

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ТИМОХІН ОЛЕКСАНДР ВІКТОРОВИЧ



УДК 621.316

**ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ
ЕЛЕКТРИЧНИМИ МЕРЕЖАМИ НА ОСНОВІ ПЕРЕДАЧІ
ШИРОКОПОЛОСНИХ СИГНАЛІВ ПО РЕМ 0,4...10 кВ**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

КИЇВ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти та науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Яндульський Олександр Станіславович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського»,
декан Факультету електроенерготехніки та автоматики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кулик Володимир Володимирович,
Вінницький національний технічний університет,
м. Вінниця,
професор кафедри електричних станцій і систем;

кандидат технічних наук
Трач Ігор Васильович,
Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ,
старший науковий співробітник відділу моделювання
електроенергетичних об'єктів і систем №3.

Захист відбудеться «9» квітня 2019р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої ради К 26.002.06 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, вул. Політехнічна 37, корп. 20, ауд. 3.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «__» березня 2019р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Шостак В.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У відповідності до Енергетичної стратегії України на період до 2035 р. передбачається підвищення надійності та ефективності роботи розподільних електричних мереж (РЕМ) 0,4...10 кВ в умовах широкого впровадження відновлювальних джерел енергії (ВДЕ).

Для ефективного керування РЕМ впроваджуються нові підходи, що ґрунтуються на концепції «Smart Grid», які висувають нові вимоги до інформаційного забезпечення, серед яких є необхідність у обміні інформацією між засобами керування РЕМ, споживачами, об'єктами розподіленої генерації. Існуючі методи та засоби не в повній мірі забезпечують систему керування необхідними об'ємам інформації з допустимими затримками та заданою достовірністю передачі даних в реальному часі, що ускладнює впровадження сучасних технологій керування РЕМ.

Особливості РЕМ 0,4...10 кВ як об'єкта керування, серед яких співпадіння топологій РЕМ та інформаційних потоків, відносно невеликі об'єми інформації про стан та режими об'єктів РЕМ, що передаються від значної кількості розосереджених об'єктів РЕМ, незначні відстані між ними а також незадовільні техніко-економічні показники наявних засобів передачі, обумовлюють доцільність використання РЕМ як середовища для передачі інформаційних сигналів.

Використанню РЕМ 0,4...10 кВ як середовища передачі інформаційних сигналів присвячені науково-дослідні та дисертаційні роботи, що виконувались фахівцями Інституту Електродинаміки НАН України, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», ООО «Науково-технічний центр «Енергов'язок», ОАО «НТЦ електроенергетики», АО «Энергетический институт им. Г.М.Кржижановского», а також Лундського університету (Швеція), фірми Novell (США), компанії Echelon Corporation (США), університету Модені і Реджо-нель-Емілії (Італія), Наньянського технологічного університету (Сінгапура), Римського університету «Ла Сапієнца» (Італія), групи компаній HomePlug Alliance та ін. Основні результати виконаних робіт знайшли відображення в роботах Костенка М.В., Смірнова Б.В., Буслова Л.І., Шестопалова В.Н., Перельмана Л.М., Скриля В.Ф., Яндульського О.С., Хохлова Ю.В., Stephano Galli, Thomas Vanwell, Lars Selander та ін.

Вирішення поставлених задач вимагає використання широкополосних сигналів (ШПС) в якості інформаційних сигналів для передачі даних по РЕМ. В той же час РЕМ не призначено для передачі ШПС, що обумовлює необхідність у подальшому вдосконаленні методів і засобів передачі інформаційних сигналів шляхом розробки методів формування ШПС із покращеними параметрами для передачі по РЕМ та дослідження властивостей РЕМ як середовища передачі ШПС. Це дозволить об'єднати в єдину інформаційну мережу більшу кількість об'єктів керування РЕМ та підвищити швидкість передачі інформаційних сигналів, що підвищить ефективність

інформаційного забезпечення систем керування РЕМ та є актуальною науково-практичною задачею.

Зв'язок з науковими програмами, планами та темами. Дисертація виконана відповідно до планів наукових досліджень та господарських договорів кафедри Автоматизації енергосистем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» у тому числі «Розробка та впровадження інтегрованої системи управління груповими замірними установками ГЗУ» (№ держреєстрації 0101U000631), «Розробка та впровадження системи збору та передачі інформації від мікропроцесорних пристроїв релейного захисту для підстанції 500 кВ «Новодонбаська» (№601/352), «Розробка та впровадження автоматичного збору та передачі інформації із підстанцій 330/220/110 кВ «Луцьк-північна» від мікропроцесорних пристроїв РЗА та реєстратора аварійних процесів «Регіна» (№ держреєстрації 0103U005818)

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності інформаційного забезпечення СК РЕМ шляхом використання РЕМ як середовища передачі інформаційних ШПС із покращеними характеристиками та у визначенні умов розповсюдження ШПС по РЕМ 0,4...10 кВ.

Для досягнення мети поставлені наступні задачі:

1. Провести аналіз РЕМ як об'єкта керування та обґрунтувати використання РЕМ для передачі ШПС;
2. Розробити метод формування ШПС з покращеними характеристиками для передачі по РЕМ та оцінити вплив характеристик РЕМ 0,4...10 кВ на процес розповсюдження ШПС;
3. Провести експериментальне дослідження частотних характеристик РЕМ 0,4...10 кВ;
4. Розробити підхід до розрахунку частотних характеристик елементів РЕМ 0,4...10 кВ;
5. Розробити засоби передачі інформаційних сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ як складової СК РЕМ.

Об'єкт дослідження. Процеси розповсюдження інформаційних сигналів по розподільним електричним мережам 0,4...10 кВ.

Предмет дослідження. Властивості розподільних електричних мереж 0,4...10 кВ в діапазоні частот передачі ШПС, методи формування інформаційних сигналів, що передаються по РЕМ 0,4...10 кВ, та методи розрахунку характеристик РЕМ 0,4...10 кВ.

Методи дослідження. В дисертації для вирішення задачі покращення характеристик ШПС, що передаються по РЕМ 0,4...10 кВ використано функція Wave-вейвлета. Для оцінки якості передачі сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ використано елементи кореляційного аналізу. При аналізі спектрів сигналів використано математичний апарат Фур'є аналізу. При аналізі РЕМ 0,4...10 кВ як середовища сигналів застосовувалися елементи теорії ліній із розподіленими параметрами. При розробці підходу до розрахунку параметрів елементів РЕМ як лінії із розподіленими параметрами було використано рівняння Максвела, розв'язок яких здійснювався сертифікованому програмному комплексу

розрахунку електричних та магнітних полів на основі метода скінчених елементів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Розроблено новий метод формування ШПС, який, на відміну від існуючих, полягає у застосуванні додаткового перетворення сигналу за допомогою Wave-вейвлет функції, що дозволило зосередити енергію ШПС в полосі передачі та підвищити ефективність використання частотного діапазону при передачі ШПС по РЕМ.

2. Запропоновано підхід до розрахунку параметрів елементів РЕМ як лінії із розподіленими параметрами, який, на відміну від існуючих, полягає у розв'язку рівнянь Максвелла методом скінчених елементів для моделей елементів РЕМ на основі геометричного розташування, електричних і магнітних параметрів матеріалів складових елементів РЕМ.

3. Розроблено новий метод дослідження фазочастотних характеристик РЕМ, який, на відміну від існуючих, полягає в передачі зфазованих сигналів по РЕМ, що дозволяє проводити експериментальне визначення фазочастотних характеристик під напругою без створення зворотного каналу передачі сигналів.

4. Отримано нові характеристики РЕМ в умовах передачі ШПС, що дозволило розробити вимоги та рекомендації до застосування ШПС для передачі по РЕМ.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає в тому, що розроблений новий метод формування ШПС на основі додаткового перетворення сигналу за допомогою Wave-вейвлет функції дозволив зосередити 99 % енергії ШПС в полосі передачі, що дозволило побудувати пристрої передачі інформаційних сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ з ефективним використанням частотного діапазону.

Розроблені методи формування ШПС та засоби інформаційного забезпечення СК РЕМ на основі передачі ШПС по РЕМ 0,4...10 кВ, що дозволяє забезпечити виконання задач керування в умовах впровадження технологій SmartGrid.

