

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

**ШЕВЧЕНКО СЕРГІЙ ЮРІЙОВИЧ**



УДК 621.31

**ВПЛИВ ВИЩИХ ГАРМОНІК НАПРУГИ НА ВИБІР ТА  
ЕКСПЛУАТАЦІЮ ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГ ДЛЯ  
ЗАХИСТУ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

Спеціальність 05.09.03 Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації енергосистем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор  
**Гриб Олег Герасимович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
завідувач кафедри автоматизації енергосистем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Юрченко Олег Миколайович**,  
Інститут електродинаміки  
Національної академії наук України, м Київ,  
завідувач відділу транзисторних перетворювачів;

доктор технічних наук, доцент  
**Саприка Олександр Вікторович**,  
Харківський національний технічний університет  
сільського господарства імені Петра Василенка, м Харків,  
професор кафедри технотроніки та теоретичної  
електротехніки;

доктор технічних наук, доцент  
**Назаренко Ігор Петрович**, Таврійський державний  
агротехнологічний університет, м Мелітополь,  
доцент кафедри електротехнології.

Захист відбудеться «29» листопада 2015 р. о «14<sup>30</sup>» годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.04 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м.Харків, вул. Фрунзе 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий «27» листопада 2015 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Осичев О.В.

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Основним та чи не єдиним засобом захисту систем електропостачання від перенапруг, у відповідності до нормативних документів є обмежувач перенапруг нелінійний. При виборі параметрів захисного апарату, для обмеження перенапруг в системах електропостачання усіх класів номінальної напруги, прийнято виходити з того, що допустимими є режими системи електропостачання з коротко строковими перевищеннями найбільшої робочої напруги, що викликаються різноманітними видами перенапруг. Для обмежувачів перенапруг нелінійних (ОПН) в якості найбільшої робочої приймається напруга, близька до лінійної напруги системи електропостачання. Захисний апарат вибирається таким чином, що сумарний струм, що протікає по його варисторній колонці при дії напруги рівної лінійній напрузі системи електропостачання, не перевищує декількох міліампер. В тілі варистора в безперервному режимі виділяється потужність, яка призводить до того, що температура ОПН на декілька градусів перевершує температуру навколишнього середовища. Однак такий підхід до вибору ОПН не дає змоги визначити його параметри при виникненні в складі діючої напруги гармонійних коливань тому, що зовсім іншими стають умови роботи обмежувача перенапруг. При достатньо великому вмісті вищих гармонік та часу їх дії в системі електропостачання потужність, що виділяється в варисторах ОПН, може суттєво зрости. Величина потужності, що розсіює ОПН в такому випадку може перевищити нормовану виробником для варисторів, що призведе до порушення теплового балансу ОПН та виходу його з ладу.

Фізично процес нагріву ОПН складається з трьох стадій: початкової, коли варистор ОПН нагрівається в адиабатичному режимі і істотного відтоку тепла в навколишнє середовище не відбувається; перехідною, при якій стають помітними процеси теплопередачі в ізоляційній стінці корпусу ОПН та конвективного тепловідводу з поверхні ізоляційної покривки. Конвективний тепловідвід на протязі всього часу експлуатації ОПН зумовлює його сталий тепловий режим. Усталена температура апарату визначається співвідношенням ефективності тепловідведення від варистора в навколишнє середовище та активної потужності, що виділяється в варисторі. Тому істотними чинниками, що визначають працездатність ОПН в умовах низької якості напруги системи електропостачання, будуть як теплофізичні та конструктивні особливості захисного апарату, так і склад та амплітуди вищих гармонік напруги. Слід зазначити, що стандартний тест, що визначає здатність обмежувача до розсіювання енергії, що складається з 20 імпульсів прямокутної хвилі струму амплітудою 300-500 А, не відповідає фізичним умовам нагріву ОПН за низької якості електричної енергії системи електропостачання. Згідно з нормами випробувань максимальна серія складається з трьох імпульсів струму, прикладених з інтервалом 60 с, після чого відбувається охолодження апарату до температури навколишнього середовища. Тому аналіз режиму роботи ОПН в умовах низької якості електричної енергії в системі електропостачання являє собою актуальну, науково-практичну проблему, оскільки тривалий вплив гармонійних складових може призвести до нагрівання конструкції ОПН до неприпустимо високих температур і виходу апарату з ладу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» згідно завдань держбюджетних та госпдоговірних НДР: «Розробка теоретичних засад створення інформаційно-діагностичного комплексу для оцінювання стану об'єктів електроенергетичних систем» (№ ДР 0106U001490, МОН України), «Розробка теоретичних засад створення інформаційно-діагностичного комплексу для контролю ізоляції об'єктів електроенергетичної системи (№ ДР 0108U001458, МОН України), «Розробка методів для підвищення ефективності транспорту електричної енергії та експлуатаційної надійності електроенергетичних мереж України» (№ ДР 0109U006061, МОН України), «Дослідження та розрахунок впливу на навколишнє середовище електромагнітних полів високовольтного обладнання електричних мереж» (№ ДР 0111U008463, АК «Харківобленерго», м. Харків), "Розробка рекомендацій щодо захисту від перенапруг повітряних захищених електричних ліній 6-35 кВ" (№ ДР 0114U003936, ТОВ "СІКАМ Україна", м. Київ), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів та науковим керівником.

