу чинних способів пуску асинхронних двигунів було розглянуто автотрансформаторний пуск, що дозволяє значно знизити пусковий струм, також застосовується підключення конденсатора з реактивним опором для зниження струму й підвищення пускового моменту. Застосування плавного пуску з амплітудно-фазовим управлінням дозволяє зменшити пусковий струм і досягти відсутності його імпульсів. Векторно-імпульсний спосіб управління перетворюючи пристроєм збільшує пусковий момент при відсутності збільшення пускового струму, такі переваги має квазічастотний режим пуску, але застосування обмежене спеціальним технологічним обладнанням. Тиристорний регулятор напруги зі застосуванням фазового методу керування, незважаючи на поширене застосування в системах курування, має низьке значення пускового моменту. Для виконання рушання у важких умовах, за результатами виконаного аналізу наявних систем керованого пуску, встановлено, що раціональною системою електропривода для підіймально-транспортних механізмів є система частотно-регульованого електропривода, за схемою «перетворювач частоти – асинхронний двигун» (ПЧ – АД).

**Наукова новизна.** Вперше пропонується вдосконалення чинних систем керування підіймально-транспортних механізмів, що виконують пуск у важких умовах при застосуванні режимів рушання з формування пускового моменту, що перевищує паспортне значення в 3-4 рази. Збільшення енергоефективності на основі підвищення їх ефективності, інформативності та вірогідності даних. Вперше проаналізовані причини недоліків чинних систем керування під час пуску під навантаженням в сучасному виробництві.

**Практична цінність.** Обґрунтовано вибір раціональної системи електропривода для підіймально-транспортних механізмів при виконанні рушання у важких умовах, що забезпечить максимальні зусилля в трансмісії технологічного механізму з допустимими струмовими і тепловими перевантаженнями асинхронних машин.

**Ключові слова:** автотрансформаторний пуск; амплітудно- фазове управління; векторно-імпульсне управління; квазічастотний режим; тиристорний регулятор .

### I. ВСТУП

Від сучасних підприємств вимагається застосування нових підходів для впровадження і забезпечення виконання програм енергоресурсозбереження. Водночас актуальною проблема високої аварійності електроустановок, що визначає одну зі складових витрат під час реалізації конкретних енергетичних програм. Однією з причин аварійності є відмова електротехнічного обладнання в процесі пуску, яка пояснюється відсутністю керованості процесом рушання як складової пуску.

Значна частина загальнопромислових і сільсько-

господарських механізмів має початковий момент опору технологічного агрегату під час переходу електромеханічної системи з нерухомого стану у стан руху (момент рушання), такий, що перевершує паспортне значення пускового моменту. Цей процес супроводжується зміною сил і моментів опорів за певними фізико-механічними законами, що обумовлені роботою сил тертя в кінематичних парах технологічного механізму, в ущільненнях, а також у зоні взаємодії робочого органа з технологічним середовищем [1], [2].

У науковій літературі питання пуску технологічних механізмів розглядається з позиції, коли електропривод і кінематичний ланцюг уже прийшли в рух.

Існує ряд технологічних механізмів, які за певних умов експлуатації мають нелінійну залежність моменту тертя і характеризуються рушенням електропривода у важких умовах [3]. До них належать підйомально-транспортні механізми, які виконують підйомання габаритних вантажів, такі як перевантажувачі на залізо транспортних об'єктах, підйомачі, на поромках, у порту та ін.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Формування моменту опору в процесі рушення і руху – специфічне і складне явище. Момент опору складається із сил, які формуються під час переходу електромеханічної системи від нерухомого стану до стану руху, за певними законами враховують нерівномірне формування сил тертя в підшипниках, ущільненнях, ходовій частині механізму і передачах, у тому числі зміни властивостей робочого органа під впливом технологічного середовища.

Сучасні системи управління не враховують усього комплексу чинників, які є джерелом аварійності обладнання в процесі рушення, пуску та гальмування:

- збільшення моменту опору під час рушення та пуску сприяє збільшенню динамічної складової зусилля в кінематичних вузлах системи «електродвигун–трансмсія– технологічний механізм» і, унаслідок цього, механічному зношуванню обладнання;

- режими стопоріння під час пуску та руху робочого органа двигунів змінного струму, унаслідок цього, призводить до зношування ізоляційних матеріалів, теплового і механічного перенапруження в пускових і демпферних обмотках, порушення балансування ротора та ін.;

- зниження напруги на шинах підстанції під час пуску потужних двигунів призводить до нестандартних умов пуску та перегрівання електричних машин, неприпустимих умов експлуатації інших споживачів;

- важкі умови рушення та пуску призводять до перевантажень і зменшення працездатності ліній живлення.

В умовах експлуатації технологічного обладнання з порушенням режимів роботи систем використовують трудомісткі небезпечні технологічні операції (ручний пуск робочих машин з незначними часом роботи, формуючи таким чином крок за кроком режим руху, неодноразові спроби пуску та реверсу робочого органа та ін.), що призводить до підвищення аварійності та до додаткового зношування технологічного й електричного обладнання [4].

На сьогодні інтенсивний розвиток мікросхемотехніки і унаслідок цього широкий вибір різноманітних елементів контролю технологічного процесу (датчики зусиль, датчики моменту та ін.) дозволяють побудувати автоматизовану систему з миттєвим контролем параметрів усього технологічного комплексу, з розрахунком параметрів джерела живлення електропривода і формування таких режимів роботи, які забезпечили

б необхідні вимоги виконання якісного технологічного процесу.

Застосовувані технічні рішення повинні забезпечувати необхідну якість технологічного процесу з мінімальним споживанням електроенергії та зниженням експлуатаційних витрат завдяки застосуванню сучасних методів і засобів автоматизації.

Майже всі провідні теоретики електромеханіки розглянули та запропонували способи виконання пуску електроприводів під навантаженням і без нього, з обмеженням пускових струмів і достатнім пусковим моментом.

Тому актуальним питанням є визначення відповідної системи електропривода для виконання безаварійного і ефективного режиму рушення та пуску підйомально-транспортних механізмів.

## III. МЕТА РОБОТИ

Порівняння енергетичних показників і можливостей систем і методів керування щодо формування пускового моменту, математичні розрахунки, аналіз властивостей систем і методів відповідно до вимоги виконання технологічних операцій під час рушення.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Способи пуску з обмеженням пускових струмів з використанням додаткових активних, реактивних та індуктивних опорів, зі зміною або ускладненням кіл комутації може призвести до зниження пускового моменту [5]. Схема автотрансформаторного пуску АД надає можливість збільшити пусковий момент, однак підвищує складність пускових операцій, підвищує вартість і зменшує надійність пускової апаратури [6].

Симетричне або однофазне послідовне підключення до обмоток статора конденсатора з реактивним опором  $X_c = 1/(\omega C)$  дозволяє підвищити пусковий момент, який визначається зі співвідношення:

$$\frac{M'_n}{M_n} = \frac{1 - 2b \sin \phi_k}{1 - 4b \sin \phi_k + 4b^2}, \quad (1)$$

де  $b = -1/3 \cdot X_c / Z_k$ ;  $Z_k$  – опір короткого замикання;  $\phi_k$  – фазовий кут у разі короткого замикання.

Недоліком способу є ступінчастий характер регулювання пускового моменту і необхідність додаткового комутаційного обладнання. Окрім того, зі збільшенням потужності двигуна збільшується необхідна потужність конденсаторних елементів [7].

У роботах [8], [9] запропонований спосіб пуску АД у важких пускових умовах із заздалегідь включеними конденсаторами в колах статора. Конденсатори збільшують коефіцієнт потужності системи, знижують струми лінії та посадку напруги під час пуску, надають можливість підвищувати пусковий момент і формувати необхідні характеристики АД. До недоліків способу слід віднести дискретний характер фор-

мування пускових характеристик, необхідність використання додаткового комутаційного обладнання. Удосконалення систем керованого плавного пуску здійснюється за допомогою розробки тиристорних схем, які поступово збільшують ефективне значення напруги на статорі в процесі пуску. Недоліком таких схем є неможливість формування пускових характеристик електропривода під час значних моментів рушання [10]-[12].

За даними фірми Schneider Electric, пристрої плавного запуску цієї фірми забезпечують формування пускових характеристик і плавний запуск електропривода в режим «повновольтажного байпасного старту» зі значним моментом рушання. Недоліком такого способу запуску є неможливість отримання пускового моменту двигуна, вищого за його номінальне значення [13].

Деякі системи тиристорного плавного пуску для підвищення пускового моменту двигуна забезпечують поетапне підвищення напруги (і моменту) на самому початку рушання з подальшим переходом на звичайний плавний пуск з експоненціальним характером зростання напруги живлення [14]. Недолік способу, як і в попередньому випадку, полягає в неможливості отримання пускового моменту АД, що перевищує каталожні значення.

У роботі [15] розглянуто векторно-імпульсний спосіб пуску АД із застосуванням повністю керованих силових елементів, коли підключення обмоток статора відбувається за певних початкових умов, які забезпечують появу першої напівхвилі перехідного моменту позитивного знаку. Відключення статора від мережі повинно відбуватися до того, як перехідний момент буде негативний. При цьому перехідний момент поєднується з основним і збільшує середній момент АД без збільшення струму статора. Недоліком способу є складність його реалізації, яка передбачає визначення початкових електромагнітних умов, тобто визначення кута між векторами напруги статора і потіккозчеплення ротора для підключення обмоток статора за певного значення цього кута [15].

Для спрощення схеми і зменшення собівартості пускового пристрою в роботі [16] запропонований векторно-імпульсний спосіб керування з включенням обмоток статора в зірку через трифазний випрямний міст і один силовий ключ IGBT, що комутує обмотки статора на стороні постійного струму. Недоліками способу є неможливість застосування двигунів, обмотки яких з'єднані в трикутник, необхідність наявності на затискачах двигуна всіх початків і кінців фазних обмоток, що рідко виконується у АД середньої та великої потужності.

У роботі [17] запропонований квазічастотний режим пуску АД, у якому в системі «тиристорний перетворювач напруги-асинхронний двигун» з від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю в процесі розгону здійснюється модуляція струму статора АД за частотою і амплітудою напруги живлення так, щоб

забезпечити зміну кута відкриття тиристора залежно від значень частоти струму ротора, що дозволяє зменшити пускові витрати на сучасному силовому обладнанні з незначними капітальними витратами. Недоліком способу є вузька сфера застосування, яка обумовлена орієнтованістю методу на механізми з незначним моментом статичного опору, який не перевищує допустимого.

Використання для керованого пуску різних схем симетричних і несиметричних напівпровідникових перетворювачів як для фазового, так і для імпульсного керування в роторних колах описано [7], [12]. Основним недоліком способів пуску з використанням роторних кіл АД, а також способів пуску, які передбачають комбіноване управління статорними та роторними колами, є необхідність застосування асинхронної машини спеціальної конструкції, яка дорожча і складніша в експлуатації.

Для початку руху та пуску некерованим електроприводом технологічних механізмів застосовують пристрої плавного пуску, принцип дії яких ґрунтується на тому, що механічний момент, що розвивається електродвигуном, пропорційний квадрату прикладеної до нього напруги. Підвищуючи напругу від початкового зниженого рівня (опорної напруги) до максимального можливого, необхідно плавно запустити та розігнати електродвигун до його номінальних оборотів. Традиційні пристрої плавного пуску (ППП) використовують амплітудні-фазові методи керування і тому здійснюють запуск обладнання в холостому або слабко навантаженому режимі.

На відміну від ППП контролери ЕнерджіСейвер використовують фазові методи керування і тому здатні запускати електроприводи, що характеризуються важкими та дуже важкими пусковими режимами «номінал у номінал». Контролери ЕнерджіСейвер дозволяють робити запуски частіше, ніж традиційні ППП, а також мають убудований режим енергозбереження і корекції коефіцієнта потужності [17].

Цей пристрій за принципом роботи є тиристорним регулятором напруги. Для керованого пуску та гальмування використовують три основні способи:

– керування напругою. Система задає початкову напругу та необхідну тривалість пуску. Система ТПН-АД при цьому не контролює струм або момент двигуна, тому цей спосіб непридатний для електроприводів з важким пуском;

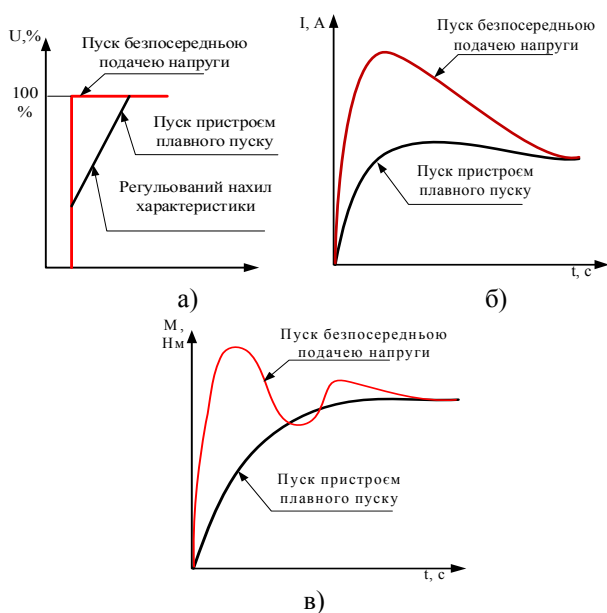
– керування струмом. Цей спосіб заснований на збільшенні напруги, припиняється з досягненням струмом заданої межі, і далі струм утримується на цьому значенні до закінчення розгону двигуна. Недоліком способу є зміна прискорення в процесі розгону так само, як із застосуванням способу керування напругою;

– керування моментом. Це найбільш складний і досконалий спосіб. Він використовує замкнуту за моментом систему регулювання, що дозволяє отримати лінійний графік зміни швидкості двигуна. При цьому

способи керування прискорення та уповільнення електропривода може залишатися постійним навіть зі зміною навантаження в широких межах [17].

Тому можливо реалізувати лінійний характер збільшення швидкості для широкого класу механізмів. Необхідно зазначити, що пристрій дозволяє також реалізувати контрольований процес гальмування (зупинки) механізму.

На рис. 1. показані головні відмінності між пуском безпосередньою подачею напруги і пуском пристроєм плавного пуску щодо напруги на двигуні, струму двигуна та його моменту. Основним недоліком пристроїв плавного пуску на основі тиристорних регуляторів напруги є мале значення початкового пускового моменту двигуна ( $0,1-1,0 M_{ном}$ ). Це може створити проблеми для забезпечення пуску механізмів зі значним моментом опору під час рушання з місця. Незважаючи на широкий спектр можливості системи ТПН-АД, вона не здатна забезпечити виконання передпускової підготовки та можливість рушання електропривода у важких умовах пуску [1].



**Рисунок 1.** Часові залежності напруги (а), струму статора (б) і моменту двигуна в різних видах пуску (в)

Усі названі способи забезпечують пуск з можливістю створення достатнього пускового моменту. Однак жоден зі способів не передбачає варіант виконання передпускової підготовки, коли рушання та пуск технологічного механізму здійснюється у важких умовах або під навантаженням.

Однак на базі системи ТПН-АД з використанням спеціально розробленого алгоритму визначення параметрів роботи ТПН для створення досить великого пускового моменту асинхронного двигуна можна забезпечити виконання передпускової підготовки, рушання та пуску у важких умовах електропривода тех-

нологічної установки.

Квазічастотне керування (КЧК) асинхронним двигуном поєднує в собі принципи частотного та параметричного способів керування, дозволяє ефективно використовувати його для формування необхідних режимів під час рушання і на початковому етапі запуску. Необхідна форма механічних характеристик електропривода під час керованого рушання забезпечується можливістю використання КЧК завдяки завданню двох параметрів: частоти основної гармоніки напруги живлення і кута відкриття тиристорів. Виконання передстартової підготовки [14] електромеханічної системи починається з тестування та визначає наявність можливості пуску двигуна.

Запропонований алгоритм квазічастотного керування рушанням використовується тільки на період виконання рушання та пуску для нерегульованого електропривода. Виконується також обчислення параметрів формування пускового моменту  $M(t, a, f')$ .

У цій ситуації можливі два альтернативні варіанти модернізації нерегульованих електроприводів піддільно-транспортних механізмів:

- використання традиційних систем «soft-start» з розширеними функціональними можливостями передстартової підготовки внаслідок забезпечення підвищеного пускового моменту двигуна із частотою обертання  $\omega \approx (0,05-0,1)\omega_{ном}$  або формування крокового режиму з імпульсним характером моменту двигуна;

- упровадження частотно-регульованих електроприводів, що дозволяють реалізувати не тільки передстартову підготовку, а і забезпечити необхідні динамічні характеристики електроприводів під час розгону та гальмування, мінімізувати коливання підвищеного вантажу, підвищити точність позиціонування механізмів підймання і пересування, енергетичну ефективність електромеханічної системи.

