

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

БЕЗВЕРХНЯ ЮЛІЯ СЕРГІЇВНА

УДК 621.316.35:006.354

ДИСЕРТАЦІЯ

**ВДОСКОНАЛЕННЯ ПІДХОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ
ТРОЛЕЙНИХ ШИНОПРОВОДІВ СИСТЕМ ЦЕХОВОГО
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З НЕЛІНІЙНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ**

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Галузь знань 14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії


Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


_____ Ю.С. Безверхня

Науковий керівник Коцур Михайло Ігорович, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри електричних та електронних апаратів НУ "Запорізька політехніка"



Запоріжжя – 2021

*Олександр
Запорожський*


АНОТАЦІЯ

Безверхня Ю.С. Вдосконалення підходів визначення параметрів тролейних шинопроводів систем цехового електропостачання з нелінійними навантаженнями – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Національний університет "Запорізька політехніка", Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Запоріжжя, 2021.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси в тролейних шинопроводах систем цехового електропостачання в умовах впливу гармонійних складових струму навантаження.

Предмет дослідження – електромагнітні параметри тролейних шинопроводів систем цехового електропостачання при нелінійному навантаженні.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-прикладного завдання, спрямованого на вдосконалення підходів моделювання електромагнітних процесів і підвищення точності визначення параметрів тролейного шинопровода з врахуванням впливу гармонійних складових струму навантаження.

У вступі обґрунтовано актуальність задач дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, наведена наукова новизна та сформульоване практичне значення отриманих результатів.

В першому розділі встановлено, що існуючі методики розрахунку активного та реактивного опорів та електромагнітних параметрів тролейних шинопроводів, що основані на польовому моделюванні не забезпечують високу точність та ефективність, так як не враховують наявність гармонійних складових струму. Інші методики розрахунку параметрів тролейних шинопроводів, що основані на емпіричних залежностях та застосовуються на інженерній практиці

мають припущення щодо відсутності впливу скін-ефектів, ефектів близькості, поверхневих та інших крайових ефектів, не враховують електрофізичні та нелінійні властивості матеріалів провідників. Відсутні дослідження щодо порівняльного аналізу активного та реактивного опорів й електромагнітних параметрів існуючих профілів тролей. Недостатня вивченість електромагнітних процесів при наявності вищих гармонік струму в провідниках шинопровода, не встановлені співвідношення падіння напруги та активних втрат для різних форм тролей шинопровода від спектрів частот і амплітуд k -х гармонік струму та коефіцієнту гармонійних спотворень.

В другому розділі удосконалено метод польового розрахунку, на основі якого запропоновано математичну двовимірну польову модель електромагнітних процесів в елементах конструкції тролейного шинопровода у частотній постановці задачі, яка у порівнянні з просторовою часовою моделлю електромагнітного поля, дозволяє з високою точністю ($1,88\% \div 2,06\%$) та ефективністю чисельної реалізації для кожної відповідної амплітуди і частоти k -ї гармоніки струму навантаження визначати активний та реактивний опори та електромагнітні параметри тролейного шинопровода з врахуванням їх конструктивних особливостей, нелінійності магнітних та електрофізичних властивостей матеріалів, скін-ефекту, ефекту близькості, поверхневих та інших крайових ефектів. За результатами польового розрахунку встановлено співвідношення падіння напруги та активних втрат для різних форм тролей шинопровода від спектрів частот і амплітуд k -х гармонік струму і коефіцієнту гармонійних спотворень, що дозволяє виявити ступінь і характер впливу на асиметрію падіння напруги і параметрів тролей шинопровода. Проведено дослідження та порівняльний аналіз активних і реактивних опорів L , W , I , U , X -форм тролей шинопровода з врахуванням впливу скін-ефекту, ефекту близькості, поверхневих та інших крайових ефектів. Встановлено, що найбільш оптимальною формою сталевих і мідних тролей шинопровода є куткова форма тролей (L -форма), для якої забезпечується найменше значення активного і реактивного опорів, активних втрат і втрат напруги, а також найменший рівень

