

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**Лисиченко Роман Миколайович**

УДК 621.316.051.3:621.314

**ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В  
РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ ЗА РАХУНОК  
УДОСКОНАЛЕННЯ ПЕРЕТВОРЮЧІВ ЕНЕРГІЇ**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

**Автореферат**  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант

доктор технічних наук, професор  
**Мірошник Олександр Олександрович**,  
Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, завідувач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Тугай Юрій Іванович**,  
Інститут електродинаміки Національної академії наук України, завідувач відділу №14 оптимізації систем електропостачання;

кандидат технічних наук  
**Дривецький Станіслав Ігорович**,  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри передачі електричної енергії.

Захист відбудеться « 30 » вересня 2021 р. о 12.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.050.06 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», за адресою: вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002.

Автореферат розісланий «27» \_\_\_\_\_ серпня \_\_\_\_\_ 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Дмитро ДАНИЛЬЧЕНКО

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Завдання покращення якості електричної енергії в розподільних мережах є вкрай важливою задачею, бо з якісними показниками пов'язані і надійність роботи мереж, і втрати енергії, і як наслідок, собівартість продукції.

Науково – дослідні роботи по якості електричної енергії розширюються, а саме, питання якості електричної енергії визначилося в окремий науковий напрям в енергетиці, проблемами якого розробляються такими вченими як: А.Ф.Жаркін, І.В. Жежеленко, О.Г. Гриб, Е.Г. Куреной, В.Г. Кузнецов, Ю.Л. Саєнко, В.І. Васильченко, Ю.Ф. Тесик, М.Й. Бурбело, Г.А.Сендерович, Ю.І. Тугай, П.Д. Лежнюк, ін.

Сама проблема якості електричної енергії (ЯЕЕ) в науковому вимірі представляється, як система пов'язаних питань, що спрямовані на розробку ефективних засобів забезпечення нею споживачів. Однак, розробка нових напівпровідникових приладів для керування режимом роботи електричного обладнання, привела до появи нових схемних рішень і засобів керування обладнанням в електричних мережах, пов'язаних з ускладненням структури і функцій технологічних процесів, з використанням нових промислових технологій, тому постає актуальне питання забезпечення якості споживаної електричної енергії.

Розвиток енергетичного комплексу призвів до підвищення вимог до ЯЕЕ, що обумовлено технічними вимогами і економічними показниками, відповідно до вимог стандартів. Невідповідність показників ЯЕЕ призводить до зменшення строків працездатності обладнання, втратам продукції і штрафним санкціям для постачальних компаній, а наслідки будуть відчутні, як у роботі розподільної мережі на різних ділянках так і безпосередньо у кінцевих споживачів.

Аналіз науково-технічної літератури показує що в розподільних мережах переважну частку нелінійного навантаження становлять саме асинхронні двигуни, причому інколи їх сумарна потужність становлять величини порівняну із потужністю мережі живлення. А виходячи із того, що переважна більшість їх сьогодні знаходиться під керуванням інверторних систем, то питання виникнення гармонійних складових в розподільній мережі можна пов'язувати саме із цими чинниками.

Проведені вимірювання параметрів електричних мереж при живленні частотно-регульованих електроприводів, показали, що в нормальних режимах роботи електричних мереж 0,4-10 кВ, мають значне перебільшення по гармонійним складовим і не відповідають нормованим значенням, а здебільшого майже в рази перевищують ці нормовані величини. Результати вимірювань в мережах 6-110 кВ системи електропостачання споживача зі значною нелінійним навантаженням, що становить близько 20-30 % від потужності живильної мережі, свідчать про істотне перевищення, як гармонійних складових напруги  $KU(n)$ , так і сумарних коефіцієнтів гармонійних складових напруги  $KU$  над допустимими нормами.

Для зниження величин  $KU(n)$  і  $KU$  в розподільних мережах, перспективним є напрям, що дозволяє керувати спектральними характеристиками перетворювачів енергії, який має переваги перед пасивними фільтрами, бо зменшення гармонійних складових здійснюється при різних режимах роботи асинхронних двигунів, на відміну від пасивних фільтрів. Так, запропонований метод дорожчий за пасивні фільтри але за динамічними показниками значно їх перевищує. В той же час, активні фільтри значно дорожчі за метод керування спектральними характеристиками перетворювачів енергії. Тому, розробка засобів по покращенню ЯЕЕ на основі використання керування спектральними характеристиками перетворювачів енергії є актуальною задачею, як в теоретичному, так і в практичному аспектах.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалась у відповідності до: Закону України «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки», зокрема п.6 ст.7 «Нові технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі»; Постанови Кабінету Міністрів України №556 від 23.08.2016 р. «Перелік пріоритетних напрямків наукових досліджень і науково-технічних розробок до 2020 р.»; тематики науково-дослідних робіт кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, та у межах виконання науково-дослідної теми «Розробка методів та засобів підвищення ефективності управління режимами і транспортом електричної енергії в електричних мережах із застосуванням технології *Smart Grid*» (№ ДР 0118U003310) за якою здобувач був виконавцем окремих розділів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є покращення якості електричної енергії в розподільних мережах з частотно-регульованими електроприводами за рахунок керування спектральними характеристиками перетворювачів енергії.

Для досягнення сформульованої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Проаналізувати сучасний стан методів і засобів визначення показників ЯЕЕ.
2. Провести моніторинг ЯЕЕ в розподільних мережах із значною часткою нелінійних споживачів і проведено статистичний аналіз замірів якісних показників електричної енергії.
3. Провести аналіз заходів підвищення ЯЕЕ в розподільних мережах при застосуванні перетворювачів енергії.
4. Розробити метод зменшення гармонійних складових в розподільних мережах за рахунок керування спектральними характеристиками інверторів.
5. Провести дослідження впливу характеристик діапазонних збудників інвертора напруги на їх спектральні характеристики при різних режимах роботи нелінійного навантаження.

6. Розробити макетний зразок пристрою для коригування показників ЯЕЕ та структурну схему частотного перетворювача з адаптивним керуванням та варіант його принципової електричної схеми.

7. Виконати техніко-економічне обґрунтування ефективності застосування методу керування спектральними характеристиками перетворювачів енергії з метою підвищення ЯЕЕ в розподільних мережах.

*Об'єкт дослідження* – електромагнітні процеси в електричних мережах за наявності в них перетворювачів електричної енергії.

*Предмет дослідження* – електричні параметри перетворювачів енергії з керуванням спектральними характеристиками для підвищення якості електричної енергії в електричних мережах.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених завдань використано системний підхід при проведенні теоретичних і експериментальних досліджень, що базується на основних положеннях теоретичної електротехніки, математичного моделювання, теорії ймовірностей і математичної статистики. Теоретичні результати мають співвідношення із результатами вимірів в електричних мережах і з експериментальними дослідженнями на основі моделювання несинусоїдальних режимів з використанням програмних засобів, таких як *Matcad, Simulink, PowerSystems*.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у наступному:

- вперше запропоновано метод керування спектральними характеристиками інверторів, який відрізняється від існуючих цільовою функцією параметрів ЯЕЕ, що дозволило розробити засади для створення інверторів зі зменшеними показниками спотворення форми напруги і струму;

- отримав подальший розвиток метод визначення походження гармонічних складових в електричному струмі від силових перетворювачів енергії, який, на відміну від відомих, дозволив визначити спектральні методи збудження, як найбільш збалансовані з економічної і технічної точок зору;

- отримала подальший розвиток математична модель спектрального збудження силових перетворювачів енергії, яка відрізняється врахуванням параметрів електричної мережі, що дозволяє отримати математично обґрунтовані спектрально-енергетичні залежності в електричній мережі;

- удосконалено метод визначення параметрів спектрального збудження силових перетворювачів енергії і моделювання їх роботи в середовищі *Matlab*, який відрізняється врахуванням параметрів електричної мережі, що дозволяє отримати параметри перетворювача з підвищеними характеристиками ЯЕЕ.