Регулювання напруги та частоти для забезпечення необхідного в пусковому режимі закону зміни параметрів електроенергії дозволяє формувати характеристики АД для широкого кола технологічних механізмів з різноманітними механічними характеристиками. Основний недолік частотного пуску полягає в тому, що для нерегульованих електроприводів використання перетворювачів частоти недоцільне внаслідок значних капітальних витрат.

Сучасний перетворювач частоти виконується з ланкою постійного струму і вихідним інвертором на базі IGBT транзисторів. Вони є завершеним комплексним пристроєм, призначеним для створення регульованого асинхронного електропривода і вирішення завдань плавного пуску та гальмування, регулювання моменту, швидкості двигуна і технологічних параметрів. Поряд із завданнями регулювання, пристрій вирішує завдання захисту, блокування та діагностики електропривода. Застосування сучасних силових модулів, мікропроцесорної техніки та складного програ-

много забезпечення робить пристрій досить дорогим продуктом. Основна перевага – це високий пусковий момент (1,5–1,8  $M_n$ ) і можливість формування плавного збільшення і зниження швидкості за попередньо заданим законом.

Як зазначено вище, система керування електроприводом, повинна виконувати не тільки передпускову підготовку для приведення технологічної установки до руху, рушання та пуску, а також і керуваність усієї технологічної операції [18].

Організація передпускової підготовки із застосуванням простих законів частотного керування дозволяє не тільки підвищувати пускове значення моменту АД, а й забезпечувати необхідну інтенсивність його збільшення. Унаслідок зміни співвідношення амплітуди та частоти напруги живлення  $k_U = (k_f)I/\beta$ , де  $k_f = f/f_{1nom}$  – коефіцієнт, що враховує зниження частоти  $f_1$  основної гармоніки напруги відносно до номінальної частоти напруги живлення  $f_{1nom}$ ;  $k_U = U_1/U_{1nom}$  – напруга на статорі, подана в частках до номінальної;  $\beta$  – коефіцієнт, що визначає величину моменту АД і змінюється в діапазоні  $\beta = 1 \dots k$  за законом  $\beta_n = \beta + 0,1n$ , де  $n$  – номер спроби рушання;  $k$  – кількість спроб рушання.

Отже, пусковий момент  $M_{пi}$  збільшується на значення  $\Delta M_{пi}$  й інтенсивність збільшується формується за законом  $M_{пi} = M_{пi-1} + \Delta M_{пi}$ .

Однак не всі можливості системи керованого рушання на базі ПЧ–АД застосовуються для деяких технологічних механізмів (конвеєрних ліній, підйомно-транспортних механізмів).

Для основних законів частотного керування характерні такі припущення: напруга симетрична та синусоїдальна; характеристика намагнічування двигуна лінійна або шматково-лінійна ( $X_c = const$  з регулюванням  $\Psi$  у невеликих межах); ефект витіснення струму відсутній; активний опір ланцюга намагнічування приймається рівним нулю  $R_{ин} = 0$ . Отже, отримані закони не враховують зміни електромагнітних параметрів асинхронної машини зі зниженням частоти напруги живлення і, унаслідок цього, вибрані параметри керування під час роботи на зниженій частоті неефективні, що призводить до збільшення втрат, перегрівання та зношування устаткування.

Іншим недоліком наведеного вище методу виконання рушання та пуску є наявність значних пускових струмів, хоч і обмежених частотними засобами керування, але істотних у разі зниження частоти напруги живлення під час досить тривалого часу рушання та пуску. Результати аналізу систем пуску асинхронного привода зведено до табл. 1

Отже, на сьогодні завдання виконання передпускової підготовки з можливістю створення пускового моменту, що перевищує паспортне номінальне значення в кілька разів, з визначенням реальних параметрів асинхронної машини, що забезпечують вибір адекватних параметрів напруги живлення з контролем

режимів роботи електропривода і завдання підвищення керованості виконання рушання та пуску, досить актуальні для підйомально-транспортних машин.

Таблиця 1. Характеристики способів пуску АД

Спосіб пуску	Переваги	Недоліки
Автотрансформаторний пуск	Зменшення пускового струму на $u^2$ , де $u$ – зниження напруги, напруга $60\% = 0,60$	Стрибки струму з переходом від зниженої до номінальної напруги. Знижений пусковий момент
Підключення конденсатора з реактивним опором	Збільшення коефіцієнта потужності системи, зниження струму й осідання напруги під час пуску, підвищення пускового моменту	Дискретний характер регулювання пускового моменту, додаткове комутаційне обладнання
Плавний пуск. Амплітудно-фазове керування	Плавний пуск. Імпульси струму відсутні. Менший гідравлічний удар під час пуску насоса. Зменшення пускового струму на необхідну величину, зазвичай у 2–3 рази	Знижений пусковий момент
Векторно-імпульсний	Збільшення моменту без збільшення струму статора завдяки додатковій першій напівхвилі перехідного моменту позитивного знаку	Складність його реалізації
Квазічастотний режим	Збільшення моменту, зменшення пускових втрат	Вузька сфера застосування
Тиристорний регулятор напруги зі застосуванням фазовому методі керування	Важкий і дуже важкий пусковий режим, корекція коефіцієнта потужності, режим енергозбереження	Низьке значення початкового пускового моменту двигуна (0,1–1,0 $M_n$ )
Частотний пуск	Імпульси струму відсутні. Менший гідравлічний удар під час пуску насоса. Зменшення пускового струму, зазвичай, до рівня струму повного навантаження. Можна використовувати для безперервної подачі живлення до електродвигуна	Висока вартість. (є джерелом вищих гармонік). Наявні методи управління не досить точно відображають реальні перехідні процеси

## V. ВИСНОВКИ

Виконано аналіз існуючих систем керованого пуску. Для отримання результатів аналізу існуючих способів пуску асинхронних двигунів було розглянуто автотрансформаторний пуск що дозволяє значно знизити пусковий струм, також застосовується підключення конденсатора з реактивним опором для зниження струму й підвищення пускового моменту. застосування плавного пуску з амплітудно-фазовим керуванням дозволяє зменшити пусковий струм і досягти відсутності його імпульсів. Векторно-імпульсний спосіб керування перетворюючим пристроєм збільшує пусковий момент при відсутності збільшення пускового струму, такі переваги має квазічастотний режим пуску але застосування обмежене спеціальним технологічним обладнанням. Система ТРН-АД за наявності істотних переваг нездатна виконати передпускову підготовку рушання та пуск технологічного механізму під навантаженням. Під час модернізації системи ТРН-АД алгоритмом керування ТРН для отримання достатнього пускового моменту асинхронного двигуна можливе здійснення квазічастотного пуску та рушання. Однак ця система має низку недоліків, які не дозволяють отримати допустимо можливий пусковий момент під час рушання та пуску в важких умовах.

З важкими умовами рушання необхідно застосувати такі технічні рішення, які б забезпечили максимальні зусилля в трансмісії технологічного механізму з допустимими струмовими і тепловими перевантаженнями асинхронних машин електропривода підіймально-транспортних механізмів. Для цього необхідно реалізуватися таку систему електропривода, яка б забезпечувала зазначені вимоги.

Для виконання рушання у важких умовах, що розглянуті в статті, після виконання аналізу наявних систем керованого пуску, встановлено, що раціональною системою електропривода для підіймально-транспортних механізмів є система частотно-регульованого електропривода, за схемою «перетворювач частоти-асинхронний двигун» (ПЧ-АД).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Сандлер А. С., Сарбатов Р. С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. - М. : Энергия. 1974. - 328 с.
- [2] Клепиков В. Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография. - Х. : Изд-во «Підручники НТУ «ХП». 2014. - 408 с.
- [3] Benglsu n. t. , AKay A. stability of friction-induced vibrations in roudty-degree-of-freedom systems. Journ. of Sound and Vi.br. 1994. Но 4, Р. 557–570.
- [4] Balik J., Lukac P. On the kinetics of dynamic strain ageing. Kovove Mater. 1998. V. 36. No. 1. P. 3–9.
- [5] Справочник по автоматизированному электроприводу под ред. Е. А. Елисеева, А. В. Шинянско-го. - М. : Вища школа, 1983. - 616 с.
- [6] Кацман М. М. Электрические машины : [учебник для студ. учреждений сред. проф. образования (12-е изд., стер)]. - М. : Издательский центр «Академия», 2013. - 496 с.
- [7] Петров И. И., Мейстель А. М.и Специальные режимы работы асинхронного электропривода. - М. : Энергия, 1968. - 264 с.
- [8] Войтех А. А. Попович А. Н., Бибик Е. В. Математическая модель оптимального проектирования асинхронного двигателя с предвключенными конденсаторами для тяжелых условий пуска. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. - 2002. - № 1. С. 361–363.
- [9] Попович Н. Г., Печник Н. В. Электромеханические системы автоматизации и задача энергосбережения. Вісник ХДПУ. Збірка наукових праць. - 2000. - №113. С. 297–300.
- [10]Петров Л. П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. - М. : Энергоиздат, 1981. - 184 с.
- [11]Герасимьяк Р. П., Лещев В. А., Путилин Н. С. Асинхронный электропривод с тиристорным управлением. - К. : Техніка, 1984. - 150 с.
- [12]Браславский А. Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. - М. : Энергоатомиздат, 1988. - 224 с.
- [13]Krecek, T., Brandstetter, P., Korbelt, P. Nonmodel Based Sensorless Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor. In ISIE, Cambridge, 2008, p. 618–623.
- [14]Петрушин В. С., Якимец А. М., Груша А. В., Каленик О. В. Энергетические и тепловые показатели регулируемых асинхронных двигателей с учетом высших пространственно временных гармоник. Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук.-техн. зб. - 2008. - № 70. С. 68 – 71.
- [15]Simulation of induction motor startup. MotorAnalysis Example1. N.p., n.d. Web. 29 June 2017.
- [16]Басков С. Н., Усатый Д. Ю., Радионов А. А. Пуск асинхронного двигателя в электроприводах с повышенным пусковым моментом. Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2004. - № 2. С. 47–49.
- [17]Принцип действия устройств плавного пуска. Режим доступа : URL : [http://www.softstarter.ru/plavnij-pusk/upp/princip\\_dejstviya/](http://www.softstarter.ru/plavnij-pusk/upp/princip_dejstviya/)
- [18]Черный А. П., Гладырь А. И., Осадчук Ю. Г. и др. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов [Текст]. - Кременчуг : ЧП Щербатых А. В. : 2006. - 280 с.

Стаття надійшла до редакції 01.12.2020

## АНАЛИЗ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ТРОГАНИИ И ПУСКА ПОД НАГРУЗКОЙ

- ХРЕБТОВА О.А.** канд. техн. наук, доцент кафедры системы автоматического управления и электропривода Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина. e-mail: 34092@ukr.net;
- ЗАЧЕПА Н.В.** канд. техн. наук, доцент кафедры системы автоматического управления и электропривода Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина. e-mail: zachepa.nataliia@ukr.net.

**Цель работы.** Выполнить анализ действующих систем управления электропривода и методов формирования момента пуска для определения соответствия выбранной системы и метода с требованиями по выполнению безаварийного режима трогания и пуска технологического механизма в тяжелых условиях или трогания и пуска под нагрузкой.

**Методы исследования.** Сравнение энергетических показателей и возможностей систем и методов управления по формированию пускового момента, математические расчеты, анализ свойств систем и методов в соответствии с требованием выполнения технологических операций при трогании.

**Полученные результаты.** Для получения результатов анализа действующих способов пуска асинхронных двигателей были рассмотрены автотрансформаторный пуск что позволяет значительно снизить пусковой ток, также применяется подключения конденсатора с реактивным сопротивлением для снижения тока и повышения пускового момента. применение плавного пуска с амплитудно-фазовым управлением позволяет уменьшить пусковой ток и достигли отсутствия его импульсов. Векторно-импульсной способ управления пре-вращая устройство увеличивает пусковой момент при отсутствии увеличения пускового тока, такие преимущества имеет квазичастотного режим пуска, но применение ограничено специальным технологическим оборудованием. Тиристорный регулятор напряжения с применением фазового методе управления несмотря на распространенное применение в системах управления имеет низкое значение пускового момента. Для выполнения трогания в тяжелых условиях, по результатам выполненного анализа существующих систем управляемого пуска, установлено, что рациональной системой электропривода для подъемно-транспортных механизмов является система частотно-регулируемого электропривода по схеме «преобразователь частоты - асинхронный двигатель» (ПЧ - АД).

**Научная новизна.** Впервые предлагается совершенствование действующих систем управления подъемно-транспортных механизмов выполняющих пуск в тяжелых условиях при применении режимов трогания с формированием пускового момента превышающей паспортное значение в 3-4 раза. Увеличение энергоэффективности на основе повышения их эффективности, информативности и достоверности данных. Впервые проанализированы причины недостатков действующих систем управления при пуске под нагрузкой в современном производстве.

**Практическая ценность.** Обоснован выбор рациональной системы электропривода для подъемно-транспортных механизмов при выполнении трогания в тяжелых условиях, что обеспечит максимальные усилия в трансмиссии технологического механизма с допустимыми токовыми и тепловыми перегрузками асинхронных машин.

**Ключевые слова:** автотрансформаторный пуск; амплитудно фазовый управления; векторно-импульсное управление; квазичастотного режим; тиристорный регулятор.

## ANALYSIS OF ELECTRIC DRIVE SYSTEMS FOR PERFORMANCE OF DRIVING AND STARTING UNDER LOAD

- KHREBTOVA O.A.** Ph.D, Associate professor of the departments of automatic control system and electric drive of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University, Kremenchuk, Ukraine. e-mail: 34092@ukr.net;
- ZACHEPA N.V.** Ph.D, Associate professor of the departments of automatic control system and electric drive of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University, Kremenchuk, Ukraine. e-mail: zachepa.nataliia@ukr.net.

**Purpose.** Perform an analysis of existing automated control systems of the electric drive and methods of forming the starting torque to determine the compliance of the selected system and method to the requirements for trouble-free mode of start and start of the technological mechanism in difficult conditions or breakaway and start under load..



**Methodology.** Comparison of energy performance and capabilities of control systems and methods for the formation of starting torque, mathematical calculations, analysis of the properties of systems and methods in accordance with the requirements of technological operations during the start.

**Findings.** To obtain the results of the analysis of the current methods of starting induction motors, autotransformer start was considered, which can significantly reduce the starting current, and also connect a capacitor with a reactance to reduce the current and increase the starting torque; the use of soft start with amplitude-phase control allows you to reduce the starting current and reached the absence of its impulses. The vector-pulse method of controlling the converting device increases the starting torque in the absence of an increase in starting current, such advantages have a quasi-frequency starting mode, but the application is limited by special technological equipment. Thyristor voltage regulator using the phase control method, despite its widespread use in control systems, has a low value of the starting torque. To carry out starting in difficult conditions, according to the results of the analysis of existing systems of controlled starting, it was found that a rational electric drive system for hoisting-and-transport mechanisms is a frequency-controlled electric drive system according to the "frequency converter - asynchronous motor" (FC - IM) scheme.

**Originality.** For the first time it is proposed to improve the existing control systems of hoisting and transport mechanisms that perform start-up in difficult conditions when using the modes of movement to form the starting torque that exceeds the passport value by 3-4 times. Increasing energy efficiency based on increasing their efficiency, information content and data reliability. For the first time, the reasons for the shortcomings of existing control systems during start-up under load in modern production are analyzed.

**Practical value.** The choice of a rational electric drive system for lifting and transport mechanisms is substantiated when starting in difficult conditions, which will provide maximum efforts in the transmission of a technological mechanism with permissible current and thermal overloads of asynchronous machines.

**Keywords:** autotransformer start; amplitude - phase control; vector-pulse control; quasi-frequency mode; thyristor regulator.