несиметрії між фазами шинопровода, як при основній, так і при вищих гармоніках струму. Встановлено, що при наявності вищих гармонік струму, параметри (активний і реактивний опори) тролей шинопровода не залежать від амплітуди k -х гармонік струму, а залежать лише від їх частоти. Значення падіння напруги при визначених параметрах тролей шинопровода з врахуванням впливу скін-ефекту, ефекту близькості, поверхневих, та інших крайових ефектів має прямо пропорційну залежність від амплітуди k -х гармонік струму. Рівень несиметрії падіння напруги для всіх форм фазних тролей шинопровода викликано несиметрією їх параметрів. Запропоновано алгоритм, який дозволяє на основі даних польового моделювання, з врахуванням особливості конструкції тролейного шинопровода (форми тролей, їх розташування, при та без наявності екрануючих елементів) та скін-ефекту, ефекту близькості, поверхневих, та інших крайових ефектів встановити функціональну залежність падіння напруги від частоти та амплітуди вищих гармонік струму, яка представлена у вигляді бікубічного полінома, і дозволяє для діючих спектрів і амплітуд вищих гармонік струму, підібрати необхідні значення коефіцієнтів полінома без витрат часу на польове моделювання.

В третьому розділі удосконалено підхід щодо визначення активного та реактивного опорів й електромагнітних параметрів тролейного шинопровода з врахуванням гармонійних складових струму навантаження, конструктивних особливостей тролей, нелінійності магнітних та електрофізичних властивостей матеріалів, скін-ефекту, ефекту близькості, поверхневих та інших крайових ефектів. На основі даного підходу запропоновано нову методику, яка з високою точністю та ефективністю без витрат часу на польове моделювання, для кожної k -ї гармоніки струму дозволяє визначити значення активного, реактивного опорів і падіння напруги з врахуванням і без врахування дії зовнішнього магнітного поля, незалежно від форми і розташування тролей, відстані між ними і кількості фаз шинопровода. Вдосконалено математичну модель щодо визначення втрат напруги в тролях шинопровода в залежності від коефіцієнту потужності мережі, яка відрізняється від відомої тим, що дозволяє для кожного

спектру частоти вищих гармонік струму врахувати кут зсуву за фазою падіння напруги, викликаного дією зовнішнього магнітного поля від струмів в сусідніх трелеях шинопровода, який дорівнює $\arctg(X_k/R_k)$. Нев'язка втрати напруги за вдосконаленою математичною моделлю та результатами польового розрахунку при основній гармоніці струму складає $|\delta\Delta U_1| \leq 0,02\%$, при врахуванні вищих гармоніках струму – $|\delta\Delta U_{рез}| \leq 0,14\%$. Засобами експериментального дослідження доведено адекватність та високу точність ($3,03 \div 8,57\%$ в залежності від $\cos\varphi$) запропонованого підходу щодо визначення активного та реактивного опорів й електромагнітних параметрів трелейного шинопровода.

В четвертому розділі запропонована імітаційна модель взаємопов'язаних електромагнітних процесів між електроприводом механізму переміщення та струмопровідними елементами мостового крана, яка відрізняється тим, що дозволяє за даними розрахунку польової моделі використовувати інтегровані параметри трелеїв шинопровода та визначити їх електромагнітні параметри в залежності від відстані розташування мостового крана до точки живлення трелеїв шинопровода. На прикладі роботи механізму переміщення існуючого мостового крана 32т механічного цеху ТОВ «ЗЛМЗ» м. Запоріжжя проведено дослідження взаємопов'язаних електромагнітних процесів між електроприводами механізму переміщення мостового крану та трелеями шинопровода. Встановлені закономірності моменту асинхронного електроприводу від втрат напруги в трелеях шинопровода, що дозволяють, як при основній так і при вищих гармоніках струму, визначити максимальну допустиму відстань переміщення мостового крану до точки підживлення секції трелеїв шинопровода, при якій забезпечується безаварійна робота електроприводу мостового крану, а також визначити кількість точок підживлення секцій трелеїв шинопровода та відстані між ними, що забезпечить однаковий рівень втрат напруги та активних втрат в трелеях шинопровода при основній гармоніці і з врахуванням вищих гармонік струму навантаження.

На основі теоретичного дослідження були розроблені рекомендації щодо зниження втрат напруги та активних втрат в тролєях шинопровода при роботі частотно-регульованого електроприводу механізмів мостового крану.

