

Одеський національний політехнічний університет
Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СЕМЕНЮГ ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.311.13

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ПОКРАЩЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ
СУМІСНОСТІ В КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ІЗ
ЧАСТОТНИМ УПРАВЛІННЯМ**

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

_____ О. М. Семенюг

Науковий керівник: Бесараб Олександр Миколайович, кандидат технічних наук, доцент

Одеса – 2019

АНОТАЦІЯ

Семенов О. М. Методи та моделі та покращення електромагнітної сумісності в кабельних лініях електроприводів із частотним управлінням. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 „Електротехнічні комплекси та системи”. – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2019. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2019.

Робота присвячена розв’язанню задачі збільшення довжини кабельних ліній між перетворювачем частоти і електродвигуном в частотно-регульованих електроприводах шляхом розробки методів із забезпечення їх електромагнітної сумісності (ЕМС).

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження. Зазначено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Наведено відомості про апробацію роботи, особистий внесок здобувача та публікації. Зазначено зв’язок роботи з науковими програмами, темами.

У першому розділі виконано аналіз причин виникнення спотворень форми напруг та струмів в лініях електропередач та наслідків їх впливів на роботу частотно-регульованих електроприводів. На підставі виконаного аналізу визначено мету та задачі роботи. Показано, що основною вадю ліній передачі між широтно-імпульсним перетворювачем (ШІП) та двигуном є спотворення форми напруги на затискачах двигуна по відношенню до напруги на виході ШІП. При цьому виникають вищі гармоніки, які вважаються причиною спотворень напруги. Для боротьби із вищими гармоніками та забезпечення ЕМС використовуються різноманітні фільтри. Однак, на сьогодні відсутня обґрунтована методика виборів фільтрів ЕМС, яка враховує весь комплекс факторів, впливають на виникнення спотворень, таких як: довжина кабелю, його тип і параметри, а також частота комутації ключів інвертора. Практично єдиним параметром, за яким виробники фільтрів ЕМС рекомендують

здійснювати їх вибір, є номінальний струм двигуна. Водночас, теорія ліній з розподіленими параметрами показує, що спотворення форми сигналів в них виникає за рахунок наявності розподілених по довжині індуктивності та ємності. Ці параметри є невід'ємними для будь якої довгої лінії. Спотворення в ній обумовлені самою фізичною природою лінії, в наслідок чого фазова швидкість розповсюдження хвильових процесів в звичайній лінії залежить від частоти. Це призводить до того, що при наявності на вході лінії джерела напруги несинусоїдальної форми (ШП в частотно-керованому електроприводі), фазова швидкість хвиль напруги вищих гармонік буде вищою, ніж така ж швидкість нижчих гармонік. Це призводить до неодночасного досягнення хвилями різних гармонік кінця лінії, до якого підімкнено двигун. Наслідком цього є спотворення форми напруги на виході лінії передачі енергії, що й відомо як «проблема довгого кабелю». Але хвильові процеси в трифазних кабелях є недостатньо дослідженими. Для розв'язання проблеми довгого кабелю та підвищення електромагнітної сумісності такі дослідження є необхідними. Тому розробка математичних моделей та методів покращення електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та електричних двигунів в частотно-регульованих електроприводах є актуальною науково-практичною задачею.

У другому розділі побудовано математичні моделі для розрахунку напруг та струмів в лініях електропередач частотно-регульованих електроприводів в усталеному синусоїдальному режимі роботи. Показано, що для лінії із трьома провідниками (трифазний кабель) хвильовий процес є накладанням трьох типів коливань. Перший тип коливань, що характеризується відповідним хвильовим опором та коефіцієнтом розповсюдження – це власні коливання за рахунок напруги, що підводиться до провіднику лінії. Два інших типи коливань виникають за рахунок напруг та струмів у зв'язаних провідниках. Ці додаткові типи коливань мають свої власні вторинні параметри – хвильовий опір та коефіцієнт розповсюдження. Ці параметри відмінні від параметрів коливань

першого типу, що призводить до появи трьох складових падаючих та відбитих хвиль, які розповсюджуються з різною швидкістю.

Розроблено метод аналітичного розрахунку коефіцієнту корисної дії лінії, який оцінювався за відношенням активної потужності, що виділяється на навантаженні кабелю до активної потужності джерела живлення на вході, для визначення умов передачі електричної енергії між частотними перетворювачами та двигунами з мінімальними втратами.

Досліджено вплив взаємних зв'язків між провідниками кабелю на його коефіцієнт корисної дії. Показано, що: наявність магнітних і гальванічних зв'язків між провідниками лінії згладжує залежність коефіцієнту корисної дії від активної та реактивної складових опору навантаження і забезпечує високі значення коефіцієнту корисної дії в широкому діапазоні активних та реактивних навантажень; максимум коефіцієнту корисної дії досягається при опорах навантаження, більших за значенням, ніж активна і реактивна складові хвильового опору; хвильовий опір суттєво не впливає на коефіцієнт корисної дії.

Обґрунтовано, що для практичного використання розроблених моделей необхідно розроблення методу експериментального визначення первинних параметрів лінії, оскільки для визначення первинних параметрів розрахунковим шляхом треба знати точні значення діелектричної та магнітної проникності матеріалів, з яких виготовлено кабель. Як правило, такі значення або взагалі не вказуються заводом виробником, або вказуються в межах певного діапазону. Тому аналітичні методи розрахунку первинних параметрів не можуть забезпечити прийнятної точності.

У третьому розділі розроблено метод експериментального визначення первинних параметрів ліній електропередач з двома та трьома провідниками. Показано, що для визначення первинних параметрів трифазної лінії не обов'язково використовувати відповідну математичну модель для такої лінії. Для цього достатньо провести експеримент таким же чином, як і для двопровідної лінії, використавши будь-які два проводи трифазної лінії.

Запропонований в роботі метод експериментального визначення первинних параметрів є простим в організації та проведенні експерименту та не потребує спеціальних електричних вимірювальних приладів, окрім вольтметра, амперметра, фазометра та вимірювача частоти.

Для перевірки отриманих в роботі результатів було проведено експеримент по визначенню первинних параметрів кабелю КВБбШВ 4x1,5 довжиною 3010 метрів. Верифікація методу проводилась співставленням експериментальних та розрахункових (із знайденими первинними параметрами) значень розподілу напруг на виході кабелю різної довжини. Експериментальні та розрахункові дані різняться не більше, ніж на 5 відсотків, що свідчить про те, запропонований в розділі метод експериментального визначення первинних параметрів ліній електропередач з двома та трьома провідниками може бути використаний в асинхронному частотно-керованому електроприводі.

У четвертому розділі на підставі аналізу типів коливань запропоновано метод покращення електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та електричних двигунів в частотно-регульованих електроприводах та здійснено перевірку його роботи. Показано, що основною причиною виникнення проблеми електромагнітної сумісності в довгих лініях зв'язку частотних електроприводів є спотворення форми напруги на виході лінії. Таким чином, розв'язання цієї проблеми можливе лише за умови роботи лінії електропередачі в режимі без спотворень.

Математично доведено, що в багатожильних кабельних лініях робота в режимі без спотворень неможлива, тому що неможливо одночасно досягти цього режиму для різних типів хвильового процесу. Причиною є різні значення фазових швидкостей коливань різних типів процесу. Робота в режимі без спотворень можлива лише для одножильного кабелю, в якому існує тільки один тип коливань із однією фазовою швидкістю.