**Практичне значення отриманих результатів для електроенергетичної галузі** полягає в обґрунтуванні напрямку підвищення ЯЕЕ в розподільних мережах за рухунок удосконалення частотних перетворювачів енергії; огрунтуванні параметрів пристрою для коригування показників якості електроенергії (патент на винахід №101521); розробці структурної схеми частотного перетворювача з адаптивним керуванням (патент на корисну модель №113090); розробці та побудові стенду для вимірювання вищих гармонік які генеруються частотно-регульованими електроприводами в розподільну мережу;

розробці варіанту принципової електричної схеми частотного перетворювача енергії з можливістю адаптивного керування спектральними характеристиками.

Результати роботи та розроблений діючий макетний зразок стенду і програмне забезпечення для обробки результатів вимірювання рівня вищих гармонік, які генеруються частотно-регульованим електроприводом в розподільну мережу, використовуються в ТОВ «Слобода-буделектромонтаж», ТОВ «Харківське спеціалізоване монтажньо-експлуатаційне підприємство», ТОВ «Промагроінжиніринг». Результати теоретичних та експериментальних досліджень використовуються при викладенні дисциплін «Якість електропостачання», «Інформаційні системи та технології в енергетиці», «*Smart Grid* технології» на кафедрі електропостачання та енергетичного менеджменту Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка.

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати, які виносяться на захист, одержані здобувачем особисто. Серед них – виконання основного об'єму теоретичних та експериментальних досліджень, викладених у дисертаційній роботі, включаючи розробку математичних моделей, методу спектрального збудження силових перетворювачів енергії, методу визначення параметрів спектрального збудження силових перетворювачів енергії і моделювання їх роботи в середовищі *Matlab*, узагальнення та перевірку отриманих експериментальних даних та їх оформлення у вигляді наукових публікацій та доповідей за темою дослідження.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень доповідались та обговорювались на наступних міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях: «Сучасні проблеми землеробської механіки» (Суми, 2016 р.); «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)» (Київ, 2020 р.); «Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК» (Київ, 2013 р.); «Енергозабезпечення технологічних процесів в АПК України» (Мелітополь, 2015 р.); «Перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (Київ, 2015 р., 2016 р.); «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (Харків, 2014 – 2017 р.); «Молодежь и сельскохозяйственная техника в XXI веке» (Харьков 2011 - 2013 р.); «Електронні та механотронні системи: теорія, інновація, практика» (Полтава, 2020 р.); «Лідери АПК XXI століття» (Житомир, 2012 р.).

**Публікації.** Основний зміст дисертаційної роботи викладено в 22 наукових публікаціях, з них: 1 – у монографії, 7 – у наукових фахових виданнях України, 2 – у закордонних виданнях, включених до науково метричних баз даних Scopus; 1 – у патенті України на винахід, 1 – у патент України на корисну модель, 10 – у матеріалах конференції.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 170 сторінки,

у тому числі: 124 сторінки основного тексту, 250 найменувань використаних джерел на 27 сторінках, 2 додатки на 17 сторінках. Основний текст містить 17 таблиць по тексту. Роботу ілюстровано 28 рисунками по тексту, та 3 рисунки на 3 окремих сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та основні завдання дослідження, наведено відомості щодо зв'язку роботи з науковими програмами, стисло викладено отримані результати, висвітлено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, відзначено методи досліджень, особистий внесок здобувача у спільних публікаціях, висвітлено кількість опублікованих наукових праць і показники структури та обсягу дисертації.

**У першому розділі** приведено огляд науково-технічної літератури з напрямку забезпечення показників ЯЕЕ в розподільних мережах.

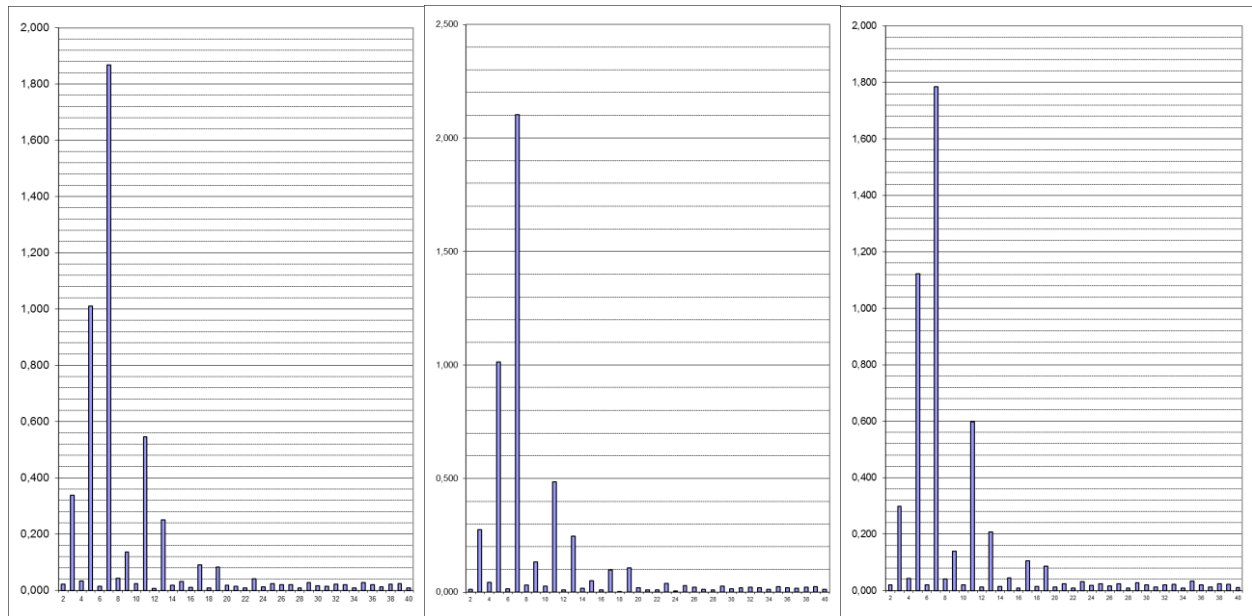
Параметри ЯЕЕ були досліджені в процесі здійснення серії замірах на окремих ділянках розподільних мереж при різних режимах роботи системи електропостачання ВАТ «Житомиробленерго». Заміри було проведено на об'єктах електроенергетики, розташованих на території Житомирської області (приклад отриманих діаграм – рис.1):

- насосні станції I і II підйому (м. Житомир);
- головна каналізаційна насосна станція введення 1 (м. Житомир);
- головна каналізаційна насосна станція введення 2 (м. Житомир);
- комплекс очисних споруд ОСК-1 (м. Житомир).

Всього було проведено більше 50 вимірів показників ЯЕЕ та отрані протоколи вимірів по кожному показнику у визначених точках контролю та проведено аналіз отриманих результатів досліджень. Показано, що у всіх замірах присутні відхилення показників ЯЕЕ.

Окрім того, проведено аналіз технологічних процесів підприємств що під'єднані до розподільної мережі ВАТ «Житомиробленерго»: підприємства сільськогосподарського призначення, хімічної та машинобудівельної галузі. Вказані підприємства, як споживачів, об'єднує наявність значної кількості приводів робочих органів машин і механізмів із асинхронними електричними двигунами, в керуванні якими виконується за допомогою електронних приладів (інверторів, регуляторів потужності, тощо), яке класифікується як нелінійне навантаження.

Результати вимірювань значень  $KU(n)$  в розподільній мережі на підстанціях демонструють явно виражене переважання 11-й і 13-й гармонійних складових, які значно перевищують нормовані значення. Наявність гармонійних складових в діапазоні частот 11-ї і 13-ї гармонійних складових, зумовлені впливом схеми випрямлення змінного струму в інверторі, які застосовується в системі електропостачання споживача з нелінійним навантаженням.