Результати дисертаційних досліджень впроваджені та використані на ТОВ "Запорізький ливарно-механічний завод" м. Запоріжжя (гірничо-металургійної групи ТОВ «Метінвест Холдинг»), що забезпечило збереження проектних показників втрат напруги та активних втрат в тролєях шинопровода живлення мостового крану після модернізації на частотно-регульований електропривод.

Ключові слова: тролейний шинопровід, електромагнітне поле, чисельне моделювання, активний і індуктивний опір, падіння напруги, електромагнітні процеси, гармонійний склад струмів.

Список публікацій за темою дисертації

Статті у закордонних періодичних виданнях, занесених до міжнародних наукометричних баз даних:

1. Kotsur, M. I. New approach for voltage drop estimation in the busbars of workshop networks at higher current harmonics influence [Text] / M. I. Kotsur, D. S. Yarymbash, Yu.S. Bezverkhnya, I.M. Kotsur // Problemele energeticii regionale. – 2019. - №1(39). – P. 43-56. – Режим доступу: DOI: 10.5281/zenodo.2650419. (*Web of Science, Ulrich's Periodicals Directory, ProQuest LLC, EBSCO*)

2. Kotsur, M. I. Accuracy Improvement for the Determination of Parameters and Voltage Drops in Busbars, Considering the Networks Power Factor [Text] / M. I. Kotsur, D. S. Yarymbash, Yu.S. Bezverkhnya, I.M. Kotsur // Problemele energeticii regionale. – 2021. - №3(51). – P. 37-52. – Режим доступу: DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.3-51.04>. (*Scopus, Web of Science, Ulrich's Periodicals Directory, ProQuest LLC, EBSCO*)

Статті у періодичних виданнях, включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України:

3. Bezverkhnia, Yu. S. A voltage loss preliminary estimation in ac busbars [Text] / Yu. S. Bezverkhnia // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho

Universytetu – 2019 – no. 4. – P. 73-78. DOI:10.29202/nvngu/2019-4/13 (*Scopus, Ulrich's Periodicals Directory, ProQuest LLC, ReserchBib, EBSCO*)

Статті у фахових періодичних виданнях, включених до категорії «Б» Переліку наукових видань України:

4. Дивчук, Т. Э. Подход к определению токов холостого хода силовых трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами [Текст]/ Т. Э. Дивчук, Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килымник, М. И. Коцур, Ю. С. Безверхняя // *Электротехника и электроэнергетика*. – 2017. – № 2. - С. 56-66. – Режим доступа : DOI : [10.15588/1607-6761-2017-2-6](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2017-2-6) (*Ulrich's Periodicals Directory, ReserchBib, DOAJ, Google Scholar та ін.*)

5. Дивчук, Т.Е. Уточнючий підхід до визначення функціональних залежностей відносних магнітних проникностей анізотропних холоднокатаних електротехнічних сталей [Текст]/ Т.Е. Дівчук, Д.С. Ярымбаш, С.Т. Ярымбаш, І.М. Килимник, М. І. Коцур, Ю. С. Безверхняя // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2018. – N 2. - С. 6-15. – Режим доступу : DOI : [10.15588/1607-6761-2018-2-1](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2018-2-1). (*Ulrich's Periodicals Directory, ReserchBib, DOAJ, Google Scholar та ін.*)

6. Коцур, М.І. Особливості польового моделювання електромагнітних процесів тролейного шинопровода [Текст] / Коцур, М.І., Ярымбаш, Д.С., Безверхняя, Ю.С., Дівчук, Т.Є. // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2021. – № 1. - С. 46-60. – Режим доступу : DOI : [10.15588/1607-6761-2021-1-5](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-1-5) . (*Ulrich's Periodicals Directory, ReserchBib, DOAJ, Google Scholar та ін.*)

Статті у матеріалах міжнародних конференцій періодичних виданнях України, занечених до міжнародних наукометричних баз даних:

7. Kotsur, M. I. Increasing of Thermal Reliability of a Regulated Induction Motor in Non-Standard Cycle Time Conditions [Text] / M. I. Kotsur, I.M. Kotsur, Yu. Bezverkhnia, D. Andrienko // *IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), November 15th - 17th, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, 2017, pp. 88-91. DOI:[10.1109/MEES.2017.8248960](https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248960)* (*Scopus, Web of Science*)

