

## **В І Д Г У К**

**офіційного опонента доктора технічних наук, професора,  
завідувача кафедри електромеханічних систем автоматизації в  
промисловості і на транспорті Вінницького національного технічного  
університету Кутіна Василя Михайловича на дисертаційну роботу  
Семенюга Олександра Миколайовича „Методи та моделі покращення  
електромагнітної сумісності в кабельних лініях електроприводів із  
частотним управлінням” представлену на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук зі спеціальності  
05.09.03 – „Електротехнічні комплекси та системи”.**

**Актуальність теми дисертації** не викликає ніяких сумнівів. Сьогодні широкого розповсюдження в різних галузях промисловості набуває частотно - регульований асинхронний електропривод. Але форма напруги живлення, що подається на асинхронний двигун значно відрізняється від синусоїдальної. Ця напруга має вигляд послідовності прямокутних імпульсів різної полярності і тривалості. Передача енергії з такою формою напруги не викликає ускладнень при малої відстані, але в умовах існуючих підприємств довжина кабелів досягає декількох сотень метрів. В цих умовах передачі електричної енергії виникають суттєві спотворення форми напруги, яка прикладена до двигунів, виникають хвильові процеси в кабелі, які супроводжуються перенапругою. Це негативно впливає на технічний стан ізоляції обмоток двигуна, виникають додаткові втрати в сталі магнітопроводу двигуна. Існуючі засоби у вигляді фільтрів є не достатньо ефективними, тому розробка методів і моделей покращення електромагнітної сумісності частотних перетворювачів на електричних двигунах в частотно - регульованих електроприводах є актуальною науково - прикладною задачею.

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

Об'єктом дослідження є процес виникнення несинусоїдальної напруги та хвильові процеси в кабелі живлення асинхронних двигунів з частотним регулюванням швидкості їх обертання.

Предметом дослідження є методи та моделі покращення електромагнітної сумісності в кабельних лініях електроприводів із частотним управлінням.

### **Аналіз змісту дисертації і коротка характеристика.**

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, вказано мету, об'єкт, предмет дослідження, практична цінність отриманих результатів.

В першому розділі розглянуто показники якості електричної енергії, принципи роботи електроприводів із частотним управлінням, методи та

пристрої регулювання частоти напруги живлення електродвигунів, проведено аналіз проблем довгого кабелю, методів визначення параметрів кабельної лінії. Зроблено такі висновки.

1. Основною завадою лінії передачі між ШП та двигуном є спотворення форми напруги на затискачах двигуна по відношенню до напруги ШП. При передачі електричної енергії виникають вищі гармоніки, що є причиною спотворень напруги.

2. Для боротьби з вищими гармоніками використовуються різноманітні фільтри ЕМС. Однак на сьогодні відсутня обґрунтована методика вибору фільтрів ЕМС, яка враховувала би множину впливаючих факторів.

3. В одиночній лінії з розподільними параметрами відбиті хвилі, відсутні в режимі узгодженого навантаження. Але в трифазному кабелі існує система трьох зв'язаних між собою ліній. Тому треба дослідити умови виникнення узгодженого навантаження в системі трифазного кабелю.

4 Аналіз існуючих робіт, де запропоновано розв'язок проблем довгого кабелю показав, що всі ці методи спрямовані на боротьбу не з причиною виникнення спотворень напруги, а із наслідками, тобто з саме цим спотворенням, тому її розв'язок є актуальною науково - практичною задачею.

5. Для розв'язку проблеми довгого кабелю необхідно знати точні значення його первинних параметрів. На сьогодні не існує простого та дешевого способу визначення цих параметрів.

В другому розділі побудовані та виконано аналіз математичних моделей для розрахунку напруги та струму в кабельних лініях електропередачі. Зокрема: математична модель процесу розповсюдження струмів і напруг в провідниках трифазного екранованого кабелю у вигляді системи диференційних рівнянь і дозволяє визначити значення струмів і напруг в провідниках кабелю в усіх режимах його роботи, а саме у випадку синусоїдального режиму: у вигляді системи диференційних рівнянь, коли струми і напруга в провідниках кабелю виражається через параметри кабелю і невідомі постійні інтегрування знаходяться із граничних умов, коли невідомі постійні інтегрування виражаються через відомі струми і напруги на початку провідників кабелю, коли невідомі постійні інтегрування виражаються через відомі напруги на початку провідників кабелю і опір його навантаження, у випадку невідомих напруг на початку кабелю і опору симетричного навантаження. Показано, що для використання цих моделей необхідно знати первинні параметри кабелю.