а) для фази А;

б) для фази В;

в) для фази С

Рисунок 1 – Коефіцієнт n-й гармонійної складової напруги в схемі живлення насосних станцій першого і другого підйомів м. Житомира

Проведено аналіз впливу вищих гармонік на роботу іншого електричного обладнання яке під'єднане до мережі із живленням частотно-регульованих електроприводів. З аналізу схемно-режимної ситуації, за даними вимірів, встановлено вплив режимів роботи на значення  $KU$  і  $KU(n)$ , однак, для встановлення причина перевищення вимагає проведення спеціальних додаткових досліджень. На даному етапі висувуються припущення для подальших досліджень: – при зміні топології мережі відбувається перерозподіл навантаження між трансформаторами що призводить до їх перевантаження і роботі в нелінійному режимі; – в лініях на частотах гармонійних складових проявляється хвильовий ефект, коли довжина ліній виявляється сумірною з довжинами хвиль на цих частотах; – зміна параметрів системи з відключеним обладнанням, а саме активного і реактивного опорів, значення яких, в свою чергу, можуть призводити до резонансу на деяких частотах; – зміна активного і реактивного опорів розподіленого ланцюга може призводити до генерування (зростання) значень гармонійних складових в лінії з розподіленими параметрами; – відключення інверторів, як засіб боротьби із гармонійними складовими не розглядається, бо саме завдяки інверторам досягаються відповідні технічні дії у відповідності технологічних процесів.

У другому розділі розглядаються методи управління перетворювачами енергії за рахунок яких може бути досягнуто сформульовану цільову функцію щодо підтримання якісним параметрам електричної енергії. Показані засади для створення практичного рішення з розробки методу управління перетворювачами енергії із досягненням цільової функції. Наведено класифікацію силових електронних пристроїв, розглянуті структурна і функціональна схеми напівпровідникових перетворювачів електричної енергії,



визначені способи комутації ключів, крім того, визначена класифікація перетворювачів енергії (рис.2). Із загальної структури було виділено інвертори напруги, які використовуються для асинхронних електродвигунів.

В роботі було розглянуто методи керування перетворювачами енергії.

Наведено засоби управління перетворювачами енергії за заданим критерієм якості електричної енергії.

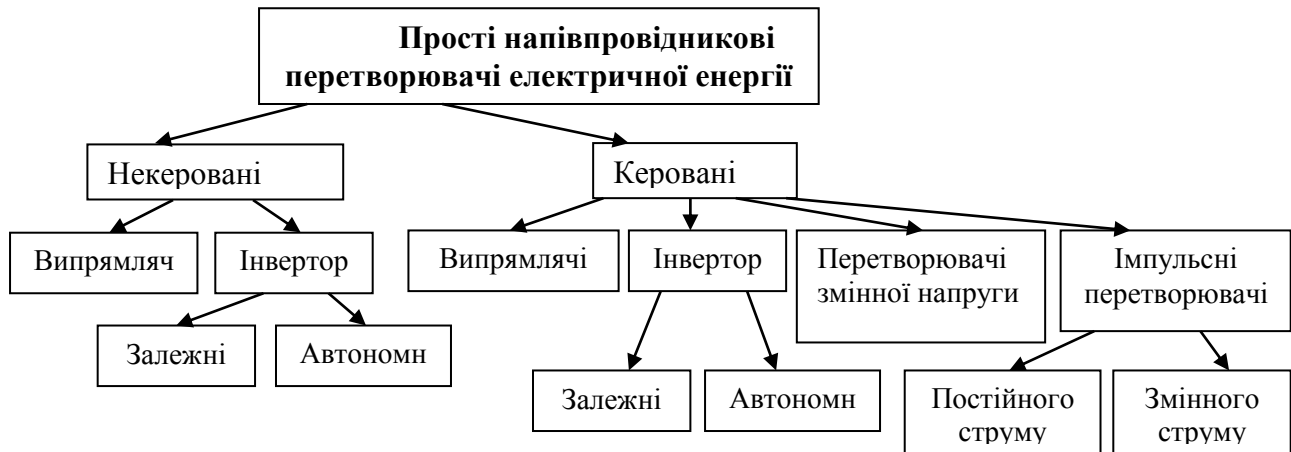


Рисунок 2 – Класифікація напівпровідникових перетворювачів енергії

Процедура синтезу способу управління була сформульована у вигляді наступних послідовних етапів: – завдання розподілу тривалостей імпульсів на періоді вихідний частоти відповідно до обраного законом широтної імпульсної модуляції (ШІМ) і заданою глибиною модуляції; – визначення оптимального (відповідно до обраного критерію) розташування фронтів зазначених імпульсів – синтез законів модуляції (ЗМ); – визначення положення фронтів імпульсів управління відповідно до методики, запропонованої в – синтез алгоритмів перемикачів (АП) і ШІМ-імпульсів; – визначення параметрів невідомого сигналу, що реалізує синтезований спосіб управління – синтез процедури реалізації способу (ПРС).

**У третьому розділі**, відповідно до поставленого завдання, було проведено моделювання системи керування інверторів для з'ясування можливості зменшення гармонійного впливу на розподільну мережу.

Для проведення намічених досліджень обрано схему діапазонного збудника. Проведений аналіз показав, що в якості діапазонного збудника інвертора напруги необхідно використовувати цифровий синтезатор частоти. Показані переваги непрямого методу синтезу. Отримані вирази спектральної щільності потужності фазових флуктуацій дозволяє врахувати вплив елементів схеми збудника інвертора на його спектральні характеристики і розрахувати дисперсію, середньоквадратичне відхилення фази в смузі частот і середній квадрат набігу фази вихідного сигналу збудника. Ця методика забезпечує необхідний алгоритм розрахунку технічних характеристик інвертора в цілому.

Виконано теоретичний аналіз спектральних характеристик діапазонних збудників інверторів напруги. Однією з основних завдань, яке доводиться вирішувати в процесі проектування і виробництва інверторів напруги полягає в

тому, щоб найбільшою мірою виключити небажаний вплив збудника на технічні характеристики (ТХ) інвертора, зокрема, на електромагнітну сумісність. У зв'язку з цим, розробка рекомендацій щодо вибору оптимальних значень параметрів системи фазово-амплітудного перетворювача частоти (ФАПЧ) синтезатора частоти на основі точного чисельного аналізу відбуваються в ньому є актуальною. Відомо, що системи ФАПЧ в загальному випадку описуються нелінійними диференціальними рівняннями. Для отримання розрахункових співвідношень використовувався метод функціональних розкладань Вольтера, який в даний час є одним з найбільш зручних і точних методів аналізу нелінійних динамічних систем. Наведені розрахунки спектральних характеристик для нелінійної моделі ФАПЧ показують, що враховувати нелінійність необхідно лише при кількісних оцінках. Для якісного аналізу процесів з достатнім ступенем точності може бути використана простіша лінійна модель ФАПЧ.

В якості основної схеми цифрового синтезатора частоти (ЦСЧ) діапазонного збудника (на основі аналізу сучасної елементної бази вибираємо однокільцеву схему петлі ФАПЧ, у зворотному колі до якого поміщений дільник частоти із змінним коефіцієнтом ділення (ДЗКД) (рис.3).

Петля складається з генератора керованого напругою (ГКН), дільника частоти із змінним коефіцієнтом ділення (ДЗКД), фазового дискримінатора (ФД) і фільтра нижніх частот (ФНЧ). Частота ГКН ділиться і порівнюється зі стабільною опорної частотою. Напруга помилки виробляється ФД, використовується для стабілізації частоти ГКН. Установка вихідної частоти виробляється командою від комп'ютера або з панелі управління, яка змінює коефіцієнт розподілу ДЗКД. Міняючи коефіцієнт розподілу ДЗКД на виході синтезатора можна отримати сітку частот із кроком.

$$f_{\text{оА}} = Nf_0, \text{ де } f_0 = \frac{f_{\text{ор}}}{M},$$

де  $N$  – коефіцієнт розподілу ДЗКД;  $M$  – коефіцієнт розподілу ДФКД;  $f_0$  – частота порівняння (крок) на вході ФД.