8. Kotsur, M. Speed Synchronization Methods of the Energy-Efficient Electric Drive System for Induction Motors [Text] / M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur, Yu. Bezverkhnia // IEEE: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), February 20-24, Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 304-307 DOI:[10.1109/TCSET.2018.8336208](https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336208) (Scopus, *Web of Science*)

9. Yarymbash, D. Parameters Determination of the Trolley Busbars by Electromagnetic Field Simulation [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, Yu. Bezverkhnia, I. Kotsur // IEEE: 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), September 10-14, Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 76-79. DOI: [10.1109/IEPS.2018.8559576](https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559576) (Scopus, *Web of Science*)

10. Kotsur, M. Determination of a busbar's parameters by electromagnetic field simulation [Text] / M.I. Kotsur, D.S. Yarymbash, Yu.S. Bezverkhnya, I.M. Kotsur // *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-4, doi: [10.1109/PAEP49887.2020.9240811](https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240811) (Scopus, *Web of Science*)

Тези доповідей у збірниках конференцій:

11. Безверхня Ю.С. Дослідження параметрів шинопроводів цехових мереж в умовах дії вищих гармонік струму засобами польового моделювання [Текст] / Ю.С. Безверхня // Тиждень науки: наук: щорічна науково-практична конференція, 15-19 квітня 2019р.: тези доп./Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – С. 83-85.

12. Безверхня Ю.С. Постановка задачі щодо оптимізації конструктивних особливостей шинопроводів [Текст] / Ю.С. Безверхня // Тиждень науки: наук: щорічна науково-практична конференція, 18-21 квітня 2017р.: тези доп./Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. – С. 350-351.

ABSTRACT

Bezverkhnia Yu. S. Approach improvements of trolley busbar parameters of power shop supply systems effected by nonlinear loads - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of PhD degree on a specialty 141 - Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics - National University "Zaporizhzhia Polytechnic", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Zaporizhzhia, 2021.

Object of research are electromagnetic processes in trolley busbars of shop power supply systems effected by harmonic components of load current.

Subject of research are electromagnetic parameters of trolley busbars of shop power supply systems effected by nonlinear loads.

The dissertation work is devoted to the decision of the actual scientific and applied problem directed on improvement of approaches of modeling of electromagnetic processes and increase of accuracy of definition of parameters of a trolley busbar taking into account influence of harmonic components of loading current.

The introduction substantiates the relevance of research objectives, shows the relationship of work with scientific programs, plans, topics, provides scientific novelty and formulates the practical significance of the results.

In the first chapter is decided the existing methods of calculation of resistance and reactance and electromagnetic parameters of trolley busbars based on field modeling do not provide high accuracy and efficiency. It doesn't take into account the presence of harmonic current components. Other methods of calculating the parameters of trolley busbars, based on empirical dependencies and used in engineering practice, has assumptions about the absence of skin effects, proximity effects, surface and other edge effects. Also, the known methods do not take into account the electrophysical and nonlinear properties of conductor materials. There are no studies on the comparative

analysis of resistance and reactance and electromagnetic parameters of existing trolley shape. Insufficient study of electromagnetic processes in the presence of higher current harmonics in the conductors of the busbar, the ratio of voltage drop and active losses for different shapes of trolleys of the busbar from the spectra of frequencies and amplitudes k -th harmonics of current and coefficient of harmonic distortions.

In the second chapter the method of field calculation is improved, on the basis of which the mathematical two-dimensional field model of electromagnetic processes in elements of a design of a trolley busbar in frequency statement of a problem is offered. It allows in comparison with the spatial time-depend model of the electromagnetic field with high accuracy (1,88%÷2,06%) and the efficiency of the numerical implementation for each corresponding amplitude and frequency k -th load current harmonics to determine the resistance and reactance and electromagnetic parameters of the trolley busbar taking into account their design features, nonlinearity of magnetic and electrophysical properties of materials, skin effect, proximity effect, surface and other edge effects. According to the results of the field calculation, the ratio of voltage drop and active losses for different shapes of busbar trolleys from the spectra of frequencies and amplitudes was established for k -th harmonics of current and coefficient of harmonic distortions. It allows to reveal degree and character of influence on asymmetry of voltage drop and parameters of trolleys busbar. A research and comparative analysis of resistance and reactance L, W, I, U, X- shapes of busbar trolleys taking into account the influence of skin effect, proximity effect, surface and other edge effects. It is established that the most optimal form of steel and copper trolleys of a busbar is an angular form of trolleys (L-shape). It provides the lowest value of resistance and reactance, active losses and voltage drops, as well as the lowest level of asymmetry between the phases of the busbar, both at the main and at higher current harmonics. It is established, that in the presence of higher current harmonics, the parameters (resistance and reactance) of the busbar trolleys does not depend on the amplitude k -th harmonics of current, and depend only on their frequency. The value of the voltage drop at certain parameters of the busbar trolleys, taking into account the effect of the skin effect, the effect of proximity, surface, and other edge effects is