В третьому розділі розроблено метод визначення первинних параметрів ліній електропередач з двома та трьома провідниками. Автор стверджує, що для визначення первинних параметрів трифазної лінії достатньо провести експеримент для двопровідної лінії, використавши два будь - які проводи трифазної лінії. Для експериментального визначення первинних параметрів використовує вольтметр, амперметр, фазометр та вимірювач частоти. Перевірка методу проводилась співставленням експериментальних та розрахункових значень розподілу напруг на виході кабелю різної довжини. Перевірка показала, що при використаному лабораторному обладнанні

похибка визначення первинних параметрів становить не більше 5%. Здійснено аналіз мод падаючих і відбитих хвиль.

В четвертому розділі показано, що основною причиною виникнення проблем електромагнітної сумісності в довгих лініях зв'язку частотних електроприводів є спотворення форми напруги на виході лінії. Розв'язок цієї проблеми можливий лише за умови роботи лінії електропередачі в режимі без спотворень. Запропоновано метод покращення електромагнітної сумісності частотних перетворювачів та електричних двигунів в частотно-регульованих електроприводах, 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. Ці котушки слід включати в розрив броні кабелю по його поверхні.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність і новизна.**

Отримані Семенюгом О. М. результати мають наукову новизну. Вона полягає у тому, що з позиції системного підходу, використовуючи сучасні методи теоретичних і експериментальних досліджень 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.

Створено математичні моделі роботи кабельних ліній без спотворень, які представлені в аналітичній формі, що дозволено зробити висновок про складність досягнення електромагнітної сумісності при використанні багатожильних кабелів як ліній зв'язку між частотними перетворювачами та двигунами.

Вдосконалена математична модель розповсюдження електричної енергії в кабельних лініях електроприводів із частотним управлінням, яка відрізняється від існуючих підвищеною точністю за рахунок використання аналітичних виразів замість числових методів, що дозволено розробити метод аналітичного розрахунку хвильових процесів в кабельних лініях електроприводів із частотним управлінням.

Дістав подальший розвиток метод експериментального визначення первинних параметрів кабелів, який відрізняється від існуючих спрощенням експерименту і не потребує спеціального обладнання.

Положення і висновки відносно суті проблеми розроблених методів побудови математичних моделей достатньо обґрунтовані, вони базуються на методах математичного моделювання. Використовувались методи еквівалентних схем заміщення, гармонічний аналіз, методи комп'ютерно-орієнтованих моделей.

Висновки по розділах і по роботі в цілому відповідають змісту дисертації і є об'єктивними. Можна стверджувати, що приведені в дисертаційній роботі Семенюга О.М. висновки і рекомендації щодо використання результатів дослідження достатньо обґрунтовані і відповідають дійсності. Достовірність теоретичних положень підтверджено лабораторними й натурними експериментальними дослідженнями, а також забезпечена співпадінням теоретичних положень з результатами обчислювальних експериментів в системі з використанням математичного Інтернет – ресурсу „Wolfram Alpha”.

Основні результати досліджень **достатньо апробовані**. Вони доповідались на міжнародних науково - технічних конференціях і опубліковані у 11 наукових працях, в тому числі 6 статей, у яких опубліковані основні наукові результати, три статті, в яких додатково висвітлені результати дисертації і двох наукових праць апробаційного характеру.

Аналіз публікацій дозволяє зробити висновок, що в них у повному обсязі представлені матеріали дисертації. Автореферат дисертації відображає її зміст, ідеї та висновки, розкрито новизну розробок, теоретичне і практичне значення, результати проведених досліджень.

### **Значення отриманих результатів для теорії і практики.**

Наукова цінність дисертації Семенюга О. М. полягає в першу чергу в тому, що вона є новим кроком вперед в покращенні електромагнітної сумісності в кабельних лініях електроприводів із частотним управлінням асинхронних двигунів. Практичне значення цієї роботи полягає в тому, що проєктанти систем керування електроприводів із частотним управлінням в промисловості, транспорті, сільському господарстві отримали в свої руки новий метод та моделі, які дозволяють вдосконалити процес проєктування та введення в експлуатацію нових систем частотного керування асинхронними двигунами. Зокрема розроблено спосіб: експериментального визначення первинних параметрів ліній кабельного типу, покращення режиму роботи кабельних ліній без спотворень завдяки встановленню додаткових котушок індуктивності і в розрив броні кабелю, визначення критичної довжини лінії електропередачі, при якій забезпечується заданий рівень спотворень вихідної напруги.