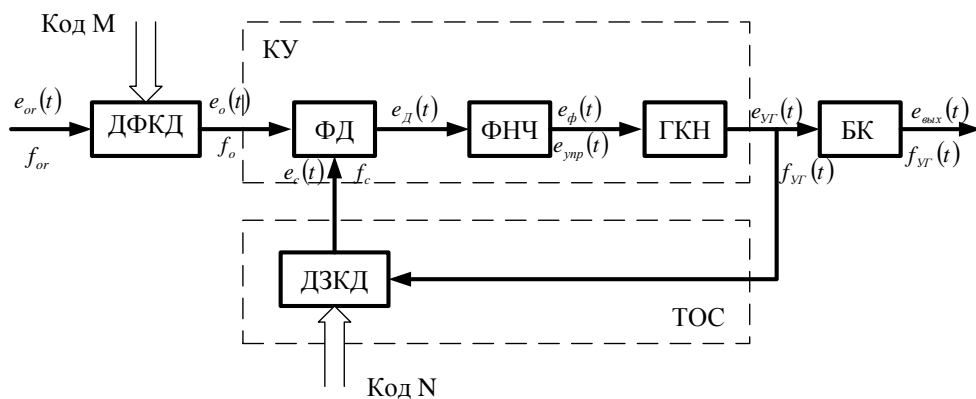


Рисунок 3 – Структурна схема ЦСЧ з імпульсно-фазовою автопідстройкою (ІФАП): ТЗЗ – тракт зворотного зв'язку, БК – буферний каскад, ГКН – генератор, керований напругою, ДЗКД – дільник частоти із

змінним коефіцієнтом ділення, ФНЧ – фільтр нижніх частот, ФД – фазовий дискримінатор, КУ – канал управління, ДФКД – дільник частоти з фіксованим коефіцієнтом ділення

Проведено аналіз спектральних характеристик обраної базової структури діапазонного збудника інвертора напруги. Для обґрунтування такої методики необхідно знайти рівняння, що характеризує спектр сигналу на виході синтезатора частоти від його структурної схеми і елементів, що входять в нього. Система ІФАПЧ, якою є цифровий синтезатор частоти, може бути перетворена на базі теореми Котельникова до безперервної.

Умова цієї теореми можна виразити у вигляді нерівності

$$f_n \geq f_i$$

де  $f_n$  – частота повторення імпульсів;  $f_i$  – частота ропускання безперервної частини.

Вираз для спектральної щільності потужності фазових флуктуацій ГКН  $S_{\varphi\hat{A}\hat{E}\hat{O}}$  отримаємо через спектральні щільності потужності фазових флуктуації вільного ГКН і опорного генератора відповідно  $S_{\varphi\hat{A}\hat{C}\hat{I}}$  і  $S_{\varphi\hat{I}\hat{A}}$

$$S_{\varphi\hat{A}\hat{E}\hat{O}} = S_{\varphi\hat{A}\hat{C}\hat{I}} \frac{1}{|1 + G(j\omega)|^2} + S_{\varphi\hat{I}\hat{A}} \left| \frac{G(j\omega)}{1 + G(j\omega)} \right|^2. \quad (1)$$

Для подальшого аналізу конкретизуємо тип фазового детектора. Виберемо вид характеристики, яка описується:

$$F(\theta) = \cos \theta, \quad (2)$$

$$\theta(t) = \theta_0 + \varphi(t),$$

де  $\varphi(t)$  – мале  $\ll \varphi^2 \ll 1$  випадкове відношення фаз.

В якості ФНЧ застосуємо пропорційно-інтегруючий фільтр, оскільки він поширений в даних схемах, коефіцієнт передачі якого має вигляд:

$$K_{\hat{O}\hat{I}\times} = \frac{1 + j\omega T_1}{1 + j\omega T}, \quad (3)$$

де  $T = (R + R_1)C$  ;  $T_1 = R_1 C_1$ .

Підставляючи (1) і (2) в (3) отримаємо

$$K(j\omega) = \frac{(1 + j\omega T)j\omega}{(1 + j\omega T)j\omega + \Omega_y(1 + j\omega T_1)\sin\theta}. \quad (4)$$

В якості фільтра нижніх частот будемо використовувати пропорційно-інтегруючий фільтр з передавальною характеристикою

$$K(p) = \frac{mTp + 1}{Tp + 1}, \quad (5)$$

де  $T = (R_1 + R_2)C$  – постійна часу фільтра.

$$m = \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Підставляючи (1) у вираз для ядра першого порядку (4) отримаємо вираз для лінійного наближення фазового спектра підлаштованого генератора

$$S_{\varphi_1}(\omega) = b^2 \Omega_y^2 \frac{(T + b\Omega_y m T)^2 \omega^2 + \Omega_y^2}{\omega^4 + \frac{1}{T^2} [1 + 2T\Omega_y(m-1) + m^2 T^2 \Omega_y^2] \omega^2 + \frac{\Omega_y^2}{T^2} + (a + b\Omega_y)^2} \cdot \frac{1}{(b\Omega_y m T)^2 \omega^2 + (b\Omega_y)^2}. \quad (6)$$

Для розрахунку характеристики стабільності підставимо (6) у вираз для відносного значення середньоквадратичного відхилення частоти вихідного сигналу синтезатора частоти (СЧ) від середнього значення для даного часу вимірювання (рис.4)

$$\frac{\sigma[\langle \varphi \rangle \tau]}{f_0} = \left( \frac{2}{\omega_0^2 \tau^2} \int_0^\infty S_p(\omega) \sin \frac{\omega \tau}{2} d\omega \right)^{1/2}, \quad (7)$$

де  $f_0 = \omega/2\pi$  – номінальне значення частоти вихідного сигналу СЧ.

Обчислення за рівняннями (6), (7) були проведені в програмі *Matcad*, а результати розрахунків наведено на рис. 4, лінія – 1,2. Тут же наведені результати розрахунків у лінійному наближенні – 3.

На рис. 5 наведено експериментальна (штрихпунктирна лінія) і теоретична (сплошна) характеристика стабільності частоти даного СЧ. Зіставлення цих залежностей з результатами лінійної теорії показує значну розбіжність (на порядок) отриманих даних.

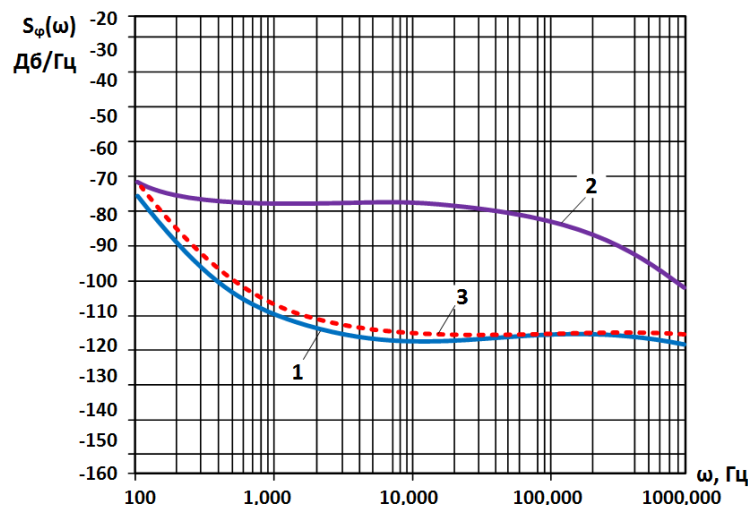


Рисунок 4 – Графік фазових шумів СЧ з урахуванням основних нелінійностей: 1 – фазові шуми, 2 – побічні спектральні складові, 3 – розрахункові дані фазових шумів

Також, слід зазначити, що облік нелінійності фазового детектора призводить до відмінності результатів лише в кількісному відношенні, не змінюючи характерів залежності. Розрахунки були зроблені для конкретного синтезатора частоти з параметрами  $b_2 = 10^{-3} \text{Åö}^{-1}$ ;  $\Omega_y = 40i\text{Åö}$ ;  $N = 20$ ;  $m = 0,5$ ;  $\dot{O} = 1,6 \cdot 10^{-2} \tilde{n}$ ;  $f_0 = 1,15\text{Åö}$ .

