

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

СЕМЕНЮГ ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 621.311.13

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

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Вінниця – 2019

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана в Одеському національному політехнічному університеті
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Бесараб Олександр Миколайович,
Одеський національний політехнічний університет,
завідувач кафедри електропостачання та
енергетичного менеджменту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кутін Василь Михайлович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри електромеханічних систем
автоматизації в промисловості і на транспорті

кандидат технічних наук
Букарос Андрій Юрійович,
Військова академія (м. Одеса),
завідувач кафедри електротехніки та систем ракетно-
артилерійського озброєння

Захист відбудеться «20» грудня 2019 р. о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий «14» листопада 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О. Б. Бурикін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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 керування швидкістю обертання асинхронного двигуна може бути досягнуто тільки за рахунок плавної зміни частоти напруги живлення. Сучасні широтно-імпульсні перетворювачі (ШП) дозволяють порівняно легко досягти плавності в зміні частоти. 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 ШП 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 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 пробою ізоляції і виходу з ладу усієї системи. Наявність високочастотних складових в спектрі напруги живлення призводить до виникнення додаткових втрат в сталі магнітопровода двигуна, що в свою чергу, призводить до його підвищеного нагрівання і зниження його корисної потужності. Це підвищує вимоги до електромагнітної сумісності (ЕМС) 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 моделей та методу 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, ДР U00), 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. 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.

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

Предмет дослідження – моделі та методи покращення електромагнітної сумісності електроприводів із частотним управлінням.

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 диференціальних 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 полягає в наступному:

– 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 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, 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 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] та [7] 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, 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 109 сторінок основної частини, список використаних джерел з 113 найменувань на 13 сторінках, 2 додатки на 6 сторінках, 15 рисунків та 7 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ включає загальну характеристику роботи, що підкреслює та обґрунтовує її актуальність, відповідність державним науковим програмам, мету і завдання досліджень, наукову новизну й практичне значення отриманих результатів.

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 вадою ліній передачі між ШІМ та двигуном є спотворення форми напруги на затискачах двигуна по відношенню до напруги ШІМ. При цьому виникають вищі гармоніки, які вважаються причиною спотворень напруги. Для боротьби із вищими гармоніками використовуються різноманітні фільтри ЕМС. 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. 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 математичну модель для розрахунку напруг та струмів в лініях електропередач частотно-регульованих електроприводів в усталеному синусоїдальному режимі роботи, а також розроблено метод аналітичного розрахунку коефіцієнту корисної дії лінії, для визначення умов передачі електричної енергії між частотними перетворювачами та двигунами з мінімальними втратами. Відомо, що у загальному вигляді для лінії з N провідниками математична модель являє собою систему диференціальних рівнянь, яка в матричній формі записується як:

$$\begin{cases} -\frac{\partial}{\partial x}[u] = [R] \cdot [i] + [L] \frac{\partial}{\partial t}[i] \\ -\frac{\partial}{\partial x}[i] = [G] \cdot [u] + [C] \frac{\partial}{\partial t}[u] \end{cases}, \quad (1)$$

де $[u]$ та $[i]$ – матриці-стовпці миттєвих значень струмів та напруг в довільній точці кожної з ліній, $[R]$ – матриця питомих опорів кожної з ліній, $[L]$ – матриця питомих індуктивностей кожної з ліній та взаємних індуктивностей M між ними, $[C]$ – матриця питомих ємностей між кожною лінією та загальним проводом (екраном) та

між кожною парою проводів, $[G]$ – матриця питомих провідностей між лініями та між кожною лінією та екраном.

Для випадку лінії із двома зв'язаними провідниками, яка працює в усталеному синусоїдальному режимі, з системи (1) отримано:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{d\dot{U}_1}{dx} = \underline{Z}_0 \dot{I}_1 + \underline{Z}_M \dot{I}_2 \\ -\frac{d\dot{U}_2}{dx} = \underline{Z}_M \dot{I}_1 + \underline{Z}_0 \dot{I}_2 \\ -\frac{d\dot{I}_1}{dx} = \underline{Y}_S \dot{U}_1 - \underline{Y}_{12} \dot{U}_2 \\ -\frac{d\dot{I}_2}{dx} = -\underline{Y}_{12} \dot{U}_1 - \underline{Y}_S \dot{U}_2 \end{array} \right. ,$$

де: $\underline{Z}_0 = R + j\omega L$; $\underline{Z}_M = j\omega M$; $\underline{Y}_S = (G_{10} + G_{12}) + j\omega(C_{10} + C_{12})$; $\underline{Y}_{12} = G_{12} + j\omega C_{12}$.

Розв'язуючи цю систему, отримуємо залежності комплексів напруг та струмів від відстані y від кінця лінії:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_1 = \frac{1}{2} (\dot{U}_{2+} ch\gamma_1 y + \dot{U}_{2-} ch\gamma_2 y + \underline{Z}_{C1} \dot{I}_{2+} sh\gamma_1 y + \underline{Z}_{C2} \dot{I}_{2-} sh\gamma_2 y) \\ \dot{U}_2 = \frac{1}{2} (\dot{U}_{2+} ch\gamma_1 y - \dot{U}_{2-} ch\gamma_2 y + \underline{Z}_{C1} \dot{I}_{2+} sh\gamma_1 y - \underline{Z}_{C2} \dot{I}_{2-} sh\gamma_2 y) \\ \dot{I}_1 = \frac{1}{2} \left(\dot{I}_{2+} ch\gamma_1 y + \dot{I}_{2-} ch\gamma_2 y + \frac{1}{\underline{Z}_{C1}} \dot{U}_{2+} sh\gamma_1 y + \frac{1}{\underline{Z}_{C2}} \dot{U}_{2-} sh\gamma_2 y \right) \\ \dot{I}_2 = \frac{1}{2} \left(\dot{I}_{2+} ch\gamma_1 y - \dot{I}_{2-} ch\gamma_2 y + \frac{1}{\underline{Z}_{C1}} \dot{U}_{2+} sh\gamma_1 y - \frac{1}{\underline{Z}_{C2}} \dot{U}_{2-} sh\gamma_2 y \right) \end{array} \right. \quad (2)$$