Запропонований підхід до розрахунку параметрів елементів РЕМ як лінії із розподіленими параметрами та отримані нові характеристики РЕМ, що можуть бути використані при проектуванні нових систем передачі інформаційних сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ.

Розроблений новий метод дослідження ФЧХ РЕМ з використанням зфазованих сигналів, що дозволяє побудувати систему корекції ФЧХ РЕМ у вузлах прийому ШПС в реальному часі, що покращить якість прийому ШПС.

Результати роботи використані при розробці інтегрованої системи управління установками ГЗУ НГВУ "Чернігівнафтогаз".

Результати роботи також використані у навчальному процесі кафедри автоматизації енергосистем в дисципліні «Основи та засоби передачі інформації», під час курсового та дипломного проектування.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення і результати, викладені в дисертаційній роботі, розроблені автором самостійно. Формулювання мети роботи, вибір методологічних підходів, узагальнення результатів виконані

безпосередньо дисертантом за участю наукового керівника. Робота [1] написана автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: [3] – підхід до аналізу якості розповсюдження ШПС по РЕМ 0,4...10 кВ на основі кореляційного аналізу; [2, 4] – підхід до аналізу та аналіз експериментальних результатів; [11] – отримання та аналіз нових закономірностей розповсюдження сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ в частотному діапазоні 1-1000 кГц; [12, 13] – підхід до побудови пристроїв корекції частотних характеристик РЕМ при використанні їх для передачі ШПС; [5, 6, 7, 10, 14] – аналіз систем керування РЕМ та вимоги до них в умовах впровадження технологій SmartGrid.

Апробація матеріалів дисертації. Основні теоретичні положення, результати та висновки по роботі доповідалися та обговорювалися на П'ятій міжнародній науково-практичній конференції “Комп’ютерні системи в автоматизації виробничих процесів” (м. Хмельницький, 2007), Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електротехніки та автоматики» (м.Київ, 2010), II Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2013)» (м. Вінниця, 2013 р.); на V Міжнародній науково-технічній конференції «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах» (м. Луцьк, 2014 р.); на ОКЕУ 2013 Оптимальне керування електроустановками. II Міжнародна науково-технічна конференція. (м. Вінниця 2013р.); V Міжнародна науково-технічна конференція «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах». (Луцьк, 2014р.); Четверта міжнародна конференція «Інтелектуальні енергетичні системи - ESS'15». (м. Київ, 2015р.); ОКЕУ 2015 Оптимальне керування електроустановками. III Міжнародна науково-технічна конференція. (м. Вінниця, 2015р); ОКЕУ 2017 Оптимальне керування електроустановками. IV Міжнародна науково-технічна конференція. (м. Вінниця, 2017р);

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 20 наукових праць, в тому числі 9 статей у наукових фахових виданнях України (3 статті у виданнях України, які включені до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International, РИНЦ).

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (136 найменувань) і додатків. Основний зміст викладений на 154 сторінках друкованого тексту, містить 8 таблиць, 61 рисунки. Загальний обсяг дисертації – 171 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність та доцільність теми дослідження, сформульовано мету, завдання, об’єкт, предмет і методи дослідження, практичне значення та апробацію результатів роботи.

У першому розділі проведено аналіз стану РЕМ України як об’єкта керування. Встановлено, що сучасні тенденції розвитку СК РЕМ в умовах

збільшення кількості ВДЕ та інших об'єктів розосередженої генерації, а також підвищення вимог до якості електропостачання споживачів обумовлюють необхідність вирішення нових задач керування, що потребують відповідного інформаційного забезпечення СК.

Встановлено, що в існуючих інформаційних мережах використовують різноманітні інформаційні інтерфейси та різноманітні протоколи передачі даних. При цьому групи об'єктів моніторингу та керування РЕМ локалізовані в межах одного об'єкта РЕМ, що дозволяє об'єднання інформаційних потоків від цих об'єктів РЕМ в єдиний потік при передачі на ДП РЕМ. Тобто, на інформаційні мережі СК РЕМ покладається комплекс нових задач по інтеграції до інформаційної мережі СК РЕМ великої кількості об'єктів керування РЕМ із різними інтерфейсами, швидкостями та протоколами передачі. Об'єднання об'єктів моніторингу та керування РЕМ в межах об'єкта РЕМ обумовлює необхідність підвищення швидкості передачі повідомлень в системах інформаційного забезпечення РЕМ.

Відзначено, що при створенні СК РЕМ з великою кількістю об'єктів моніторингу та керування доцільним є використання як існуючих засобів інформаційного забезпечення, так і розробка нових. При цьому слід відзначити, що для потреб інформаційного забезпечення СК РЕМ використовуються різні типи КПД, що ускладнює процес інтеграції їх в СК РЕМ.

Проведений аналіз показав, що в наслідок співпадіння топології РЕМ із топологією інформаційних потоків СК РЕМ, а також по техніко-економічним показникам доцільним при побудові систем інформаційного забезпечення є використання РЕМ 0,4...10 кВ як середовища для передачі інформаційних сигналів.

Однак існуючі підходи до побудови засобів передачі інформаційних сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ не в повній мірі відповідають новим вимогам до засобів передачі інформаційних сигналів систем інформаційного забезпечення СК. Тому виникає необхідність в подальшому розвитку підходів до побудови засобів передачі інформаційних сигналів по РЕМ.

На основі проведеного аналізу існуючих методів і засобів передачі інформаційних сигналів по РЕМ встановлено доцільність використання ШПС в якості інформаційних сигналів для передачі по РЕМ 0,4...10 кВ, які на відміну від існуючих сигналів дозволяють здійснити багатоканальну передачу, збільшити швидкість і завадостійкість передачі інформаційних сигналів по РЕМ. Але обмеженість полоси частот, що придатна для передачі сигналів по РЕМ, потребує подальшого розвитку підходів формування ШПС для ефективного використання РЕМ 0,4...10 кВ як середовища передачі ШПС.

У другому розділі проведено аналіз сигналів, які використовуються для передачі по РЕМ в системах інформаційного забезпечення СК РЕМ, в тому числі класичних вузькополосних сигналів і сучасних ШПС.

В спектрах інформаційних сигналів для передачі по РЕМ, що отримані класичними методами 90% енергії сигналу знаходиться в межах першої пелюстки спектру. При цьому решта енергії втрачається, що призводить до спотворення сигналу.

Для зменшення частини енергії, що виходить за рамки першої пелюстки, запропоновано новий метод, який полягає у додатковому перетворенні сигналу за допомогою Wave-вейвлет функції, яка є швидко згасаючою як в частотному, так і в часовому просторах і є безперервно інтегрованими та диференційованими на всьому часовому інтервалі. Блок-схема пристрою, що реалізує запропонований метод представлено на рис. 1.

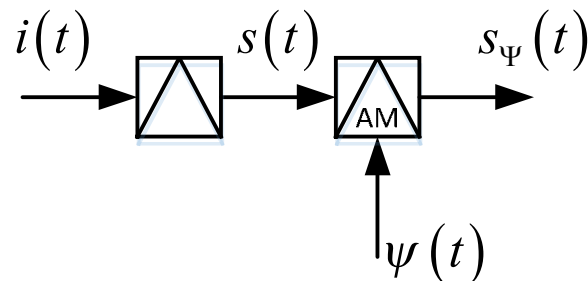


Рисунок 1 – Блок-схема додаткового перетворення сигналу за допомогою Wave-вейвлет функції:

$i(t)$ – інформаційний сигнал; $s(t)$ – модульований інформаційний сигнал; $\psi(t)$ – Wave-вейвлет функція, що обмежена в часовому та частотному просторах; $s_\psi(t)$ – сигнал після додаткового перетворення

Wave-вейвлет функція є 1-ю похідною функції Гауса:

$$\psi(t) = te^{-\frac{t^2}{2}}. \quad (1)$$

В якості критерію обмеження сигналу в часовому просторі $[-\tau_\psi; \tau_\psi]$ було використано умови (2):

$$\begin{cases} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(\omega, \tau_\psi)^2 d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(\omega, \infty)^2 d\omega} \geq 0,99 \\ \frac{|\psi(\tau_\psi)|}{|\psi_{\max}|} \leq 0,01 \end{cases} \quad (2)$$

В результаті використання запропонованого методу отримано ШПС, фрагмент якого представлено на рис. 2.