## REFERENCES

- [1] Sandler A.S., Sarbatov R.S. (1974) Automatic frequency control of induction motors. M.: Energy. 328.
- [2] Klepikov V.B. (2014) Dynamics of electromechanical systems with nonlinear friction: a monograph. H.: Publishing house "Textbooks of NTU" KhPI ". 408 p.
- [3] Benglsu n. t., AKay A. stability of friction-induced vibrations in roudly-degree-of-freedom systems. *Jorn. of Sound and Vi.br.* 1994. Ho 4, R. 557–570.
- [4] Balik J., Lukac P. On the kinetics of dynamic strain aging // *Kovove Mater.* 1998. V. 36. No. 1. P. 3–9.
- [5] Eliseeva E.A., Shinyansky A.V. (1983) Handbook of automated electric drive. M.: Higher school. 616.
- [6] Katsman M.M. (2013) Electric machines: [textbook for students. institutions environments. prof. education (12th ed., erased)]. M.: Publishing Center "Academy". 496.
- [7] Petrov I.I., Meistel A.M. (1968) Special modes of operation of asynchronous electric drive. M.: Energiya. 264.
- [8] Voitek A.A., Popovich A.N., Bibik E.V. (2002) Mathematical model of optimal design of an induction motor with pre-connected capacitors for heavy start-up conditions *Visnyk of Kremenchug State Polytechnic University.* 1. 361–363.
- [9] Popovich N.G., Pechnik N.V. (2000) Electromechanical automation systems and the problem of energy saving *Bulletin of the KhDPU. Collection of scientific works.* 113. 297–300.
- [10] Petrov L.P. (1981) Control of starting and braking of induction motors. M.: Energoizdat. 184.
- [11] Gerasimyak R.P., Leshchev V.A., Putilin N.S. (1984) Asynchronous electric drive with thyristor control. K.: Machinery. 150.
- [12] Braslavsky A. Ya. (1988) Asynchronous semiconductor electric drive with parametric control. M.: Energoatomizdat. 224.
- [13] Kreck, T., Brandstetter, P., Korbel, P. Nonmodel Based Sensorless Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor. In *ISIE, Cambridge, 2008*, p. 618–623
- [14] Petrushin B. C., Yakimets A. M., Grusha A.V., Kalenik O.V. (2008) Energeticheskie i teplovye pokazateli reguliruemyykh asynkhronnykh dvigateliv u taking into account higher spatial-temporal harmonics *Elektromashinostroyuvanie ta elektrooblannannya: Mizhvid. scientific and technical zb.* 70. 68 - 71.
- [15] Simulation of induction motor startup. MotorAnalysis Example1. N.p., n.d. Web. 29 June 2017.
- [16] Baskov S.N., Usaty D. Yu., Radionov A.A. (2004) Start of asynchronous motor in electric drives with increased starting torque *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Electromechanics.* 2. 47–49.
- [17] The principle of operation of soft-start devices. Access mode: URL: [http://www.softstarter.ru/plavnij-pusk / upp / princip\\_dejstviya /](http://www.softstarter.ru/plavnij-pusk / upp / princip_dejstviya /)
- [18] Cherny A.P., Gladyr A.I., Osadchuk Yu.G. et al. (2006) Starting systems of unregulated electric drives [Text] Kremenchug: PE Shcherbatykh AV: 280.

УДК 621.316

## ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ПОТУЖНИМИ НЕЛІНІЙНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ

- ПАПАЙКА Ю.А. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: [papaika@ukr.net](mailto:papaika@ukr.net);
- ЛИСЕНКО О.Г. канд. техн. наук, доцент кафедри електроприводу Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: [lysenkoag@ukr.net](mailto:lysenkoag@ukr.net);
- БУБЛІКОВ А.В. д-р техн. наук, професор кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: [bublikov.a.v@ntu.one](mailto:bublikov.a.v@ntu.one);
- ОЛІШЕВСЬКИЙ І.Г. асистент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: [olishevskiyi@ukr.net](mailto:olishevskiyi@ukr.net).

**Мета роботи.** Виконати обґрунтування доцільності застосування законів розподілу для моделювання надійності роботи систем електропостачання з потужними нелінійними навантаженнями.

**Методи дослідження.** Застосування експоненційного та нормального законів розподілу, та закону Вейбулла.

**Отриманні результати.** При комплексній оцінці проблеми електромагнітної сумісності та розробці багатокритеріальних параметрів енергетичної ефективності систем електропостачання промислових підприємств найбільш доцільно використовувати показники надійності елементів, які математично описуються розподілом Вейбулла. При цьому результати моделювання типових електричних режимів та варіації схем розміщення підприємств показали чутливість показників надійності до змін потужності енергосистеми.

**Наукова новизна.** Нові теоретичні засади для виконання досліджень у сучасних системах електропостачання із зростанням потужностей нелінійних навантажень дозволили розвинути наукові основи аналізу та синтезу енергетичних процесів у багатозначних електричних системах та запропонувати методи корекції з урахуванням комплексної дії джерел електромагнітних завад, характерних для промислових підприємств. А також запропонувати методи оцінки їх впливу на надійність та ефективність роботи основного електроенергетичного обладнання.

**Практична цінність.** Обґрунтовано можливість застосування отриманих результатів для оцінки надійності систем електропостачання з потужними нелінійними навантаженнями. Забезпечено необхідну точність та достовірність рішення на рівнях випадкових подій, величин і процесів. Наведено математичний апарат для аналізу основних показників надійності при наявності несинусоїдальності напруги. Зроблено висновки щодо адекватності результатів розрахунку на різних ступенях розподілу електроенергії. Показано, що одночасна оптимізація показників надійності та якості напруги – це складові комплексної наукової проблеми забезпечення енергетичної ефективності електричних мереж при впровадженні децентралізованих моделей енергосистеми.

**Ключові слова:** закон розподілу випадкової величини; показники надійності електрообладнання; термін експлуатації; індекс надійності; електричні мережі; математичне очікування, інверторне обладнання; моделювання.

### І. ВСТУП

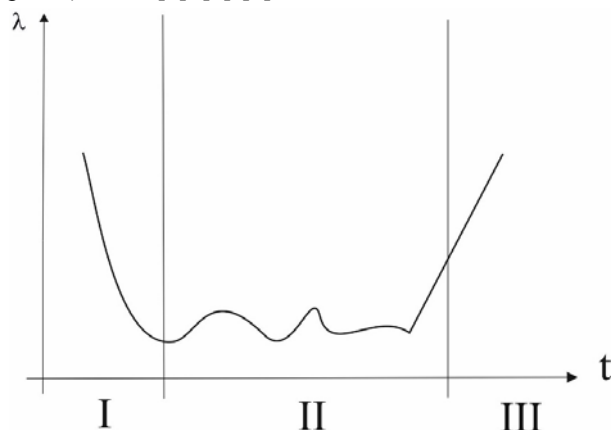
Надійність елементів систем електропостачання (СЕП) промислових підприємств аналізується в залежності від постановки задачі, необхідної точності і достовірності рішення на рівнях випадкових подій, величин і процесів. Для інженерних методів розрахунку надійності в основному використовується апарат випадкових величин.

При аналізі надійності переважно застосовують закони розподілу, які визначаються за допомогою

невеликої кількості числових характеристик. Так показовий (експоненціальний) закон розподілу визначається лише одним параметром - математичним очікуванням випадкової величини. Нормальний закон розподілу та, за певних умов, закон Вейбулла характеризується двома параметрами (математичним очікуванням випадкової величини і дисперсією). Інші закони розподілу вимагають більшої кількості числових характеристик.

Статистичні дані про відмови елементів СЕП дозволили представити зміни  $\lambda(t)$  в часі за допомогою

кривой (рис. 1), на якій чітко виділяються 3 стадії (періоди) зміни [1], [3]-[6].



**Рисунок 1.** Крива статистичних відмов електрообладнання

*I. Ця стадія - обкатки:* коли в основному виділяються дефекти виробів, споруд, монтажу, наладки;  $\lambda(t)$  знижується за рівнем усунення недоліків (дефектів);  $\lambda(t)$  описується законом Вейбулла. Період приросту, в основному, до 5 років для повітряних ліній.

*II. Період нормальної роботи.* Можливі відмови відбуваються, в основному, внаслідок перевищення факторів, що впливають понад допустимих (розрахункових) значень;  $\lambda(t)$  описується експоненціальним законом. Цей закон має переважне використання в задачах надійності СЕП.

*III. Третя фаза - період старіння елементів.* В результаті зносу, старіння, незворотніх фізико-хімічних процесів, впливу вологості, агресивного середовища і т.д. навіть при нормальній експлуатації старіння збільшується.

Час життя кабельних ліній та трансформаторів, обумовлений старінням їх ізоляції, 20 - 30 років, комутаційного обладнання - 40 - 50 років.

В СЕП тривалість безвідмовної роботи, як правило, значно більше часу відновлення:  $T \gg \tau_r$  [2], [4]-[7].

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Закономірності випадкових величин описуються за допомогою інтегральної функції розподілу ймовірностей. Для опису розподілу ймовірностей безперервних випадкових величин застосовується диференціальна функція розподілу ймовірностей, або закон розподілу випадкових величин [1], [2], [4]-[6], [10].

В роботах [3], [8]-[9] обґрунтовано методологію оцінки надійності обладнання при зниженій якості електроенергії. Це питання є дуже актуальним, оскільки наявність великої кількості потужних напівпровідникових перетворювачів призводить до спотворення синусоїдальності форми напруги в енергосистемі. Доведено негативний вплив зниженої якості електро-

енергії на надійність елементів систем електропостачання.

В статті [11] обґрунтовано доцільність оптимізації параметрів надійності систем електропостачання задля підвищення енергоефективності їх роботи.

Невирішеним залишалося питання можливості застосування відомих законів розподілу для одночасної оптимізації показників надійності та якості напруги при забезпеченні енергетичної ефективності електричних мереж при впровадженні децентралізованих моделей енергосистеми.

## III. МЕТА РОБОТИ

Виконати обґрунтування доцільності застосування законів розподілу для моделювання надійності роботи систем електропостачання з потужними нелінійними навантаженнями.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Експоненціальний розподіл визначається одним параметром - інтенсивністю відмов  $\lambda(t)$ . Для цього випадку показники надійності:

- ймовірність безвідмовної роботи в інтервалі від 0 до  $t$  [2], [5]-[9].

$$R(t) = e^{-\lambda t}; \quad (1)$$

- ймовірність відмови [2], [5]-[9]:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t}; \quad (2)$$

- густина ймовірності відмови [2], [5]-[9]:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}; \quad (3)$$

- середній час безвідмовної роботи [2], [5]-[9]

$$T = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) dt = 1/\lambda, \quad (4)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{\int_0^{\infty} f(x) dx} = \frac{f(x)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda. \quad (5)$$

Умова (5) передбачає, що обладнання, час безвідмовної роботи, має експоненціальний розподіл та не старіє. Якщо об'єкт почав функціонувати в нескінченно далекому моменті часу в минулому, то кількість відмов в інтервалі  $[0, t]$  залежить тільки від його довжини, тобто розглядається стаціонарний стан. Іноді це умова не дотримується через процеси обкатки (перша фаза функціонування елемента) та старіння (третя фаза). Для опису цих періодів слід користуватися іншими, більш складними законами розподілу. В період обкатки надійність звичайно підвищується за рахунок додаткового контролю при виготовленні, монтажі, прийманні в експлуатацію, а в період старіння - за рахунок додаткового обслуговування. Тому в електроенергетиці при вирішенні практичних задач

інтенсивність відмов вважається постійною протягом тривалого часу [2], [5]-[9].

В якості параметра експоненціального розподілу відновлення використовується інтенсивність відновлення  $\mu$ . Вірогідність відновлення елемента за час від 0 до  $t$  [2], [5]-[9]

$$G(t) = 1 - e^{-\mu t}; \quad (6)$$

- середній час відновлення [2], [5]-[9]

$$\tau = 1/\mu; \quad (7)$$

Для інженерних розрахунків надійності в СЕП приймається, що час безвідмовної роботи  $T$  і час відновлення  $\tau$  розподіляються за експоненціальним законом [2], [5]-[9].

Використання результатів імовірнісних розрахунків є правильними при необхідності дотримання двох умов: застосування в розрахунках одних і тих самих значень параметрів потоків відмов  $\lambda$  та однакових методів розрахунку, основних на прийнятті закону розподілу випадкових величин [7].

Нижче приведені загальні результати послідовних значень параметрів потоку відмов (інтенсивності відмов) ліній електропередачі, а також трансформаторів 500-35 кВ за оцінками вітчизняних та зарубіжних дослідників. Для ПЛІ 35-110 кВ, застосовуються в системах електропостачання, значення потоку відмов  $\lambda_{eq}^{CL}$  знаходяться в межах 0,75 - 2,2, найбільша імовірність  $\lambda_{eq}^{CL} = 0,85$ . Середній час відновлення  $\tau_e$  приймається рівним  $10^{-3}$  при коефіцієнті планових простотів  $K_s = 4 - 5 \cdot 10^{-3}$ .

Для кабельних ліній при прокладанні в каналах і балках в середньому  $\lambda_{CL} = 0,015$  при  $\tau_r^{CL} = 1,4 \times 10^{-3}$ . Для трансформаторів і автотрансформаторів  $\lambda_{eq}^T = 0,04 - 0,1$ ; переважають значення  $\lambda_{eq}^T = 0,03$ ,  $\tau_r = 10^{-3}$  [2].

#### Нормальний закон розподілу.

Нормальний закон розподілу в задачах надійності СЕП застосовується порівняно рідко [2], [5]-[9]. Перевага віддається використанню методів, заснованих на експоненціальному розподілі або розподілі Вейбула. Нормальний закон застосовується при відомих розрахунках, що характеризують електромагнітні та подібні їм процеси.

Оцінка надійності електрообладнання проводиться з урахуванням зміни його терміну служби (тривалості життя). Спочатку розглянемо процеси за умови нормального закону розподілу надійності.

Функція надійності  $R(t)$ . Для нормального закону надійності має вид [2]:

$$R(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{t-m_t}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{\sigma_t^2}} dx, \quad (8)$$

де  $m_t$  та  $\sigma_t$  - математичне очікування і середньоквадратичне відхилення тривалості життя електрообладнання.

Вираз справедливий при  $m_t \gg \sigma_t$ . Цей вираз називається інтегралом імовірностей або, інтегралом помилок.

Інтеграл (8) перетворюється к виду [2], [5]-[9]:

$$R(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{m_t - t}{\sigma_t}\right) = \Phi\left(\frac{1 - \frac{t}{m_t}}{\frac{\sigma_t}{m_t}}\right). \quad (9)$$

Значення функції  $\Phi\left(\frac{1 - \frac{t}{m_t}}{\frac{\sigma_t}{m_t}}\right)$  знаходиться за

наступними таблицями в залежності від  $t$ , рік.

$$m_t = t_{ном}(1 - \Delta t_x).$$

При відносному часу життя  $\Delta t_x$  значення  $m_t$ , визначається залежно від його номінального значення  $t_{ном}$ , яке зазвичай вказується фірмою виробником. Як правило,  $t_{ном} = 25 - 30$  років.

Інтеграли імовірності  $\Phi\left(\frac{1 - \frac{t}{m_t}}{\frac{\sigma_t}{m_t}}\right) = \Phi(x)$  є непар-

ною функцією тобто:

$\Phi(-x) = -\Phi(x)$ , що враховувалося при виконанні розрахунку.

Таблиця значень функції  $\Phi(x)$  при  $x = 0 - 5$  приведена в довідковій літературі.

Виконаємо розрахунок для силових трансформаторів типу ТМ з номінальною первинною напругою 150 кВ при вихідних даних:

$$а) t_{ном} = 30 \text{ років}; \Delta t_x = 0,1; \frac{\sigma_t}{m_t} = 0,33;$$

$$б) t_{ном} = 25 \text{ років}; \Delta t_x = 0,2; \frac{\sigma_t}{m_t} = 0,33.$$

Результати розрахунку приводяться в табл. 1 і табл. 2. Відповідні криві представлені на рис. 2.