У цій системі $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_1, \dot{I}_2$ – комплекси струмів та напруг в першому та другому проводах, $\dot{U}_{2+} = \dot{U}_{12} + \dot{U}_{22}$, $\dot{U}_{2-} = \dot{U}_{12} - \dot{U}_{22}$, $\dot{I}_{2+} = \dot{I}_{12} + \dot{I}_{22}$, $\dot{I}_{2-} = \dot{I}_{12} - \dot{I}_{22}$, \dot{U}_{12} – напруга на виході першого проводу лінії, \dot{U}_{22} – напруга на виході другого проводу лінії, \dot{I}_{12} – струм на виході першого проводу лінії, \dot{I}_{22} – струм на виході другого проводу лінії. Вторинні параметри лінії:

$$\underline{Z}_{C1} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_M}{\underline{Y}_S - \underline{Y}_{12}}}, \quad (3)$$

$$\underline{Z}_{C2} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_M}{\underline{Y}_S + \underline{Y}_{12}}}, \quad (4)$$

$$\gamma_1 = \sqrt{(\underline{Z}_0 + \underline{Z}_M)(\underline{Y}_S - \underline{Y}_{12})}, \quad (5)$$

$$\gamma_2 = \sqrt{(\underline{Z}_0 - \underline{Z}_M)(\underline{Y}_S + \underline{Y}_{12})}. \quad (6)$$

Як видно із (3), (4), (5) та (6), вторинні параметри лінії показують наявність двох незалежних хвильових процесів. Перший процес, який характеризується

хвильовим опором \underline{Z}_{C1} та коефіцієнтом розповсюдження γ_1 , обумовлений власною хвилею, яка розповсюджується в лінії за рахунок напруги, яку підключено до її входу. Другий хвильовий процес з параметрами \underline{Z}_{C2} та γ_2 виникає за рахунок наявності між дротами лінії індуктивного та гальванічного зв'язку.

Рівняння (2) є математичною моделлю для розрахунку напруг та струмів в всталеному синусоїдальному режимі роботи лінії із двома провідниками. Однак, в сучасних електроприводах найчастіше використовуються трифазні асинхронні двигуни, які з'єднані із ШПП трифазними кабельними лініями передачі електричної енергії. Тому в розділі створено та досліджено математичну модель для розрахунку напруг та струмів в трифазних лініях із врахуванням індуктивних та гальванічних зв'язків між провідниками. На підставі (1) для лінії із трьома провідниками отримано систему рівнянь для комплексів напруг та струмів в лінії в режимі усталеного синусоїдального сигналу. Позначивши: $\underline{Z}_0 = R + j\omega L$, $\underline{Z}_1 = j\omega M$, $\underline{Y}_0 = G + j\omega C$, $\underline{Y}_1 = G_{12} + j\omega C_{12}$, для лінії із трьома провідниками отримуємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{d\dot{U}_1}{dx} = \underline{Z}_0 \dot{I}_1 + \underline{Z}_1 \dot{I}_2 + \underline{Z}_1 \dot{I}_3 \\ -\frac{d\dot{U}_2}{dx} = \underline{Z}_1 \dot{I}_1 + \underline{Z}_0 \dot{I}_2 + \underline{Z}_1 \dot{I}_3 \\ -\frac{d\dot{U}_3}{dx} = \underline{Z}_1 \dot{I}_1 + \underline{Z}_1 \dot{I}_2 + \underline{Z}_0 \dot{I}_3 \\ -\frac{d\dot{I}_1}{dx} = \underline{Y}_0 \cdot \dot{U}_1 - \underline{Y}_1 \cdot \dot{U}_2 - \underline{Y}_1 \cdot \dot{U}_3 \\ -\frac{d\dot{I}_2}{dx} = -\underline{Y}_1 \cdot \dot{U}_1 + \underline{Y}_0 \cdot \dot{U}_2 - \underline{Y}_1 \cdot \dot{U}_3 \\ -\frac{d\dot{I}_3}{dx} = -\underline{Y}_1 \cdot \dot{U}_1 - \underline{Y}_1 \cdot \dot{U}_2 + \underline{Y}_0 \cdot \dot{U}_3 \end{array} \right. \quad (7)$$

Розв'язок системи (7) за допомогою WEB-ресурсу Wolfram Alpha, показує що для лінії із трьома провідниками хвильовий процес є накладанням трьох типів коливань із такими параметрами:

$$\underline{Z}_{C1} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0 + 2\underline{Z}_1}{\underline{Y}_0 - 2\underline{Y}_1}}, \quad (8)$$

$$\underline{Z}_{C2,C3} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_1}{\underline{Y}_0 + \underline{Y}_1}}, \quad (9)$$

$$\gamma_1 = \sqrt{(\underline{Z}_0 + 2\underline{Z}_1)(\underline{Y}_0 - 2\underline{Y}_1)}, \quad (10)$$

$$\gamma_{2,3} = \sqrt{(\underline{Z}_0 - \underline{Z}_1)(\underline{Y}_0 + \underline{Y}_1)}. \quad (11)$$

Перший тип коливань, що характеризується хвильовим опором (8) та коефіцієнтом розповсюдження (10) – це власні коливання за рахунок напруги, що підводиться до провіднику лінії. Два інших типи коливань, обумовлені кратними

$Z_{C2,C3}$ та $\gamma_{2,3}$, виникають за рахунок напруг та струмів у зв'язаних провідниках. Ці коливання є однаковими тому що провідники лінії розташовані симетрично один до одного й однаково впливають один на одного.

Отримані результати дозволяють оцінювати спотворення, які виникають в кабелі в залежності від його довжини та первинних параметрів. З використанням розкладання імпульсів в ряд Фур'є є можливим дослідження впливу частоти комутації ключів інвертора та крутизни фронтів імпульсів на форму кривих напруг та струмів на виході кабелю.

Досліджено вплив взаємних зв'язків між провідниками кабелю на його коефіцієнт корисної дії (η), який оцінювався за відношенням активної потужності, що виділяється на навантаженні кабелю до активної потужності джерела живлення на вході. Розрахований графік залежності η від активної та реактивної складової опору навантаження показано на рис. 1.

З аналізу рис. 1 можна зробити такі висновки:

– Наявність магнітних і гальванічних зв'язків між провідниками лінії згладжує залежність коефіцієнту корисної дії від активної та реактивної складових опору навантаження. У цьому сенсі можна стверджувати, що такі зв'язки мають благотворний вплив: при їх наявності високі значення коефіцієнту корисної дії мають місце в широкому діапазоні активних та реактивних навантажень.