directly proportional to the amplitude k -th current harmonics. The level of voltage drop asymmetry for all shapes of phase trolleys busbar is caused by the asymmetry of their parameters. An algorithm is proposed that allows to determine the functional dependence of voltage drop based on field modeling data, taking into account the design features of trolley busbar (trolley shape, their location, with and without shielding elements) also skin effect, proximity effect, surface and other edge effects from the frequency and amplitude of the higher current harmonics. The functional dependence is presented in the form of a bicubic polynomial, and allows for the operating spectra and amplitudes of the higher current harmonics to select the required values of the polynomial coefficients without spending time on field modeling.

The third chapter improves the approach to determine the resistance and reactance and electromagnetic parameters of the trolley busbar, taking into account the harmonic components of the load current, design features of trolleys, nonlinearity of magnetic and electrophysical properties of materials, skin effect, proximity effect, surface and other edge effects. Based on this approach, a new methodology is proposed. This allows with high accuracy and efficiency without spending time on field modeling, for each k -th current harmonic allows to determine the value of resistance, reactance and voltage drop taking into account and without taking into account the external magnetic field, regardless of the shape and location of trolleys, distance between trolleys and the number of phases of the busbar. Improved mathematical model for determining voltage drops in busbar trolleys depending on the network power factor. It differs from that known in that it allows for each frequency spectrum of the higher harmonics of the current to take into account the phase shift angle of the voltage drop caused by the external magnetic field from the currents in adjacent trolleys of the busbar, which is equal to $\arctg(X_k/R_k)$. Error voltage drops according to the improved mathematical model and the results of field calculation at the fundamental harmonic of the current is $|\delta\Delta U_1| \leq 0,02\%$, taking into account the higher current harmonics – $|\delta\Delta U_{pe3}| \leq 0,14\%$. Adequacy and high accuracy have been proved by means of experimental research ($3,03 \div 8,57\%$ depending on $\cos\varphi$) of the

proposed approach for determining the resistance, reactance and electromagnetic parameters of the trolley busbar.

In the fourth chapter the simulation model of interconnected electromagnetic processes between the electric drive of the mechanism of movement and current-carrying elements of the bridge crane is offered. It differs in that it allows the calculation of the field model to use the integrated parameters of the busbar trolleys and determine their electromagnetic parameters depending on the distance of the bridge crane to the power supply point of the busbar trolleys. On the example of the mechanism of movement of the existing bridge crane 32t of the mechanical shop of LLC “Zaporizhzhia Foundry and Mechanical Plant”, Zaporizhzhia, a study of interconnected electromagnetic processes between the electric drives of the mechanism of movement of the bridge crane and trolleys of the busbar. The regularities of the torque of the induction motor from voltage drops in the trolleys of the busbar are established. This allows, both at the main and at higher current harmonics, to determine the maximum allowable distance of movement of the bridge crane to the feed point of the trolley section of the busbar, which ensures trouble-free operation of the electric drive of the bridge crane. And also it allows to define quantity of feeding points of sections of trolleys of a busbar and distance between them that will provide the same level voltage drop and active losses in trolleys of a busbar at the basic harmonic and taking into account higher harmonics of loading current.

Based on the theoretical research, recommendations were developed to reduce voltage drop and active losses in the trolleys of the busbar during the operation of the frequency-regulated electric drive of the bridge crane mechanisms.