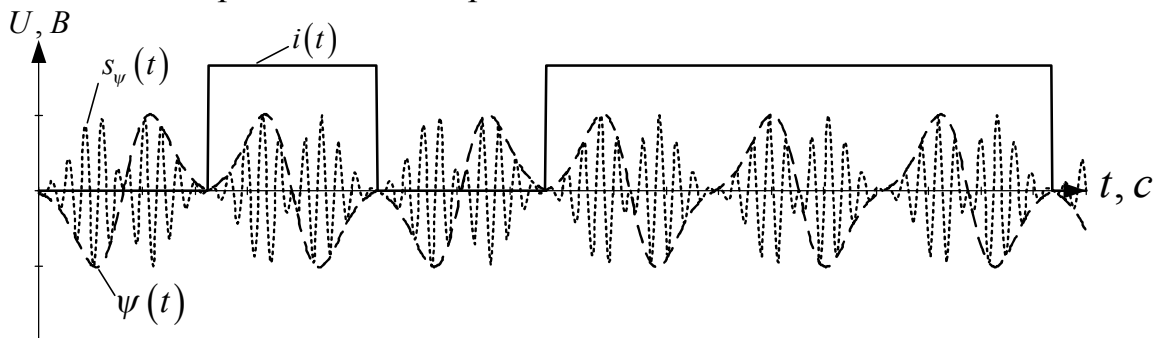


Рисунок 2 – Фрагмент інформаційного ШПС сигналу $i(t)$, Wave-вейвлет функції $\psi(t)$ та вихідного сигналу $s_\psi(t)$

Показано, що система обмежень сигналів (2) дозволила отримати сигнал, 99% енергії якого лежать в визначених межах в частотній та часовій площинах.

Важливим при передачі ШПС є вплив на нього частотних характеристик РЕМ. Для оцінки впливу частотних характеристик РЕМ 0,4...10 кВ на процес розповсюдження сигналів по РЕМ запропоновано підхід на основі кореляційного аналізу між сигналами на стороні передачі та прийому. В якості критерію оцінки використано коефіцієнт кореляції між сигналами на стороні передачі та прийому, який у математичному вигляді представлено виразом (3).

$$r = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{j\varphi_n} E_n}{\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} E_n \sum_{n=0}^{\infty} A_n^2 e^{2j\varphi_n} E_n}}, \quad (3)$$

де E_n – енергія n -ї гармоніки в спектрі вихідного сигналу; A_n – АЧХ РЕМ для n -ї гармоніки; φ_n – ФЧХ РЕМ для n -ї гармоніки.

На основі запропонованого підходу проведено оцінку впливу АЧХ РЕМ на процес розповсюдження ШПС. Дослідження проводились з використанням АЧХ ділянок РЕМ, що представлені на рис. 3.

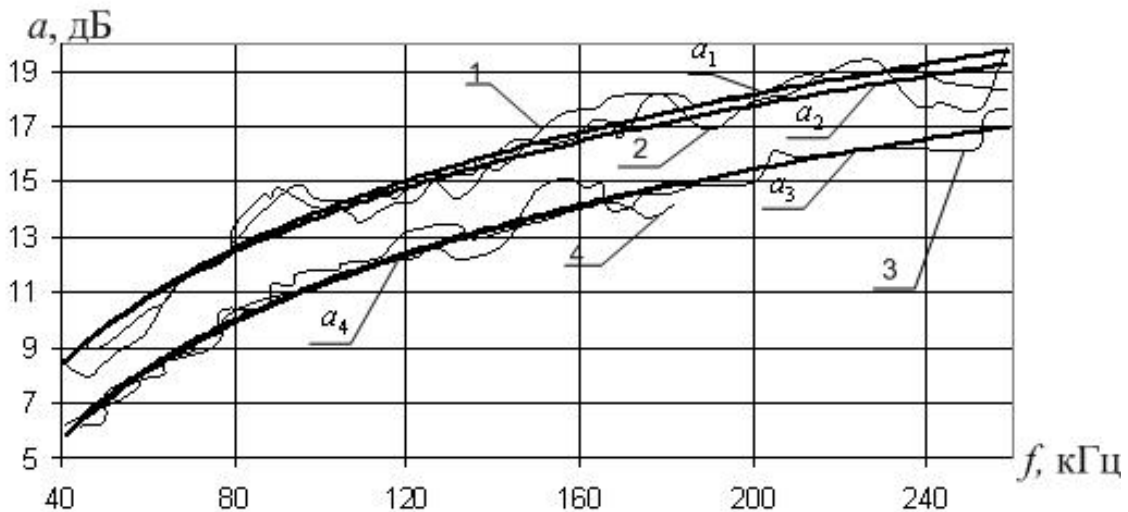


Рисунок 3 – АЧХ ділянок РЕМ 20 кВ: 1 – "чиста лінія"; 2 – на початку лінії включено трансформатор 1000 кВА; 3 – в кінці лінії підключений вузол радіальних ліній; 4 – на початку лінії включено два трансформатори 1000 кВА; $a_{1...4}$ – апроксимуючі криві

Із застосуванням запропонованого підходу (3) отримано результати оцінки впливу АЧХ РЕМ на процес розповсюдження ШПС по РЕМ, аналіз яких показав, що коефіцієнт кореляції між сигналом на стороні прийому та вихідним сигналом для дослідних АЧХ РЕМ знаходиться в межах $r = 0,92 - 0,929$. Відхилення значення вільного члена апроксимованої АЧХ не призводить до зміни значень коефіцієнта кореляції, що говорить про його незалежність від лінійної складової, а основний вплив здійснює нелінійна складова. Відповідно виникла необхідність в дослідженні АЧХ РЕМ з метою виявлення характерних нелінійностей та їх вплив на процес розповсюдження ШПС.

де $\Delta\psi_{n(n+1)}$ – експериментально отримані дані відносних зсувів фаз двох гармонійних сигналів. Відповідно маємо систему n – рівнянь з $(n+1)$ невідомими, що не дозволяє отримати єдиний розв’язок.

Для вирішення отриманої системи прийнято зафіксувати один із зсувів фаз. Тоді розв’язок системи рівнянь (10) при фіксації i -го зсуву фаз $\Delta\varphi_i$ має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\varphi_1 = 0 \\ \Delta\varphi_2 = -\Delta\psi_{1,2} \\ \Delta\varphi_3 = \frac{f_3}{f_2} \Delta\varphi_2 - \Delta\psi_{2,3} \\ \dots\dots\dots \\ \Delta\varphi_{n+1} = \frac{f_{n+1}}{f_n} \Delta\varphi_n - \Delta\psi_{n,(n+1)} \end{array} \right. \quad . \quad (11)$$

Розв’язок системи рівнянь (11) і є відносна ФЧХ РЕМ в діапазоні частот $[f_1, f_{n+1}]$ відносно фази сигналу з частотою f_i .

Запропонований метод не дозволяє визначити абсолютну ФЧХ для будь-якої точки дослідного частотного діапазону, а тільки для дискретних точок дослідного частотного діапазону без урахування резонансних частот, які створюють розриви в ФЧХ, але при цьому запропонований метод дозволяє здійснити дослідження ФЧХ між точками, що розташовані на значних відстанях одна від одної без створення зворотного каналу передачі сигналів, що особливо актуально у випадку дослідження ФЧХ РЕМ.

Для реалізації запропонованого методу для дослідження ФЧХ розроблена дослідна установка, блок-схема якої наведена на рис. 4.