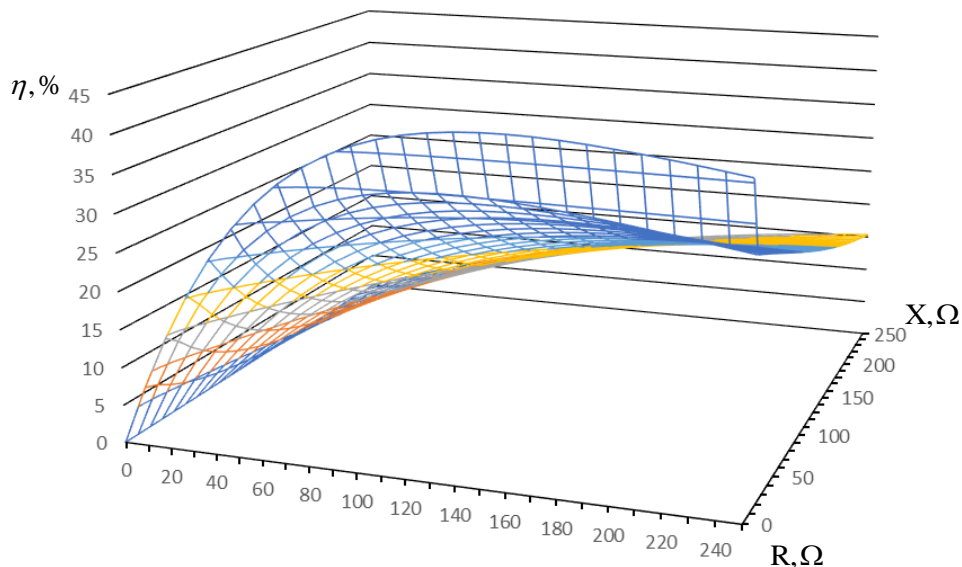


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнту корисної дії кабелю від опору навантаження

– Максимум коефіцієнту корисної дії досягається при опорах навантаження, більших за значенням, ніж активна і реактивна складові хвильового опору. Це можна пояснити тим, що при зміні опору навантаження змінюється і вихідний опір лінії. Цей опір в разі наявності втрат в лінії вже не дорівнює хвильовому навіть при чисто активному навантаженні. А максимум коефіцієнту корисної дії, як відомо, досягається коли опір навантаження дорівнює вихідному опору.

– Хвильовий опір \underline{Z}_{C2} суттєво не впливає на коефіцієнт корисної дії. Це можна пояснити тим, що перетік енергії за рахунок магнітних зв'язків між проводами лінії є значно меншим у порівнянні з енергією, що передається по провіднику.

Таким чином, на підставі розроблених в цьому розділі математичних моделей можна розрахувати та дослідити роботу ліній електропередач частотно-регульованих електроприводів в усталеному синусоїдальному режимі роботи. Для практичного використання розроблених моделей треба знати первинні параметри ліній. Як показано в розділі 1, визначення первинних параметрів розрахунковим шляхом не може забезпечити прийнятної точності. Тому треба розробити метод експериментального визначення первинних параметрів лінії.

У **третьому розділі** розроблено метод експериментального визначення первинних параметрів ліній електропередач з двома та трьома провідниками.

Двожильна екранована лінія містить два провідники, об'єднані загальним екраном. Хвильові процеси в такій лінії описуються системою рівнянь (2). Розглянемо дослід холостого ходу одночасно між кожним проводом та екраном в кінці лінії. При досліді холостого ходу, коли суми струмів в кінці лінії $\dot{I}_{2+} = \dot{I}_{2-} = 0$, з системи (2) для лінії відомої довжини l отримуємо:

$$\begin{cases} 2\dot{U}_{10} = \dot{U}_{2+}ch\gamma_1 l + \dot{U}_{2-}ch\gamma_2 l \\ 2\dot{U}_{20} = \dot{U}_{2+}ch\gamma_1 l - \dot{U}_{2-}ch\gamma_2 l \\ 2\dot{I}_{10} = \frac{1}{\underline{Z}_{C1}}\dot{U}_{2+}sh\gamma_1 l + \frac{1}{\underline{Z}_{C2}}\dot{U}_{2-}sh\gamma_2 l \\ 2\dot{I}_{20} = \frac{1}{\underline{Z}_{C1}}\dot{U}_{2+}sh\gamma_1 l - \frac{1}{\underline{Z}_{C2}}\dot{U}_{2-}sh\gamma_2 l \end{cases} \quad (12)$$

В цьому досліді експериментальному визначенню підлягають комплекси напруг на початку та в кінці кожного проводу лінії. Тоді з першого та другого рівнянь системи (12) можна визначити гіперболічні косинуси $ch\gamma_1 l$ та $ch\gamma_2 l$ як розв'язок системи:

$$\begin{cases} \dot{U}_{2+}ch\gamma_1 l + \dot{U}_{2-}ch\gamma_2 l = 2\dot{U}_{10} \\ \dot{U}_{2+}ch\gamma_1 l - \dot{U}_{2-}ch\gamma_2 l = 2\dot{U}_{20} \end{cases}$$

Звідси можна знайти коефіцієнти розповсюдження γ_1 та γ_2 :

$$\gamma_1 = \frac{1}{l} \operatorname{arcch} \frac{\dot{U}_{10} + \dot{U}_{20}}{\dot{U}_{2+}}, \quad (13)$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{l} \operatorname{arcch} \frac{\dot{U}_{10} - \dot{U}_{20}}{\dot{U}_{2-}}. \quad (14)$$

Аналогічно, з розв'язуючи третє та четверте рівняння системи (12) відносно хвильових опорів \underline{Z}_{C1} та \underline{Z}_{C2} отримуємо:

$$\underline{Z}_{W1} = \frac{\dot{U}_{2+} \sqrt{ch^2 \gamma_1 l - 1}}{\dot{I}_{10} + \dot{I}_{20}}, \quad (15)$$

$$\underline{Z}_{W2} = \frac{\dot{U}_{2-} \sqrt{ch^2 \gamma_2 l - 1}}{\dot{I}_{10} - \dot{I}_{20}}. \quad (16)$$