The results of this work were implemented and used at LLC “Zaporizhzhia Foundry and Mechanical Plant”, Zaporizhzhia (mining and metallurgical group of Metinvest Holding LLC). It ensured the preservation of the design indicators of voltage drop and active losses in the trolleys of the busbar power supply of the bridge crane after the modernization of the frequency-regulated electric drive.

Keywords: trolley busbar, electromagnetic field, numerical simulation, resistance and inductance, voltage drop, electromagnetic processes, harmonic current composition.

References

Articles in foreign periodicals listed in international scientometric databases:

1. Kotsur, M. I. New approach for voltage drop estimation in the busbars of workshop networks at higher current harmonics influence [Text] / M. I. Kotsur, D. S. Yarymbash, Yu.S. Bezverkhnya, I.M. Kotsur // *Problemele energeticii regionale*. – 2019. - №1(39). – P. 43-56. – Режим доступа: DOI: 10.5281/zenodo.2650419. (*Web of Science, Ulrich's Periodicals Directory, ProQuest LLC, EBSCO*)

2. Kotsur, M. I. Accuracy Improvement for the Determination of Parameters and Voltage Drops in Busbars, Considering the Networks Power Factor [Text] / M. I. Kotsur, D. S. Yarymbash, Yu.S. Bezverkhnya, I.M. Kotsur // *Problemele energeticii regionale*. – 2021. - №3(51). – P. 37-52. – Режим доступа: DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.3-51.04>. (*Scopus, Web of Science, Ulrich's Periodicals Directory, ProQuest LLC, EBSCO*)

Articles in periodicals included in category "A" of the List of scientific professional publications of Ukraine:

3. Bezverkhnia, Yu. S. A voltage loss preliminary estimation in ac busbars [Text] / Yu. S. Bezverkhnia // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu* – 2019 – no. 4. – P. 73-78. DOI:10.29202/nvngu/2019-4/13 (*Scopus, Ulrich's Periodicals Directory, ProQuest LLC, ReserchBib, EBSCO*)

Articles in professional periodicals included in category "B" of the List of scientific publications of Ukraine:

4. Divchuk, T. E. Approach to determination of no load current of three-phase power transformers with plane rods magnetic systems [Text]/ T. E. Divchuk, D. S. Yarymbash, S. T. Yarymbash, I. M. Kylymnyk, M. I. Kotsur, Y. S. Bezverkhnia // *Electrical Engineering and Power Engineering*. – 2017. – № 2. - С. 56-66. – Режим

доступа : DOI : [10.15588/1607-6761-2017-2-6](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2017-2-6) (*Ulrich's Periodicals Directory, ReserchBib, DOAJ, Google Scholar та ін.*)

5. Divchuk, T. E. An adjusting approach to the determination of the permeability functional dependencies of anisotropic cold-rolled electrotechnical steels [Text]/ T. E. Divchuk, D. S. Yarymbash, S. T. Yarymbash, I. M. Kylymnyk, M. I. Kotsur, Y. S. Bezverkhnia // *Electrical Engineering and Power Engineering*. – 2018. – N 2. - С. 6-15. – Режим доступу : DOI : [10.15588/1607-6761-2018-2-1](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2018-2-1). (*Ulrich's Periodicals Directory, ReserchBib, DOAJ, Google Scholar та ін.*)

6. Kotsur, M. I. Features of field modeling of electromagnetic processes of trolley busbar [Text] / M. I. Kotsur, D. S. Yarymbash, Yu.S. Bezverkhnya, T. E. Divchuk // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2021. – № 1. - С. 46-60. – Режим доступу : DOI : [10.15588/1607-6761-2021-1-5](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-1-5) . (*Ulrich's Periodicals Directory, ReserchBib, DOAJ, Google Scholar та ін.*)

Articles in the materials of international conferences of periodicals of Ukraine, recorded in international scientometric databases:

7. Kotsur, M. I. Increasing of Thermal Reliability of a Regulated Induction Motor in Non-Standard Cycle Time Conditions [Text] / M. I. Kotsur, I.M. Kotsur, Yu. Bezverkhnia, D. Andrienko // *IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, November 15th - 17th, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, 2017, pp. 88-91. DOI:[10.1109/MEES.2017.8248960](https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248960) (Scopus, *Web of Science*)