На підставі цього висновку запропоновано методіку покращення електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та електричних двигунів, яка полягає в використанні системи окремих екранованих одна від

одної одножильних кабельних ліній, кожна з яких працює в режимі без спотворень.

Для досягнення умови роботи кабельної лінії в режимі без спотворень рекомендовано використовувати штучне підвищення питомої індуктивності за рахунок включення вздовж довжини кабелю додаткових котушок індуктивності. Враховуючи конструктивні особливості одножильних броньованих кабелів, ці котушки слід включати в розрив броні кабелю по його поверхні.

Для перевірки запропонованої методики покращення електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та електричних двигунів було досліджено спотворення форми прямокутного сигналу від ШПІ при його розповсюдженні вздовж кабелю заданої довжини. Дослідження виконано розрахунковим шляхом для двох кабельних ліній: звичайного одножильного кабелю, та кабелю без спотворень, питома індуктивність якого штучно збільшена.

За результатами проведених досліджень, форму вихідної напруги можна вважати прийнятною для роботи двигунів в електроприводі з частотним управлінням при довжині звичайного кабелю 65 метрів, а для кабелю без спотворень – в п'ятеро більшої довжини – 320 метрів.

Таким чином, в дисертаційній роботі отримано нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі, яка полягає в розробці методу та моделей покращення електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та електричних двигунів в частотно-регульованих електроприводах.

Ключові слова: частотний електропривод, електромагнітна сумісність, кабельна лінія, лінія без спотворень, проблема довгого кабелю.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

[1] Д. А. Маевский, А. Н. Семенюг, та Г. Н. Кучеренко, «Установившиеся режимы в связанных двухпроводных линиях передачи», *Электротехнические и компьютерные системы*, № 14 (90), с. 61 – 66, 2014.

[2] Д. А. Маевский, А. Н. Семенюг, та Г. Н. Кучеренко, «Влияние взаимных связей между проводниками кабеля на режим работы электрических сетей» *Электротехнические и компьютерные системы*, № 19 (95), с. 142 – 145, 2015.

[3] D. Maevsky, E. Maevskaya, and A. Semenyug, «Influence of connections between Three-Phase cable conductors on quality of electrical energy», *Science. Business. Society*, Vol. 1, №. 4/2016, p. 7 – 10, 2016.

[4] D. Maevsky, A. Savieliev, E. Maevskaya, A. Semenyug, and S. Horokholynskyi, «Coefficient of efficiency of coupled electric power transmission lines», *Proceedings of 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*, p. 340-345, 2018. (Видання індексується у SCOPUS)

[5] Д. А. Маєвський, О. М. Бесараб, О. М. Семенюг, та О. Ю. Маєвська «Експериментальне визначення первинних параметрів ліній електропередач», *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, № 30 (106), с. 31 – 38, 2019.

[6] Семенюг. О. М. «Використання ліній без спотворень як спосіб розв'язання проблеми довгого кабелю», *Вісник Львівської Політехніки, серія «Радіоелектроніка та телекомунікації»*, № 909, с. 82 – 91, 2019.

Наукові праці, в яких додатково висвітлено результати дисертації:

[7] А. Н. Семенюг, «Схема замещения трехфазного электрического кабеля с учетом взаимных влияний между проводниками», *Электротехнические и компьютерные системы*, № 21 (97), с. 43 – 48, 2016.

[8] Д. А. Маевский, Е. Ю. Маевская, А. Н. Семенюг, и С. Н. Огинская, «Особенности несимметричных режимов работы трехфазного кабеля с учетом связей между его проводниками», *Электротехнические и компьютерные системы*, № 22 (98), с. 84 – 90, 2016.

[9] Д. А. Маевский, Е. Ю. Маевская, А. Н. Семенюг, и А. А. Савельев «Коэффициент полезного действия двухпроводного электрического кабеля с учетом взаимных влияний между его проводниками», *Электротехнические и компьютерные системы*, № 24 (100), с. 91 – 96, 2017.

Наукові праці апробаційного характеру:

[10] Д. А. Маевский, А. Н. Семенюг, Е. Ю. Маевская, и Г. Н. Кучеренко, «Математическое моделирование электромагнитных процессов в экранированных кабелях», *Тези доповідей Десятої міжнародної науково-практичної конференції Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2015*, с. 183 – 187.

[11] О. М. Семенюг, «Спосіб покращення електромагнітної сумісності кабельної лінії з широтно-імпульсним перетворювачем і асинхронним електродвигуном», *Патент України на корисну модель*, № u201907202; заявл. 27.06.2019; опубл. 20.08.2019.

ABSTRACT

Semenyug O. M. Methods and models for improvement of electromagnetic compatibility in cable lines of electric drives with frequency control. – Qualification research paper printed as manuscripts.

Thesis is for obtainment of a candidate degree in technical sciences on the specialty 05.09.03 „Electrical Engineering Complexes and Systems”. – Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2019. – Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, 2019.

The paper deals with the problem of increasing the length of cable lines between a frequency converter and an electric motor in frequency-controlled electric drives by developing methods to ensure their electromagnetic compatibility.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, formulates the purpose and objectives of the research. The scientific novelty and practical value of the obtained results are outlined. Provides information on job validation, personal contribution of the applicant and publications. The connection with work with scientific programs, topics is indicated.

The first section analyzes the causes of distortions in the form of voltages and currents in power lines and the consequences of their effects on the operation of frequency-controlled electric drives. Purpose and tasks of the work are determined on

the basis of the performed analysis. It is shown that the main disadvantage of the transmission lines between the PWM and the motor is the distortion of the voltage on the clamps of the motor relative to the PWM voltage. Higher harmonics occur, which are considered to be the cause of voltage distortions. Various EMC filters are used to combat higher harmonics. However, to date, there is no sound methodology for selecting EMC filters, which takes into account the whole set of factors, affecting the appearance of distortions, such as: cable length, its type and parameters, and switching frequency of the inverter keys. Almost the only parameter by which EMC filter manufacturers recommend their choice is the rated motor current. At the same time, the theory of distributed parameter lines shows that the distortion of the signal shape in them arises due to the presence of distributed inductance and capacitance. These parameters are inalienable for any long line. The distortions in it are due to the very physical nature of the line, resulting in the phase velocity of propagation of wave processes in the ordinary line depending on frequency. This leads to the fact that in the presence of a line input voltage source of non-sinusoidal form (PWM in frequency-controlled electric drive), the phase velocity of the waves of higher harmonics will be higher than the same velocity of the lower harmonics. This results in different harmonics reaching the end of the line to which the motor is connected by waves. The result is a distortion of the voltage output line, known as the "long cable problem". But the wave processes in three-phase cables are not well understood. Such studies are necessary to address the problem of long cable and electromagnetic compatibility. Therefore, the development of mathematical models and methods for improving the electromagnetic compatibility of frequency converters and electric motors in frequency-controlled electric drives is an urgent scientific and practical task.

In the second section mathematical models for calculation of voltages and currents in power lines of frequency-regulated electric drives in steady sine-wave mode of operation are constructed. It is shown that for a three-conductor line (three-phase cable), the wave process is an overlay of three types of oscillations. The first type of oscillation, characterized by the corresponding wave resistance and

propagation coefficient, is its own oscillations due to the voltage supplied to the line conductor. The other two types of oscillations are due to voltages and currents in the coupled conductors. These additional types of oscillations have their own secondary parameters - wave resistance and propagation coefficient. These parameters are different from the oscillation parameters of the first type, which results in three constituent incident and reflected waves propagating at different speeds.