Об'єднуючи в систему рівняння (13) та (14), та підставляючи значення первинних параметрів, маємо:

$$R_0 + j\omega L_0 = \frac{A_+ + A_-}{2}, \quad (17)$$

$$j\omega M = \frac{A_+ - A_-}{2}. \quad (18)$$

Аналогічно для параметрів провідностей та ємностей із рівнянь (14) та (17) отримуємо:

$$G_{12} + j\omega C_{12} = \frac{B_- - B_+}{2}, \quad (19)$$

$$(G_0 + G_{12}) + j\omega(C_0 + C_{12}) = \frac{B_+ + B_-}{2}. \quad (20)$$

В цих виразах для скорочення позначено:

$$A_+ = \frac{\dot{U}_{2+} \sqrt{ch^2 \gamma_1 l - 1}}{\dot{I}_{10} + \dot{I}_{20}} \cdot \frac{1}{l} \operatorname{arcch} \frac{\dot{U}_{10} + \dot{U}_{20}}{\dot{U}_{2+}},$$

$$A_- = \frac{\dot{U}_{2-} \sqrt{ch^2 \gamma_2 l - 1}}{\dot{I}_{10} - \dot{I}_{20}} \cdot \frac{1}{l} \operatorname{arcch} \frac{\dot{U}_{10} - \dot{U}_{20}}{\dot{U}_{2-}},$$

$$B_+ = \frac{\dot{I}_{10} + \dot{I}_{20}}{\dot{U}_{2+} \sqrt{ch^2 \gamma_1 l - 1}} \cdot \frac{1}{l} \operatorname{arcch} \frac{\dot{U}_{10} + \dot{U}_{20}}{\dot{U}_{2+}},$$

$$B_- = \frac{\dot{I}_{10} - \dot{I}_{20}}{\dot{U}_{2-} \sqrt{ch^2 \gamma_2 l - 1}} \cdot \frac{1}{l} \operatorname{arcch} \frac{\dot{U}_{10} - \dot{U}_{20}}{\dot{U}_{2-}}.$$

З виразів (17), (18), (19) та (20) можна отримати первинні параметри екранованої двопровідної лінії передачі в частотно-керованому електроприводі.

Показано, що для визначення первинних параметрів трифазної лінії не обов'язково використовувати відповідну модель. Для цього достатньо провести експеримент таким же чином, як і для двопровідної лінії, використавши будь-які два проводи трифазної лінії.

Для перевірки отриманих в роботі результатів було проведено експеримент по визначенню первинних параметрів кабелю КВББШВ 4x1,5 довжиною 3010 метрів. На вхід двох провідників кабелю подавалася змінна синусоїдальна напруга частотою 50 Нз від низьковольтного генератора синусоїдальних сигналів. Вимірювалися діючі значення струму та напруги на вході кожного провідника, а також зсуви за фазою між струмом та напругою. За нульове значення фази в цьому

вимірюванні було прийнято початкову фазу напруги на вході кабелю. Результати вимірювань представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати вимірювань

Параметр	Діюче значення	Зсув за фазою, град.
Вхід кабелю		
U_{11}	8 V	0
U_{21}	8 V	0
I_{11}	0,47 mA	-15
I_{21}	0,39 mA	-18
Вихід кабелю		
U_{12}	7,29 V	76
U_{22}	7,63 V	69

На підставі цих даних за приведеними в п. 3 формулами були розраховані первинні параметри кабелю, представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Розраховані первинні параметри кабелю

Параметр	Значення
$R_0, \Omega/m$	0,0127
$L_0, H/m$	$1,78 \cdot 10^{-5}$
$C_0, F/m$	$1,35 \cdot 10^{-9}$
$M, H/m$	$1,34 \cdot 10^{-6}$
$G_0, S/m$	$3,76 \cdot 10^{-9}$
$G_{12}, S/m$	$3,5 \cdot 10^{-9}$

Для перевірки правильності визначення параметрів з цим же кабелем було проведено експеримент. Схема експерименту наведена на рис. 2.

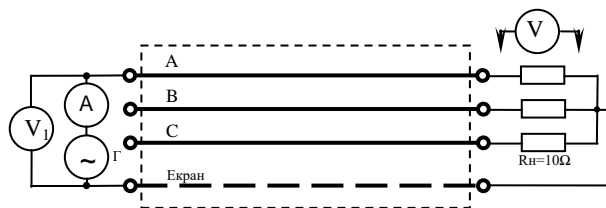


Рисунок 2 – Схема експерименту для перевірки параметрів кабелю

На один з провідників кабелю (умовно – фаза A) від генератора сигналів синусоїдальної форми подавалася напруга з діючим значенням $8V$ (активний провідник). Вимірювання проводилися для двох значень частоти генератора – $50 Hz$ та $100 Hz$. Два інші провідники (умовно – фаза B та C) не підімкнено (пасивні провідники). Вимірювалось діюче значення напруги в кінці активного та пасивного провідників (U_{2A}, U_{2B}, U_{2C}) в режимі симетричного активного навантаження 10Ω . Також вимірювалось діюче значення струму на вході активного провідника (I_{1A}). Результати експериментів та розрахунку представлено в таблицях 3 та 4.

Таблиця 3 – Порівняння результатів для частоти 50 Hz

Параметр	Експеримент	Розрахунок	Відхилення
U_{2A}, V	0,245	0,256	4,5%
U_{2B}, V	0,017	0,0176	3,5%
U_{2C}, V	0,017	0,0175	2,7%
I_{1A}, mA	21,2	22,23	4,9%

Таблиця 4 – Порівняння результатів для частоти 100 Hz

Параметр	Експеримент	Розрахунок	Відхилення
U_{2A}, V	0,244	0,253	3,7%
U_{2B}, V	0,018	0,0186	3,3%
U_{2C}, V	0,019	0,0186	2,1%
I_{1A}, mA	21,1	22,19	0,45%

Як можна бачити із таблиць 3 та 4, експериментальні та розрахункові дані різняться не більше, ніж на 5 відсотків. Це свідчить про те, запропонований в розділі метод експериментального визначення первинних параметрів ліній електропередач з двома та трьома провідниками може бути використаним в асинхронному частотно-керованому електроприводі.

Розроблені моделі показали наявність у зв'язаних магнітними та гальванічними зв'язками лініях різних мод коливань падаючих та відбитих хвиль. Аналіз цих мод дозволяє розробити метод покращення електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та електричних двигунів в частотно-регульованих електроприводах.

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.

Як відомо, в режимі без спотворень фазова швидкість хвиль в лінії та коефіцієнт затухання не залежать від частоти. Це забезпечує передачу по лінії несинусоїдального сигналу падаючої хвилі, форма якого відповідає формі сигналу на вході. В цьому випадку частотно модульована напруга на виході ШПП буде без спотворень передаватися на затискачі двигуна, що розв'язує проблему покращення електромагнітної сумісності.

У випадку однопровідної кабельної лінії для досягнення режиму без спотворень треба, як відомо, виконати співвідношення

$$\frac{R_0}{L_0} = \frac{G_0}{C_0}. \quad (21)$$

Розглянемо можливість досягнення режиму без спотворень у випадку кабелю із двома та трьома провідниками.