8. Kotsur, M. Speed Synchronization Methods of the Energy-Efficient Electric Drive System for Induction Motors [Text] / M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur, Yu. Bezverkhnia // *IEEE: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, February 20-24, Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 304-307 DOI:[10.1109/TCSET.2018.8336208](https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336208) (Scopus, *Web of Science*)

9. Yarymbash, D. Parameters Determination of the Trolley Busbars by Electromagnetic Field Simulation [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, Yu. Bezverkhnia, I. Kotsur // *IEEE: 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and*

Power Systems (IEPS), September 10-14, Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 76-79.
DOI: [10.1109/IEPS.2018.8559576](https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559576) (Scopus, *Web of Science*)

10. Kotsur, M. Determination of a busbar's parameters by electromagnetic field simulation [Text] / M.I. Kotsur, D.S. Yarymbash, Yu.S. Bezverkhnya, I.M. Kotsur // 2020 *IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-4, doi: [10.1109/PAEP49887.2020.9240811](https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240811) (Scopus, *Web of Science*)

Theses of reports in conference proceedings:

11. Research of parameters of busbars of shop networks in the conditions of action of higher harmonics of current by means of field modeling [Text] / Yu. S. Bezverkhnya // *Week of Science: Sciences: annual scientific-practical conference*, April 15-19, 2019. - Zaporizhzhia: ZNTU, P. 83-85

12. Statement of the problem of optimizing the design features of busbars [Текст] / Yu.S. Bezverkhnya // *Week of Science: Sciences: annual scientific-practical conference*, April 18-21, 2017p. - Zaporizhzhia: ZNTU, P. 350-351.

ЗМІСТ

	С.
Зміст.....	2
Перелік умовних позначень.....	4
Вступ.....	5
1 Аналіз особливостей тролейних шинопроводів у системах цехового електропостачання як об'єктів дослідження.....	13
1.1 Загальні конструктивні характеристики тролейних шинопроводів.....	15
1.2 Електромагнітні параметри шинопроводів та методи їх дослідження...	22
1.3 Способи зменшення впливу гармонійних складових струму та напруги та компенсація реактивної потужності в системах цехового електропостачання.....	30
1.4 Висновки до першого розділу і постановка задачі досліджень.....	39
2 Дослідження електромагнітних процесів в активних елементах тролейного шинопровода засобами польового моделювання.....	42
2.1 Особливості польового моделювання електромагнітних процесів в активних елементах тролейного шинопровода.....	42
2.2 Порівняльний аналіз параметрів різних форм тролей шинопровода.....	60
2.3 Дослідження електромагнітних параметрів тролей за наявності екрануючого кожуха шинопровода.....	77
2.4 Дослідження та порівняльний аналіз електромагнітних параметрів при різних формах тролей шинопровода.....	90
2.5 Висновки до другого розділу.....	101
3 Розробка нових та удосконалення існуючих підходів щодо визначення параметрів та втрат напруги в тролєях шинопровода.....	103
3.1 Розробка нового підходу щодо визначення параметрів тролейного шинопровода.....	103

3.2. Вдосконалення аналітичного визначення втрат напруги в троліях шинопровода.....	123
3.3 Валідація теоретичних та експериментальних даних втрат напруги в троліях шинопровода.....	136
3.4 Висновки до третього розділу.....	146
4 Розробка рекомендацій щодо зниження втрат напруги та активних втрат в троліях шинопровода від дії вищих гармонік струму при роботі механізму переміщення мостового крану.....	149
4.1 Особливості імітаційного моделювання електромагнітних процесів в троліях шинопровода при роботі механізму переміщення мостового крану.....	149
4.2 Дослідження електромагнітних процесів в троліях шинопровода при роботі механізму переміщення мостового крану.....	156
4.3 Рекомендації щодо зниження втрат напруги та активних втрат в троліях шинопровода від дії вищих гармонік струму при роботі мостового крану.....	171
4.4 Висновки до четвертого розділу.....	172
Висновки.....	174
Перелік джерел посилання.....	177
Додаток А Принципова електрична схема живлення струмоприймачів механічного цеху ТОВ «ЗЛМЗ».....	199
Додаток Б Конфігурація тролієвого шинопровода механічного цеху ТОВ «ЗЛМЗ».....	201
Додаток В Акти впровадження.....	204
Додаток Г Список публікацій за темою дисертації.....	207