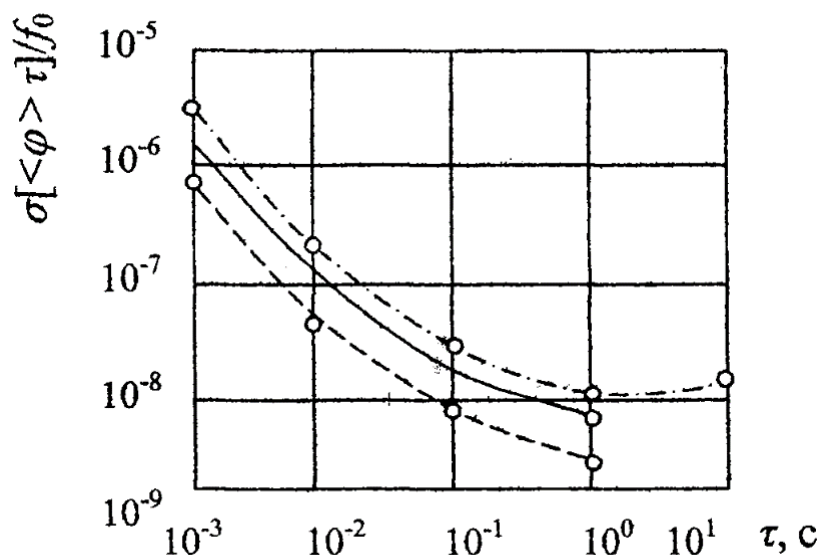


Рисунок 5 – Характеристики стабільності частоти СЧ

Таким чином, наведені розрахунки спектральних характеристик для нелінійної моделі ФАПЧ показують, що враховувати нелінійність необхідно лише при кількісних оцінках. Для якісного аналізу процесів з достатнім ступенем точності може бути використана простіша лінійна модель ФАПЧ.

Апробація запропонованої методики аналізу впливу неідеальності характеристик основних елементів ФАПЧ СЧ, комбінації ФАП здійснена на основі порівняння результатів розрахунку на комп'ютері з результатами експериментальних досліджень СЧ на частоті 1 ГГц. Методика розрахунку дозволяє отримати досить близькі до експериментальних значень розрахункові дані як для спектральних густин потужності фазових флуктуації, так і для дискретних складових спектру вихідного сигналу.

Таким чином, з наведених результатів випливає, що запропонована методика розрахунку дає близькі до експериментальних значень чисельні оцінки і може бути рекомендована для проектування СЧ збудників і систем фазової синхронізації інверторів.

Для практичної реалізації отриманих залежностей та з метою розширення функціональних можливостей частотного перетворювача з адаптивним керуванням запропоновано структурну схему перетворювача з додатковою компенсацією залишкових гармонік (рис.6, патент на корисну модель №113090).

Поставлена задача вирішується тим, що пристрій має систему керування, випрямляч, проміжне коло, інвертор, причому, до системи керування б

приєднано випрямляч 1, проміжне коло 2 та інвертор 3, причому, додатково введено три датчика напруги 7, блок компенсації залишкових гармонік 4, виконаного на базі мікроконтролера фірми *Atmel*, і блок адаптивного керування 5, виконаного на базі транзисторів *APL1001* компанії *Advanced Power Technology* і *IXTB30N100I* компанії *IXYS Semiconductor*.

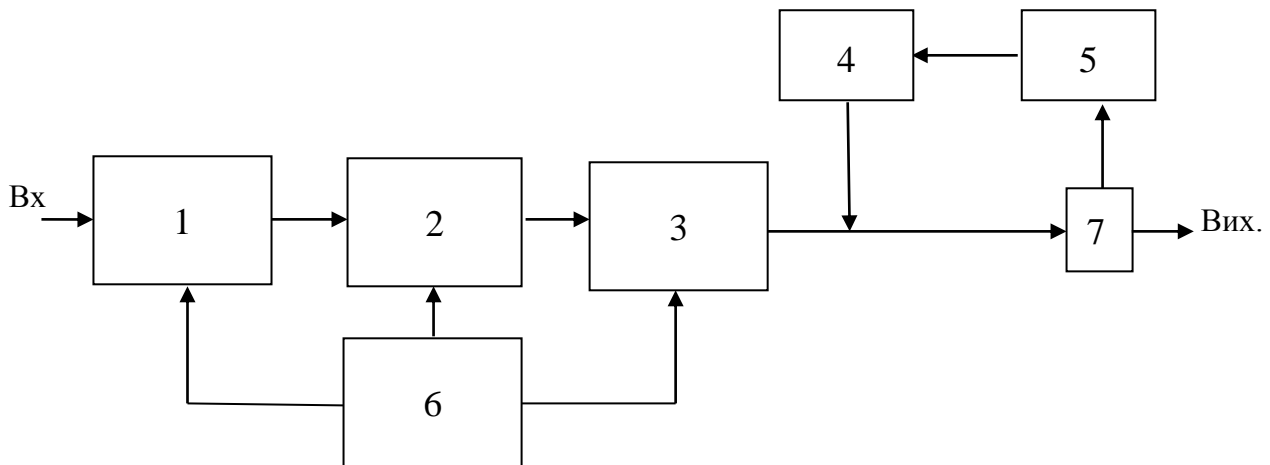


Рисунок 6 – Структурна схема ПЧ з адаптивним керуванням:

1 – випрямляч, 2 – проміжне коло, 3 – інвертор, 4 – блок компенсації залишкових гармонік, 5 – блок адаптивного керування компенсації залишкових гармонік, 6 – блок оперативного керування, 7 – датчик вихідної напруги

Для проведення експериментальних досліджень щодо ефективності запропонованого методу керування спектральними характеристиками ПЧ розроблено діючий макет вимірювального стенду (рис. 7).



Рисунок 7 – Стенд для вимірювання вищих гармонік в мережі живлення частотно-регульованого електроприводу

На рис. 8 (патент на винахід № 101521) наведена принципова електрична схема пристрою для коригування показників ЯЕЕ в мережі живлення частотно-регульованого електроприводу, який функціонує наступним чином: значення напруги та струмів від кожної фази *A, B, C* фіксуються і порівнюється блоком системи керування (СК), потім формується сигнал керування, форма і величина, якого залежить від струму навантаження та значення напруги мережі завдяки датчиків струму *RS4-RS5* і відповідно напруги *ДН1-ДН4*. Імпульсне коло

інвертора напруги з колом постійного струму реалізована на *IGBT*-транзисторах і конденсаторах *C1-C3*, формує заданий струм, який через дроселі *L1-L3* підсумовується струмом навантаження в точці підключення активного фільтра, причому в сукупності дроселі *L1-L3* і *C1-C3* та *C4-C6* є інтерфейсним фільтром, який забезпечує згладжування вхідного і вихідного струму на заданій частоті.