The method of analytical calculation of the efficiency of the line, which was estimated by the ratio of active power allocated on the load of the cable to the active power of the power source at the input, was developed to determine the conditions for the transmission of electricity between frequency converters and motors with minimum losses.

The effect of the interconnections between the conductors of the cable on its efficiency is investigated. It is shown that: the presence of magnetic and galvanic bonds between the conductors of the line smoothest the dependence of the efficiency coefficient on the active and reactive components of the load resistance and provides high values of the efficiency in a wide range of active and reactive loads; the maximum of the efficiency is reached at load resistances greater in value than the active and reactive components of the wave resistance; the wave resistance does not significantly affect the efficiency.

It is substantiated that for the practical use of the developed models it is necessary to develop a method of experimental determination of the primary parameters of the line, since in order to determine the primary parameters by calculation it is necessary to know the exact values of the dielectric and magnetic permeability of the materials from which the cable is made. As a rule, these values are either not specified by the manufacturer at all or specified within a certain range. Therefore, analytical methods for calculating the initial parameters cannot provide acceptable accuracy.

In the third section the method of experimental determination of primary parameters of two- and three-conductor power lines is developed. It is shown that it is not necessary to use the appropriate mathematical model for such a line to determine

the initial parameters of a three-phase line. It is sufficient to perform the experiment in the same way as for a two-wire line using any two wires of a three-phase line. The method of experimental determination of primary parameters proposed in the paper is simple in organizing and conducting the experiment and does not require special electrical measuring devices, except for the voltmeter, ammeter, phasemeter and frequency meter.

To verify the results obtained in the experiment, an experiment was conducted to determine the initial parameters of the cable KVBbShV 4x1.5 with a length of 3010 meters. The method verification was performed by comparing experimental and calculated (with found initial parameters) values of voltage distribution at the output of cable of different length. The experimental and calculated data differ by no more than 5 percent, indicating that the method proposed in the section for the experimental determination of the primary parameters of two- and three-wire transmission lines can be used in an asynchronous frequency-controlled electric drive.

In the fourth section, based on the analysis of the types of oscillations, a method of improving the electromagnetic compatibility of frequency converters and electric motors in frequency-controlled electric drives is proposed and its operation is tested. It is shown that the main cause of the problem of electromagnetic compatibility in long lines of frequency drives is the distortion of the voltage at the output line. Therefore, this problem can only be solved if the transmission line is operated without distortion.

It is mathematically proved that in multicore cable lines operation in the mode without distortion is impossible, because it is impossible to simultaneously achieve this mode for different types of wave process. The reason is different values of phase velocities of oscillations of different types of process. Operation without distortion is only possible for a single-core cable in which there is only one type of oscillation with a single-phase speed.

Based on this conclusion, a technique for improving the electromagnetic compatibility of frequency converters and electric motors is proposed, which consists

in using a system of separate shielded cable lines, each of which operates in a distortion-free mode.

It is recommended to use artificial increase of the specific inductance by attaching additional inductors along the cable length to achieve the condition of operation of the cable line without distortion. Considering the design features of single-core armored cables, these coils should be included in the rupture of the cable armor on its surface.

In order to test the proposed technique for improving the electromagnetic compatibility of frequency converters and electric motors, the distortion of the rectangular PWM signal during its propagation along a predetermined cable was investigated. The study was performed by calculation for two cable lines: ordinary single-core cable and cable without distortion, whose specific inductance is artificially increased.

According to the research, the output voltage can be considered acceptable for motors in frequency-controlled electric motors at the length of a normal cable of 65 meters, and for a cable without distortion at five longer lengths - 320 meters.

Thus, in the dissertation the new solution of the actual scientific and applied problem, which consists in the development of a method and models for improving the electromagnetic compatibility of frequency converters and electric motors in frequency-controlled electric drives, is obtained.

Keywords: frequency-controlled electric drive, electromagnetic compatibility, cable line, line without distortion, long cable problem.

THE LIST OF THE APPLICANT'S PUBLICATION BY DISSERTATION:

Proceedings where basic scientific results of thesis are published:

[1] D. A. Mayevsky, A. N. Semenyug, and G. N. Kucherenko, "Steady-state modes in coupled two-wire transmission lines", *Electrotechnical and computer systems*, No. 14(90), p. 61 – 66, 2014.

[2] D. A. Mayevsky, A. N. Semenyug, and G. N. Kucherenko, “Influence of mutual connections between cable conductors on the mode of operation of electric networks”, *Electrical and computer systems*, No. 19(95), pp. 142 – 145, 2015.

[3] D. Maevsky, E. Maevskaya, and A. Semenyg, “Influence of connections between Three-Phase cable conductors on quality of electrical energy”, *Science. Business Society*. - Vol. 1, No. 4/2016, p. 7 – 10, 2016.

[4] Dmitry Maevsky, Artem Savieliev, Elena Maevskaya, Aleksandr Semenyug, and Serhii Horokholynskiyi, “Coefficient of efficiency of coupled electric power transmission lines”, *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*, p. 340-345, 2018. (Indexing in SCOPUS)

[5] D. A. Maevsky, O. M. Besarab, O. M. Semenyug, and O. Yu. Maevska, “Experimental value of the first parameters of linear power transmission”, *Electrotechnical and computer systems*, No. 30(106), p. 31 – 38, 2019.

[6] Semenyug O.M., “The use of lines without distortion as a way to solve the problem of long cable”, *Bulletin of Lviv Polytechnic, series "Radio electronics and telecommunications"*, № 909, p. 82 – 91, 2019.

Proceedings, which additionally reflect the scientific results of the thesis:

[7] Semenyug, A. N., “The equivalent circuit of a three-phase electric cable taking into account the mutual influences between the conductors”, *Electrical and computer systems*, No. 21(97), p. 43 – 48, 2016.

[8] D. A. Mayevsky, E. Yu. Maevskaya, A. N. Semenyug, and S. N. Oginskaya “Features of asymmetric operating modes of a three-phase cable, taking into account the connections between its conductors”, *Electrical and Computer system*, No. 22(98), p. 84

– 90, 2016.

[9] D. A. Mayevsky, E. Yu. Maevskaya, A. N. Semenyug, and A. A. Savelyev, “The coefficient of performance of a two-wire electric cable, taking into account the mutual influences between its conductors”, *Electrical and computer systems*, No. 24(100), p. 91 – 96, 2017.

Proceedings that certify an improvement of thesis materials:

[10] D. A. Maevsky, A. N. Semenyug, E. Yu. Maevskaya, and G. N. Kucherenko, “Mathematical modeling of electromagnetic processes in shielded cables”, *Mathematical and simulation systems modeling. MODS 2015: abstracts of the Tenth International Science-Practical Conference*, 2015, p. 183 – 187.