Результати роботи впроваджені і використовуються при проєктуванні частотно - керованих електроприводів в інжиніринговій компанії „S-Engineering” та навчальному процесі кафедри теоретичних основ і загальної електротехніки Одеського національного політехнічного університету.

### **Зауваження по роботі.**

1. У вступі доцільно було б викласти наукове положення, а потім наукові результати і змінити послідовність їх викладення, спочатку, що отримано вперше, вдосконалено, потім, що отримало подальший розвиток.

2. Потребує уточнення формулювання об'єкта дослідження. Краще „процес виникнення не синусоїдальної напруги та хвильові процеси в кабелі живлення асинхронних двигунів з частотним регулюванням швидкості їх обертання.

3. Обсяг першого розділу завищено майже вдвічі.

4. Регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів, супроводжується перехідними процесами, тому при побудові математичних моделей для розрахунку струмів і напруг у багатожильному кабелі доцільно було б розглянути не тільки усталений, але і перехідний режим роботи.

5. Висновки по другому і третьому розділі доцільно подати у вигляді рекомендацій суспільству за отриманими результатами досліджень, а не у вигляді переліку проведених досліджень.

6. При побудові математичних моделей у другому розділі вважають, що первинні параметри (питомий опір, індуктивність, взаємні індуктивності, ємність і провідність) окремих жил кабелю однакові. Цього не гарантує жоден із заводів, що виготовляють кабелі, наприклад: ємність окремих жил кабелю, крім цього в процесі експлуатації змінюється провідність окремих жил кабелю. Чи буде це суттєво впливати на результати розрахунків струмів і напруг в запропонованих моделях?

7. Потребує пояснення чому в системі рівнянь (2.36) з'явився коефіцієнт  $1/6$ .

8. В третьому розділі доцільно було б обґрунтувати заміну трифазної лінії на лінію з двома проводами, коли третій буде вимкнено, як від джерела живлення так і від навантаження для визначення первинних параметрів трифазного кабелю. Таке спрощення математичної моделі можливо коли конструктивно кабель симетричний, параметри кабелю мають лінійну залежність від частоти сигналу.

9. Метод експериментального визначення первинних параметрів кабелю в разі проведення дослідження не передбачає зворотних зв'язків, тому результати визначення параметрів суттєво залежать від точності вхідних даних і кількості проведених експериментів. Автор на основі одного експерименту визначає абсолютну похибку вимірювань, що викликає сумнів в достовірності отриманих результатів.

10. В роботі бажано було б дати економічну оцінку отриманим результатам, або викласти хоча б методику розрахунку економічної ефективності отриманих результатів дослідження.

11. Ряд викладених в пояснювальній записці аналітичних залежностей не пронумеровано, якщо це просто проміжні перетворення, то їх доцільно винести в додатки.

12. За текстом дисертації зустрічаються описки та „русизми”, наприклад: працездатність, а не робото здатність, оцінка замість оцінювання, перешкоджання замість зменшення перешкод і т. п.

### **Висновки.**

Дисертаційна робота Семенюга Олександра Миколайовича на тему: „Методи та моделі покращення електромагнітної сумісності в кабельних лініях електроприводів із частотним управлінням” є закінченою науковою працею, у якій вирішено важливу наукову задачу покращення електромагнітної сумісності в кабельних лініях електроприводів із частотним управлінням.

Актуальність роботи, наукова новизна, ступінь обґрунтованих наукових положень, висновків і рекомендацій сформульованих у дисертації та їх достовірність не викликає сумнівів. Відмічені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації.

Дисертаційна робота відповідає спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи вимогам ДАК України, зокрема п.9.11.12 Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника, затвердженого постановою кабінету Міністрів від 24 липня 2013 року № 565 (зі змінами затвердженими постановою кабінету Міністрів України від 19 серпня 2015 року №656), які висуваються до робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, так як вони містять нові науково обґрунтовані результати проведених досліджень. Вважаю, що Семенюг О.М. заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 - електротехнічні комплекси та системи.

Завідувач кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті Вінницького національного технічного університету

д.т.н., професор



В. М. Кутін