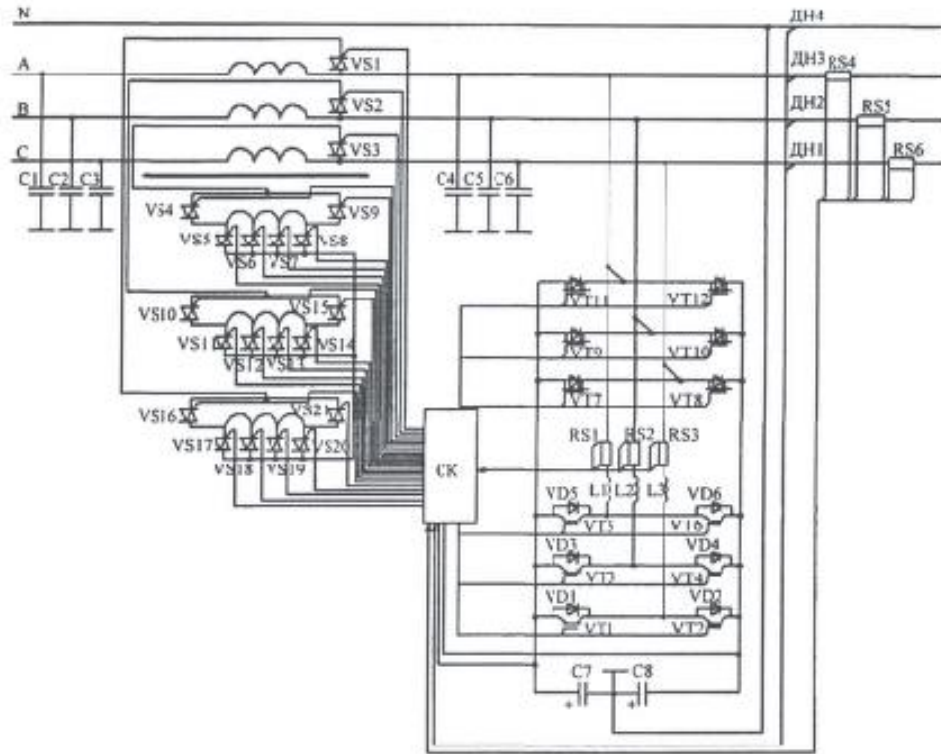


Рисунок 8 – Принципова електрична схема пристрою для коригування показників ЯЕЕ

Для зменшення отриманих пульсацій застосовано лінійне коло, побудоване на польових транзисторах *VT7-VT12*, а система керування отримує інформацію про величину струму в мережі від датчиків струму *RS1-RS3*, порівнюючи вихідний струм із струмом задавання формує величину похибки регулювання, яка є струмом задання для керування колом *VT7-VT12*. В результаті на виході імпульсного кола формується струм трикутної форми, який і компенсує пульсації основного вихідного струму, що дозволяє значно покращити ефективність заглушення вищих гармонік і зниження інших завад. В розділі виконано наступне: – проведені в роботі дослідження показали, що існуючі рекомендації по вибору значень параметрів діапазонних збудників і систем фазової синхронізації інверторів розроблені, як правило, для лінійних моделей що є причиною значної розбіжності  $> 10\%$  між розрахованими і отриманими експериментально значеннями спектральних характеристик; – для забезпечення розрахункової точності ТХ інверторів напруги аналіз роботи систем фазової синхронізації інверторів з первинною мережею, з навантаженням, а також збудника на основі ФАПЧ слід проводити з

урахуванням нелінійного характеру петель ФАП на основі функціонального методу з використанням рядів Вольтера; – розроблена методика розрахунку дозволяє отримати досить близькі 1 % до експериментальним значенням розрахункові дані, як для спектральної щільності потужності фазових флуктуацій, так і для дискретних складових спектру вихідного сигналу, причому, будь-яка задана точність може бути отримана шляхом вибору необхідного числа членів ряду; – в якості основної структури збудника інвертора напруги вибрано однопетльовий цифровий синтезатор на основі ФАПЧ з подільником частоти в колі зворотного зв'язку; – встановлено, що для забезпечення перспективних вимог до спектральної чистоти вихідного сигналу збудника необхідно, щоб рівень побічних складових в спектрі вихідного сигналу був на рівні фонових шумів, тобто мав рівень 200 дБ; – розроблено алгоритм моделювання роботи і вибору вузлів підключення інверторів напруги до електричної мережі в середовищі *Matlab*.

У четвертому розділі наведено порівняння інвестиційної привабливості різних типів фільтрів, а саме обумовлено засади для визначення збитків пов'язаних із ЯЕЕ; визначено структуру і складові економічного збитку; показано вплив низької ЯЕЕ на роботу електричного обладнання; проведено порівняння інвестиційної привабливості методу керування спектральними характеристиками перетворювачів енергії і різних типів фільтрів гармонічних складових; показано зменшення втрат від гармонічної складової електричної енергії при використанні методу керування спектральними характеристиками. Отримано наступні результати, а саме:

- капітальні витрати, необхідні для реалізації методу керування спектральними характеристиками (МКСХ), на 95 % вищі в порівнянні з пасивними фільтрами, але на 20 % нижче в порівнянні з активними фільтрами;
- виконана оцінка економічної ефективності від застосування МКСХ показала, що додаткові втрати електричної енергії в мережі, викликані гармонічними складовими, знизилася в 1,2 рази.

У додатках наведено результати замірів якості електричної енергії на підстанціях м. Житомира, загільний вигляд стенду для вимірювання рівня вищих гармонік в мережах із частотно-регульованими електроприводами робочих машин і механізмів, варіант принципової електричної схеми ПЧ з адаптивним керуванням, акти впровадження результатів дисертаційної роботи та список опублікованих праць за темою дисертації.

## ВИСНОВКИ

На основі аналізу існуючих засобів і заходів поліпшення ЯЕЕ обґрунтовано застосування методу керування спектральними характеристиками перетворювачів енергії. Ефективність поліпшення ЯЕЕ перевірена на основі застосування методу керування спектральними характеристиками перетворювачів енергії на моделі і підтверджена експериментально.

Основні результати проведеного дослідження дозволяють сформулювати загальні висновки по роботі:



1. Було проаналізовано сучасні методи та засоби визначення показників ЯЕЕ, що дозволило сформулювати мету та задачі дослідження дисертаційної роботи.

2. Експериментальні дослідження в розподільних мережах з частотно-регульованими електроприводами дозволили виявити невідповідність показників ЯЕЕ, зокрема  $KU(n)$  і  $KU$ , нормованим значенням. В електричних мережах 0,4-110 кВ електропостачання, до яких під'єднанні споживачі із значним нелінійним навантаженням, що становить близько 20-30 % потужності живильної мережі, спостерігаються значні спотворення форми кривих струмів і напруг.

3. На підстанціях і в розподільній мережі, прилеглих до вузлів підключення частотно-регульованих електроприводів, значення  $KU$  на шинах 6-110 кВ досягають 6-12 %, тобто перевищують вимоги норм більш, ніж в 2 -3 рази. Статистичний метод аналізу результатів вимірювань дозволив визначити характер взаємозв'язку  $KU(n)$  в реальних умовах експлуатації розподільної мережі. Для зменшення негативного впливу нелінійного навантаження на роботу розподільної мережі необхідна розробка та реалізація заходів щодо поліпшення ЯЕЕ.

4. В результаті проведеного аналізу заходів щодо рішення задачі поліпшення ЯЕЕ в електричній мережі доведено що це можливо досягнути шляхом розробки і застосування методу керування спектральними характеристиками перетворювачів енергії. Перевагою запропонованого методу у порівнянні з традиційними пасивними фільтрами є більш якісні показники електричної енергії при динамічному діапазоні зміни потужності навантаження.

5. В результаті теоретичних досліджень розроблені методики, які дозволяють розрахувати і визначити параметри МКСХ, що підтверджується чисельними розрахунками та результати випробувань в розподільних мережах на діючих об'єктах електроенергетики.

6. Результати експериментальних досліджень і перевірки алгоритму моделювання роботи і вибору вузлів підключення методу керування спектральними характеристиками в електричній мережі в середовищі *Matlab* дозволяють зробити висновок про можливість застосування МКСХ для поліпшення ЯЕЕ.

7. Результати моделювання роботи методу керування спектральними характеристиками в нормальних і ремонтних режимах роботи в розподільній мережі показують, що їх застосування знижує значення  $KU$  в мережі живлення 6-110 кВ з 4-5 % до 1-2 %. Наведені частотні характеристики в вузлах до і після підключення методу керування спектральними характеристиками дозволяють провести аналіз зміни рівнів гармонійних складових з урахуванням схеморежимної ситуації мережі.