[11] O. M. Semenyug, “The Ukrainian patent for utility model. The way of reducing the electric-magnetic sum of cable lines with a pulse-width impulse override and asynchronous electric motor”, No. u201907202; declared 06/27/2019; publ. 20/08/2019.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	18
ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1 ПРИЧИНИ ВИНИКНЕННЯ СПОТВОРЕНЬ В КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ТА ЇХ ВПЛИВ НА РОБОТУ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ	26
1.1 Якість електричної енергії і її показники	27
1.2 Принципи роботи електроприводів із частотним управлінням	34
1.3 Методи та пристрої регулювання частоти напруги живлення електродвигунів	37
1.4 Аналіз проблеми довгого кабелю	40
1.5 Сутність проблеми визначення параметрів кабельних ліній електропередач	48
1.5 Висновки за першим розділом	50
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ НАПРУГ ТА СТРУМІВ В КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ	53
2.1 Загальна математична модель для кабелю з N провідниками	53
2.2 Математична модель розповсюдження струмів та напруг в кабелі із двома провідниками	55
2.3 Залежність коефіцієнту корисної дії кабелю від опору навантаження	60
2.4 Математична модель розповсюдження струмів та напруг в трифазному екранованому кабелі	62
2.4.1 Схема заміщення ділянки трифазного екранованого кабелю	63
2.4.2 Загальна математична модель процесу розповсюдження струмів напруг в провідниках трифазного екранованого кабелю	66

2.4.3 Математична модель процесу розповсюдження струмів і напруг в провідниках трифазного екранованого кабелю в усталеному синусоїдальному режимі	69
2.4.4 Загальний розв'язок рівнянь розповсюдження струмів і напруг в усталеному синусоїдальному режимі	71
2.4.4.1 Розв'язання рівнянь розповсюдження для напруг	73
2.4.4.2 Розв'язання рівнянь розповсюдження для струмів	83
2.4.5 Математична модель розрахунку струмів і напруг в провідниках кабелю при відомих струмах і напругах на їх початку	90
2.4.6 Математична модель розрахунку струмів і напруг в провідниках кабелю при відомих напругах на їх початку і опорах навантаження	91
2.4.7 Математична модель розрахунку струмів і напруг в провідниках кабелю при відомих напругах їх початку і опорах симетричного навантаження	96
2.5. Висновки за другим розділом	97
РОЗДІЛ 3 МЕТОД ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРВИННИХ ПАРАМЕТРІВ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ	99
3.1 Математична модель для експериментального визначення параметрів одножильного екранованого кабелю	100
3.2 Математична модель для експериментального визначення параметрів двошльового екранованого кабелю	102
3.3. Визначення параметрів трифазного екранованого кабелю	107
3.4 Метод експериментального визначення первинних параметрів кабелю	108
3.5 Перевірка методу експериментального визначення первинних параметрів кабелю	109
3.6 Висновки за третім розділом	111

РОЗДІЛ 4 МЕТОД ПОКРАЩЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ЧАСТОТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ В ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ	113
4.1 Спотворення в лініях зв'язку	113
4.2 Розробка методу покращення електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та електричних двигунів в частотно- регульованих електроприводах	116
4.3 Висновки за четвертим розділом	124
ВИСНОВКИ	126
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	128
ДОДАТКИ	141
Додаток А Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	142
Додаток Б Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	144

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Характерною особливістю світового технічного прогресу є вимога до постійного вдосконалення роботи і розширення функцій механізмів і машин. Особливо це стосується вимог, що несуть із собою так звані «індустріальні революції». Зокрема четверта індустріальна революція передбачає розвиток і злиття автоматизованого виробництва, обміну даних і виробничих технологій в єдину саморегульовану систему, з найменшим або взагалі відсутнім втручанням людини у виробничий процес. Досягнення цього неможливо без використання керованих електричних приводів. Сьогодні електроприводи із асинхронними двигунами є самими розповсюдженими в світі. В даний час широкого поширення в різних галузях промисловості набув частотно-регульований асинхронний привод. Найбільш оптимальне управління швидкістю обертання асинхронного двигуна може бути досягнуто тільки за рахунок плавної зміни частоти напруги живлення. Сучасні ШПП будуються з використанням широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) та дозволяють порівняно легко досягти плавності в зміні частоти, на відміну із використанням частотної модуляції (ЧМ). Але форма напруги живлення, що подається на електричний асинхронний двигун при цьому значно відрізняється від синусоїдальної. Ця напруга являє собою високочастотну послідовність прямокутних імпульсів різної полярності й тривалості однаковою амплітудою. На малих відстанях передача такої напруги проходить без ускладнень. Але характерною особливістю систем розподілу електроенергії є значна довжина живильних і розподільних електричних мереж, обумовлена тим, що виробниче обладнання розподілене по великій площі. В таких умовах довжини кабелів, що з'єднують ШПП із асинхронними двигунами досягають декількох сотень метрів. Головним недоліком таких систем, особливо при наявності кабелів значної довжини, є те, що вони є досить потужними джерелами електромагнітних завад та спотворень форми напруги, яка прикладена до двигунів.

Крім того, проходження імпульсного сигналу з крутим фронтом за рахунок прямокутного закону зміни електрорушійної сили (ЕРС) ШПІ викликає хвильові процеси в кабелі, що призводять до появи перенапруг на затискачах двигуна. Виникнення перенапруг створює негативний вплив на ізоляцію як обмоток двигуна, так і самого кабелю, що призводить до її передчасного зносу. А це, в свою чергу, може привести до пробую ізоляції і виходу з ладу усєї системи. Наявність високочастотних складових в спектрі напруги живлення призводить до виникнення додаткових втрат в сталі магнітопроводу двигуна, що в свою чергу, призводить до його підвищеного нагрівання і зниження його корисної потужності. Це підвищує вимоги до електромагнітної сумісності кабельних ліній електроприводів із частотним управлінням.

Для розв'язання проблеми електромагнітної сумісності в теперішній час використовуються різноманітні фільтри. Серед таких фільтрів найбільшого поширення набули дроселі та індуктивно-ємнісні фільтри. Однак, на даний момент відсутня обґрунтована методика виборів фільтрів ЕМС, що враховує весь комплекс факторів, що впливають на виникнення і параметри електромагнітних полів, таких як: довжина кабелю, його тип і параметри, частота комутації ключів інвертора та крутизни фронтів імпульсів. Тому розробка методів та моделей покращення електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та електричних двигунів в частотно-регульованих електроприводах є **актуальною науково-практичною задачею**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано у відповідності до пріоритетних напрямів науково-дослідних робіт Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ), згідно з координаційними планами Міністерства освіти і науки України, НДР «Підвищення якості електропостачання з урахуванням електромагнітної сумісності силових електричних кабелів» (Одеський національний політехнічний університет, номер державної реєстрації 0116U002957), та в рамках міжнародного ERASMUS+ проекту «Model-Oriented Approach and Intelligent Knowledge-Based System for Evolvable Academia-Industry Cooperation

in Electronic and Computer Engineering» (№ 544497-TEMPUS-1-2013-1-UK-TEMPUS-JPHES, 2014 – 2016 роки).

Роль автора у зазначених науково-дослідних роботах і проектах, у яких він був безпосереднім виконавцем, полягає у розробці моделей, методів та алгоритмів створення електромагнітної сумісності кабельних ліній в електроприводах із частотним управлінням.

Мета і завдання дослідження.

Об'єкт дослідження – процес покращення електромагнітної сумісності електроприводів із частотним управлінням.

Предмет дослідження – методи та моделі покращення електромагнітної сумісності.

Метою роботи є покращення електромагнітної сумісності ліній максимальної довжини в частотно-регульованих електроприводах за рахунок створення в кабельній лінії режиму роботи без спотворень.

Для досягнення поставленої мети в роботі були розв'язані **наступні задачі**:

– виконано аналіз причин виникнення спотворень форми напруг та струмів в лініях електропередач та наслідків їх впливів на роботу частотно-регульованих електроприводів;

– побудовано математичну модель для розрахунку напруг та струмів в лініях електропередач частотно-регульованих електроприводів в усталеному синусоїдальному режимі роботи;

– розроблено метод експериментального визначення первинних параметрів ліній електропередач різних типів;

– створено методику покращення електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та електричних двигунів в частотно-регульованих електроприводах та здійснено її перевірку.