У випадку двопроводного кабелю, як витікає із формул (5) та (6), існує дві моди коливань. Режим без спотворень при цьому може бути досягнутий лише тоді, коли коливання кожної з мод будуть передаватися без спотворень. Для першої моди із (5) маємо:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_0 + \underline{Z}_M &= R_0 + j\omega L_0 + j\omega M = R_0 + j\omega(L_0 + M), \\ \underline{Y}_S - \underline{Y}_{12} &= (G_{10} + G_{12}) + j\omega(C_{10} + C_{12}) - G_{12} - j\omega C_{12} = G_0 + j\omega C_0.\end{aligned}$$

Режим без спотворень для коливання першої моди буде досягнутий при виконанні умови

$$\frac{R_0}{L_0 + M} = \frac{G_0}{C_0}. \quad (22)$$

Для коливання другої моди із (6) отримуємо аналогічно:

$$\frac{R_0}{L_0 - M} = \frac{G_0 + 2G_{12}}{C_0 + 2C_{12}}. \quad (23)$$

Не важко побачити, що одночасне виконання обох умов (22) та (23) можливе лише коли $M = 0$ та $G_{12} = C_{12} = 0$, тобто коли зв'язки між провідниками відсутні. А це відповідає випадку застосування двох не зв'язаних магнітно та гальванічно ліній.

У випадку кабелю із трьома провідниками, як показано в розділі 2, хвильовий процес обумовлено трьома модами коливань. Перша мода описується коефіцієнтом розповсюдження (10), а дві інших – коефіцієнтом розповсюдження, який розраховується за формулою (11).

Для коливань першої моди з (10) маємо:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_0 + 2\underline{Z}_1 &= R_0 + j\omega L_0 + 2j\omega M = R_0 + j\omega(L_0 + 2M), \\ \underline{Y}_0 - 2\underline{Y}_1 &= (G_0 - 2G_{12}) + j\omega(C_0 - 2C_{12}).\end{aligned}$$

Спотворень першої моди не виникатиме за умови

$$\frac{R_0}{L_0 + 2M} = \frac{G_0 - 2G_{12}}{C_0 - 2C_{12}}. \quad (24)$$

Для коливань другої та третьої моди з (11) отримуємо співвідношення для режиму роботи без спотворень:

$$\frac{R_0}{L_0 - M} = \frac{G_0 + G_{12}}{C_0 + C_{12}}. \quad (25)$$

Як можна побачити, одночасне виконання умов (24) та (25) можливе лише за відсутності зв'язків між проводами лінії, коли $M = 0$ та $G_{12} = C_{12} = 0$.

Таким чином, в розділі математично доведено, що в багатожильних кабельних лініях робота в режимі без спотворень неможлива, тому що неможливо одночасно досягти цього режиму для різних мод хвильового процесу. Робота в режимі без спотворень можлива лише для одножильного кабелю, в якому існує тільки одна (перша) мода коливань.

На підставі цього висновку запропоновано методику покращення електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та електричних двигунів, яка полягає в використанні системи окремих екранованих одна від одної одножильних кабельних ліній без спотворень за умови (21). Для досягнення цієї умови

рекомендовано використовувати штучне підвищення питомої індуктивності за рахунок включення вздовж довжини кабелю додаткових котушок індуктивності. Кількість таких додаткових котушок залежить від довжини кабелю. Однак, для збереження рівномірності первинних параметрів, відстань між котушками не повинна перевищувати одного метра.

Враховуючи конструктивні особливості одножильних броньованих кабелів, ці котушки слід включати в розрив броні кабелю по його поверхні. Поверхнєве розміщення додаткових котушок легко реалізувати на практиці. Схематичний вигляд розміщення додаткової котушки показано на рис. 3.

Для перевірки запропонованої методики покращення електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та електричних двигунів було досліджено спотворення форми прямокутного сигналу на виході ШІМ при його розповсюдженні вздовж кабелю заданої довжини.

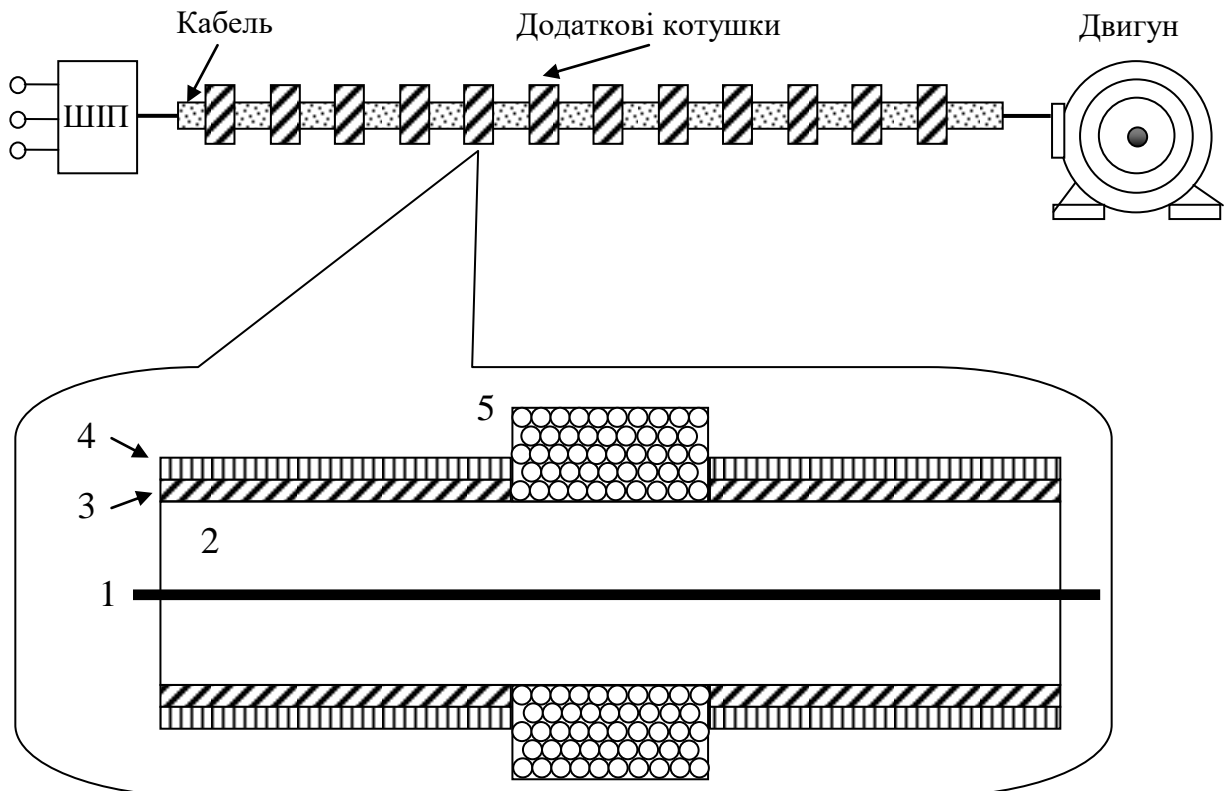


Рисунок 3 – схематичний вигляд розміщення додаткових котушок індуктивності:
 1 – центральна жила; 2 – внутрішня ізоляція; 3 – броня; 4 – зовнішня ізоляція;
 5 – додаткова котушка