8. Капітальні витрати на реалізацію методу керування спектральними характеристиками вищі в порівнянні з пасивними фільтрами, але значно нижчі в порівнянні з активними фільтрами. Виконана оцінка економічної ефективності, яка показує, що застосування МКСХ в розподільних мережах

забезпечує зниження додаткових втрат електричної енергії в мережі, викликаних гармонійними складовими, в 1,2 рази.

Таким чином, розвиток і вдосконалення електроенергетичних систем пов'язано з поліпшенням ЯЕЕ на основі розробки і реалізації заходів щодо його забезпечення, за допомогою впровадження методу керування спектральними характеристиками в електричних мережах. Проведене дослідження є підсумком виконаної роботи, спрямованої на розробку і реалізацію заходів щодо підвищення ЯЕЕ в розподільних мережах.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лисиченко Р.Н. Учет и компенсация реактивной мощности при несимметричных режимах работы систем электроснабжения: монографія / Е.И. Сокол, Ю.А. Сиротин, О.Г. Гриб, В.Г. Сыченко, Д.А. Босый, Д.А. Гапон, С.В. Швец, Т.С. Иерусалимова, Р.Н. Лисиченко. – Х.: ФОП Панов А., 2017. – 290 с.

*Здобувачу належить проведення експериментальних досліджень, зокрема вимірювання коефіцієнта реактивної потужності в системах електропостачання.*

2. Лисиченко Р.М. Підвищення якості електроенергії в мережах з нелінійними електроспоживачами / В.І. Гуревич, П.І. Савченко, Р.М. Лисиченко, О.О. Мірошник, О.В. Уваров // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки. – 2011. - Вип. 11. – Т. 4. – С. 148-151.

*Здобувачу належать експериментальні дослідження зміни синусоїдальності напруги в мережі при підключенні споживачів з нелінійними напівпровідниковими елементами.*

3. Лисиченко Р.М. Дослідження впливу характеристик елементів діапазонних збудників інверторів напруги перетворювачів частоти на їх спектральні характеристики // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» – Х.: ХНТУСГ, 2014. – Вип. 153. – С. 41-44.

4. Лисиченко Р.Н. Теоретический анализ влияния нелинейности систем фазовой синхронизации инверторов напряжения на их спектральные характеристики / Р.Н. Лисиченко, Н. М. Черемисин // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки. – 2015. – Вип. 15. – Т. 2. – С. 248-256.

*Здобувачу належить проведення теоретичного дослідження щодо впливу напівпровідникових нелінійних елементів частотних перетворювачів на спектральні характеристики інверторів.*

5. Лисиченко Р.М. Современные способы получения спектральных характеристик возбудителей-инверторов // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» – Х.: ХНТУСГ, 2015. – Вип. 164. – С. 37-41.

6. Лисиченко Р. Н. Анализ способов получения требуемых спектральных характеристик возбудителей инверторов напряжения // Энергетика та

комп'ютерно-інтегровані технології в АПК – Х.: ХНТУСГ, 2015. – № 1(3). – С. 20-24.

7. Лисиченко Р. М. Аналіз способів підвищення енергоефективності електричного приводу в АПК // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» – Х.: ХНТУСГ, 2016. – Вип. 175. – С. 116-118.

8. Лисиченко Р. М. Удосконалення схем частотних перетворювачів за рахунок адаптивного керування // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» – Х.: ХНТУСГ, 2017. – Вип. 186. – С. 47-48.

9. Lysychenko R. The influence of the specifications of the elements of range of exciters voltage inverters on their spectral characteristics / P. Komada, O. Miroshnyk, R. Lysychenko, T. Shchur // Przegląd Elektrotechniczny. – 2019. – № 5(95). – P. 83-87. – URL: DOI:10.15199/48.2019.05.21.

*Здобувачу належать теоретичні дослідження щодо впливу елементів з нелінійними характеристиками на спектральні характеристики перетворювачів енергії.*

10. Lysychenko R. The research of the spectral characteristics of the voltage inverter exciter bandwidth. In Journal of Physics / O. Miroshnyk, R. Lysychenko, S. Kovalyshyn, W. Kruszelnicka, P. Bałdowska-Witos, A. Tomporowski // International Conference on Applied Sciences. – 2020. – Vol. 1426. – P. 1-11.

*Здобувачу належить дослідження впливу спектральних характеристик на параметри інвертору перетворювача частоти.*

11. Лисиченко Р.М. Вплив якості напруги на ефективність роботи електроприводу // Молодежь и сельскохозяйственная техника в XXI веке. Матер. Межд. форума молодежи – Х.: ХНТУСГ, 2011. – С. 183.

12. Лисиченко Р.М. Технічні засоби для зниження вищих гармонік у споживачів в сільському господарстві // Молодежь и сельскохозяйственная техника в XXI веке. Матер. Межд. форума молодежи – Х.: ХНТУСГ, 2012. – С. 116.

13. Лисиченко Р.М. Підвищення якості електричної енергії у споживачів АПК // Лідери АПК XXI століття. Матер. учасн. XIV зльоту (12-15 трав. 2012 р., м. Житомир) – Житомир : ЖНАЕУ, 2012. – С. 151-153.

14. Лисиченко, Р.М. Доцільність застосування багатофункціонального вимірювача Power-Logic в сільськогосподарських розподільних мережах // Молодежь и сельскохозяйственная техника в XXI веке. Матер. Межд. форума молодежи – Х.: ХНТУСГ, 2013. – С. 142.

15. Лисиченко, Р.М. Зниження якості електричної енергії в мережах АПК внаслідок застосування перетворювачів частоти в електроприводах робочих машин і механізмів / Р. М. Лисиченко, П. І. Савченко // Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК. Матер. Міжнар. науч.-техн. конф. (6-7 листопада 2013 р., м. Київ) – К.: НУБІП, 2013. – С. 38-40.

*Здобувачу належить розробка стенду для проведення експериментальних досліджень щодо впливу перетворювачів при живленні електроприводів робочих машин та механізмів в сільському господарстві.*

16. Лисиченко Р. М. Методика розрахунку системи фазової синхронізації інвертору перетворювача частоти / Р.М. Лисиченко, М.М. Черемісін // Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК. Матер. III Міжнар. наук.-прак. конф. (17-18 грудня 2015 р., м. Київ) – К.: НУБіП, 2015. – С. 111-112.

*Здобувачу належить розробка методики для визначення фазової синхронізації інвертору перетворювача частоти в мережі живлення електроприводів.*

17. Лисиченко Р. М. Підвищення електричної енергії в мережах при живленні частотно-регульованого електропривода // Сучасні проблеми землеробської механіки. Матер. XVII Міжнар. наук. конф. (17-18 жовтня 2016 р., м. Суми) – Суми: СНАУ, 2016. – С. 209-210.

18. Лисиченко Р. М. Покращення показників якості електричної енергії на основі зміни спектральних характеристик інвертора // Проблеми та перспектив розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК. Матер. IV Міжнар. наук.-практ. конф.(21-22 листопада 2016 р., м. Київ) – К.: НУБіП, 2016. – С. 14-15.

19. Лисиченко Р. М. Стенд для визначення впливу частотно-регульованого електроприводу на форму синусоїди напруги в мережі живлення / Р.М. Лисиченко, М.М. Черемісін // Матер. IX Міжн. наук.-техн. конф. «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)» (19-22 травня 2020 р., м. Київ) – К.: НУБіП, 2020. – С. 51-53.

*Здобувачу належить розробка діючого макетного зразка стенду для визначення рівня генерації вищих гармонік в мережу частотно-регульованими електроприводами.*

20. Лисиченко Р. М. Перетворювач частоти для електроприводу з функцією компенсації залишкових гармонік / Р.М. Лисиченко, О.О. Мірошник // Матер. VI Всеукр. наук.-практ. конф. «Електронні та механотронні системи: теорія, інновації, практика» (6 листопада 2020 р., м. Полтава) – Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2020. – С. 104-107.