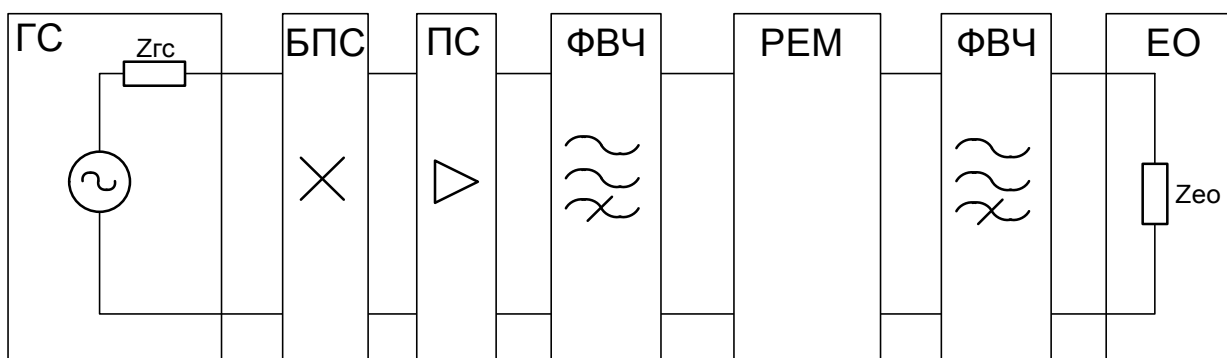


Рисунок 4 – Блок-схема досліду ФЧХ РЕМ 0,4-10 кВ:

ГС – генератор сигналів; БПС – блок перемноження сигналів; ПС – підсилювач; ФВЧ – фільтр верхніх частот; ЕО – електронний осцилограф

Результати дослідження загасання та вхідного опору РЕМ показали, що характер зміни повного вхідного опору РЕМ $Z_{вх}$ має схожий характер для всіх трьох фаз і збільшується від 1-3 Ом на частотах від 1÷100 кГц до 8 Ом для фази С і 16÷18 Ом для фаз А і В на частоті 1000 кГц. Максимальне значення 21,53 Ом

отримано для фази B на частоті 780 кГц. Слід зауважити наявність провалу Z_{ex} на частоті 50 кГц, що може бути обумовлено резонансом в мережі.

Встановлено, що частотні характеристики z , r , x , та φ не мають чіткої залежності і характеризуються рядом екстремумів, що свідчить про наявність резонансних частот дослідної мережі, що відповідають резонансам струмів та напруг. Зокрема для вхідного опору спостерігався резонанс струмів для дослідної мережі спостерігається на 9 кГц, 50 кГц, 220 кГц, 455 кГц та 780 кГц. Для ділянки мережі в зворотному напрямку спостерігається резонанс струмів на частоті 9 кГц для всіх фаз та на частоті 288 кГц для фази A , а резонанс напруг на частоті 50 кГц. На більш високих частотах від частоти 445 кГц спостерігається лінійне зростання вхідного опору по всіх фазах.

Дослідження рівнів передачі показало, що для дослідної мережі рівні передачі лежать в межах $-88 \div -18$ дБ. На частотах 200, 550 та 850 кГц всі криві мають максимуми. На частотах $400 \div 500$ кГц та $600 \div 650$ кГц спостерігається зниження рівня сигналів по всіх фазах. Коливання рівня сигналів лежить в межах $0 \div 25$ дБ.

Встановлено, що по окремій фазі мінімальний рівень сигналу було зафіксовано на частоті 450 кГц і становить -78 дБ, а максимальний – на частоті 300 кГц і становить -40 дБ. По інших фазах результати були схожими та відрізнялись в межах $2 \div 3$ дБ.

При дослідженні рівнів передачі сигналів із мережі 0,4 кВ в мережу 10 кВ було встановлено, що мінімальний відносний рівень сигналу спостерігався на частоті 150 кГц і склав -73 дБ, максимальний відносний рівень спостерігався на частоті 800 кГц і склав -63 дБ. Характер зміни рівня передачі від частоти плавний. Найбільш придатним для передачі є діапазон $400 \div 1000$ кГц в якому рівень передачі знаходиться в межах від -58 дБ до -44 дБ.

Результати дослідження ФЧХ для РЕМ 0,4 кВ показали, що зміна відносного фазового тракту сягає $150^\circ - 320^\circ$. Всі отримані ФЧХ мають тенденцію до спадання фазового зсуву по відношенню до 10 кГц, причому після 600 кГц крутизна спадання зростає.

У четвертому розділі проведено аналіз методів розрахунку РЕМ як середовища передачі сигналів для розрахунку частотних характеристик РЕМ. Аналіз проводився на основі представлення РЕМ у формі хвильових каналів, які описуються системою із $2n$ рівнянь виду (12)

$$\begin{cases} -\frac{d^2}{dx^2} \mathbf{U}_s = \boldsymbol{\lambda}^{-1} \mathbf{P} \boldsymbol{\lambda} \mathbf{U}_s \\ -\frac{d^2}{dx^2} \mathbf{I}_{(s)} = \boldsymbol{\delta}^{-1} \mathbf{P}^T \boldsymbol{\delta} \mathbf{I}_{(s)} \end{cases}, \quad (12)$$

де $\boldsymbol{\lambda}$ та $\boldsymbol{\delta}$ – квадратні не вироджені матриці, елементи яких не залежать від повздовжньої координати x і є такими, що перетворюють матриці \mathbf{P} та \mathbf{P}^T у діагональні матриці, а $\mathbf{P} = \mathbf{Z}\mathbf{Y}$; $\mathbf{P}^T = \mathbf{Y}\mathbf{Z}$ - матриці, що є похідними від матриці повних опорів \mathbf{Z} та матриці повних провідностей \mathbf{Y} .

Узагальнене рішення системи рівнянь (12) має вигляд

$$\mathbf{U}_s = e^{-\gamma x} \mathbf{B}_{1s} + e^{\gamma x} \mathbf{B}_{2s} = \mathbf{U}_{s.\text{пад}} + \mathbf{U}_{s.\text{відб}}, \quad (13)$$

де $e^{-\gamma x}$ – експоненціальна функція від діагональної матриці γx , яка представляє собою діагональну матрицю з членами $e^{-\gamma_s x}$; \mathbf{B}_{1s} і \mathbf{B}_{2s} – стовбцеві матриці з відповідними постійними інтегрування; $\mathbf{U}_{s.\text{пад}}$ і $\mathbf{U}_{s.\text{відб}}$ – відповідно матриці падаючої та відбитої хвиль напруги.

Встановлено, що для використання системи рівнянь (12) та її розв'язку (13) потребує знання параметрів реальної РЕМ як лінії із розподіленими параметрами.

Проведений аналіз спрощених методів показав, що вони основані на представленні ВЧ тракту по РЕМ двома характеристиками: a_{mp} – загасання тракту та Z_{ex} – характеристичний тракту.

$$\begin{cases} a_{mp} = a_{mp.\text{дл}} + \Delta a_{\text{від}} \\ Z_{ex} = K_{ex} Z_c \end{cases}, \quad (14)$$

де $a_{mp.\text{дл}}$ – згасання ліній, що входять до тракту за умови, що всі хвилі, що виникли в наслідок відбиття від місць порушення однорідності, повністю загасають в однорідних ділянках тракту, Z_c – характеристичний опір лінії, поправка $\Delta a_{\text{від}}$ та коефіцієнт K_{ex} враховують багатократні відбиття в точках порушення однорідності.

Такий підхід не враховує фазочастотної характеристики РЕМ, що важливо при застосуванні для передачі ШПС і потребує наявності експериментальних даних обладнання РЕМ в широкому частотному діапазоні.

В роботі при розрахунку РЕМ для коректного врахування ФЧХ використано підхід представлення РЕМ, при якому лінії електропередач РЕМ розбиваються на ділянки, довжиною $l_{\text{max}} = \frac{1}{|\gamma|}$, де γ – стала розповсюдження лінії електропередач РЕМ. А кожна з ділянок еквівалентується мостовою схемою заміщення.

Для вирішення задачі визначення параметрів еквівалентної мостової схеми заміщення елементів РЕМ запропоновано використання чисельного розв'язку методом скінчених елементів рівнянь Максвелла для просторових моделей елементів РЕМ.

Перевірка запропонованого підходу виконана шляхом порівняння розрахункових та експериментально отриманих параметрів елементів РЕМ. В якості дослідного елемента РЕМ обрано силовий кабель ГРШЕ 3x35+1x10+3x4, зовнішній вигляд геометричного розташування складових якого представлено на рис. 5.