Дослідження виконано розрахунковим шляхом для двох кабельних ліній: звичайного одножильного кабелю з первинними параметрами згідно із таблицею 2, та кабелю, питома індуктивність якого штучно збільшена до значення $4,56 \cdot 10^{-3} \text{ H}$, при якому задовольняється умова (23). Для досягнення режиму без спотворень індуктивність додаткової котушки повинна становити $4,54 \cdot 10^{-3} \text{ H}$ а вона повинна мати лише 380 витків. На вхід кабелю подано прямокутний імпульсний сигнал амплітудою 100 V, частотою 1000 Hz та скважністю 2. Для оцінки спотворень форми

кривої напруги на виході кабелю відносно напруги на його вході запропоновано використовувати коефіцієнт спотворення форми k_F , який розраховується за формулою:

$$k_F = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N \left(\frac{U_{1i}}{U_{11}} - \frac{U_{2i}}{U_{21}} \right)^2}}{N},$$

де N – кількість гармонік в розкладанні в ряд Фур'є, U_{1i} – амплітуда i -ї гармоніки вхідної напруги, U_{2i} – амплітуда i -ї гармоніки вихідної напруги, U_{11} та U_{21} – амплітуди перших гармонік вхідної та вихідної напруги відповідно. При значенні $k_F = 0$ форми обох напруг співпадають.

Результати розрахунків k_F для звичайного кабелю та кабелю без спотворень в залежності від довжини l наведено в таблиці 5.

Таблиця 5 – Результати розрахунків коефіцієнту спотворень форми напруг

Довжина l , m	Звичайний кабель		Кабель без спотворень	
	k_f	lgk_f	k_f	lgk_f
10	0,0000216	-4,67	0,0000032	-5,49
20	0,0000744	-4,13	0,0000082	-5,09
30	0,0001706	-3,77	0,0000153	-4,82
40	0,0003192	-3,50	0,0000247	-4,61
50	0,0005378	-3,27	0,0000365	-4,44
60	0,0008632	-3,06	0,0000508	-4,29
70	0,0013797	-2,86	0,0000676	-4,17
80	0,0023437	-2,63	0,0000870	-4,06
90	0,0053153	-2,27	0,0001092	-3,96
100	0,0267815	-1,57	0,0001343	-3,87
200	0,0376915	-1,42	0,0006011	-3,22
300	0,0435353	-1,36	0,0021611	-2,67
310	0,0541298	-1,27	0,0025466	-2,59
320	0,0299229	-1,52	0,0030689	-2,51
330	0,0358486	-1,45	0,0038366	-2,42
340	0,0286603	-1,54	0,0051338	-2,29
350	0,0586655	-1,23	0,0080579	-2,09

Зважаючи на велику різницю між значеннями коефіцієнту k_F в таблиці, для зручності порівняння та графічного відображення, розраховано його десятковий логарифм lgk_F . Для наглядного відображення спотворення форми, на рис. 4 та 5 наведено графіки вихідної напруги звичайного кабелю та кабелю без спотворень для двох значень довжини. По осі абсцис графіків відкладено час в секундах, а по осі ординат – напругу в вольтах. Пунктирною лінією на усіх графіках показано вхідну напругу кабелів.

Як можна бачити із рис. 4, звичайний кабель довжиною вже 95 метрів створює значні спотворення форми вихідної напруги. Цій довжині відповідає значення $k_F = 0,012$. На цій же відстані кабель без спотворень (рис. 5) практично не змінює форму вихідної напруги. Коефіцієнт k_F на відстані 100 метрів для такого кабелю дорівнює лише 0,0001343, тобто у 90 разів нижчий за відповідний коефіцієнт для звичайного кабелю. Як показали дослідження, форму вихідної напруги можна вважати прийнятною для роботи двигунів в електроприводі з частотним управлінням при $k_F \leq 0,01$. Таке значення k_F для звичайного кабелю відповідає довжині 65 метрів, а для кабелю без спотворень – 320 метрів.

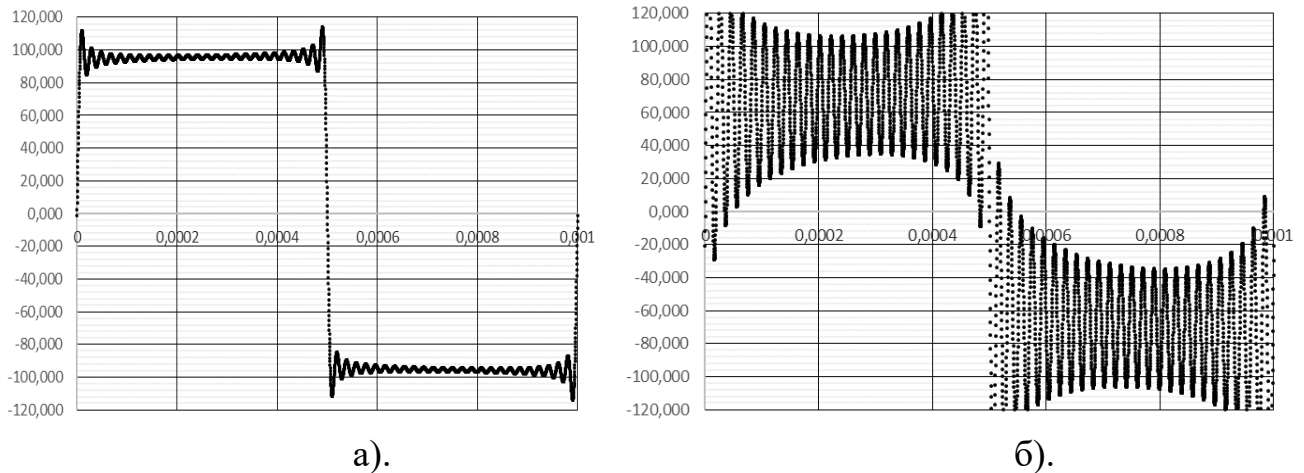


Рисунок 4 – Форма вихідної напруги для звичайного кабелю довжиною
а) – 10 метрів; б) – 95 метрів