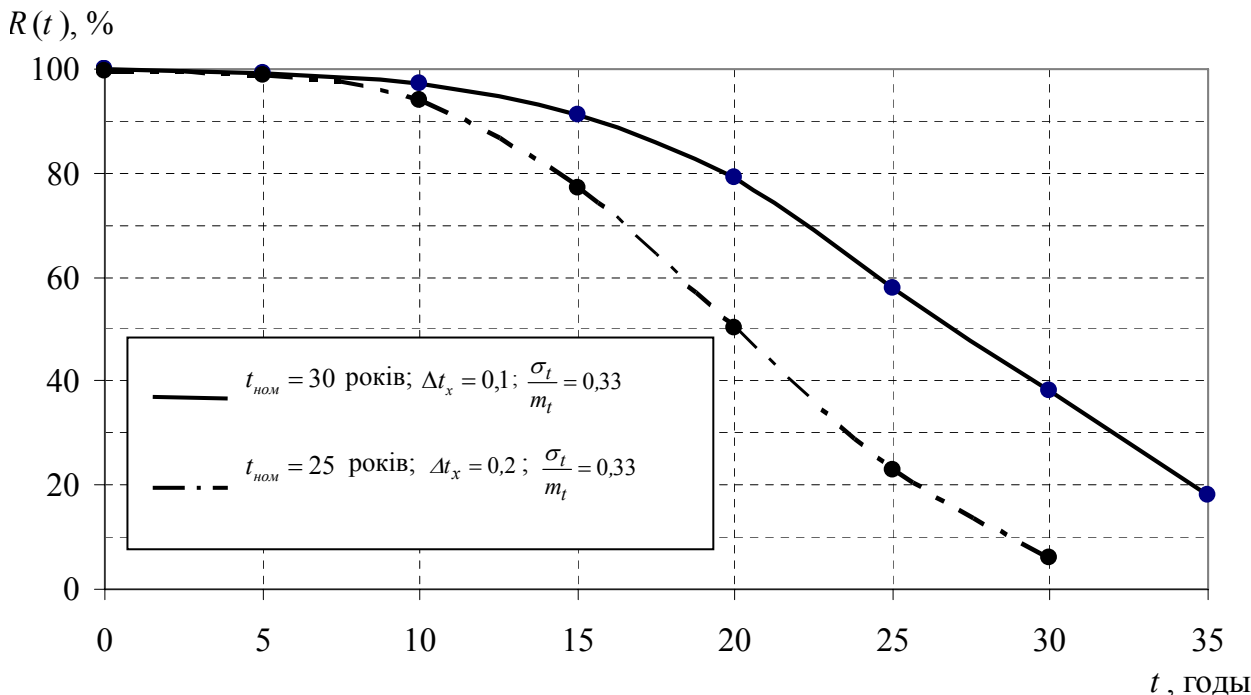


Рисунок 2. Криві надійності  $R(t)$

Таблиця 1. Результати розрахунку значень  $R(t)$  для  $\frac{t}{m_t} = \frac{t}{30(1-0,1)} = 0,037t$ ;  $\frac{\sigma_t}{m_t} = \frac{1}{3}$

$t$ , роки	1	2	5	10	15	20	25	30	35
$\frac{1-t/m_t}{1/3}$	2,9	2,8	2,4	1,9	1,35	0,8	0,21	-0,37	-0,9
$\Phi\left(\frac{1-t/m_t}{\sigma_t/m_t}\right)$	0,498	0,497	0,491	0,47	0,41	0,29	0,08	-0,12	-0,32
$0,5 + \Phi\left(\frac{1-t/m_t}{\sigma_t/m_t}\right)$		0,997	0,991	0,97	0,91	0,79	0,58	0,38	0,18

Таблиця 2. Результати розрахунку значень  $R(t)$  для  $\frac{t}{m_t} = \frac{t}{25(1-0,2)} = 0,05t$

$t$ , роки	1	2	5	10	15	20	25	30
$\left(\frac{1-t/m_t}{\sigma_t/m_t}\right)$	0,05	0,497	0,487	0,439	0,273	0	-0,273	-0,439
$0,5 + \Phi\left(\frac{1-t/m_t}{0,33}\right)$	1,0	0,997	0,987	0,939	0,773	0,5	0,227	0,061

Докладний аналіз впливу скорочення терміну служби електрообладнання (трансформатори, електродвигуни, конденсатори) дозволяє зробити висновок, що значне зниження надійності спостерігається при часу експлуатації понад 10 років. Тому на практиці, як правило, графіки  $R(t)$  будуються для  $t \geq 10$  років.

Нижче представлені результати розрахунку па-

раметра  $R(t)$  ізоляції трансформатора ТМ 630/10 в мережі з параметрами несинусоїдальності:

$$m_{K_U} = 6,2\% \text{ і } \sigma_{K_U} = 0,05m_{K_U} .$$

Аналогічні залежності справедливі і для інших видів електрообладнання - генераторів, АД, СД та ін.

Як свідчать численні розрахунки, при постійному впливі несинусоїдальності, значення параметрів

яких відповідають гранично допустимим згідно ГОСТ 13109-97, термін служби трансформатора 10 МВ·А, 35/6 кВ знижується на 25-30%. При середніх значеннях цих параметрів термін служби скорочується на 8-10%.

**Методи розрахунку надійності, засновані на законі Вейбула.**

Аналітичні методи розрахунку надійності роботи електричних систем і їх основних елементів у багатьох випадках ґрунтуються на законі Вейбула. З  $\lambda = \lambda(t)$  теорії надійності відомо, що розподіл Вейбула є найменш складним і найбільш загальним законом розподілу зі змінним параметром відмов.

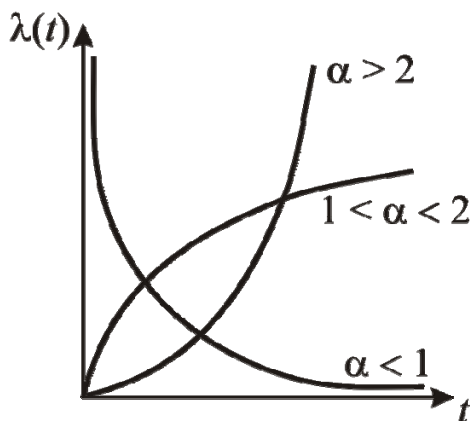
Функція надійності в цьому випадку має вигляд [2], [5]-[9]:

$$R(t) = e^{-\lambda_0 t^\alpha}; \quad (10)$$

де  $\alpha$  - параметр форми розподілу;  $\lambda_0$  - параметр потоку відмов;  $\lambda(t)$  - характеризує небезпеку відмови:

$$\lambda(t) = \alpha \lambda_0 t^{\alpha-1}. \quad (11)$$

Характер зміни функції залежить від значення параметра  $\alpha$ : при  $\alpha^\infty$ ,  $\alpha < 1$  вона монотонно убуває, при  $\alpha > 1$  зростає, при  $\alpha = 1$  ( $\lambda(t) = \lambda_0$ ) - значення в початковий момент часу (рис. 3).



**Рисунок 3.** Залежність  $\lambda(t)$  при законі Вейбула

У елемента з прихованими дефектами, однак, не старіючого протягом тривалого часу, небезпека відмови різко підвищена спочатку і швидко падає; функція надійності добре описується законом Вейбула при  $\alpha < 1$ . Якщо у елемента майже немає прихованих дефектів, проте він швидко старіє, то небезпека відмови монотонно зростає, функція надійності добре описує його законом Вейбула з  $\alpha > 1$  [2], [5]-[9].

При  $\alpha = 1$  розподіл Вейбула переходить в експоненціальний [2], [5]-[9].

Для розрахунків на практиці використовуються табличні значення  $\alpha$  і  $\lambda_0$  для різних видів електроустаткування, отримані теоретично і підтверджені експериментально з ймовірністю не менше 95% (табл. 3).

**Таблиця 3.** Значення коефіцієнтів для оцінки параметрів потоку відмов (закон Вейбулла)

Напруга, кВ	Повітряні лінії		Трансформатори та автотрансформатори	
	$\alpha$	$\lambda_0$ , 1/рік	$\alpha$	$\lambda_0$ , 1/рік
35	1,005	1,7	0,5	0,08
110	0,97		0,5	0,09
220	0,87	2,1	0,5	0,014
350	0,83		0,5	0,034
500	0,77	4,3		0,103

При  $\lambda t^\alpha \leq 1$  можна користуватися наближеною формулою:

$$R(t) \approx 1 - \lambda t^\alpha. \quad (12)$$

Якщо електрообладнання працює з постійним нагрівом, що визначає певне значення  $\Delta t_x \neq 0$ , величина  $\lambda_0$  - визначається значенням  $\lambda_0' = \lambda_0(1 + \Delta t_x)$ .

Найбільш розповсюдженими номінальними параметрами головних знижувальних підстанцій гірничих підприємств є первинна напруга 110-150 кВ, тому найбільший інтерес представляє моделювання параметрів надійності силових трансформаторів 110-150/6-10 кВ. Розрахункова функція  $\lambda(t)$  і  $R(t)$  для трансформатора з високою напругою 150 кВ зображена на рис. 4.

Оцінимо зменшення ймовірності безвідмовної роботи кабельної лінії при скороченні терміну служби ізоляції за рахунок впливу ВГ на 10%. Потік відмов без урахування впливу ВГ підпорядковується розподілу Вейбула; параметр потоку відмов (питома пошкоджуваність  $\lambda$ ) і параметр форми розподілу  $\alpha$  рівні

$$\lambda = 0,8 \text{ рік}^{-1}; \quad \alpha = 1,5.$$

Ймовірність безвідмовної роботи  $R(t)$  в загальному випадку [2], [5]-[9]:

$$R = e^{-\lambda t^\alpha}.$$

Середній час безвідмовної роботи з використанням гамма-функції [2], [5]-[9]:

$$T_{cp} = \int_0^\infty e^{-\lambda t^\alpha} dt = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right)}{\lambda^{1/\alpha}}.$$

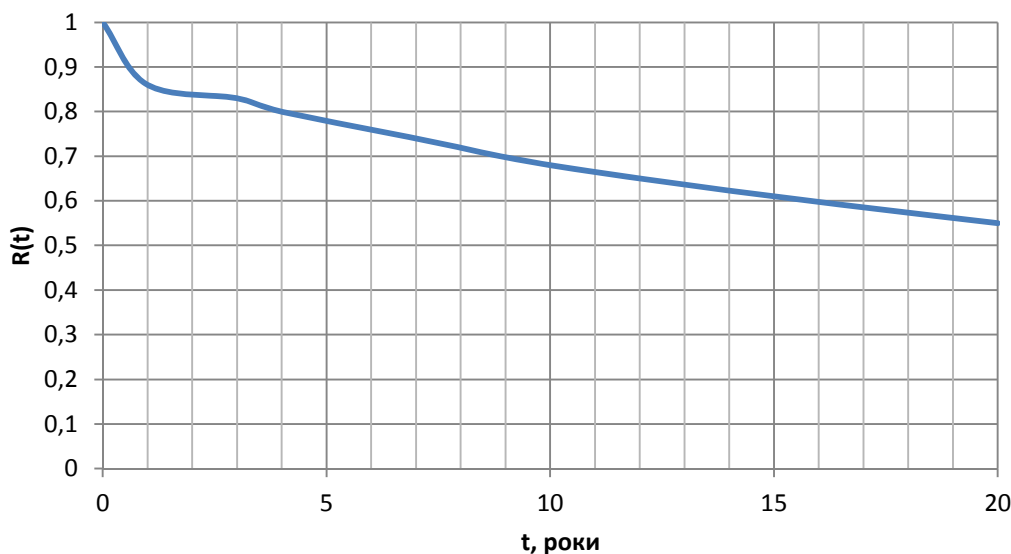


Рисунок 4. Криві надійності  $R(t)$

Приймемо, що середній час безвідмовної роботи пропорційний терміну служби ізоляції; тоді

$$T'_{cp} = T_{cp} = (\lambda/\lambda')^{1/\alpha};$$

де  $T'_{cp}$  і  $\lambda$  - середній час безвідмовної роботи і параметр потоку відмов з урахуванням зносу ізоляції від впливу ВГ.

Звідси отримуємо [2], [5]-[9]

$$\lambda' = \lambda(T'_{cp}/T_{cp})^\alpha = 0,8(1/0,9)^{1,5} = 0,94.$$

Відносне значення ймовірності безвідмовної роботи кабельної лінії при скороченні терміну служби ізоляції на 10%

$$\frac{R'(t)}{R(t)} = \frac{e^{-\lambda't^\alpha}}{e^{-\lambda t^\alpha}} = e^{-(\lambda'-\lambda)t^\alpha} = e^{-0,14t^{1,5}}.$$

Відносні значення ймовірності безвідмовної роботи кабельної лінії для різних інтервалів часу представлені у табл. 4.

Таблиця 4. Результати розрахунків відносного значення ймовірності

t, рік	1	2	3	4	5
$\frac{R'(t)}{R(t)}$	0,87	0,67	0,48	0,33	0,21

## V. ВИСНОВКИ

1. Нові теоретичні засади для виконання досліджень у сучасних системах електропостачання із зростанням потужностей нелінійних навантажень дозволили розвинути наукові основи аналізу та синтезу енергетичних процесів у багатофазних електричних системах та запропонувати методи корекції з урахуванням комплексної дії джерел електромагнітних за-

вад, характерних для промислових підприємств, та оцінки їх вплив на надійність та ефективність роботи основного електротехнологічного обладнання.

2. При комплексній оцінці проблеми електромагнітної сумісності та розробці багатокритеріальних параметрів енергетичної ефективності систем електропостачання промислових підприємств найбільш доцільно використовувати показники надійності елементів, які математично описуються розподілом Вейбулла. При цьому результати моделювання типових електричних режимів та варіацій схем заміщення підприємств показали чутливість показників надійності до змін потужності енергосистеми.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Жаркин А.Ф. Пути решения проблемы высших гармоник в электрических сетях Украины / А.Ф. Жаркин, И.В. Мостовяк, С.А. Палачев // Технічна електродинаміка. Темат. Вип.: Силова електроніка та енергоефективність. – 2006. – Ч1.– С.79 – 82.
- [2] Папаика Ю.А. Энергетична ефективність систем електропостачання / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка. – Д.: НТУ «ДП», 2018. – 149 с.
- [3] Оценка надежности оборудования при пониженном качестве электроэнергии / Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., А.В. Горпинич // Вести в електроенергетику, 2006. - №6 – с.13-17.
- [4] Короткевич М. А. Оценка значения индекса надежности энергосистем / М. А. Короткевич // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: сборник научных статей . – Вып. 66. – Минск, БНТУ, 2015, С. 54-59.
- [5] Непомнящий В.А. Экономические потери от нарушения электроснабжения потребителей / В.А.

- Непомнящий. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 188 с.
- [6] Шидловский А.К. Эффективные режимы работы электротехнологических комплексов / А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк, С.И. Выпанасенко, В.В. Слесарев. – Д.: НГА Украины, 2000.
- [7] Соколовская Г.А. Ресурсосбережение на предприятиях / Г.А. Соколовская, Т.С. Сигарева. – М.: Экономика, 1990. – 156 с.
- [8] Михайлов В.В. Надежность электроснабжения промышленных предприятий / В.В. Михайлов. – М.: Энергия, 1973. – 168 с.
- [9] Непомнящий В.А. Надежность оборудования энергосистем / В.А. Непомнящий. – М.: журнал «Электроэнергия. Передача и распределение», 2013. – 196 с., ил.
- [10] Paraika, Y., Lysenko, O., Koshelenko, Y. and Olisheskiy, I., 2021. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), pp.97-103.
- [11] Pivnyak, G., & Dychkovskiy, R. (2017). Energy Saving and Efficiency: Technological, Economical and Social Challenges. In: *Advanced Engineering Forum: monograph*. Zurich: Trans Tech Publication Ltd.
- [12] A. Ghosh and G. Ledwich, Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices. Norwell, MA: Kluwer, 2002.
- [13] Janik P. Photovoltaic Power Generation Assessment Based on Advanced Signal Processing and Optimisation Techniques. Wroclaw: Publishing house of Wroclaw University of Science and Technology Wroclaw, 2014.
- [14] Janik P., Kosobudzki G., Schwarz. Influence of increasing numbers of RE-inverters on the power quality in the distribution grids: A PQ case study of a representative wind turbine and photovoltaic system. Higher Education Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017, DOI 10.1007/s11708-017-0469-3.
- [15] Олишевский И. Г. Обоснование рациональной схемы теплонасосной системы отопления / И. Г. Олишевский // *Механіка гіроскопічних систем / НТУУ «Київський політехнічний інститут»*. – Київ. – 2015. – № 30. – С. 26 – 35.
- [16] Ryszard Strzelecki, Henryk Supronowicz. Wspolczynnik mocy w systemach zasilania pradu przemiennego i metody jego poprawy / Ryszard Strzelecki, Henryk Supronowicz, Warszawa: Oficyna Wydaw. Politechniki Warszawskiej, 2000, 452 s.
- [17] Олишевский И. Г. Обоснование применения теплонасосного оборудования для утилизации тепловых потерь в силовых трансформаторах большой мощности / И. Г. Олишевский, Г. С. Олишевский // *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Ракетно-космічна техніка. / Дніпр. нац. ун-т ім. О. Гончара. – Дніпропетровськ, 2015. – № 4. – Т. 23. – Вип. 18(1) – С. 131-136.*
- [18] Пивняк Г.Г. Электрификация горничих работ / Г.Г. Пивняк, М.М. Білий та ін. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2005. – 320 с.
- [19] Олишевский Г. С. Обоснование метода утилизации теплоты системы кондиционирования для теплонасосной системы отопления / Г. С. Олишевский, И. Г. Олишевский // *Інформаційні системи, механіка та керування / НТУУ «Київський політехнічний інститут»*. – Київ. – 2017. – № 17. – С. 86 – 94.