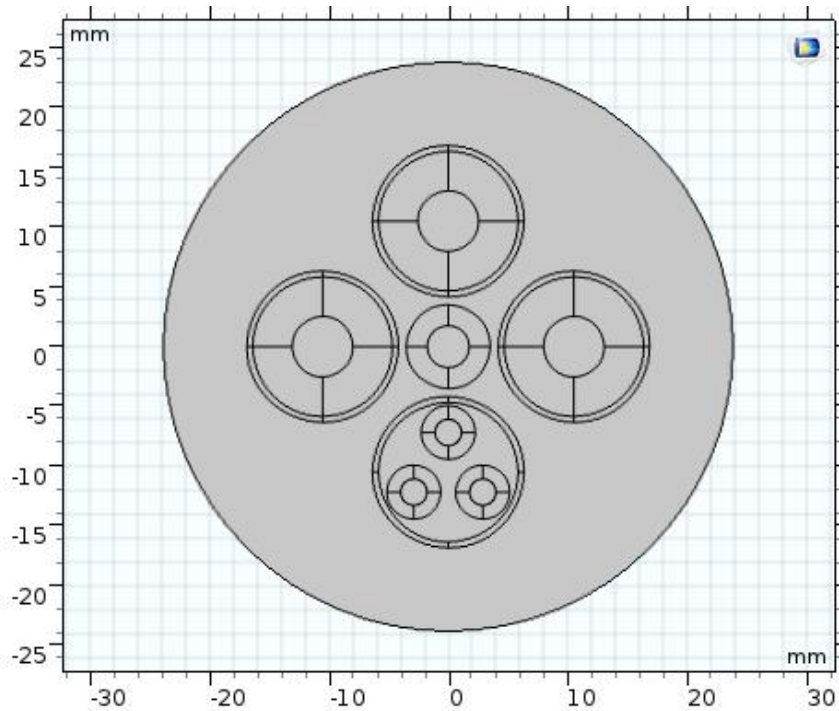


Рисунок 5 – Геометричне розташування складових дослідного елемента РЕМ в програмному комплексі COMSOL Multiphysics 5.3a

Розрахунок параметрів дослідного елемента РЕМ здійснювався на основі вирішення задачі визначення розподілу електричного потенціалу при моделюванні подачі постійної напруги амплітудою 1 В між фазами В та С та щільності магнітного потоку шляхом моделювання проходження струму по фазі В та в зворотному напрямку по фазі С. Для моделювання було використано математичний пакет COMSOL Multiphysics 5.3a.

Результати розрахунку розподілу електричного потенціалу та щільності магнітного потоку в дослідному елементі РЕМ представлено на рис. 6 та рис. 7.

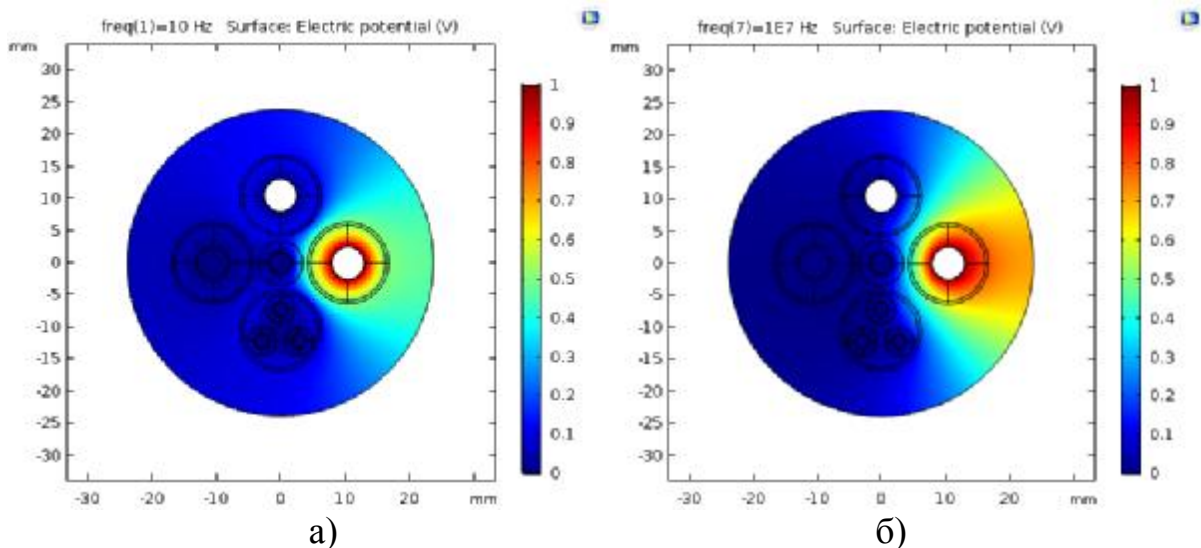


Рисунок 6 – Геометричний розподіл електричного потенціалу в дослідному елементі РЕМ для частот 10 Гц (а) та 10 МГц (б)

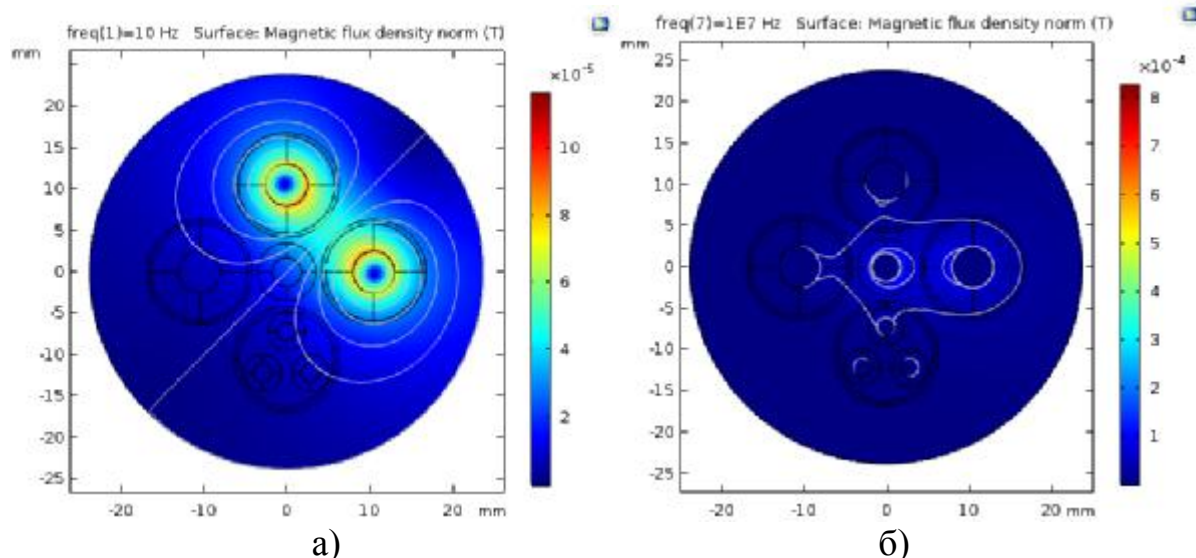


Рисунок 7 – Геометричний розподіл щільності магнітного потоку в дослідному елементі РЕМ для частот 10 Гц (а) та 10 МГц (б)

На підставі отриманого розв'язку отримано поперечні та повздовжні параметри дослідного елемента РЕМ, а також вхідний хвильовий опір та його стала розповсюдження, які представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Повздовжні параметри дослідного елемента РЕМ

| Частота, кГц | Повздовжний опір, Ом/км | Повздовжна індуктивність, мГн/км | Поперечна провідність, мСм/км | Поперечна ємність, мкФ/км | Z_{ex} , Ом/км | γ , 1/км |
|--------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------|---|------------------|
| 0,01 | 2,565 | 0,700 | $3,491 \cdot 10^{-7}$ | 0,225 | $2,985 \cdot 10^{-4} + 3,04 \cdot 10^{-4}j$ | 429,657-422,343j |
| 0,1 | 2,574 | 0,695 | $4,067 \cdot 10^{-6}$ | 0,225 | $8,765 \cdot 10^{-4} + 0,001j$ | 146,816-123,996j |
| 1 | 2,709 | 0,665 | $3,759 \cdot 10^{-4}$ | 0,225 | $0,002 + 0,006j$ | 80,465-23,808j |
| 10 | 5,016 | 0,613 | 0,375 | 0,225 | $0,003 + 0,052j$ | 73,952-4,700j |
| 100 | 14,475 | 0,567 | 3,697 | 0,224 | $0,017 + 0,501j$ | 71,096-0,512j |
| 1000 | 44,364 | 0,552 | 151,783 | 0,197 | $0,313 + 4,634j$ | 74,511+4,08j |
| 10000 | 147,220 | 0,547 | 533,134 | 0,174 | $1,149 + 43,287j$ | 79,307+1,765j |

Відомо, що експериментально встановлені поперечні для дослідного елемента РЕМ знаходяться в межах 0,223-0,241 мкФ/км. В результаті

моделювання отримана повздовжна ємність дослідного елемента РЕМ $0,225 \text{ мкФ/км}$ на частотах до 100 кГц , що відповідає експериментальним даним та підтверджує коректність моделі і розрахункових параметрів.