Методи дослідження. При побудові моделей електромагнітної сумісності використано методи системного аналізу та теоретичної електротехніки, зокрема теорію ліній з розподіленими параметрами та теорію перехідних процесів. Для

аналізу спотворень в лініях зв'язку використано теорію диференційних рівнянь та динамічних систем. Для розрахунку первинних параметрів кабельних ліній використано методи теорії електромагнітного поля та методи обчислювальної математики. Для перевірки результатів застосовано методи експериментальних досліджень в реальних умовах експлуатації електроприводів. Для оцінки похибок експерименту використано методи математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів:

– дістала подальшого розвитку математична модель розповсюдження електричної енергії в кабельних лініях електроприводів із частотним управлінням, яка відрізняється від існуючих моделей, які використовують числові методи, підвищеною точністю за рахунок використання аналітичних виразів, що дозволило розробити метод аналітичного розрахунку хвильових процесів в кабельних лініях електроприводів із частотним управлінням;

– дістав подальшого розвитку метод експериментального визначення первинних параметрів кабелів, який відрізняється від існуючих простотою експерименту, не потребує спеціального обладнання, та дозволив використання математичного моделювання розповсюдження електричної енергії в кабельних лініях електроприводів із частотним управлінням;

– вперше, на підставі математичної моделі розповсюдження електричної енергії в кабельних мережах, створено математичні моделі роботи кабельних ліній без спотворень, які відрізняються від існуючих тим, що представлені в аналітичній формі, що дозволило зробити висновок про неможливість досягнення електромагнітної сумісності при використанні багатожильних кабелів як ліній зв'язку між частотними перетворювачами та двигунами;

– вперше, на підставі математичних моделей роботи кабельних ліній без спотворень запропоновано метод покращення електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та електричних двигунів, який полягає в використанні системи окремих екранованих одножильних кабельних ліній в режимі без спотворень, що дозволило досягти електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та асинхронних електричних двигунів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці способу покращення електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та електричних двигунів із врахуванням усього комплексу факторів, що впливають на виникнення завад в частотно-регульованих електроприводах, таких як довжина кабелю, його тип і параметри, а також частота комутації ключів інвертора. Зокрема, до практичних результатів слід віднести:

- розробку способу експериментального визначення первинних параметрів ліній електропередач різного типу;

- розробку способу покращення режиму роботи кабельних ліній без спотворень завдяки встановленню додаткових котушок індуктивності в розрив екрану (броні) кабелю;

- розробку способу визначення критичної довжини лінії електропередачі, при якій забезпечується заданий рівень спотворень вихідної напруги.

- Основні положення, висновки та рекомендації, що містяться в дисертаційній роботі, використовуються при проектуванні частотно-керованих електроприводів в інжиніринговій компанії «S-Engineering», в навчальному процесі кафедри теоретичних основ і загальної електротехніки (дисципліна «Теоретичні основи електротехніки» ОНПУ, а також в навчальному процесі кафедри електромеханічних систем з комп'ютерним управлінням ОНПУ (дисципліни «Моделювання електромеханічних систем та пристроїв», «Електропривод типових промислових установок»), в міжнародному проекті TEMPUS-CABRIOLET «Model-Oriented Approach and Intelligent Knowledge-Based System for Evolvable Academia-Industry Cooperation in Electronic and Computer Engineering» при розробці методичного забезпечення курсу MC2 «High availability systems and technologies», а також тренінг-модулю TM2 «Safety-case-oriented system measurement and data analysis».

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, висновки і рекомендації, що викладені в дисертації та виносяться на захист, отримані особисто здобувачем і узагальнені під час роботи над дисертацією. Роботи [6], [7] та [11] написані безпосередньо автором. У роботах, написаних у

співавторстві автору належить: у роботі [1] – аналітичне розв’язання рівнянь для двопроводної лінії, в роботі [2] – моделювання взаємних впливів між провідниками кабелю, в роботі [3] – дослідження впливу взаємних зв’язків на показники якості електричної енергії, в роботі [4] – з’ясування умов виникнення режиму узгодженого навантаження в лініях із взаємними зв’язками, в роботі [5] – планування, проведення та інтерпретація експерименту для визначення первинних параметрів ліній, в роботі [8] – розрахунки струмів та напруг в режимі несиметричного навантаження кабелю, в роботі [9] – дослідження впливу взаємних зв’язків на коефіцієнт корисної дії кабельних ліній передачі електричної енергії, в роботі [10] – розв’язання хвильових рівнянь для екранованого кабелю.

Апробація матеріалів дисертації. Наукові результати та основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на конференціях: міжнародному симпозіумі «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія та практика» (SIEMA’2014, м. Харків); міжнародному семінарі «Summer Training School STraS-CABRIOLET 2014» (м. Чернівці), десятій міжнародній науково-практичній конференції «Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2015» (м. Чернігів), міжнародних конференціях «Електротехнічні та комп’ютерні системи. Теорія та практика» (ETKS 2015, ELTECS 2016, м. Одеса), V International Scientific and Technical Conference “Engineering, Technologies, Education, Security (TTOC-2016, Veliko Tarnovo, Bulgaria) та 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET-2018, Lviv, Ukraine).

Публікації. По темі дисертації опубліковано 10 наукових праць та 1 патент України, з них 6 статей в наукових фахових виданнях України з Переліку, затвердженого МОН України, у тому числі 1 стаття в журналі, що індексується в базі даних SCOPUS, а також 3 статті в інших наукових періодичних виданнях України та 1 доповідь на міжнародній науковій конференції.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів та висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Загальний обсяг дисертації – 146 сторінок, містить 127 сторінок основної частини, список використаних джерел з 113 найменувань на 13 сторінках, 15 рисунків та 7 таблиць.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Д. А. Маевский, А. Н. Семенюг, и Г. Н. Кучеренко, «Установившиеся режимы в связанных двухпроводных линиях передачи», *Электротехнические и компьютерные системы*, № 14 (90), с. 61 – 66, 2014.

[2] Д. А. Маевский, А. Н. Семенюг, и Г. Н. Кучеренко, «Влияние взаимных связей между проводниками кабеля на режим работы электрических сетей» *Электротехнические и компьютерные системы*, № 19 (95), с. 142 – 145, 2015.

[3] D. Maevsky, E. Maevskaya, and A. Semenug, «Influence of connections between Three-Phase cable conductors on quality of electrical energy», *Science. Business. Society*, Vol. 1, №. 4/2016, p. 7 – 10, 2016.

[4] D. Maevsky, A. Savieliev, E. Maevskaya, A. Semenug, and S. Horokholynskyi, «Coefficient of efficiency of coupled electric power transmission lines», *Proceedings of 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*, 2018. (Видання індексується у SCOPUS)

[5] Д. А. Маєвський, О. М. Бесараб, О. М. Семенюг, та О. Ю. Маєвська, «Експериментальне визначення первинних параметрів ліній електропередач», *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, № 30 (106), с. 31 – 38, 2019.

[6] Семенюг О. М., «Використання ліній без спотворень як спосіб розв'язання проблеми довгого кабелю», *Вісник Львівської Політехніки, серія «Радіоелектроніка та телекомунікації»*, № 909, с. 82 – 91, 2019.

[7] А. Н. Семенюг, «Схема замещения трехфазного электрического кабеля с учетом взаимных влияний между проводниками», *Электротехнические и компьютерные системы*, № 21 (97), с. 43 – 48, 2016.