Стаття надійшла до редакції 05.09.2020

## ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С МОЩНЫМИ НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ

- ПАПАЙКА Ю.А. д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электроэнергетики НТУ «Днепровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: paraika@ukr.net;
- ЛЫСЕНКО А. Г. канд техн. наук, доцент кафедры электропривода НТУ «Днепровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: lysenkoag@ukr.net;
- БУБЛИКОВ А.В. д-р техн. наук, профессор кафедры киберфизических и информационно-измерительных систем НТУ «Днепровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: bublikov.a.v@nmu.one.
- ОЛИШЕВСКИЙ И.Г. ассистент кафедры безопасности информации и телекоммуникаций НТУ «Днепровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: olisheskiyi@ukr.net;

**Цель работы.** Выполнить обоснование целесообразности применения законов распределения для моделирования надежности работы систем электроснабжения с мощными нелинейными нагрузками.

**Методы исследования.** Применение экспоненциального и нормального законов распределения, и закона Вейбула.

**Полученные результаты.** При комплексной оценке проблемы электромагнитной совместимости и раз-



работке многокритериальных параметров энергетической эффективности систем электроснабжения промышленных предприятий, наиболее целесообразно использовать показатели надежности элементов, которые математически описываются распределением Вейбулла. При этом результаты моделирования типовых электрических режимов и вариаций схем замещения предприятий показали чувствительность показателей надежности к изменениям мощности энергосистемы.

**Научная новизна.** Новые теоретические положения для выполнения исследований в современных системах электроснабжения с возрастанием мощностей нелинейных нагрузок позволили развить научные основы анализа и синтеза энергетических процессов в многофазных электрических системах, и предложить методы коррекции с учетом комплексного действия источников электромагнитных помех, характерных для промышленных предприятий. А также предложить методы оценки их влияния на надежность и эффективность работы основного электротехнологического оборудования.

**Практическая ценность.** Обоснованно возможность применения полученных результатов для оценки надежности систем электроснабжения с мощными нелинейными нагрузками. Обеспечено необходимую точность и достоверность решения на уровнях случайных событий, величин и процессов. Приведено математический аппарат для анализа основных показателей надежности при наличии несинусоидального напряжения. Сделано выводы насчет адекватности результатов расчета на разных ступенях распределения электроэнергии. Показано, что одновременная оптимизация показателей надежности и качества электроэнергии – это составляющие комплексной научной проблемы обеспечения энергетической эффективности электрических сетей при внедрении децентрализованных моделей энергосистемы.

**Ключевые слова:** закон распределения случайной величины; показатели надежности электрооборудования; срок эксплуатации; индекс надежности; электрические сети; математическое ожидание; инверторное оборудование; моделирование.

## RELIABILITY ASSESSMENT OF POWER SUPPLY SYSTEMS WITH POWERFUL NONLINEAR LOADS

- PAPAİKA YU. A. Sci.D, Professor, Head of the Department of Power Engineering, Dnipro University of technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: papaika@ukr.net;
- LYSENKO O. H. PhD, docent of the Electric Drive department, Dnipro University of technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: lysenkoag@ukr.net;
- BUBLIKOV A.V. Sci.D, Professor of the Department of Cyberphysical and Information-measuring Systems, Dnipro University of technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: bublikov.a.v@nmu.one;
- OLISHEVSKIY I. H. Assistant of Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: olishevskiyi@ukr.net.

**Purpose.** To substantiate the expediency of applying distribution laws to model the reliability of power supply systems with powerful nonlinear loads.

**Methodology.** Application of exponential and normal distribution laws, and Weibull's law.

**Findings.** In a comprehensive assessment of the problem of electromagnetic compatibility and the development of multicriteria parameters of energy efficiency of power supply systems of industrial enterprises, it is most appropriate to use the reliability of the elements that are mathematically described by the Weibull distribution. At the same time, the results of modeling of typical electrical modes and variations of substitution schemes of enterprises showed the sensitivity of reliability indicators to changes in power system capacity.

**Originality.** New theoretical foundations for research in modern power supply systems with increasing nonlinear load capacity have developed the scientific basis for analysis and synthesis of energy processes in multiphase electrical systems and propose methods of correction taking into account the complex action of sources of electromagnetic interference. And also to offer methods of estimation of their influence on reliability and efficiency of work of the basic electrotechnological equipment.

**Practical value.** The possibility of applying the obtained results to assess the reliability of power supply systems with powerful nonlinear loads is substantiated. The necessary accuracy and reliability of the decision at the levels of random events, quantities and processes is provided. The mathematical apparatus for the analysis of the main indicators of reliability in the presence of non-sinusoidal voltage is given. Conclusions are made on the adequacy of the calculation results at different stages of electricity distribution. It is shown that the simultaneous optimization of reliability and voltage quality are components of a complex scientific problem of ensuring energy efficiency of

*electrical networks in the implementation of decentralized models of the energy system.*

**Keywords:** *the law of distribution of a random variable; indicators of reliability of electrical equipment; service life; reliability index; electrical networks; mathematical expectation, inverter equipment; modeling.*

#### REFERENCES

- [1] Zharkin A.F., Mostovjak I.V., Palachev S.A. (2006). Puti reshenija problemy vysshih garmonik v jelektricheskikh setjah Ukrainy. *Tehnichna elektrodinamika. Temat. Silova elektroni-ka ta energoefektivnist'*. Vol. 1, 79-82.
- [2] Papaika Ju.A., Pivnjak G.G., Zhezhenko I.V. (2018). Energetichna efekтивnist' sistem elektropostachannja. Dnipro, NTU «DP», 149.
- [3] Zhezhenko I.V., Saenko Ju.L., A.V. Gorpnich. (2006). Ocenka nadezhnosti oborudovanija pri ponizhen-nom kachestve jelektrojenergii. *Vesti v jelektrojenergetike*, No 6. 13-17.
- [4] Korotkevich M. A. (2015). Ocenka znachenija indeksa na-dezhnosti jenergosistem. Metodicheskie voprosy issledovanija nadezhnosti bol'shijh sistem jenergetiki: sbornik nauchnyh statej. Vol. 66, Minsk, BNTU, 54-59.
- [5] Nepomnjashhij V.A. (2010). Jekonomicheskie poteri ot na-rushenija jelektrosnabzhenija potrebitelej. Moscow, Izdatel'skij dom MJeI, 188.
- [6] Shidlovskij A.K., Pivnjak G.G., Vypanasenko S.I., Slesarev V.V. (2000). Jeffektivnye rezhimy raboty jelektrotehnologicheskijh kompleksov. Dnipro. NGA Ukrainy.
- [7] Sokolovskaja G.A., Sigareva T.S. (1990). Resursosberezhenie na predpri-jatijah. Moscow. Jekonomika, 156.
- [8] Mihajlov V.V. (1973). Nadezhnost' jelektrosnabzhenija promyshlennyh predpriyatij. Moscow, Jenergija, 168.
- [9] Nepomnjashhij, V.A. (2013). Nadezhnost' oborudovanija jene-rgosistem. Moscow. *Jelektrojenergija. Peredacha i raspredelenie*, 196.
- [10] Papaika, Y., Lysenko, O., Koshelenko, Y. and Olishevskij, I., 2021. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 97-103.
- [11] Pivnyak, G., Dychkovskij, R. (2017). Energy Saving and Efficiency: Technological, Economical and Social Challenges. In: *Advanced Engineering Forum: monograph*. Zurich: Trans Tech Publication Ltd.
- [12] Ghosh A., Ledwich G. (2002). Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices. Norwell, MA: Kluwer.
- [13] Janik P. Photovoltaic Power Generation Assessment Based on Advanced Signal Processing and Optimisation Techniques. Wroclaw: Publishing house of Wroclaw University of Science and Technology Wroclaw, 2014.
- [14] Janik P., Kosobudzki G., Schwarz. Influence of increasing numbers of RE-inverters on the power quality in the distribution grids: A PQ case study of a representative wind turbine and photovoltaic system. Higher Education Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017, DOI 10.1007/s11708-017-0469-3.
- [15] Olishevskij I. G. (2015). Obosnovanie racional'noj shemy teplonasosnoj sistemy otoplenija. *Mehanika girokopichnih sistem*. NTUU «Kiivs'kij politechnij institut». Kiiv, No 30, 26-35.
- [16] Ryszard Strzelecki, Henryk Supronowicz. Wspolczynnik mocy w systemach zasilania pradu przemiennego i metody jego poprawy / Ryszard Strzelecki, Henryk Supronowicz, Warszawa: Oficyna Wydaw. Politechniki Warszawskiej, 2000, 452.
- [17] Olishevskij I. G., Olishevskij G. S. (2015). Obosnovanie primenenija tep-lonasosnogo oborudovanija dlja utilizacii teplovyh poter' v silovyh transformatorah bol'shoj moshhnosti. *Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu. Serija: Raketno-kosmichna tehnika*. Dnipro. nac. un-t im. O. Gonchara, Dnipropetrovs'k, No 4.
- [18] Pivnjak G.G., Bilij M.M. (2005). Elektrifikacija gimichijh robot. Dnipropetrovs'k: Nacional'nij gimichij universitet, 320.
- [19] Olishevskij G. S., Olishevskij I. G. (2017). Obosnovanie metoda utiliza-cii teploty sistemy kondicionirovanija dlja teplonasosnoj sistemy otoplenija. *Informacijni si-stemi, mehanika ta keruvannja*. NTUU «Kiivs'kij politechnij institut», Kiiv, 2017. No 17. 86-94.

## СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ РОБОТОТЕХНІЧНОЮ ПЛАТФОРМОЮ 3D-ДРУКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

- АНИКІН П.С. аспірант, Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: [anikinps@zntu.edu.ua](mailto:anikinps@zntu.edu.ua);
- ШИЛО Г.М. д-р техн. наук, завідувач кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: [shilo.gn@gmail.com](mailto:shilo.gn@gmail.com);
- КУЛИКОВСЬКИЙ Р.А. к.т.н., доцент кафедри обладнання та технології зварювального виробництва Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: [r.kulikovski@ukr.net](mailto:r.kulikovski@ukr.net);
- МОЛОЧКОВ Д.Є. інженер-програміст ТОВ «Тріада ЛТД Ко», Запоріжжя, Україна, e-mail: [dmolochkov@gmail.com](mailto:dmolochkov@gmail.com).

**Мета роботи.** Розробка архітектури системи автоматизованого керування робототехнічною платформою 3D-друку з використанням технології електродугового зварювання, структури її апаратних компонентів, алгоритму функціонування.

**Методи дослідження.** Для реалізації алгоритму програми керування використовується комп'ютерне моделювання теплових режимів в САЕ-системі. Основні параметри технології друку окремого шару отримані шляхом експериментального використання технології адитивного виробництва електродуговим зварюванням.

**Отримані результати.** Визначено вимоги до технологічності та якості друку деталей у вигляді геометричних розмірів об'єкту, хвилястості поверхні, параметрів стану мікроструктури, залишкових напружень та збереження оптимальної швидкості виробництва. На основі вимог аналізу технологічності розроблено алгоритм програми керування. Створено архітектуру системи автоматизованого керування робототехнічною платформою адитивного виробництва, у якій застосовується зворотній зв'язок для контролю температурного режиму, параметрів геометричної форми деталі та зварювальної ванни. Розроблено трирівневу ієрархічну модель, що надає можливість розглядати окремо рівні створення валику, шару та стінки у процесі 3D-друку деталі. Визначено вхідні дані для роботи системи автоматизованого керування робототехнічною платформою з використанням технології електродугового зварювання. Розглянуто базові геометричні параметри зварювального валику та способи перекриття двох та більше валиків, при генерації програми для керування роботом показана необхідність урахування критичних відмінностей ідеальної та реальної моделей перекриття валиків. Проведено аналіз можливостей симуляції тривимірного друку з використанням технології електродугового зварювання в САЕ-системах для визначення впливу температурних параметрів, механічних навантажень, зміни траєкторії руху створення деталі, та на основі отриманих даних визначення залишкових напружень та дефектів у вироблених деталях.

**Наукова новизна.** Запропоновано архітектуру системи автоматизованого керування робототехнічною платформою 3D-друку з включенням системи зворотного зв'язку для контролю температурного режиму, параметрів геометричної форми деталі та зварювальної ванни. Розроблено трирівневу ієрархічну модель технології адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання. Розроблено алгоритм функціонування системи, що надає можливість удосконалення геометричних та механічних властивостей готової продукції.

**Практична цінність.** Розробка автоматизованої системи керування робототехнічною платформою 3D-друку з використанням технології електродугового зварювання, що надасть можливість підвищити точність друку деталей та зменшити час виготовлення.

**Ключові слова:** електродугове зварювання; САЕ системи; робототехніка; слайсінг; 3D моделювання.

### І. ВСТУП

На сьогодні, зварювальні технології є невід'ємною складовою тривимірного друку металевих виробів. Ще у 1926 році Бейкер запатентував спосіб

«використання електричної дуги в якості джерела для отримання тривимірних об'єктів шляхом нанесення один на одного шарів розплавленого металу». Проте, значний проміжок часу подібні технології отримання тривимірних металевих об'єктів не знаходили пода-

льший розвиток. Це було пов'язано в першу чергу з технологічними особливостями процесу та якістю отриманих виробів. Існуючі «традиційні» технології виробництва формоутворення виробів з металу, насамперед литво, обробка тиском та різанням забезпечували потрібну якість при прийнятних витратах на виробництво. Проте, технологічний розвиток та третя й четверта промислова революції створили прийнятні умови для появи та економічного підґрунтя для нових сучасних способів виготовлення виробів.

Наразі існує та промислово застосовується досить широкий перелік технологій об'ємного друку, які надають можливість вирощувати металеві вироби будь-якої складності. Від «традиційних» технологій їх відрізняє гнучкість, швидкість виготовлення, висока ступінь автоматизації процесів проектування та безпосереднього виготовлення деталей, зниження енергетичних та матеріальних витрат, більш низький негативний вплив на навколишнє середовище. Крім того, застосування цих процесів надає можливість принципово змінити планування етапів промислового виробництва, оптимізувати логістичну складову та мінімізувати участь в виробництві спеціального обладнання.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз можливостей існуючих адитивних технологій тривимірного друку металевих виробів (табл. 1) показав:

- для виготовлення деталей невеликих розмірів, які вимагають високу розмірну точність, прийнятним є застосування лазерних технологій типу SLM [1]-[3] або електронно-променевої типу PLM [4];

- для виготовлення великогабаритних виробів слід застосовувати технології, основою яких є методи дугового зварювання [5]-[8].

Через технологічні особливості, застосування лазерних або електронно-променевої технологій обумовлено високими витратами на виробництво, та як наслідок, високою вартістю готових виробів. Найбільш доступними технологіями з точки зору простоти та окупності процесу [9] є технології на основі дугових та плазмових процесів.

Процес адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання має значні переваги у виготовленні деталей великих розмірів. Для адитивного виробництва на базі технології лазерного запікання використовують спеціальну камеру для проведення процесу 3D друку, яка своїми розмірами обмежує максимальні габарити вироблюваної продукції. Через те, що під час процесу адитивного виробництва з використанням технології електродугового зварювання використовується платформа, яка оснащена роботизованою рукою, рис. 1, що вільно рухається у заданому просторі, система не обмежена у розмірі необхідній для виробництва повного виробу. Такий підхід також надає можливість прискорити виробни-

чий процес. В цьому випадку на швидкість виробництва впливають вимоги до якості деталі, яка буде вироблена, кількість шарів та їх товщина, швидкість нагріву, траєкторія нанесення, а також тип технології електродугового зварювання.

При тривимірному друці металевих виробів з використанням технології електродугового зварювання в якості виконавчого механізму найчастіше застосовуються роботизовані системи антропогенного типу. Обов'язковою складовою їх є необхідність розробки керуючої програми для маніпулятора. Однак особливість розвитку САМ систем для промислових роботів ускладнює широке використання технологій тривимірного друку цього напрямку. Так, кожен виробник промислових роботів використовує свою певну мову програмування. Крім того, існуючі розроблені симулятори великих виробників, в своїй масі, підтримують тільки задачі пов'язані з переміщенням інструменту маніпулятора та вмиканням або вимиканням в певний проміжок часу зварювальних програм.

Таким чином, з можливістю легкого програмування, платформа адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання може бути використана для друку великогабаритних деталей без необхідності розробки складного, високозатратного технологічного процесу.