Аналіз отриманих результатів показав, що із зростанням частоти повздовжній опір суттєво зростає із частотою починаючи із 100 кГц від $14,475 \text{ Ом}$ до $147,22 \text{ Ом}$ на частоті 10 МГц . При цьому повздовжна індуктивність навпаки падає, хоч і не так суттєво, від $0,665 \text{ мГн}$ на частоті 1 кГц і до $0,547 \text{ мГн}$ на частоті 10 МГц . Ці результати обумовленні дією скін-ефекту.

Проведені дослідження показали сталість поперечної ємності на частотах до 100 кГц та її зниження на частотах більше 100 кГц до $0,174 \text{ мкФ/км}$ (на 23%) на частоті 10 МГц , що може бути пов'язане із перерозподілом поля в об'ємі кабеля складної конструкції. Повздовжна провідність навпаки суттєво зростає з частотою від $3,491 \cdot 10^{-7} \text{ См/км}$ на частоті 10 Гц до $533,134 \text{ См/км}$ на частоті 10 МГц , у зв'язку із її прямою залежністю від частоти.

Проведені дослідження показали можливість визначення первинних параметрів РЕМ як лінії із розподіленими параметрами шляхом чисельного вирішення методом скінчених елементів рівнянь Максвелла для просторової моделі елементів РЕМ із врахуванням електричних та магнітних властивостей матеріалів із яких вони побудовані.

Проведені дослідження та запропоновані підходи було використано при розробці елементів засобів передачі інформаційних сигналів по РЕМ $0,4 \dots 10 \text{ кВ}$ як складові системи інформаційного забезпечення СК РЕМ.

Зокрема при розробці пристрою використано підхід обмеження частотного спектру сигналу шляхом додаткової амплітудної модуляції функцією, що обмежена в частотному та часовому просторах. Для реалізації запропонованого підходу розроблено формувач додаткової модулюючої функції, що забезпечує локалізацію сигналів в межах спектру модулюючої функції. Структурна схема отримання модулюючої функції представлена на рис. 8.

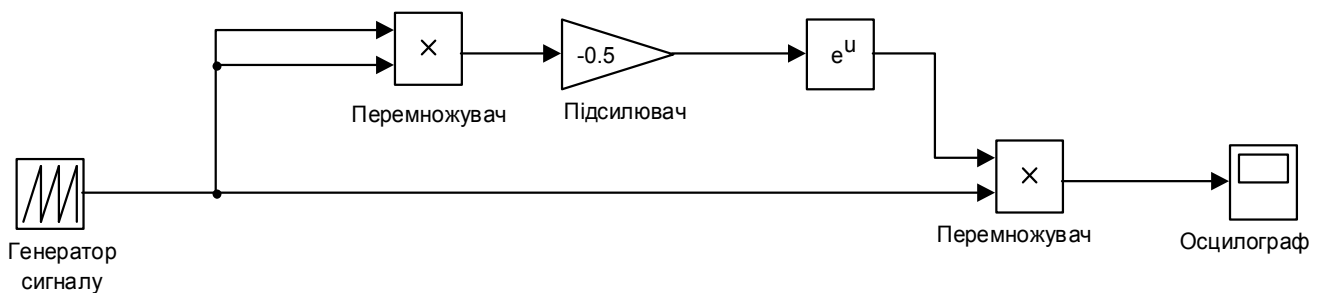


Рисунок 8 – Блок-схема формувача модулюючої функції для побудови сигналів з підвищеною ефективністю використання частотного спектру

Функція отримувалась в аналоговому вигляді шляхом схемних реалізацій математичних функцій. А саме функцій множення та обчислення функції e^u . Для реалізації множення сигналів використано мікросхему аналогового перемножувача AD835, а для отримання e^u – багатфункціональний аналоговий обчислювальний модуль AD538.

Розроблені засоби передачі інформаційних сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ впроваджено при побудові інтегрованої системи управління установками ГЗУ НГВУ "Чернігівнафтогаз".

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання, що полягає у підвищенні ефективності інформаційного забезпечення СК РЕМ шляхом передачі інформаційних ШПС з покращеними властивостями по РЕМ та у визначенні умов розповсюдження ШПС по РЕМ 0,4...10 кВ.

В дисертаційній роботі отримані наступні наукові та практичні результати:

1. Встановлено, що тенденції розвитку ОЕС України ставлять додаткові вимоги до СК РЕМ, що обумовлює зростання об'ємів інформації СК РЕМ. Реалізація додаткових вимог до СК РЕМ потребує більш складних та оптимальних алгоритмів керування, які ґрунтуються на управлінні об'єктами генерації, розподілення та споживання РЕМ як єдиною системою. Це вимагає підвищення керованості вузлів РЕМ шляхом встановлення автоматичних і автоматизованих засобів керування та об'єднання їх в єдину інформаційну мережу. Аналіз підходів до побудови інформаційних мереж СК РЕМ показав доцільність використання РЕМ 0,4...10 кВ для передачі інформаційних ШПС.

2. На основі проведеного аналізу підходів по створенню ШПС розроблено новий метод формування ШПС із використанням додаткового перетворення сигналу за допомогою Wave-вейвлет функції, що дозволило зосередити 99% енергії сигналу в заданій полосі передачі, що підвищує ефективність використання частотного діапазону РЕМ для передачі ШПС.

3. Розроблено метод експериментального дослідження ФЧХ РЕМ на основі передачі по електричній мережі зфазованих сигналів, що дозволило провести дослідження ФЧХ РЕМ під напругою без створення зворотного каналу передачі сигналів.

4. Експериментальне дослідження АЧХ РЕМ 0,4...10 кВ показало, що вони є нелінійними і не мають вираженої аналітичної залежності. Загасання лежить в межах -79 дБ – -12 дБ для різних ділянок мережі. АЧХ РЕМ має декілька провалів і піків, що обумовлено резонансними явищами в дослідній РЕМ 0,4...10 кВ. Встановлено, що вхідний опір РЕМ в частотному діапазоні до 1000 кГц змінюються від 1 Ом до 40 Ом, причому зміна навантаження у вузлах РЕМ практично не впливає на його значення. Дослідження відносної ФЧХ РЕМ показало, що характеристика є нелінійною та кут змінюється від 0° до 320° (по відношенню до частоти 10 кГц) для дослідних ділянок РЕМ.

5. В результаті аналізу методів розрахунку РЕМ як середовища передачі сигналів встановлено, що існуючі методи використовують частотні характеристики загасання та опору елементів РЕМ, при цьому не враховують ФЧХ елементів РЕМ. Це унеможливує їх застосування до розрахунку РЕМ як середовища передачі ШПС.

6. Запропоновано підхід розрахунку параметрів елементів РЕМ шляхом чисельного розв'язання рівнянь Максвелла методом скінчених елементів для геометричних форм складових елементів РЕМ із урахуванням електричних і

магнітних параметрів матеріалів, що дозволяє застосувати метод моделювання РЕМ на основі телеграфних рівнянь для моделювання РЕМ як середовища передачі ШПС. Проведені дослідження показали коректність запропонованого підходу розрахунку параметрів елементів РЕМ, що підтверджено співпадінням експериментально визначених та чисельно розрахованих параметрів для дослідних елементів РЕМ.

7. Розроблено елементи системи інформаційного забезпечення СК РЕМ із використанням запропонованих методів та підходів, які випробувано в умовах РЕМ 0,4...10 кВ, що дозволить вирішити нові задачі інформаційного забезпечення СК РЕМ в умовах впровадження технологій SmartGrid.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Тимохін О. В. Підвищення ефективності передачі інформації по розподільних електричних мережах 0,4-10 кВ / Тимохін О. В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014(1). – С. 66–69. (включено до міжнародної наукометричної бази даних РИНЦ)

Особистий внесок: Використання додаткового перетворення сигналу за допомогою Wave-вейвлет функції для зосередження енергії ШПС в полосі передачі.