[8] Д. А. Маевский, Е. Ю. Маевская, А. Н. Семенюг, и С. Н. Огинская, «Особенности несимметричных режимов работы трехфазного кабеля с учетом связей между его проводниками», *Электротехнические и компьютерные системы*, № 22 (98), с. 84 – 90, 2016.

[9] Д. А. Маевский, Е. Ю. Маевская, А. Н. Семенюг, и А. А. Савельев, «Коэффициент полезного действия двухпроводного электрического кабеля с учетом взаимных влияний между его проводниками», *Электротехнические и компьютерные системы*, № 24 (100), с. 91 – 96, 2017.

[10] Д. А. Маевский, А. Н. Семенюг, Е. Ю. Маевская, и Г. Н. Кучеренко, «Математическое моделирование электромагнитных процессов в экранированных кабелях», *Тези доповідей Десятої міжнародної науково-практичної конференції Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2015*, с. 183 – 187, 2015.

[11] О. М. Семенюг, «Спосіб покращення електромагнітної сумісності кабельної лінії з широтно-імпульсним перетворювачем і асинхронним електродвигуном», *Патент України на корисну модель*, № u201907202; заявл. 27.06.2019; опубл. 20.08.2019.

[12] «Правила улаштування електроустановок», *Видання офіційне, Видавництво «Форт»*, 760 с., 2017.

[13] C. W. Gellings, M. Samotyj, and B. Howe, «The future's smart delivery system [electric power supply]», *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 2, № 5, p. 40 – 48.

[14] Zhao L, «Identification of power quality disturbances based on improved TT transform and support vector classifier», *Proceedings of the 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, p. 416 – 420, 2016.

[15] В. С. Андреев, «Теория нелинейных электрических цепей: Учебное пособие для вузов», *Радио и связь*, 280 с., 1982.

[16] «Влияние качества электроэнергии на работу электродвигателей» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electricalschool.info/main/elsnabg/851-vlijanie-kachestva-jelektrojenergii-na.html>

[17] Л. А. Бессонов, «Теоретические основы электротехники. Электрические цепи», *Учебник*, 10-е изд., 638 с., 2002.

[18] ГОСТ 13109-97. «Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», *Изд-во стандартов*, 31 с., 1998.

[19] S. Fakhry, «The capability of the national institute of standards in the electromagnetic compatibility measurements», *Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest*, p.p. 436 – 437, 2008, doi: 10.1109/CPEM.2008.4574840

[20] K. B. Reddy, and P. V. Y. Jayasree, «Simplification of EMI for oblique incident of single shield EM waves», *Proceedings of the International Conference & Workshop on Emerging Trends in Technology (ICWET '11)*, p.p. 1161 – 1164, 2011, doi: 10.1145/1980022.1980272

[21] J. Roizen, C. E. Anderson, and F. M. Remley, «International Electrotechnical Commission Meetings: Technical Committee 60 (Recording), SC 60B – Video Recording», *Journal of the SMPTE*, Vol. 84, No. 8, p.p. 618 – 619, 1975, doi: 10.5594/J13321

[22] «IEC EN 61000-1-1, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 1: General - Section 1: Application and interpretation of fundamental definitions and terms», *CEI*, 64 P., 1992.

[23] «IEC/TR 61000-2-1, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 1: Description of the environment - Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signaling in public power supply systems», *CEI*, 48 P., 1990.

[24] «IEC/TR 61000-2-3, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 3: Description of the environment - Radiated and non-network-frequency-related conducted phenomena», *CEI*, 48 P., 2006.

[25] «IEC 61000-3-2, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2 - Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)», *CEI*, 46 P., 2006.

[26] «IEC 61000-3-4, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A», *CEI*, 29 P., 1998.

[27] «IEC 61000-3-5, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-5: Limits - Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 75 A», *CEI*, 21 P., 2009.

[28] «IEC 61000-4-1, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-1: Testing and measurement techniques - Overview of IEC 61000-4 series», *CEI*, 19 P., 2016.

[29] «IEC 61000-4-2, Electromagnetic compatibility (EMC)- Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test», *CEI*, 44 P., 2008.

[30] «IEC 61000-4-3, Electromagnetic compatibility (EMC)- Part 4-3: Testing and measurement techniques - Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test», *CEI*, 111 P., 2006.

[31] «IEC 61000-4-4, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-4: Testing and measurement techniques - Electrical fast transient/burst immunity test», *CEI*, 28 P., 1995.

[32] «IEC 61000-4-5, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-5: Testing and measurement techniques - Surge immunity test», *CEI*, 155 P., 2014.

[33] «IEC 61000-4-6, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-6: Testing and measurement techniques - Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields», *CEI*, 168 P., 2013.

[34] «IEC 61000-4-7, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto», *CEI*, 71 P., 2002.

[35] «IEC 61000-4-8, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-8: Testing and measurement techniques - Power frequency magnetic field immunity test», *CEI*, 65 P., 2009.

[36] «IEC 61000-4-9, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-9: Testing and measurement techniques - Pulse magnetic field immunity test», *CEI*, 57 P., 1993.

[37] «IEC 61000-4-11, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-11: Testing and measurement techniques - Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests», *CEI*, 51 P., 2004.

[38] IEC 61000-4-12, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-12: Testing and measurement techniques - Ring wave immunity test. – *CEI*, 63 P., 2006.

[39] «IEC 61000-6-1, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6-1: Generic standards - Immunity for residential, commercial and light-industrial environments», *CEI*, 31 P., 2005.

[40] «IEC 61000-6-2, Electromagnetic compatibility (EMC). Generic standards. Immunity for industrial environments», *CEI*, 20 P., 2005.

[41] «IEC 61000-6-3, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6-3: Generic standards - Emission standard for residential, commercial and light-industrial environments», *CEI*, 27 P., 2006.

[42] «IEC 61000-6-4, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6-4: Generic standards - Emission standard for industrial environments», *CEI*, 23 P., 2006.

[43] А. К. Шидловский, и В. Г. Кузнецов, «Повышение качества энергии в электрических сетях» *Наукова думка*, 267 С., 1986

[44] «Качество электрической энергии» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sonel.ru/ru/biblio/article/quality-voltage/>

[45] Ю. А. Бычков, В. М. Золотницкий, и Э. П. Чернышев, «Основы теории электрических цепей: Учебник для вузов», *Издательство «Лань»*, 464 с., 2002.

[46] В. П. Карпушенко, Л. А. Щебенюк, Ю. О. Антонець, та О. А. Науменко, «Силіві кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість: Підручник», *Регіон-інформ*, 376 с., 2000.

[47] А. Н. Бесараб, В. Н. Невольниченко, М. Ю. Шабовта, Я. А. Соколов, и И. И. Тищенко, «Уменьшение технологических потерь электроэнергии в городских распределительных сетях напряжением 10 (6) кВ путем оптимизации мест размыкания контуров», *Электротехнические и компьютерные системы*, № 21 (97), С. 70 – 75, 2016.