Рисунок 1. Приклад роботизованої руки для процесу адитивного виробництва на ТОВ «Тріада ЛТД Ко»

## III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є розробка архітектури системи автоматизованого керування робототехнічною платформою 3D- друку з використанням технології електродугового зварювання, структури її програмних та апаратних компонентів та алгоритму функціонування

Таблиця 1. Характеристика основних технологій адитивного виробництва металевих виробів

Джерело енергії	Технологія	Витратний матеріал		Порівняльні показники	
		форма	тип	Переваги	Обмеження та недоліки
Лазерний промінь	Пряме лазерне спікання (DMLS) [1]	порошок	будь-які металеві сплави	- висока деталізація елементів - висока точність ( $\pm 5$ мкм)	- низька енергоефективність – 2...5% - низька продуктивність процесу (не більше 10 см <sup>3</sup> /год) - низький коефіцієнт використання матеріалу (40%)
	Вибіркове лазерне плавлення (EBM [2])				
	Вибіркове лазерне спікання (SLS) [3]				
Електронний промінь	Електронно-променево плавлення (EBM) [4]	дріт, порошок	будь-які металеві сплави	- отримання деталей більш високої щільності та міцності порівняно з лазерними технологіями; висока швидкість друку порівняно з іншими методами друку порошком; можливість використання порошоків неферичної форми	- обмежена енергоефективність - 15...20%; - необхідність створення вакуумного середовища; - складність застосування; - висока базова вартість обладнання
Електрична дуга	- TIG [5] - MIG [6] - СМТ [7]	суцільний та порошковий дріт	низьколегована конструкційна сталь, сплави на основі нікелю, алюмінію, титану та інші зварювальні матеріали;	- висока продуктивність (понад 500 см <sup>3</sup> /год) - значна енергоефективність – до 95% - низька вартість обладнання - доступність	- значні залишкові напруження та деформації виробу; - низька точність виготовлення виробу; - значна зона термічного впливу
	Плазмодугова [8]	порошок  дріт	будь-які металеві сплави, композиційні матеріали  низьколегована конструкційна сталь, сплави на основі нікелю, алюмінію, титану та інші зварювальні матеріали;	- міцність до 100% від міцності основного металу; - більш висока енергоефективність в порівнянні зі звичайними електродуговими процесами:	- значні залишкові напруження та деформації виробу; - низька точність виготовлення виробу;

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- спроектувати архітектуру системи адитивного виробництва;
- розробити алгоритм функціонування системи;

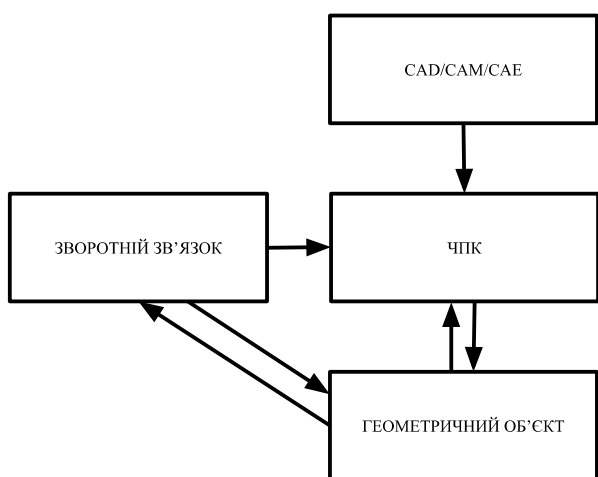
- розробити ієрархічну модель технології адитивного виробництва методом електродугового зварювання.

Розроблена архітектура повинна передбачити зворотній зв'язок за результатами вимірювання температурних показників, показників перевірки геометрії.

рії та показників перевірки параметрів зварювальної ванни для забезпечення автоматизованого керування тривимірним друком. В ієрархічній моделі необхідно передбачити обов'язкові три рівні: перший рівень це - валик, який містить в собі геометричні параметри однієї зварювальної одиниці. Другий рівень, це - шар, який містить геометрію контуру та топологію. Третій рівень - стінка, яка містить інформацію щодо уклонів та кривизни вертикальних поверхонь.

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

Виробництво за допомогою 3D-друку з використанням технології електродугового зварювання можна розглядати як систему, яка складається з чотирьох основних частин, рис. 2. Блок програмного забезпечення (CAD/CAM/CAE) відповідає за процес створення та підготовки геометричного об'єкту, введення вхідних даних параметрів деталі та їх подальше корегування під час аналізу технології виготовлення виробу. Отримані дані з блоку CAD/CAM/CAE відправляються до блоку числового програмного керування (ЧПК), що забезпечує контроль та процес виробництва. В процесі виготовлення деталі для захисту її від можливих деформацій, які можуть призвести до руйнації заготовки або її пошкодження, система містить в собі блок зворотного зв'язку представлений у вигляді пристрою, який перевіряє температурні показники, геометричні властивості деталі, а також розміри зварювальної ванни.



**Рисунок 2.** Базова архітектура системи адитивного виробництва з використанням технології електродугового зварювання

Блок ЧПК контролює процес створення зазначеного геометричного об'єкту, тобто заготовки, на основі попередньо введених даних, в той час як пристрій зворотного зв'язку перевіряє відповідність показників температури, геометричних властивостей та розміру зварювальної ванни у порівнянні до зазначе-

них нормативних параметрів на наявність аномальних відхилень, які можуть призвести до браку деталі.

Кожна деталь, яка буде виготовлена у процесі виробництва, має специфічні вимоги, що мають бути попередньо розглянуті для успішного процесу її створення. Такі вимоги можуть бути розділені на п'ять основних категорій представлених на рис. 3.

Під час процесу виробництва об'єкту, який складається з двох або більше валиків, поміж ними виникає періодично повторювана нерівність площини, яка зветься хвилястістю поверхні. Її параметри визначаються типом технології зварювання, довжиною, шириною, рівнем проплавлення, та величиною розтікання валику [10]. Оптимальні параметри хвилястості поверхні дозволяють підтримувати певну геометричну постійність розмірів готового виробу.

Для визначення залишкових напружень та стану мікроструктури попередньо проводяться температурні та структурні симуляції, а також симуляції різних типів навантаження у CAE-системах. Мінімізація напружень відбувається за допомогою вибору різних типів металів та домішок для процесу виробництва, розгляду їх фізичних властивостей, визначення розмірів підкладки на якій буде проводитися друк та методів її закріплення, контролю температурних режимів.

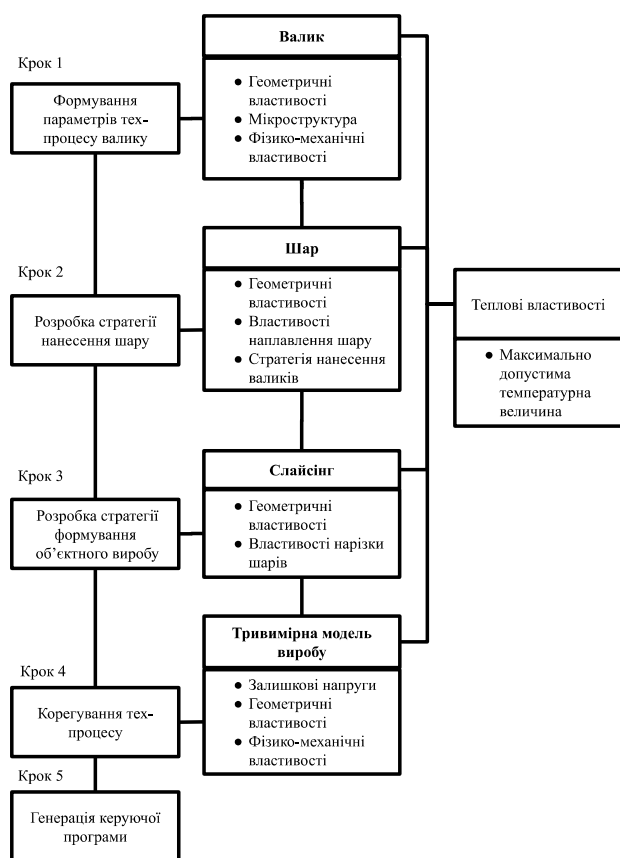


**Рисунок 3.** Вимоги до якості друку деталей

Схему аналізу технології адитивного виробництва методом електродугового зварювання з використанням параметрів визначених вимог до якості друку деталей наведено на рис. 4.

Параметри теплових властивостей визначаються розрахунком максимально допустимого рівня нагрівання [11]. За допомогою цих даних можна запобігти помилці процесу виробництва за якої геометричний об'єкт набирає занадто велику сумарну теплову масу, що приведе до нестабільної структури та руйнуванню виробу. Під час друку, тепло з новоствореного валику передається до вже надрукованих і постійно підсумовується. При досягненні максимально-допустимої температурної величини необхідно зупинити процес та дочекатися охолодження вже надрукованого об'єкту. Для отримання оптимальної швидкості výro-

бництва, яка залежить від загального теплового розподілу, повинні бути розраховані конкретні часові рамки та диференційована траєкторія шляху друку.



**Рисунок 4.** Схема аналізу технології виробництва об'єкту

Параметри властивостей валику визначаються: геометричним розміром, тобто його довжиною, шириною, висотою та формою поперечного перерізу; дослідженням розповсюдження залишкових напружень; зміни мікроструктури під впливом температури [12]; фізико-механічних властивостей - міцність та мікротвердість. Після цього в автоматизованому ре-

жимі формуються параметри технологічного процесу виготовлення валику.

На основі попередньо введених даних щодо властивостей валику можна перейти до визначення параметрів властивостей шару, його ширини, довжини. Шар розглядається як окрема структура, що складається з одного або більше валиків та може мати складну геометричну форму. Для успішного процесу створення шару необхідно визначити його ширину, висоту, властивості наплавлення, а також стратегію нанесення валиків. Отримані дані дозволяють перейти до програмної розробки стратегії нанесення шару.

Після визначення та введення параметрів властивостей валику та шару, попередньо створений у CAD-системі тривимірний геометричний об'єкт має бути розрізаний на шари за допомогою процесу слайсінгу [13]. Задається ширина і товщина шарів, величина кроку поміж ними, корегується їх формація [14]. Кожен шар можна розглядати окремо відносно необхідних технічних, геометричних та інших заданих параметрів. В автоматизованому режимі генерується стратегія формування виробу.

Аналіз тривимірної моделі виробу надає можливість переглянути параметри залишкових напруг, геометричні та фізико-механічні властивості та за необхідності, програмно скорегувати технологічний процес.

Завершення аналізу всіх основних параметрів процесу виробництва дозволяє запустити генерацію керуючої програми.

Отримані після програмної обробки параметри надсилаються до апаратної частини системи, рис. 5. Пристрій числового програмного керування, на який надсилаються дані, відповідає за контроль п'яти компонентів апаратного забезпечення, а також за пристрій вимірювання у реальному часі.

Параметрами системи руху є зміна швидкості та контроль траєкторії, що керується визначенням куту під яким наноситься матеріал і висоти відносно основи на якій відбувається процес друку або відносно вже надрукованої частини деталі.



**Рисунок 5.** Структура та параметри компонентів апаратного забезпечення

Компонент джерела живлення відповідає за увімкнення та вимкнення постачання живлення до сис-

теми, встановлення значень сили току, наявності імпульсу або його відсутності, що дозволяє використо-

вувати різні технології зварювання від звичайного GMAW до, наприклад, процесу CMT, розробленого компанією Fronius.

Параметрами подачі матеріалу є швидкість подачі дроту (wire feed speed) та схема його подачі. Дріт з котушки за допомогою пристрою подачі дроту проходить по спеціальному каналу до зварювального пальника, який направляє дріт в зону друку/наплавлення металу.

Для захисту розплавленого металу від хімічної реакції з навколишнім середовищем використовується система подачі захисного газу. Деякі типи газів можуть не тільки захистити процес виробництва але навіть і покращити металургійні властивості виробу, тому основними параметрами є вибір необхідного типу захисного газу або їх сумішей.

Система примусового охолодження призначена для підтримання оптимального теплового стану під час процесу адитивного виробництва. За типами тепловідводу можна виділити рідинний та повітряний. Основними параметрами є зміна інтенсивності охолодження та вибір зони охолодження.

Для перевірки виробу на наявність дефектів, відповідність геометричної форми, структури валиків, дотримання температурного режиму та параметрів зварювальної ванни введено пристрій вимірювання зі зворотним зв'язком у реальному часі (рис. 6). Під час процесу адитивного виробництва такий пристрій, який складається з модулів лазера та відеоспостереження, за наявності критичної ситуації дозволяє запобігти помилковому виробництву та ввести корективи у процес.

Більш детальне дослідження геометрії валику може проводитись шляхом розробки співвідношення між його властивостями та параметрами зварювання на основі обробки результатів експерименту, отриманих за допомогою регресивного аналізу [15]. Проводяться дослідження також в напрямках використання технології мереж штучного інтелекту або їх комбінації з попередньо використовуваними методами [16].

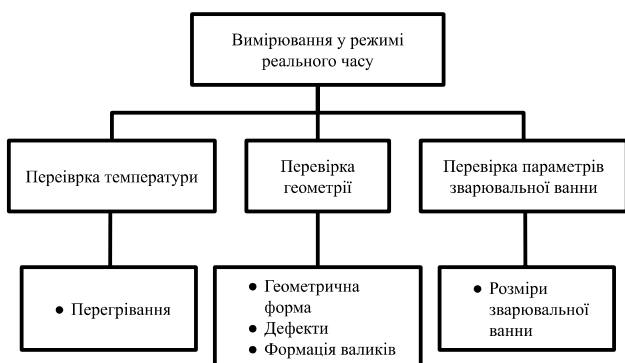


Рисунок 6. Параметри блоку зворотного зв'язку

На базі визначених вимог до адитивного виробництва, розгляду параметрів компонентів апаратної

частини, відповідальних за виконання процесу друку, розроблено алгоритм роботи системи, рис. 7.

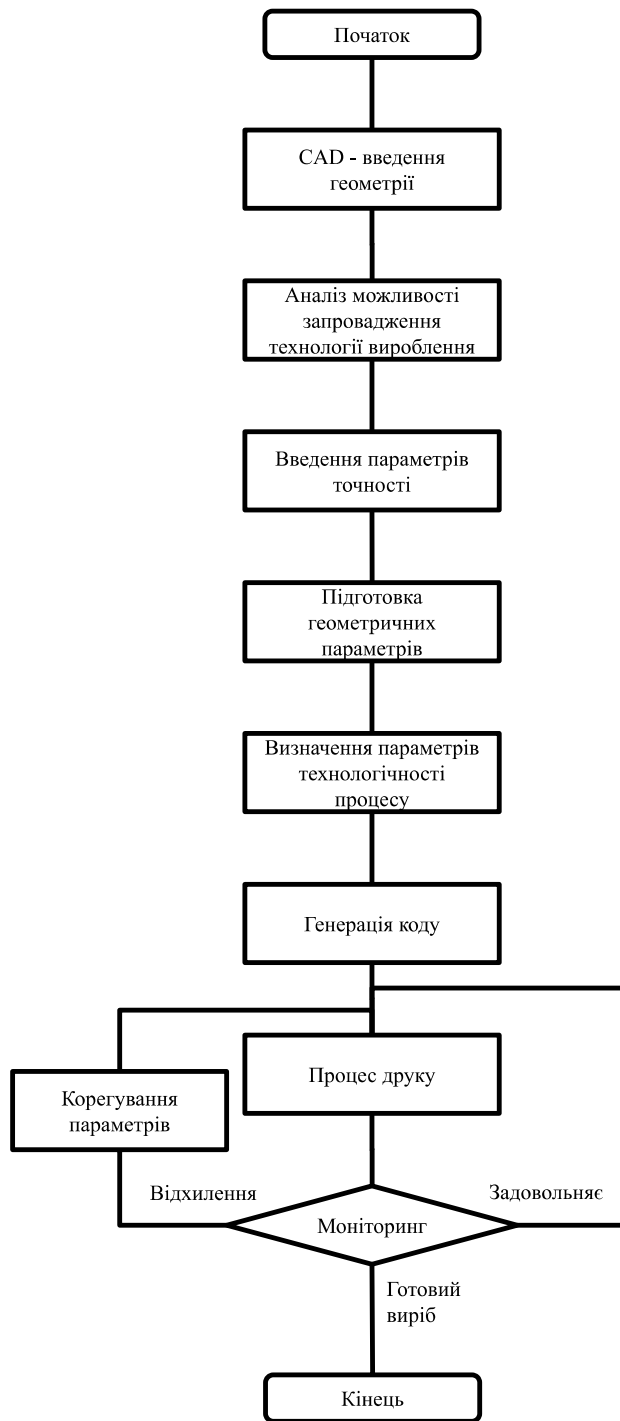
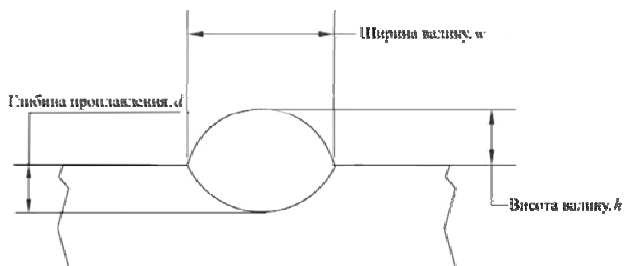


Рисунок 7. Алгоритм функціонування системи

Під час процесу друку можуть утворюватися валики різних форм: округлої, параболічної або косинусоїдної функції. Кожна форма проходить процес вимірювання з різними зварювальними параметрами, після чого відбувається їх порівняння. Дослідження показали, що оптимальна модель валику залежить від відношення швидкості подачі дроту до швидкості зва-



рьювального процесу [17]. Простий одиночний зварювальний валик, рис. 8, у даному випадку – параболічний, може бути доволі легко описано за допомогою його висоти,  $h$ , його ширини,  $w$  та глибини проплавлення,  $d$ .