2. Яндульский А. С. [и др.] Обработка широкополосных сигналов в информационно-управляющих системах на основе каналов передачи данных по РЭС 0,4...10кВ / Яндульский А. С., Тимохин А. В. // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – 2006(3). – №2 – С. 84–87.

Особистий внесок: Розробка математичних основ аналізу впливу характеристик РЕМ на процес розповсюдження ШПС.

3. Яндульский А. С. [и др.] Оценка влияния амплитудно- и фазочастотных характеристик канала передачи данных по РЭС 0,4...20 кВ на основе широкополосных сигналов / Яндульский А. С., Тимохин А. В. // Проблеми сучасної електротехніки. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – 2006(6). – С. 42–45.

Особистий внесок: Аналіз впливу АЧХ і ФЧХ окремих ділянок РЕМ на процес розповсюдження ШПС.

4. Яндульский А. С. [и др.] Оценка влияния характеристик распределительных электрических сетей 0,4...20кВ на процесс распространения широкополосных сигналов в распределительных электрических сетях / Яндульский А. С., Тимохин А. В. // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2007(1). – №2 – С. 167–171.

Особистий внесок: Аналіз впливу характеристик РЕМ на процес розповсюдження ШПС.

5. Яндульський О. С. [и др.] Автоматичне частотне розвантаження на основі аналізу швидкості зміни кута напруги / Яндульський О. С., Тимохіна А. О., Тимохін О. В. // Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». – 2012 – №2 – С. 104–109.

Особистий внесок: Аналіз підходів до визначення відносної швидкості зміни кута напруги в системах АЧР в складі систем керування РЕМ.

6. Яндутьський О. С. [и др.] Підвищення ефективності автоматичного частотного розвантаження енергосистем / Яндутьський О. С., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2013 – №1 – С. 39–43.

Особистий внесок: Розробка алгоритмів визначення відносної швидкості зміни кута напруги в системах АЧР в складі систем керування РЕМ.

7. Яндутьський О. С. [и др.] Деякі аспекти роботи автоматичного частотного розвантаження / Яндутьський О. С., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2014 – №4 – С. 167–171.

Особистий внесок: Розробка блоків адаптивної АЧР з урахуванням швидкості зміни кута напруги в системах АЧР в складі систем керування РЕМ.

8. Яндутьський О. С. [и др.] Визначення когерентних груп генераторів під час електромеханічних перехідних процесів в електроенергетичній системі / Яндутьський О. С., Тимохін О. В., Труніна Г. О., Нестерко А. Б. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015 – №6 – С. 129–135. (включено до міжнародної наукометричної бази даних РИНЦ)

Особистий внесок: Розробка елементів алгоритму визначення когерентних груп генераторів енергосистем на основі даних систем керування РЕМ.

9. Яндутьський О. С. [и др.] Зменшення кількості спрацювань системи РПН трансформатора в електричній мережі з джерелами розосередженого генерування / Яндутьський О. С., Нестерко А. Б., Труніна Г. О., Тимохін О. В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017 – №5 – С. 69–73. (включено до міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus International та РИНЦ)

Особистий внесок: Розробка блоків алгоритму системи керування режимами в РЕМ з ДРГ.

10. Марченко А. А. [и др.] Аналіз низькочастотних коливань в енергосистемі з використанням вейвлет-перетворення / Марченко А. А., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. // Технічна електродинаміка. – 2015 – №5 – С. 55–58. (включено до міжнародної наукометричної бази даних Scopus)

Особистий внесок: Математичні засади вейвлет-перетворення до аналізу низькочастотних коливань в енергосистемах.

11. Тимохін О. В. [и др.] Аналіз розподільчої електромережі 10кВ, як середовища передачі технологічної інформації в системах АСУ ТП: Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електротехніки та автоматики / Тимохін О. В., Нестерко А. Б., Планіда А. О. // "Політехніка". – 2010 – С. 70–73.

Особистий внесок: Аналіз підходів до моделювання РЕМ як середовища передачі сигналів.

12. Тимохін О. В. [и др.] Побудова коректуючих фільтрів для передачі інформації по розподільчим електричним мережам / Тимохін О. В., Юрчик Ю. К. // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і

студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2015 – С. 45–47.

Особистий внесок: Теоретичні підходи до побудови корегуючих фільтрів для корекції частотних характеристик РЕМ.

13. Тимохін О. В. [и др.] Технічні основи побудови фільтрів із заданими частотними характеристиками / Тимохін О. В., Юрчик Ю. К. // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2016 – С. 72–75.

Особистий внесок: Аналіз підходів до побудови корегуючих фільтрів на основі цифрових фільтрів із заданими параметрами для корекції частотних характеристик РЕМ.

14. Яндульський О. С. [и др.] Особливості впровадження стандарту IEC61850 на підстанціях України: Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електротехніки та автоматики. Т.1 / Яндульський О. С., Нестерко А. Б., Тимохін О. В. // "Політехніка". – 2009 – С. 169–173.

Особистий внесок: Аналіз сучасних підходів до інформаційної взаємодії об'єктів керування в складі систем керування РЕМ при впровадженні технологій SmartGrid.

15. Яндульський А. С. Оценка влияния характеристик распределительных электрических сетей 0,4...20кВ на процесс распространения широкополосных сигналов в распределительных электрических сетях / Яндульський А. С., Тимохін А. В. П'ята міжнародна науково-практична конференція "Комп'ютерні системи в автоматизації виробничих процесів", Тези доповідей. 20-23 травня 2007р., Хмельницький національний університет, Хмельницький – С.67.

16. Тимохін О. В. Підвищення ефективності передачі інформації по розподільних електричних мережах 0,4-10 кВ // ОКЕУ 2013 Оптимальне керування електроустановками. II Міжнародна науково-технічна конференція. Тези доповідей. 22-24 жовтня 2013р. Вінницький національний технічний університет, Вінниця – С.125

17. Яндульський О.С. Деякі аспекти роботи автоматичного частотного розвантаження / Яндульський О. С., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. //V Міжнародна науково-технічна конференція «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах». Тези доповідей. 29 червня – 2 липня 2014р. Луцький національний технічний університет, Луцьк-Шацькі озера – С.212-213

18. Марченко А. А. Аналіз низькочастотних коливань в енергосистемі з використанням вейвлет-перетворення / Марченко А. А., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. //Четверта міжнародна конференція «Інтелектуальні енергетичні системи - ESS'15». Тези доповідей. 9-12 червня 2015р., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ – видання на CD-диску

19. Яндульський О.С. Визначення когерентних груп генераторів під час електромеханічних перехідних процесів в електроенергетичній системі / О.С. Яндульський, О.В. Тимохін, Г.О. Труніна, А.Б. Нестерко //ОКЕУ 2015

Оптимальне керування електроустановками. III Міжнародна науково-технічна конференція. Тези доповідей. 14-15 жовтня 2015р. Вінницький національний технічний університет, Вінниця – С.66

20. Яндульський О.С. Зменшення кількості спрацювань системи РПН трансформатора в електричній мережі з джерелами розосередженого генерування / О.С. Яндульський, А.Б. Нестерко, Г.О. Труніна, О.В. Тимохін // ОКЕУ 2017 Оптимальне керування електроустановками. IV Міжнародна науково-технічна конференція. Тези доповідей. 11-13 жовтня 2017 р. Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

АНОТАЦІЯ

Тимохін О.В. Інформаційне забезпечення систем керування електричними мережами на основі передачі широкополосних сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ, 2018.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-практичної задачі підвищення ефективності інформаційного забезпечення систем керування РЕМ 0,4...10 кВ в умовах впровадження технологій SmartGrid шляхом використання електричних мереж для передачі широкополосних сигналів з покращеними характеристиками.

В роботі обґрунтовано зростання вимог до систем інформаційної взаємодії СК РЕМ в умовах впровадження технологій SmartGrid.