[48] S. Jeong, Y. Park, and G. Han, «An estimation method of rotation speed for minimizing speed variation on restarting of induction motor», *8th International Conference on Power Electronics*, pp. 697 – 704, 2011, doi: 10.1109/ICPE.2011.5944642

[49] M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur, Y. Bezverkhnia, and D. Andrienko, «Speed synchronization methods of the energy-efficient electric drive system for induction motors», *14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, pp. 304 – 307, 2018, doi: 10.1109/TCSET.2018.8336208

[50] J. Wadibhasme, S. Zaday, and R. Somalwar, «Review of various methods in improvement in speed, power & efficiency of induction motor», *International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, pp. 3293 – 3296, 2017, doi: 10.1109/ICECDS.2017.8390068

[51] B. K. Bose, «Power Electronics and Motor Drives Recent Progress and Perspective», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, No. 56 (2), pp. 581–588, 2009, doi:10.1109/tie.2008.2002726

[52] В. Н. Ванурин, «Статорные обмотки многоскоростных асинхронных двигателей для привода вентиляторов», *Научный журнал КубГАУ*, №87(03), Стр. 1 – 20, 2013.

[53] В. Ткачук, «Широтно-фазовий спосіб регулювання частоти обертання електроприводів на базі вентильних двигунів», *Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія и практика: Вестн. ХПГУ, спец. Вып.*, С. 185 – 186, 1998.

[54] Б. Т. Кононов, А. О. Нечаус, та Н. М. Рябуха, «Система керування частотно-регульованим електроприводом на базі асинхронного електричного

двигуна» *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил, Випуск 3(40)*, С. 136 – 140, 2014.

[55] E. Agamloh, A. Cavagnino, and S. Vaschetto, «Induction machine efficiency measurement using a variable frequency drive source», *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 768-775, 2017, doi: 10.1109/ECCE.2017.8095862

[56] A. Fekik, H. Denoun, N. Benamrouche, N. Benyahia, A. Badji, and M. Zaouia, «Comparative analysis of direct power control and direct power control with space vector modulation of PWM rectifier», *4th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT)*, pp. 1– 6, 2016, doi: 10.1109/CEIT.2016.7929058

[57] Э. В. Колесников, «Квазистационарные электромагнитные поля в системах с однонаправленным полем тока», *Известия вузов СССР. Электромеханика*, № 12, С. 18 – 26, 1970.

[58] A. Consoli, G. Scelba, G. Scarcella, and M. Cacciato, «New scalar control for full speed operating range IM drives», *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, pp. 170 – 175, 2011, doi: 10.1109/IEMDC.2011.5994613

[59] I. Senol, N. Bekiroglu, and S. Ozcira, «Design and application of a new sensorless induction motor drive implemented by using field-oriented vector control method», *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, pp. 1543 – 1547, 2013, doi: 10.1109/PowerEng.2013.6635845

[60] K. Klimkowski, and M. Dybkowski, «Adaptive fault tolerant direct torque control structure of the induction motor drive», *International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)*, pp. 7 – 12, 2015, doi: 10.1109/EDPE.2015.7325261

[61] D. Jinqiang, and G. Yuanlou, «The Application of PWM Control in Proportional Control System», *International Conference on Electrical and Control Engineering*, 2010, pp. 4388 – 4390, doi: 10.1109/iCECE.2010.1066

[62] Эффективные Системы [Электронный ресурс]: [Веб-сайт]. Электронні дані. – Москва: ООО «Эффективные Системы», 2002–2019. Режим доступа: <http://www.softstarter.ru/invertors/princip-raboty/> (дата звернення 03.06.2018) – Назва з екрана.

[63] Y. Sato, and M. Jiang, «Output Waveform Improvement of High Switching Frequency PWM Inverters Introducing Digital Signal Processing», *Power Conversion Conference*, pp. 800 – 803, 2007, doi: 10.1109/PCCON.2007.373058

[64] S. Rahimi, W. Wiechowski, M. Randrup, J. Ostergaard, and A. H. Nielsen, «Identification of Problems when Using Long High Voltage AC Cable in Transmission System I: Switching Transient Problems», *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp. 1–7, 2008, doi: 10.1109/TDC.2008.4517183

[65] E. Persson, «Transient effects in application of PWM inverters to induction motors», *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 28, No. 5, pp. 1095 – 1101, 1992, doi: 10.1109/28.158834

[66] B. Mokrytzki, «Filters for adjustable frequency drives», *Proceedings of 1994 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - ASPEC'94*, Vol.1, P. 542 – 548, 1994, doi: 10.1109/APEC.1994.316351

[67] A. von Jouanne, D. A. Rendusara, P. N. Enjeti, and J. W. Gray, «The effect of long motor leads on PWM inverter fed AC motor drive systems», *Proceedings of 1995 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC'95*, Vol.2, pp. 592 – 597, 1995, – doi: 10.1109/APEC.1995.469081

[68] T. Takahashi, M. Tetmeyer, H. Tsai, and T. Lowery, «Motor lead length issues for IGBT PWM drives», *Conference Record of 1995 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, P. 21 – 27, 1995, doi: 10.1109/PAPCON.1995.404854

[69] L. Gubbala, A. von Jouanne, P. Enjeti, C. Singh, and H. Toliyat, «Voltage distribution in the windings of an AC motor subjected to high dV/dt PWM voltages», *Proceedings of PESC '95 - Power Electronics Specialist Conference*, Vol.1, P. 579 – 585, 1995, doi: 10.1109/PESC.1995.474867

[70] C. J. Melhorn, and Le Tang, «Transient effects of PWM ASDs on standard squirrel cage induction motors», *IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting*, Vol.3, P. 2689 – 2695, 1995, doi: 10.1109/IAS.1995.530645

[71] A. von Jouanne, D. A. Rendusara, P. N. Enjeti, and J. W. Gray, «Filtering techniques to minimize the effect of long motor leads on PWM inverter-fed AC motor drive systems», *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 32, No. 4, P. 919 – 926, 1996, doi: 10.1109/28.511650

[72] A. von Jouanne, and P. Enjeti, «Design considerations for an inverter output filter to mitigate the effects of long motor leads in ASD applications» *Proceedings of Applied Power Electronics Conference APEC '96*, Vol.2, P. 579 – 585, 1996, doi: 10.1109/APEC.1996.500499

[73] L. A. Saunders, G. L. Skibinski, S. T. Evon, and D. L. Kempkes, «Riding the reflected wave-IGBT drive technology demands new motor and cable considerations», *Proceedings of 1996 IAS Petroleum and Chemical Industry Technical Conference*, P. 75 – 84, 1996, doi: 10.1109/PCICON.1996.564866

[74] R. Kerkman, D. Leggate, and G. Skibinski, «Interaction of drive modulation and cable parameters on AC motor transients», *IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting*, Vol. 1, P. 143 – 152, 1996, doi: 10.1109/IAS.1996.557008

[75] G. Skibinski, «Design methodology of a cable terminator to reduce reflected voltage on AC motors», *IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting*, Vol. 1, P. 153 – 161, 1996, doi: 10.1109/IAS.1996.557009

[76] A. von Jouanne, and P. Enjeti, «Design considerations for an inverter output filter to mitigate the effects of long motor leads in ASD applications», *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 33, No. 5, P. 1138 – 1145, 1997, doi: 10.1109/28.633789

[77] Huang Fengtai, and Luo Fang Lin, «Effects of long motor cables and short switching times on inverter fed induction motor drive systems», *Proceedings of*

Second International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Vol. 2, P. 670 – 674, 1997, doi: 10.1109/PEDS.1997.627439

[78] J. A. Pomilio, C. R. de Souza, L. Matias, P. L. D. Peres, and I. S. Bonatti, «Driving AC motors through a long cable: the inverter switching strategy», *IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record*, P. MB1/4.1-MB1/4.3, 1997, doi: 10.1109/IEMDC.1997.604082