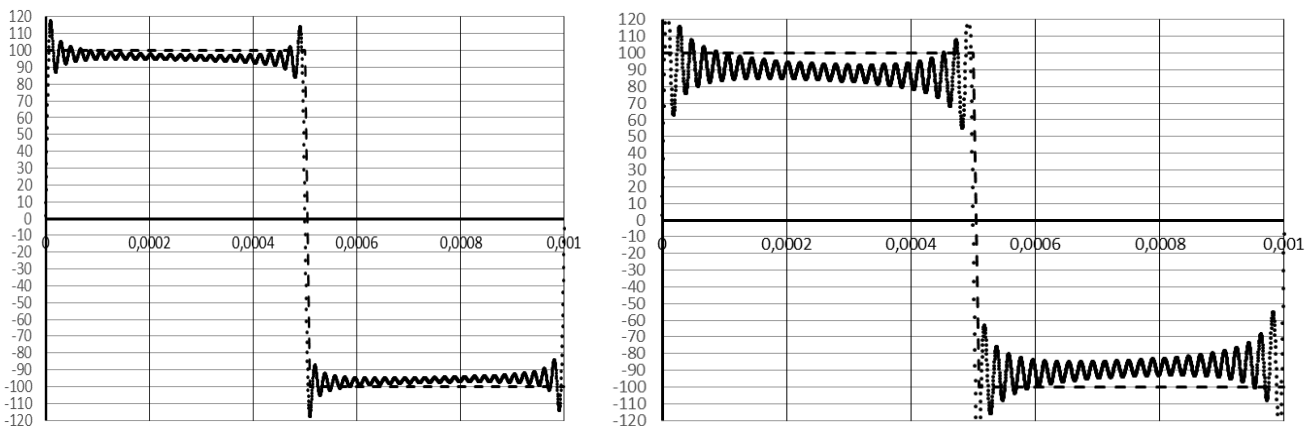


Рисунок 5 – Форма вихідної напруги для кабелю без спотворень довжиною
а) – 100 метрів; б) – 300 метрів

Отже, запропонована в роботі методика покращення електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та електричних двигунів дозволяє збільшити відстань між ШІМ та двигуном у 3 рази у порівнянні із використанням звичайного кабелю.

Побудовано графік залежності коефіцієнту спотворення форми k_F від довжини кабелю у звичайному режимі та режимі без спотворень. Цей графік показано на рис. 6. Для зручності, зважаючи на велику різницю, для коефіцієнту

спотворень обрано логарифмічну шкалу. Графік, наведений на рис. 6 має велике практичне значення. Його можна використовувати для визначення максимально допустимої довжини кабельної лінії в залежності від заданого допустимого коефіцієнту спотворень. Так, наприклад, із рис. 6 можна визначити, що при жорсткій вимозі, коли напруга від ШІМ до двигуна повинна передаватись практично без спотворень ($k_F \leq 0,001$), максимальна довжина кабелю не повинна становити більше 240 метрів. При зменшенні вимог ($k_F \leq 0,01$) довжина кабелю може бути збільшена до 320 метрів. При більш значних довжинах вплив вищих гармонік зростає. Тому для забезпечення ЕМС при більших довжинах доцільно використовувати фільтри вищих частот.

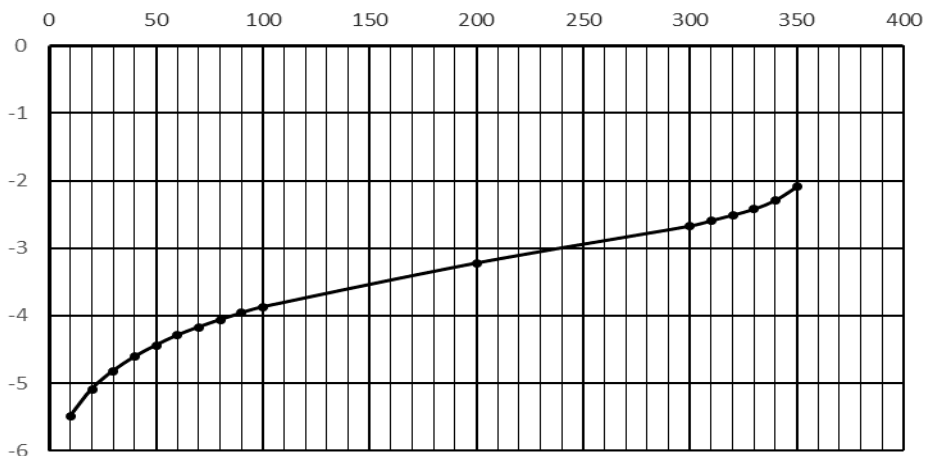


Рисунок 6 – залежність логарифму коефіцієнту спотворень форми від довжини кабелю

Таким чином, в розділі 4 створено та перевірено метод покращення електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та електричних двигунів в частотно-регульованих електроприводах.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне обґрунтування й розв'язання *актуальної науково-прикладної задачі*, яка полягає в розробці методів та моделей покращення електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та електричних двигунів в частотно-регульованих електроприводах.

Отримані наукові та практичні результати дозволяють зробити такі висновки:

1. В роботі дістала подальшого розвитку математична модель розповсюдження електричної енергії в кабельних лініях електроприводів із частотним управлінням, в якій, на відміну від існуючих, запропоновано аналітичні вирази для струмів та напруг, що дозволило розробити точний метод розрахунку хвильових процесів в кабельних лініях електроприводів із частотним управлінням;

2. На підставі математичної моделі розповсюдження електричної енергії в кабельних лініях електроприводів із частотним управлінням створено метод аналітичного розрахунку коефіцієнту корисної дії лінії, завдяки якому визначено

умови передачі електричної енергії між частотними перетворювачами та асинхронними двигунами із мінімальними втратами;

3. Створено математичні моделі роботи кабельних ліній в режимі без спотворень, на підставі яких зроблено висновок про неможливість покращення електромагнітної сумісності при використанні багатожильних кабелів як ліній зв'язку між частотними перетворювачами та двигунами;

4. Удосконалено методику експериментального визначення первинних параметрів кабелів, яка не потребує спеціальної апаратури, та дозволила визначити первинні параметри для виконання математичного моделювання розповсюдження електричної енергії в кабельних лініях електроприводів із частотним управлінням;

5. Запропоновано методику покращення електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та електричних двигунів. Ця методика полягає в використанні системи окремих екранованих одножильних кабельних ліній, які працюють в режимі без спотворень, що дозволило досягти електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та асинхронних електричних двигунів.