Запропоновано метод вдосконалення ШПС шляхом додаткового перетворення сигналу за допомогою Wave-вейвлет функції, що дало змогу підвищити ефективність використання частотного діапазону РЕМ для передачі ШПС. Запропоновано метод експериментального вимірювання ФЧХ РЕМ під напругою на основі передачі зфазованих сигналів по РЕМ та вимірювання розбіжності фаз між ними на стороні прийому. Проведено експериментальне дослідження частотних характеристик типових РЕМ 0,4...10 кВ України. Запропоновано використання чисельного розв'язку методом скінчених елементів рівнянь Максвелла для просторових моделей елементів РЕМ та перевірено правильність отриманих результатів.

Розроблено елементи засобів передачі інформаційних сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ як складові системи інформаційного забезпечення СК РЕМ із використанням запропонованих методів та підходів, які випробувано в умовах РЕМ 0,4...10 кВ, що дозволило вирішити нові задачі інформаційного забезпечення СК РЕМ в умовах впровадження технологій SmartGrid.

Ключові слова: амплітудно-частотна характеристика, інформаційні мережі, передача сигналів, розподільна електрична мережа, системи керування, фазочастотна характеристика, широкополосний сигнал.

АННОТАЦИЯ

Тимохин А.В. Информационное обеспечение систем управления электрическими сетями на основе передачи широкополосных сигналов по РЭС 0,4...10 кВ. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети и системы. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». – Киев, 2018.

Диссертационная работа посвящена решению научно-практической задачи повышения эффективности информационного обеспечения систем управления РЭС 0,4...10 кВ в условиях внедрения технологий SmartGrid путем использования электрических сетей для передачи широкополосных сигналов с улучшенными характеристиками.

В работе обосновано увеличение требований к системам информационного взаимодействия СУ РЭС в условиях внедрения технологий SmartGrid.

Предложено метод усовершенствования ШПС путем дополнительного преобразования сигнала с помощью Wave-вейвлет функции, что повышает эффективность использования частотного диапазона РЭС для передачи ШПС. Предложено метод экспериментального измерения ФЧХ РЭС под напряжением на основе передачи сфазированных сигналов по РЭС и измерение разности фаз между ними на стороне приема. Проведено экспериментальное исследование частотных характеристик типовых РЭС 0,4...10 кВ Украины. Предложено использование численного решения методом конечных элементов уравнений Максвелла для пространственных моделей элементов РЭС и проверено правильность полученных результатов.

Разработано элементы средств передачи информационных сигналов по РЭС 0,4...10 кВ как составной части системы информационного обеспечения СУ РЭС с использованием предложенных методов и подходов, которые испытано в условиях РЭС 0,4...10 кВ, что позволило решить новые задачи информационного обеспечения СУ РЭС в условиях внедрения технологий SmartGrid.

Ключевые слова: амплитудно-частотная характеристика, информационные сети, передача сигналов, распределительная электрическая сеть, системы управления, фазочастотная характеристика, широкополосный сигнал.

ABSTRACT

Timokhin O.V. Information support of electric networks control systems on the basis of broadband signals transmission by distributive electrical networks 0,4...10 kV. – On the rights of the manuscript.

The thesis submitted in fulfilment of the Candidate of Engineering Science (PhD) degree in technical sciences on specialty 05.14.02 – «Power stations, networks and systems» (141 Power engineering, electrical engineering and electromechanics). – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the solution of the scientific and practical task of information provision efficiency increasing for distributive electrical networks (DEN) 0,4...10 kV control systems (CS) in conditions of SmartGrid technologies introduction by using electric networks for broadband signals with improved characteristics transmission.

In dissertation was analyzes distributive electrical networks of Ukraine as a control object. It is established that the current trends in the development of DEN CS in conditions of increasing the number of RES and other objects of distributed generation, as well as increasing the requirements to the quality of electricity supply to consumers, necessitates the solution of new management tasks that require the appropriate information provision of the CS.

It is established, that in existing information networks various information interfaces and various data transfer protocols are used. At the same time, groups of monitoring and management objects of DEN are localized within one object of DEN, which allows information flows merging from these objects of DEN into a single stream when transmitted to the DEN CS. In other words, on the DEN CS information provision system lays a set of new tasks for integrate into the DEN CS large number of control objects of DEN with different transmission interfaces, speeds and protocols. Combining monitoring and management objects of DEN within the bounds of object of DEN causes the need to increase of information messages transmission speed.

It is noted, that when creating information systems of DEN CS with a large number of monitoring and management objects it is expedient to use both the existing information support equipment and development of new ones. It should be noted that for the DEN CS information support different information support equipment are used, which complicates the process of their integration into one DEN CS.

The analysis showed that due to the coincidence of the topology of the DEN with the topology of the DEN CS information flows, as well as on the technical and economic indicators, it is expedient to construct information support systems using of the DEN 0.4...10 kV as a medium for information signals transmission.

However, existing approaches to building communication systems for DEN 0.4.. 10 kV CS do not fully meet the new requirements of the information support of the DEN CS regarding the speed and efficiency of the transmission. Therefore, there is a need for further development of approaches to building information transmission systems for DEN CS.

On the basis of the analysis of existing methods and means of signals transmission by DEN, it was found that it is expedient to use of spread spectrum (SS) signals as information signals for transmitting by DEN 0.4...10kV, which, in contrast to the existing signals, allows multichannel signal transmission, increase speed and noise immunity. But the limited frequency bandwidth that is suitable for transmitting signals by DEN requires the further development of the approaches to the formation of SS signals to the transmission conditions of the DEN 0.4...10kV.

The analysis of the signals used for the transmission of DEN in the DEN CS information systems, including classical narrowband signals and modern wideband signals, was conducted.

In the spectra of signals for transmission by DEN, obtained by classical methods, 90% of the signal energy lies within the first spectrum tab. The rest of the energy is lost, which leads to distortion of the signal.

In order to reduce the part of the energy that goes beyond the first tab, a new method is proposed, which is to further signal transform using a Wave-wavelet function, which allowed to focus power of the signal in the band of transmission and to increase the efficiency of using frequency band when transmitting SS signals by DEN.

To estimate the influence of frequency characteristics of DEN 0.4 ... 10 kV on the process of signals propagation by DEN, an approach based on the correlation analysis between the transmitted and received signals is proposed.

Using the proposed approach, we obtained the results of the estimation of the influence of the phase-frequency characteristic and the amplitude-frequency characteristic of the DEN on the SS signals propagation process by DEN, the analysis of which showed its dependence on the nonlinearity of the amplitude-frequency characteristics and the phase-frequency characteristics of DEN.

The results of an experimental study of the frequency characteristics of the DEN 0.4...10 kV, which were carried out on the DEN 0.4...10 kV urban village Dikanka, and DEN department of the AE of the corps number 20 of NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" was presented.

A new method was proposed for the investigation of the phase-frequency characteristics that allows to research phase-frequency characteristics of DEN in the remoteness of transmission and reception points. The developed method is based on the principle of measuring the relative phase shift between signals transmitted at different frequencies, which are phased at the transmission side. It allows to determine the phase shift for discrete values of frequencies between frequencies that differ in two from each other in relation to the selected initial frequency and allows to obtain a relative phase-frequency characteristics of DEN.

An analysis of the approximate methods of DEN calculating as a medium of signal transmission has shown that they are based on the presented HF paths by DEN by two characteristics: the signal damping and the characteristic resistance of the path, which is not enough to evaluate the SS signal propagation process by DEN.

The exact method of calculating DEN as a medium for transmitting signals is a method based on DEN elements representation as lines with distributed parameters, but the use of this method is hindered by DEN elements parameters lack.

To solve the problem of DEN elements parameters determining is proposed to use the numerical solution of Maxwell equations by finite element method for DEN elements spatial models and verify the correctness of obtained results.

Key words: amplitude-frequency characteristic, broadband signal, control systems, distribution network, information networks, phase-frequency characteristic, signaling.

Підписано до друку 25.02.2019 р. Формат 60x84/16. Папір офс. Гарнітура Times.
Спосіб друку – цифровий. Ум. друк. арк. 1,63. Наклад 150 пр.
Зам. № 19-59

ФО-П Маслаков Руслан Олекційович
Свідоцтво ДК № 4726 від 29.05.2014 р.
Видавничий дім «Освіта України»
04136, Київ, вул. Маршала Гречка, 13, оф. 808
тел. (095) 699-251-20