**Рисунок 8.** Зварювальний валик з висотою,  $h$ , шириною,  $w$  та глибиною проплавлення,  $d$

Як показують попередні дослідження [18],  $w$  та  $h$  можна визначити використовуючи різні зварювальні параметри:

$$w = \frac{3\pi \nu_w \cdot d_w^2}{8h \cdot \nu_t} \quad (1)$$

$$h = C_1 \nu_w^2 + C_2 \nu_t^2 + C_3 \nu_w \nu_t + C_4 \nu_w + C_5 \nu_t + C_6 \quad (2)$$

$\nu_w$  – швидкість подачі дроту;  
 $\nu_t$  – швидкість руху зварювання.

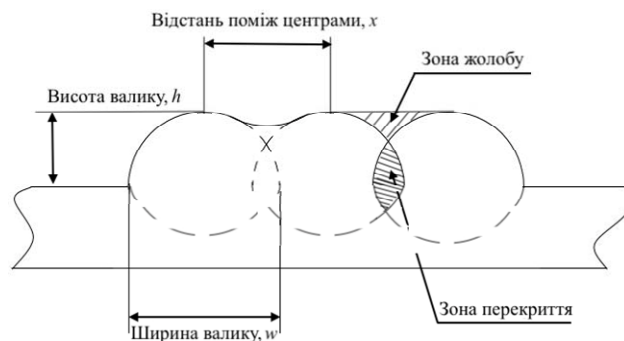
Більш детальну інформацію наведено у [10].

Для опису двох або більше валиків використовуються моделі з перекриттям. На даний час існує дві основні моделі для валиків з перекриттям:

- FOM - Flat-top Overlapping Model, модель перекриття з рівною поверхнею площини;
- TOM - Tangent Overlapping Model, дотична модель перекриття.

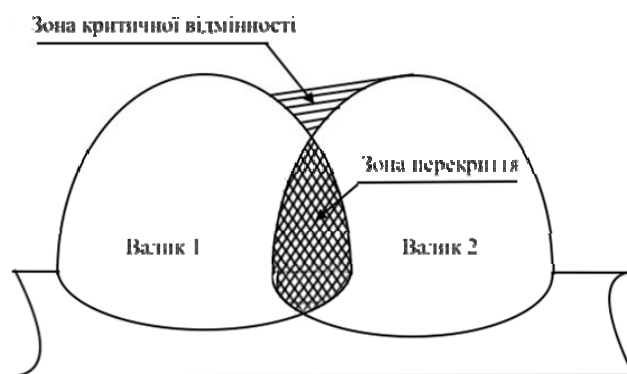
Традиційну модель перекриття з рівною поверхнею площини, також відому як FOM (рис. 9), можна описати як декілька одиночних валиків з висотою,  $h$ , шириною,  $w$ , глибиною проплавлення,  $d$ , та відстані між центрами сусідніх валиків,  $x$ . На схематичній моделі також показані зони перекриття та жолобу. Якщо значення змінної  $x$  більше ніж  $w$ , перекриття - відсутнє. Зменшення значення  $x$  в залежності від розміру ширини валику до оптимальної величини, надає можливість вирівняти поверхню площини, тобто зменшити її хвилястість. У ідеальному випадку, під час збирання значень величин зони перекриття та зони жолобу, поверхня площини поміж валиками стане повністю рівною. Однак результатами експериментальних досліджень [18] показано, що існування такої зони неможливо [19], хвилястість структури зберігається.

Дотична модель TOM (рис. 10) надає більш детальне уявлення про реальну структуру перекриття валиків.



**Рисунок 9.** Схематична модель перекриття з рівною поверхнею площини (FOM)

У схематичній моделі перекриття з рівною поверхнею площини спосіб поєднання сусідніх валиків представлено у вигляді прямої лінії. Проте експериментально було досліджено, що поміж двома валиками існує критична відмінність геометрії жолобу [20]. Цей параметр відображено у розглянутій другій моделі перекриття.

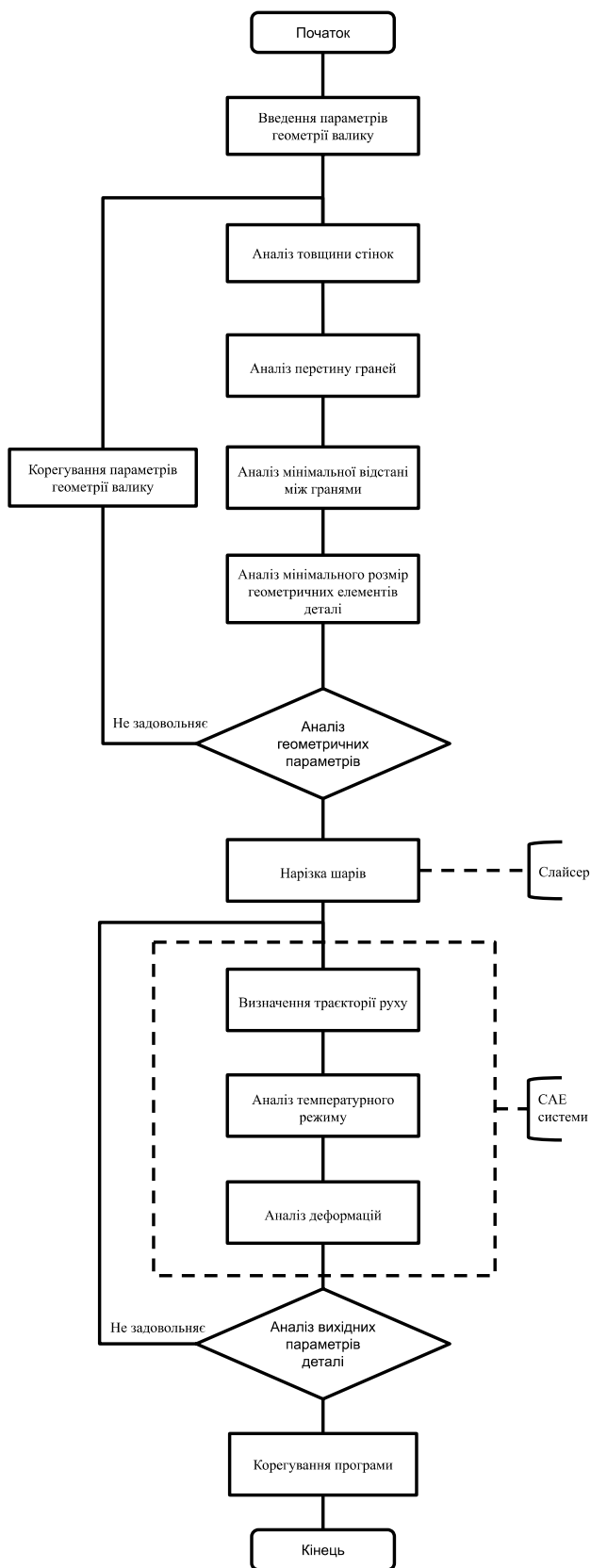


**Рисунок 10.** Схема дотичної моделі перекриття

Під час адитивного виробництва з використанням технології електродугового зварювання можливо утворення великої кількості валиків біч-о-біч. Це може призвести до їх поєднання поміж собою та утворення мульти-перекриття. Хоча й така структура не вирізняється стабільністю, у деяких випадках вона може бути ефективною. У такому разі, для отримання стабільного процесу виробництва, оптимальні параметри перекриття та відстань поміж центрами суміжних валиків мають бути розраховані окремо.

У процесі адитивного виробництва з використанням технології електродугового зварювання можна використовувати як загальні критерії для 3D-друку взагалі, так і ті, які пов'язані тільки з конкретно зазначеною вище технологією.

Для більшого розуміння процесу автоматизації 3D-друку з використанням технології електродугового зварювання запропоновано алгоритм генерації керуючої програми, рис. 11.



**Рисунок 11.** Алгоритм генерації керуючої програми

Алгоритм містить в собі та узагальнює всі попередньо зазначені параметри. На першому етапі вводиться

геометрія валику. Наступні 5 етапів складаються з аналізу товщини стінок, перекриття валиків, задання мінімальної відстані між валиками, визначення мінімального розміру геометричних елементів деталі та аналізу остаточних отриманих геометричних параметрів. Якщо отримані геометричні параметри не задовольняють систему, необхідно провести корегування параметрів валику та знову повторити п'ять етапів аналізу. Якщо отримані геометричні параметри задовольняють систему, то процес переходить до програмного забезпечення слайсеру, де відбувається нарізка шарів. Після завершення процесу слайсингу отриманий результат передається до САЕ-систем. Відбувається визначення траєкторії руху, аналіз температурних режимів та деформацій. Остаточним кроком є аналіз отриманих вихідних даних. У разі отримання результату, який не задовольняє систему, необхідно змінити параметри та наново пройти три етапи аналізу у САЕ-системах. Якщо результат вихідних параметрів деталі задовольняє систему, то відбувається процес друку. Під час процесу друку використовується електронний прилад зворотного зв'язку. У разі визначення відхилень, прилад передає інформацію до системи, після чого відбувається корегування програми.

Для визначення параметрів технологічного процесу було проведено експериментальні дослідження на роботизованому зварювальному комплексі, наданому ТОВ «Тріада ЛТД Ко». Приклади експериментальних деталей зображено на рис. 12.



**Рисунок 12.** Експериментально отримані деталі використовуючи GMAW Standard (ліворуч) та GMAW CMT (праворуч)

Результатами експерименту визначено вплив обраного типу зварювання та його параметрів, висвітлених у табл. 2, на властивості надрукованої заготовки.

Однакові за розміром та висотою заготовки відрізняються кількістю надрукованих шарів. При однаковій заданій середній величині ширини шару, яка дорівнює 4,9-5,2мм, величина висоти шару напряму залежить від технології зварювання. Використовуючи GMAW CMT вона дорівнює – 2,3-2,8мм, а GMAW Standard – 1,8-2,2мм. Так, для виготовлення заготовки використовуючи GMAW CMT необхідно створити 36 шарів. Для виготовлення заготовки використовуючи

GMAW Standard – 44 шари. Адитивне виробництво з використанням технології GMAW CMT надає більш задовільний результат порівняно з GMAW Standard.

**Таблиця 2.** Параметри нанесення матеріалу

Тип зварювання	GMAW CMT	GMAW Standard
Стан зварювання	PA (1G)	PA (1G)
Виліт електроду	15±2 мм	15±2 мм
Швидкість зварювання	70 см/хв	80 см/хв
Швидкість подачі дроту	10,0±1 м/хв	9,0±1 м/хв
Зварювальний струм	201±5 А	188±5 А
Напруга	16,1±0,5 В	20,7±0,5 В
Газ	15±1 л/хв	15±1 л/хв

Для узагальнення інформації про геометрію та технологію виготовлення деталі запропоновано трирівневу ієрархічну модель адитивного виробництва з використанням технології електродугового зварюван-

ня, рис. 13. Перший рівень ієрархічної моделі - валик, його геометричні розміри та обраний тип перекриття. Другий рівень – шар, у якому розглядається геометрія шару та хвилястість поверхні шару, підбирається траєкторія руху задля створення необхідного контуру шару, а також рівномірного розподілу тепла. Третій рівень – стінка. Досліджується хвилястість поверхні стінки, параметри залишкових напружень, геометричні параметри, які містять в себе уклони та кривизну вертикальних поверхонь.

Для дослідження температурних режимів та деформацій, які можуть виникнути під час процесу друку з використанням технології електро-дугового зварювання, застосовуються CAE-системи [21]. Одними з найбільш відомих є ANSYS, ABAQUS та SimScale. Кожна з зазначених програм надає певний спектр професійних можливостей для проведення симуляцій розповсюдження тепла, структурного аналізу та інших. Програма ANSYS з модулем Additive Suite має великий діапазон підтримки різних можливостей, проте обмежується використанням лише власної мови програмування APDL (ANSYS Parametric Design Language).



**Рисунок 13.** Трирівнева ієрархічна модель адитивного виробництва з використанням технології електродугового зварювання

Програма ABAQUS (рис. 14) теж має багатоваріативний спектр можливостей, але натомість, підтримує написання скриптів мовою програмування Python. Найбільша перевага SimScale, це орієнтоване на користування через веб-браузер програмне забезпечення, яке не вимагає обчислювальної потужності порівняно з двома попередніми програмами симуляції.

Для процесу симуляції необхідно ввести геометричні параметри виробу, товщину металевої підкладки, тип матеріалу з якого буде надруковано деталь,

його фізичні властивості. Необхідно задати розмір валику та температурні значення з якими буде відбуватися процес друку. Визначити наявність або відсутність температурних лазерів. Обрати частини для охолодження. Розрізати деталь на задані валики та обрати стратегію руху нанесення в одному чи в двох напрямках, хрестовим або спіральним способами [22]. Програмне введення таких властивостей валику як умовна межа текучості, коефіцієнт Пуассона, модуль Юнга та інших температурно-залежних параметрів [23] надає можливість провести у програмі симуляції температурний аналіз для визначення розповсюджен-

ня тепла на об'єкті. На процес наплавлення також має вплив конвекція та радіація, що відбуваються на всіх поверхнях які піддаються впливу повітря. Через те, що процес передачі тепла відбувається вздовж активованих валиків, температура зварювання для кожного окремого кроку симуляції має бути розрахована та введена попередньо, так само як і температура повітря, яка, як правило встановлюється у проміжку від 20С до 50С [22]. Отримані данні температурного аналізу надають можливість провести структурний аналіз, що дозволяє виявити структурні деформації та перевірити властивості виробу щодо різними типів навантажень.

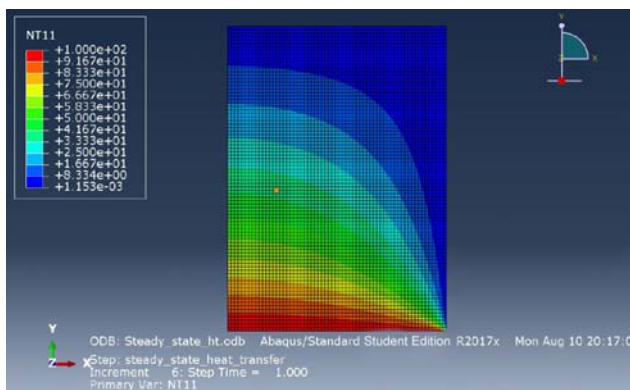


Рисунок 14. Приклад симуляції розповсюдження тепла у САЕ-системі Abaqus

Симуляція друку виглядає як процес в якому наплавлені валики створюються один за одним у попередньо визначеному порядку із зазначеною температурою плавлення та траєкторією нанесення [24]. Кожна нова нанесена одиниця розповсюджує тепло до вже наплавлених валиків, створюючи підвищення температури всієї системи.

## V. ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень було розроблено архітектуру системи автоматизованого керування робототехнічною платформою адитивного виробництва у якій застосовується зворотній зв'язок для контролю температурного режиму, параметрів геометричної форми деталі та зварювальної ванни.

Визначено вимоги до технологічності та якості друку деталей, вхідні дані для роботи системи автоматизованого керування робототехнічною платформою з використанням технології електродугового зварювання. Розроблено алгоритми роботи системи та алгоритм програми керування. Розроблено трирівневу ієрархічну модель, яка надає можливість розглядати окремо рівні створення валику, шару та стінки у процесі 3D-друку деталі. Розглянуто базові геометричні параметри зварювального валику та способи перекриття двох та більше валиків, при генерації програми для керування роботом, показана необхідність урахування критичних відмінностей ідеальної та реальної

моделей перекриття валиків. Проведено аналіз можливостей симуляції тривимірного друку з використанням технології електродугового зварювання в САЕ-системах для визначення впливу температурних параметрів, механічних навантажень, зміни траєкторії руху створення деталі, та на основі отриманих даних визначення залишкових напружень й дефектів у вироблених деталях.