[79] R. J. Kerkman, D. Leggate, D. Schlegel, and G. Skibinski, «PWM inverters and their influence on motor overvoltage», *Proceedings of APEC 97 - Applied Power Electronics Conference*, Vol. 1, P. 103 – 113, 1997, doi: 10.1109/APEC.1997.581440

[80] G. Skibinski, D. Leggate, and R. Kerkman, «Cable characteristics and their influence on motor over-voltages», *Proceedings of APEC 97 - Applied Power Electronics Conference*, Vol. 1, P. 114 – 121, 1997, doi: 10.1109/APEC.1997.581441

[81] G. Skibinski, R. Kerkman, D. Leggate, J. Pankau, and D. Schlegel, «Reflected wave modeling techniques for PWM AC motor drives», *APEC '98 Thirteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Vol. 2, P. 1021 – 1029, 1998, doi: 10.1109/APEC.1998.654023

[82] A. M. Hava, R. J. Kerkman, and T. A. Lipo, «Carrier-based PWM-VSI overmodulation strategies: analysis, comparison, and design», *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 13, No. 4, IEEE, P. 674 – 689, 1998 doi: 10.1109/63.704136

[83] Sharifabadi Kamran, Harnefors Lennart, Nee Hans-Peter, Norrga Staffan, and Teodorescu Remus, «Modulation and Submodule Energy Balancing: in Design, Control, and Application of Modular Multilevel Converters for HVDC Transmission Systems», *Wiley-IEEE Press*, 412 p, 2016, doi: 10.1002/9781118851555.ch5

[84] E. A. Vendrusculo, and J. A. Pomilio, «Power cable parameters estimation in long distance driving of electrical machines», *Proceedings IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC'99)*, P. 410 – 412, 1999, doi: 10.1109/IEMDC.1999.769130

[85] Д. А. Маевский, «Математическое моделирование переходных процессов в связанных полосковых линиях без потерь», *Теоретическая электротехника*, № 45, С. 60 – 65, 1988.

[86] Д. А. Маевский, «Математическая модель системы связанных полосковых линий», *Электромашинобудування та електрообладнання*, № 71, С. 64 – 67, 2008.

[87] P. Prasad, and R. Ravindran, «Partial Differential Equations», 1985.

[88] Л. А. Бесснов, «Теоретические основы электротехники. Электрические цепи», *Высшая школа*, 584 с., 1980.

[89] Г. А. Большанин, и Л. Ю. Большанина, «Особенности распространения электрической энергии по трехпроводной линии электропередачи», *Системы. Методы. Технологии*, № 1(3), С. 58 – 63, 2010.

[90] Г. А. Большанин, Л. Ю. Большанина, и Е. Г. Марьясова, «Особенности распространения электрической энергии по трехпроводной линии электропередачи», *Системы. Методы. Технологии*, № 3(11), С. 82 – 89, 2011.

[91] Г. А. Большанин, Л. Ю. Большанина, Е. Г. Марьясова, и Т. Г. Коробова, «Выбор оптимального места подключения электрической нагрузки к действующей линии электропередачи», *Системы. Методы. Технологии*, № 1(17), С. 64 – 70, 2013.

[92] М. В. Костенко, Л. С. Перельман, и Ю. П. Шкарин, «Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения», *Энергия*, 272 С, 1973.

[93] G. Mazzanti, M. and Marzinotto, «Fundamentals of HVDC Cable Transmission», *Wiley-IEEE Press*, 384 p, 2013.

[94] G. Karady, and K. Holbert, «Transmission Lines and Cables», *Wiley-IEEE Press*, 854 p, 2013.

[95] Андре Анго, «Математика для электро- и радиоинженеров», *Наука*, 780 с, 1965.

[96] Wolfram Alpha, «Computational Knowledge Engine», [Electronic Resource], Access Mode: <https://www.wolframalpha.com/>

[97] И. Г. Петровский, «Лекции по теории обыкновенных дифференциальных уравнений», МГУ, 296 с, 1984.

[98] И. М. Гельфанд, «Лекции по линейной алгебре», Добросвет, 319 с, 1998.

[99] J. Yin, J. Zhao, X. Wang, H. Liu, and Y. Gao, «An online measuring method of impedance parameters of asymmetric transmission lines», *12th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD)*, p. 2241 – 2245, 2016, doi: 10.1109/FSKD.2016.7603530

[100] Zhengguang Yang, and Donglin Su, Lv, S., «Analysis of characteristic impedance of strip double line», *IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, Vol. 1, p. 95 – 98, 2005, doi: 10.1109/MAPE.2005.1617856

[101] A. M. Dan, and D. Raisz, «Estimation of transmission line parameters using wide-area measurement method», *IEEE Trondheim PowerTech*, pp. 1 – 6, 2011, doi: 10.1109/PTC.2011.6019406

[102] Z. Fu, J. Guo, and Y. Li, «Calculation of Line Parameters in Different Grounding Modes of Double Earth Wire», *International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)*, p. 148 – 151, 2016, doi: 10.1109/IS3C.2016.48

[103] «АТР-ЕМТР», [Электронный ресурс]: [Веб-сайт]. – *Електронні дані*, San Francisco, CA: Scribd 2019, Режим доступу: <https://ru.scribd.com/doc/312396735/АТР-ЕМТР> (дата звернення 17.02.2019) – Назва з екрана.

[104] Xun Tangsheng, Wang Li, Zhang Song, Zhang Linlin, Kong Jin, and Cong Wei, «Study on online calculation method of transmission line parameters», *11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012)*, pp. 1 – 4, 2012, doi: 10.1049/cp.2012.0120

[105] Z. Fu, D. Ju, and Y. Li, «The Calculation of 750kV Line Parameters Based on ATP-EMTP Simulation», *2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)*, p. 160 – 163, 2016, doi: 10.1109/IS3C.2016.51

[106] «IEEE Guide for the Parameter Measurement of AC Transmission Lines», *IEEE Std 1870-2019*, pp.1 – 99, 8 July 2019, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8755346

[107] J. Luo, K. Zhang, T. Chen, G. Zhao, P. Wang, and S. Feng, «Distributed parameter circuit model for transmission line», *International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, pp. 1529 – 1534, 2011, doi: 10.1109/APAP.2011.6180607

[108] «Hyperbolic Functions» [Электронный ресурс], 2019, Режим доступа до ресурсу: <https://www.gutenberg.org/ebooks/13692>

[109] K. Yasumoto, M. Matsunaga, and B. S. Rawat, «Coupled-mode theory of terminal characteristic parameters for multilayered and multiconductor lines», *ICMMT'98. 1998 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Proceedings (Cat. No.98EX106)*, pp. 561 – 564, 1998, doi: 10.1109/ICMMT.1998.768350

[110] M. Ishii, and K. Araki, «Analysis of Nonlinear Distortion in Direct Sampling Mixers», *Korea-Japan Microwave Conference*, pp. 57 – 60, 2007, doi: 10.1109/KJMW.2007.4402239

[111] “Спотворення сигналу”, [Электронный ресурс], 2018, Режим доступа до ресурсу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BF%D0%BE%D1%82%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D1%81%D0%B8%D0%B3%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%83.

[112] Nonlinear Distortion – Okinawa: IEEE, 2012. – (Nonlinear Distortion in Wireless Systems: Modeling and Simulation with MATLAB).

[113] R. A. Green, and L. Borgman, «Space-time evolutionary Fourier analysis for linear arrays», *Proceedings of the IEEE-SP International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis (Cat. No.98TH8380)*, pp. 181 – 184, 1998, doi: 10.1109/TFSA.1998.721391