*Здобувачем запропоновано варіант принципової електричної схеми перетворювача частоти з можливістю компенсації вищих гармонік.*

21. Пат. на винахід № 101521, Україна. МПК H03H 11/04 (2006.01) Пристрій коригування показників якості електроенергії / О.О. Мірошник, М.М. Черемісін, Ю.Ф. Свєргун, В.М. Зубко, А.Є. Авраменко, Р.М. Лисиченко (Україна). – № а 2011 04408; Заявл. 11.04.2011; Опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7. – 6 с.

*Здобувачем запропонована структурна схема конструкції пристрою для корегування показників якості електроенергії в розподільній мережі.*

22. Пат. на корисну модель № 113090. Україна. МПК H02M 7/00 (2016.01) Частотний перетворювач з адаптивним керуванням / Р.М. Лисиченко, О.О. Мірошник (Україна). – № u 2016 07211; Заявл. 04.07.2016; Опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1. – 2 с.

*Здобувачем розроблена структурна схема та варіант принципової електричної схеми перетворювача частоти з адаптивним керуванням.*

## АНОТАЦІЇ

**Лисиченко Р.М. Підвищення якості електричної енергії в розподільних мережах за рахунок удосконалення перетворювачів енергії.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Харків, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню наукової задачі підвищення якості електричної енергії шляхом зменшення гармонійних складових від перетворювачів енергії. Задача, пов'язана з недостатньою ефективністю існуючих сьогодні методів забезпечення зменшення рівня гармонійних складових від нелінійних споживачів до яких відносяться інвертори управління асинхронними двигунами змінного струму. Проведений в роботі аналіз виявив необхідність розробки методів по підвищенню якості електричної енергії в розподільних мережах. Система керуючий інвертор і двигун є джерелом гармонічних складових і основним джерелом погіршення якості електричної енергії.

В роботі запропоновано метод керування спектральними характеристиками інверторів із цільовою функцією якості електричної енергії, що дозволило розробити засади для створення інверторів зі зменшеними показниками спотворення форми напруги і струму. Запропоновано технічні рішення і обґрунтована можливість використання методів спектрального збудження силових перетворювачів енергії, що забезпечують зниження рівнів гармонійних складових електричної енергії, що створюються як нелінійним навантаженням, так і мережею живлення. У порівнянні з пасивними фільтрами і активними фільтрами, методи спектрального збудження силових перетворювачів енергії не потребують спеціальної настройки під параметри конкретної мережі і відрізняються надійністю.

Розроблено апаратно інформаційну систему, яка дозволяє зменшити вплив від гармонійних складових на споживачів і систему електропостачання при різних режимах роботи частотного регулювання електричних двигунів. Результати експериментальних досліджень розробленої системи показали її відповідність технічним вимогам та можливість отримання діагностичної інформації при різних режимах роботи електродвигунів. Елементи конструкції та принцип дії розробленої системи для частотного регулювання захищені патентами України.

Ключові слова: розподільна мережа, якість електропостачання, гармонічна складова, асинхронний електричний двигун, інвертор, нелінійний споживач.

**Лисиченко Р.Н. Повышение качества электрической энергии в распределительных сетях за счет совершенствования преобразователей энергии. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети и системы. – Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко, Харьков, 2021.

Диссертация посвящена решению научной задачи повышения качества электрической энергии путем уменьшения гармонических составляющих от преобразователей энергии. Задача связанная с недостаточной эффективностью существующих сегодня методов обеспечения уменьшения уровня гармонических составляющих от нелинейных потребителей к которым относятся инверторы управления асинхронными двигателями переменного тока. Проведенный в работе анализ выявил необходимость разработки методов по повышению качества электрической энергии в распределительных сетях. Система управляющий инвертор и двигатель является источником гармонических составляющих и основным источником ухудшения качества электрической энергии.

В работе предложен метод управления спектральными характеристиками инверторов с целевой функцией качество электрической энергии, что позволило разработать основы для создания инверторов с уменьшенными показателями искажения формы напряжения и тока. Предложено технические решения и обоснована возможность использования методов спектрального возбуждения силовых преобразователей энергии, обеспечивающие снижение уровней гармонических составляющих электрической энергии, создаются как нелинейной нагрузкой, так и сетью питания. По сравнению с пассивными фильтрами и активными фильтрами, методы спектрального возбуждения силовых преобразователей энергии не требуют специальной настройки под параметры конкретной сети и отличаются надежностью.

Разработана аппаратно информационная система, которая позволяет уменьшить влияние от гармонических составляющих на потребителей и систему электроснабжения при различных режимах работы частотного регулирования электродвигателей. Результаты экспериментальных исследований разработанной системы показали ее соответствие техническим требованиям и возможность получения диагностической информации при различных режимах работы электродвигателей. Элементы конструкции и принцип действия разработанной системы для частотного регулирования защищены патентами Украины.

Ключевые слова: распределительная сеть, качество электроснабжения, гармоничная составляющая, асинхронный электрический двигатель, инвертор, нелинейный потребитель.

**Lysychenko R.M. Improving the quality of electrical energy in distribution networks by improving energy converters.** – Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.14.02 – power plants, networks and systems. – Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasilenko, Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to the decision of a scientific problem of increase of quality of electric energy by reduction of harmonic components from energy converters.

Thus, there is an urgent scientific problem associated with the lack of efficiency of existing methods to reduce the level of harmonic components from nonlinear consumers, which include inverters for controlling induction AC motors. The analysis revealed the need to develop methods to improve the quality of electricity in distribution networks. The widest distribution of various devices and equipment with induction motors, which are controlled by inverters. The control system of the inverter and the motor is a source of harmonic components and the main source of deterioration of electric energy. The solution of the specified problem at the expense of decrease in harmonic components by a method of management of spectral characteristics of inverters is offered.

The following main scientific results were obtained:

- for the first time the method of control of spectral characteristics of inverters with target function of quality of electric energy is offered that allowed to develop bases for creation of inverters with the reduced indicators of distortion of a form of tension and current;

- further developed the theory of the origin of harmonic components in electric current from power energy converters, which, in contrast to the known, allowed to determine the spectral methods of excitation as the most balanced from an economic and technical point of view;

- the model of spectral excitation of power energy converters was further developed, which allows to obtain mathematically substantiated spectral-energy dependences in the external network;

- technical solutions are offered and the possibility of using methods of spectral excitation of power energy converters is substantiated, which provide reduction of levels of harmonic components of electric energy, created both by nonlinear loading and power supply network. In comparison with passive filters and dynamic filters, methods of spectral excitation of power converters of energy do not demand special adjustment under parameters of a concrete network and differ in reliability;

- algorithms for determining the parameters of spectral excitation of power energy converters and methods of modeling their operation in the *Matlab* environment are developed, which differ taking into account the parameters of a

particular network, ensuring their construction and application at existing and projected power facilities.

Of practical importance for instrument making are approaches and recommendations for the construction of control systems for the spectral characteristics of inverters, which allows you to create equipment with reduced impact on the quality of electricity.

The practical problem of development of methods of control of spectral characteristics of inverters of asynchronous electric motors with the reduced influence on qualitative indicators of electric energy is solved.

On the basis of the offered approaches and methods the information technology of reception of commands of spectral excitation of power converters of energy with use of mathematical methods is developed.

A hardware information system has been developed, which allows to reduce the impact of harmonic components on consumers and the power supply system at different modes of operation of frequency control of electric motors. The results of experimental studies of the developed system showed its compliance with technical requirements and the ability to obtain diagnostic information in different modes of operation of electric motors. Elements of construction and the principle of operation of the developed system for frequency control are protected by patents of Ukraine (Pat. № 101521, Pat. 113090).

The results of the work are implemented in the educational process of the Department of Power Supply and Energy Management of Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture when teaching the course "Technologies, problems and prospects of industry development".

Keywords: distribution network, quality of power supply, harmonic component, asynchronous electric motor, inverter, non-linear consumer.