Практичні дослідження проводились на роботизованому зварювальному комплексі, наданому фірмою «Триада ЛТД Ко».

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Subrahmanyam A. Critical review on characterization of DMLS materials / A. Subrahmanyam, P. Srinivasa, K. Prasad // Journal of Xi'an University of Architecture and Technology. – 2020. - №14. 665-688.
- [2] Stelzer N. Mechanical properties of surface engineered metallic parts prepared by additive manufacturing / N. Stelzer, M. Scheerer, L. Bača // The European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing. - 2018.
- [3] Nguyen Huu Study on optimization of PES/CaCO 3 composite powder for selective laser sintering (SLS) 3D printing technology / Nguyen Huu, Guo Yanling, Tat, Thang Nguyen, Yu Yueqiang // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. 612. DOI:10.1088/1757-899X/612/3/032104.
- [4] Dragunov V. Investigation of the optimal modes of electron-beam wire deposition / V. Dragunov, M. Goryachkina, A. Gudenko, A. Sliva, A. Shcherbakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. 681. DOI:10.1088/1757-899X/681/1/012008.
- [5] Eyercioglu O. Evaluatuion of overhang angle in TIG welding-based wire arc additive manufacturing process / O. Eyercioglu, Y. Atalay, M. Aladag // International Journal of Research - GRANTHAALAYAH. - 2020. - №7(10). 247-254. DOI:10.29121/granthaalayah.v7.i10.2019.393.
- [6] Bai Yishan Research on Microstructure and Properties of 304 Stainless Steel Made by MIG Filler Additive Manufacturing / Bai Yishan, Gao Qingwei, Chen Xin, Yin Hao, Fang Longfei, Zhao Jian // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2019. 237. DOI:10.1088/1755-1315/237/3/032096.
- [7] Fang X. Analysis of characteristics of process parameters in CMT additive manufacturing / X. Fang, C. Ren, H. Bai, C. Wang, B. Lu // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. 504. DOI:012018. 10.1088/1757-899X/504/1/012018.
- [8] Artaza T. Influence of Heat Input on the Formation of Laves Phases and Hot Cracking in Plasma Arc Welding (PAW) Additive Manufacturing of Inconel 718 / T. Artaza, T. Bhujangrao, A. Suarez, F. Veiga, A.

- Lamikiz // Metals - Open Access Metallurgy Journal –2020. -№10(771). 1-17. Doi:10.3390/met10060771
- [9] Korzhyk V. Welding Technology in Additive Manufacturing Processes of 3D Objects / V. Korzhyk, V. Khaskin, O. Voitenko, V. Sydorets, O. Dolianovskaia // Materials Science Forum. – 2017. - №906. 121-130. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.906.121
- [10] Dinovitzer M. Effect of Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process Parameters on Bead Geometry and Microstructure / M. Dinovitzer, Chen Xiaohu, J. Laliberte, Huang Xiao, H. Frei // Additive Manufacturing. – 2019. - 26. DOI:10.1016/j.addma.2018.12.013.
- [11] Ding J. Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts / J. Ding, P. Colegrove, J. Mehnen, S. Ganguly, P.M. Sequeira Almeida, F. Wang, S. Williams // Computational Materials Science. -2011. DOI:10.1016/j.commatsci.2011.06.023
- [12] Ho Alistair On the Origin of Microstructural Banding in Ti-6Al4V Wire-Arc Based High Deposition Rate Additive Manufacturing / Ho Alistair, Zhao Hao, J. Fellowes, F. Martina, A. Davis, P. Prangnell // Acta Materialia. – 2019. - 166. DOI:10.1016/j.actamat.2018.12.038.
- [13] Adnan F. Real-time slicing algorithm for Stereolithography (STL) CAD model applied in additive manufacturing industry/ F. Andan, F. Romlay, M. Shafiq // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. - 342. D:10.1088/1757-899X/342/1/012016
- [14] Hu J. Study on STL-based slicing process for 3D printing. Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium / J. Hu // An Additive Manufacturing Conference. – 2017.
- [15] Almeida P. S. Innovative process model of Ti-6Al-4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT) / P.S. Almeida, S. Williams // In Proceedings of the Twenty-first Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas at Austin, Austin, TX, USA. – 2010.
- [16] Xiong J. Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis / J. Xiong // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2012. pp. 1-7.
- [17] Xiong J. Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing / J. Xiong // Robotics and Computer Integrated Manufacturing. – 2012.
- [18] Suryakumar S. Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing / S. Suryakumar // Computer-Aided Design. – 2011. - №43. pp. 331-344.
- [19] Aiyiti W. Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping / W. Aiyiti // Rapid Prototyping Journal. – 2006. - №12. pp. 165-172.
- [20] Ding D. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM) / D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2015. - №31. pp. 101-110.
- [21] Mehnen J. Design study for wire and arc additive manufacture / J. Mehnen, Ding Jialuo, H. Lockett, P. Kazanas, // Int. J. of Product Development. – 2014. - №19. pp. 2 - 20. DOI:10.1504/IJPD.2014.060028.
- [22] Wang J. Effects of deposition strategies on macro/microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti 6Al 4V / J. Wang, Xin Lin, Li Jiaqiang, Y.L Hu, Zhou Yinghui, Wang Chong, Li Qiuge, Huang Weidong // Materials Science and Engineering. – 2019. A. 754. DOI:10.1016/j.msea.2019.03.001.
- [23] Graf M. Thermo-Mechanical Modelling of Wire-Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Semi-Finished Products / M. Graf, A. Hälsig, K. Höfer, B. Awiszus, P. Mayr // Metals. – 2018. - №8. p.1009. DOI:10.3390/met8121009.
- [24] Israr R. Simulation of different path strategies for wire-arc additive manufacturing with Lagrangian finite element methods / R. Israr, J. Buhl, L. Elze, M. Bambach // Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg, Chair of Mechanical Design and Manufacturing, LS-DYNA Forum, Bamberg. – 2018.

*Стаття надійшла до редакції 20.11.2020*

## СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ 3D-ПЕЧАТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ

АНИКИН П.С.

аспирант, Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: anikinps@zntu.edu.ua;

ШИЛО Г.Н.

д-р техн. наук, заведующий кафедрой информационных технологий электронных средств Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: shilo.gn@gmail.com;

КУЛИКОВСКИЙ  
Р.А.

к.т.н., доцент кафедры оборудования и технологии сварочного производства Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: r.kulikovski@ukr.net;

МОЛОЧКОВ Д.Е.

инженер-программист ТОВ «Триада ЛТД Ко», Запорожье, Украина, e-mail: dmolochkov@gmail.com.

**Цель работы.** Разработка архитектуры системы автоматизированного управления робототехнической платформой 3D- печати с использованием технологий электродуговой сварки, структуры ее компонентов и алгоритма функционирования.

**Методы исследования.** Для реализации алгоритма программы управления используется компьютерное моделирование тепловых режимов в САЕ-системах. Основные параметры технологии печати отдельного слоя получены путем экспериментального использования технологии аддитивного производства электродуговой сваркой.

**Полученные результаты.** Определены требования к технологичности и качества печати деталей в виде геометрических размеров объекта, волнистости поверхности, параметров желаемого состояния микро-структуры, остаточных напряжений и сохранения оптимальной скорости производства. На основе требований анализа технологичности разработан алгоритм программы управления. Создана архитектуру системы автоматизированного управления робототехнической платформой аддитивного производства в которой применяется обратная связь для контроля температурного режима, параметров геометрической формы детали и сварочной ванны. Разработано трехуровневую иерархическую модель, которая дает возможность рассматривать отдельно уровни создания валика, слоя и стенки в процессе 3D-печати детали. Определены входные данные для работы системы автоматизированного управления робототехнической платформой с использованием технологии электродуговой сварки. Рассмотрены базовые геометрические параметры сварочного валика и способы перекрытия двух и более валиков, при генерации программы для управления роботом показана необходимость учета критических различий идеальной и реальной моделей перекрытия валиков. Проведен анализ возможностей симуляции трехмерной печати с использованием технологии электродуговой сварки в САЕ-системах для определения влияния температурных параметров, механических нагрузок, изменения траектории движения создания детали, и на основе полученных данных возможность определения остаточных напряжений и дефектов в производимых деталях.

**Научная новизна.** Предложена архитектура системы автоматизированного управления робототехнической платформой 3D-печати, которая включает в себя системы обратной связи для контроля температурного режима, параметров геометрической формы детали и сварочной ванны. Разработано трехуровневую иерархическую модель технологии аддитивного производства по использованию электродуговой сварки. Разработан алгоритм программы управления, который предоставляет возможность усовершенствования геометрических и механических свойств готовой продукции.

**Практическая ценность.** Разработка автоматизированной системы управления робототехнической платформой 3D-печати с использованием технологии электродуговой сварки, которая позволит повысить точность печати деталей и уменьшить время их изготовления.

**Ключевые слова:** электродуговая сварка; САЕ системы; робототехника; вертикальная нарезка (слайсинг); 3D моделирование.

## AUTOMATION CONTROL SYSTEM OF 3D PRINTING ROBOTIC PLATFORM WITH IMPLEMENTED WIRE + ARC WELDING TECHNOLOGY

ANIKIN P.S.

Postgraduate student of National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: anikinps@zntu.edu.ua;

SHILO G.M.

D.Sc., Head of the Department of Information Technologies of Electronic Devices of National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: shilo.gn@gmail.com;

KULYKOVSKIY  
R.A.

Ph.D, Associate professor, Associate professor of the welding technology and equipment department of National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: r.kulikovski@ukr.net;

MOLOCHKOV

Software engineer TRIADA LTD CO (Triada-Welding), Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail:

D.E.

dmolochkov@gmail.com;

**Purpose.** Development of the robotic platform automated control system architecture, development of the software control algorithm.

**Methodology.** To implement the algorithm of the control program, computer modeling of thermal regimes in CAE systems is used. The basic parameters of the single layer printing technique were obtained by experimental use of the wire plus arc additive manufacturing (WAAM) technology.

**Findings.** Requirements for manufacturability and printing quality of the manufactured parts were defined in the form of geometric dimensions, surface waviness, parameters of the desired microstructure state, residual stresses, maintaining of the optimal manufacturing speed. Based on the requirements of manufacturability analysis, an algorithm for the control program was developed. Robotic platform automated control system architecture with feedback device for the thermal mode control, parameters of the geometrical form of the manufactured part and weld pool were developed. Three-level hierarchical model, which gives an ability to consider in the process of 3D printing each level individually in terms of welding bead, layer and wall, was developed. The input data for the operation of the automated control system of the robotic platform using the technology of electric arc welding are determined. Basic geometrical parameters and the simple welding bead and the methods of overlapping of two or more beads were shown. Critical differences between ideal and real welding overlapping models were considered for necessity of taking into account whilst generating robot control software. Analysis of the possibilities for the CAE simulation of the three-dimensional printing using wire plus arc additive manufacturing technology is performed to determine the influence of the temperature parameters, mechanical loads, toolpath change, and based on the data obtained, it became possible to determine residual stresses and defects in manufactured parts.

**Originality.** Robotic platform automated control system architecture with feedback device for the control of thermal mode, parameters of the geometrical form of the manufactured part and weld pool was developed. Three-level hierarchical model for the wire plus arc additive manufacturing (WAAM) technology was created. Software control algorithm which provides an opportunity to improve geometrical and mechanical properties of the manufactured parts was developed.

**Practical value.** Development of an automated control system for 3D printing robotic platform with WAAM implemented technology, which will provide an opportunity for increase in the printing accuracy of the manufactured parts and will help to reduce manufacturing time.

**Keywords:** WAAM, CAE systems, Robotics, Vertical slicing, 3D modeling.

## REFERENCES

- [1] Subrahmanyam A., Srinivasa P., Prasad K. (2020) Critical review on characterization of DMLS materials. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology. 14. 665-688.
- [2] Stelzer N., Scheerer M., Bača L. (2018) Mechanical properties of surface engineered metallic parts prepared by additive manufacturing. The European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing.
- [3] Nguyen Huu, Guo Yanling, Tat, Thang Nguyen, Yu Yueqiang (2019) Study on optimization of PES/CaCO<sub>3</sub> composite powder for selective laser sintering (SLS) 3D printing technology. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 612. DOI:10.1088/1757-899X/612/3/032104.
- [4] Dragunov V., Goryachkina M., Gudenko A., Sliva A., Shcherbakov A. (2019) Investigation of the optimal modes of electron-beam wire deposition. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 681. DOI:10.1088/1757-899X/681/1/012008.
- [5] Eyercioglu O., Atalay Y., Aladag M. (2020) Evaluation of overhang angle in TIG welding-based wire arc additive manufacturing process. International Journal of Research - GRANTHAALAYAH. 7(10). 247-254. DOI:10.29121/granthaalayah.v7.i10.2019.393.
- [6] Bai Yishan, Gao Qingwei, Chen Xin, Yin Hao, Fang Longfei, Zhao Jian (2019) Research on Microstructure and Properties of 304 Stainless Steel Made by MIG Filler Additive Manufacturing. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 237. DOI:10.1088/1755-1315/237/3/032096.
- [7] Fang X., Ren C., Bai H., Wang C., Lu B. (2019) Analysis of characteristics of process parameters in CMT additive manufacturing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 504. DOI:10.1088/1757-899X/504/1/012018.
- [8] Artaza T., Bhujangrao T., Suarez A., Veiga F., Lamikiz A. (2020) Influence of Heat Input on the Formation of Laves Phases and Hot Cracking in Plasma Arc Welding (PAW) Additive Manufacturing of Inconel 718. Metals - Open Access Metallurgy Journal. 10(771). 1-17. Doi:10.3390/met10060771
- [9] Korzyh V., Khaskin V., Voitenko O., Sydorets V., Dolianovskaia O. (2017). Welding Technology in Additive Manufacturing Processes of 3D Objects. Materials Science Forum. 906, 121-130. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.906.121
- [10] Dinovitzer M., Chen Xiaohu, Laliberte J., Huang Xiao, Frei H. (2019) Effect of Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process Parameters on Bead Geometry and Microstructure. Additive Manufacturing. 26. DOI:10.1016/j.addma.2018.12.013.
- [11] Ding J., Colegrove P., Mehnen J., Ganguly S., Se-

- queira Almeida P.M., Wang F., Williams S. (2011) Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts. *Computational Materials Science*. DOI:10.1016/j.commatsci.2011.06.023
- [12] Ho Alistair, Zhao Hao, Fellowes J., Martina F., Davis A., Prangnell P. (2019) On the Origin of Microstructural Banding in Ti-6Al4V Wire-Arc Based High Deposition Rate Additive Manufacturing. *Acta Materialia*. 166. DOI:10.1016/j.actamat.2018.12.038.
- [13] Adnan F., Andan, F., Romlay F., Shafiq M. (2019) Real-time slicing algorithm for Stereolithography (STL) CAD model applied in additive manufacturing industry. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 342. DOI:10.1088/1757-899X/342/1/012016
- [14] Hu J. (2017) Study on STL-based slicing process for 3D printing. *Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. An Additive Manufacturing Conference*.
- [15] Almeida P. S., Williams S. (2010) Innovative process model of Ti-6Al-4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT). In *Proceedings of the Twenty-first Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas at Austin, Austin, TX, USA*.
- [16] Xiong J. (2012) Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 1-7.
- [17] Xiong J. (2012) Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*.
- [18] Suryakumar S. (2011) Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing. *Computer-Aided Design*. 43, 331-344.
- [19] Aiyiti W. (2006) Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping. *Rapid Prototyping Journal*. 12, 165-172.
- [20] Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. (2015) A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 31, 101-110.
- [21] Mehnen J., Ding Jialuo, Lockett H., Kazanas P. (2014) Design study for wire and arc additive manufacture. *Int. J. of Product Development*. 19, 2 - 20. DOI:10.1504/IJPD.2014.060028.
- [22] Wang J., Lin Xin, Jiaqiang Li, Hu Y.L, Zhou Yinghui, Wang Chong, Li Qiuge, Huang Weidong (2019) Effects of deposition strategies on macro/microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti 6Al 4V. *Materials Science and Engineering, A*, 754. DOI:10.1016/j.msea.2019.03.001.
- [23] Graf M., Hälsig A., Höfer K., Awiszus B., Mayr P. (2018) Thermo-Mechanical Modelling of Wire-Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Semi-Finished Products. *Metals*. 8, 1009. DOI:10.3390/met8121009.
- [24] Israr R., Buhl J., Elze L., Bambach M. (2018) Simulation of different path strategies for wire-arc additive manufacturing with Lagrangian finite element methods. *Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg, Chair of Mechanical Design and Manufacturing, LS-DYNA Forum, Bamberg*.