6. Розроблено спосіб створення режиму роботи кабельних ліній без спотворень завдяки встановленню додаткових котушок індуктивності в розрив броні кабелю;

7. Доведено, що при використанні розробленої методики покращення електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та електричних двигунів, довжина кабельної лінії може бути збільшена до п'яти разів при збереженні електромагнітної сумісності. *Таким чином, мету роботи досягнуто.*

8. Достовірність отриманих результатів підтверджується:

- обґрунтованістю припущень, прийнятих при розробці моделей і методів;
- експериментальними результатами дослідження розповсюдження електромагнітної енергії в кабельних лініях;
- математичним моделюванням роботи кабельних ліній в режимі без спотворень.

9. Напрямоком подальших досліджень може бути вивчення особливостей сумісної роботи кабельних ліній без спотворень з електричними фільтрами різних типів.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ 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. Semenyg, «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. Horokholynskiy, «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»*, № 993, с. 81 – 88, 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, 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.

АНОТАЦІЯ

Семенюг О. М. Моделі та методи досягнення 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». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2019.

Дисертацію присвячено розробці методів підвищення довжини кабельних ліній в частотно-регульованих електроприводах із забезпеченням їх електромагнітної сумісності. В дисертації, на підставі математичної моделі розповсюдження електричної енергії в кабельних лініях електроприводів із частотним управлінням, розроблено метод аналітичного розрахунку хвильових процесів в кабельних лініях та створено метод аналітичного розрахунку коефіцієнту корисної дії лінії. На підставі цього визначено умови передачі електричної енергії між частотними перетворювачами та двигунами з мінімальними втратами. Доведено, що при використанні багатожильних кабелів висновок покращення електромагнітної сумісності як ліній зв'язку між частотними перетворювачами та двигунами не є можливою. Запропоновано методику покращення електромагнітної сумісності, яка полягає в використанні системи окремих екранованих одножильних кабельних ліній, які працюють в режимі без спотворень. Запропонована методика дозволяє збільшити довжину кабельної лінії між широтно-імпульсним перетворювачем та асинхронним двигуном із забезпеченням електромагнітної сумісності між ними.

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

ANNOTATION

Semenyug A. N. Models and methods for achieving electromagnetic compatibility of cable lines of frequency controlled electric drives. – Qualification research paper, manuscript copyright.

Thesis on competition of scientific degree of Candidate of Technical Sciences by specialty 05.09.03 «Electrotechnical complexes and systems». – Vinnitsia National Technical University, Vinnytsia, 2019.

The dissertation is devoted to the development of methods for increasing the length of cable lines in variable frequency drives with ensuring their electromagnetic compatibility. In the thesis, on the basis of a mathematical model of the distribution of electric energy in cable lines of frequency-controlled electric drives, a method for the analytical calculation of wave processes in cable lines is developed and a method for the analytical calculation of the line efficiency is created. Based on this, the conditions for the transfer of electric energy between frequency converters and motors with minimal losses are determined. It is proved that when using multicore cables, the conclusion of improving electromagnetic compatibility as communication lines between frequency converters and

motors is not possible. A technique is proposed for improving electromagnetic compatibility, which consists in using a system of separate shielded single-core cable lines operating in a distortion-free mode. The proposed method allows to increase the length of the cable line between the pulse-width converter and an induction motor with electromagnetic compatibility between them.

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

АННОТАЦИЯ

Семенюг А. Н. Модели и методы достижения электромагнитной совместимости кабельных линиях электроприводов с частотным управлением. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2019.

Диссертация посвящена разработке методов повышения длины кабельных линий в частотно-регулируемых электроприводах с обеспечением их электромагнитной совместимости.

На основе проведенного обзора литературы показано, что причиной нарушения электромагнитной совместимости (возникновения проблемы длинного кабеля) являются искажения формы кривой напряжения, которое передается по кабелю от широтно-импульсного преобразователя к двигателю. Эти искажения предопределены особенностями волновых процессов в кабельных линиях и не могут быть устранены путем установки фильтров.

Для обеспечения электромагнитной совместимости в диссертации разработаны математические модели распространения электромагнитной энергии в кабельных линиях между частотным преобразователем и асинхронным двигателем. Модели отличаются от существующих простотой использования и повышенной точностью, которая достигается за счет использования аналитических выражений. Это позволило разработать метод аналитического расчета волновых процессов в кабельных линиях электроприводов с частотным управлением.

Для обеспечения максимального коэффициента полезного действия кабельной линии определены соотношения между нагрузочным сопротивлением связанных линий и их волновым сопротивлением. Это позволило определить условия, при которых возможна передача электрической энергии между частотными преобразователями и двигателями с минимальными потерями.

На основе созданных математических моделей работы кабельных линий без искажений показано, что обеспечение электромагнитной совместимости между частотным преобразователем и двигателем в случае использования трехфазных кабелей невозможно.

Разработан простой в применении метод определения первичных параметров кабельной линии электропередачи и выполнена его верификация.

Найденные значения первичных параметров кабеля используются при применении разработанной в диссертации методики повышения длины кабельной линии с обеспечением электромагнитной совместимости. Методика состоит в использовании для передачи широтно-импульсного модулированного напряжения между преобразователем и двигателем системы трех отдельных экранированных одножильных кабельных линий, каждая из которых работает в режиме без искажений. При этом форма напряжения на выходе кабельной линии соответствует форме напряжения на ее входе. За счет этого достигается электромагнитная совместимость частотных преобразователей и асинхронных электрических двигателей, и, в конечном итоге, решается проблема длинного кабеля. Неискажающий режим работы достигается за счет искусственного увеличения погонной индуктивности линий путем включения по длине кабеля дополнительных катушек индуктивности. Предложена методика расчета индуктивности дополнительных катушек на основе известных значений первичных параметров кабеля

Предложенная методика позволяет увеличить длину кабельной линии между широтно-импульсным преобразователем и асинхронным двигателем при сохранении электромагнитной совместимости между ними.

Ключевые слова: частотный электропривод, электромагнитная совместимость, кабельная линия, линия без искажений, проблема длинного кабеля.

Підписано до друку 13.11.2019 р. Формат 29,7 x 421/4.

Наклад 100 прим. Зам. № 2019 - ____.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-39