**Мета і завдання досліджень.** Метою дисертаційної роботи є визначення основних засад вибору та експлуатації обмежувачів перенапруг нелінійних в умовах впливу вищих гармонік напруги в місці їх встановлення, як основного способу захисту систем електропостачання. Для досягнення поставленої мети визначені наступні задачі дослідження:

- проаналізувати існуючі вимоги до вибору та експлуатації обмежувачів перенапруг нелінійних (ОПН) для захисту систем електропостачання різних класів напруги;
- виконати експериментальні дослідження електричних характеристик варисторів та ОПН в зібраному стані провідних світових виробників при різних частотах прикладеної напруги;
- уточнити математичну модель вибору енергетичних характеристик ОПН, при низькій якості електричної енергії, в системі електропостачання на базі схем заміщення ОПН, в зоні струмів витоку їх вольт-амперної характеристики (ВАХ);
- провести експериментальні дослідження вольт-амперних характеристик варисторів та ОПН в зібраному стані в зоні струмів витоку;
- розробити метод визначення втрат активної потужності в ОПН на базі отриманих ВАХ в зоні струмів витоку, та виконати аналіз впливу несинусоїдальності напруги на величину енергії, що діє на ОПН, а також вплив на нормальну роботу ОПН перенапруг грозового та комутаційного імпульсів струму та підвищеної напруги промислової частоти;
- обґрунтувати методи визначення ВАХ ОПН в зоні струмів витоку на основі отриманих експериментальних ВАХ ОПН;
- удосконалити математичну модель теплових режимів ОПН при низькій якості електричної енергії в системі електропостачання та провести їх розрахунки;
- експериментально дослідити наявність порушень якості електричної енергії в системах електропостачання України;

– розробити методи вибору ОПН в системах електропостачання з низькою якістю електричної енергії;

– науково обґрунтувати основні засади застосування та експлуатації ОПН;

*Об'єкт досліджень* – процеси в обмежувачі перенапруг нелінійному при наявності в складі діючої напруги вищих гармонік.

*Предмет досліджень* - електричні та енергетичні параметри і характеристики ОПН при низькій якості електричної енергії.

**Методи досліджень.** В основу роботи покладено системний підхід при проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, що базується на фундаментальних положеннях теорії електричних кіл, теорії загальної теплотехніки, техніки високих напруг, теорії ймовірності та математичної статистики. Математична обробка результатів досліджень виконувалася з використанням сучасного прикладного програмного забезпечення (пакета MathCAD та середовища ANSYS). Надійність розробки забезпечена коректним використанням методів дослідження, підтверджена експериментальними дослідженнями та промисловим впровадженням рекомендацій стосовно використання ОПН в якості захисних апаратів систем електропостачання.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

– вперше запропоновано метод розрахунку потужності, яка виділяється в ОПН в нормальному режимі роботи системи електропостачання, який враховує електрофізичні властивості варисторної кераміки, що дає можливість обирати тип ОПН з урахуванням впливу вищих гармонік напруги в системі електропостачання;

– вперше запропоновано метод вибору енергетичних характеристик ОПН, який відрізняється тим, що критерієм вибору є активна енергія виділена в ОПН за одну секунду. Порівняння її з активною потужністю що можуть витримати варистори ОПН, дає можливість обрати апарат з урахуванням впливу вищих гармонік напруги у місці приєднання ОПН до системи електропостачання;

– вперше експериментально підтверджено наявність високочастотних коливань напруги на повітряних лініях електропередавання, джерелом яких є ізолятори гірлянди, що впливають на якість електричної енергії;

– вперше визначено напругу переходу ОПН з діелектричного стану до стану провідника на основі аналізу експериментальних досліджень, що дозволить враховувати при розрахунках теплових та електричних режимів, як діелектричні так і провідникові властивості ОПН;

– вперше запропоновано метод вибору найбільшої робочої напруги ОПН, який відрізняється тим, що враховує наявність та склад гармонійних коливань напруги в системі електропостачання, що дозволить підвищити надійність роботи ОПН;

– удосконалено метод визначення ВАХ ОПН в зоні струмів витоку, який відрізняється тим, що ВАХ розділяють на два відрізки та кожний з них замінюють прямою лінією, що дозволить спростити представлення ВАХ під час розрахунків;

– удосконалено модель електричних процесів в ОПН, яка відрізняється від існуючих врахуванням електрофізичних властивостей варисторної кераміки, що

дозволить отримати значення енергії враховуючи діелектричні та провідникові властивості ОПН;

– удосконалено модель теплових процесів в ОПН, яка відрізняється від існуючих урахуванням при розрахунку теплового потоку електрофізичних властивостей варисторної кераміки, що дозволить підвищити точність розрахунків теплових режимів ОПН.

**Практичне значення отриманих результатів**, для електроенергетичної галузі, полягає у розробці методики вибору ОПН для систем електропостачання різної номінальної напруги, яка дозволяє на етапі проектування системи захисту від перенапруг урахувати якість електричної енергії в місці встановлення ОПН. Запропоновано спосіб визначення ВАХ ОПН в зоні струмів витоку, який дозволяє, в умовах недостатньої інформації, визначити значення струмів витоку та енергії, що розсіює ОПН. Доведено можливість використання інфрачервоних засобів, як основних для діагностики ОПН під час експлуатації.

Результати дисертаційної роботи використані при розробці наступних нормативних документів для Мінпаливенерго України: Правила Улаштування електроустановок; Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 6-35 кВ. Настанова щодо вибору та застосування у розподільчих установках СОУ-Н МЕВ 40.1-00100227-67:2012; Засоби захисту від перенапруг. Інструкція. Нормативний документ затверджений Міністром України.

Результати дисертаційної роботи використані у: НЕК «Укренерго» (м. Київ), при розробці методики вибору ОПН, АК «Харківобленерго» (м.Харків), при виборі типу ОПН. Теоретичні положення та практичні висновки втілені у навчальний процес НТУ «ХП» при підготовці студентів електротехнічних спеціальностей.

**Особистий внесок здобувача.** Усі положення, результати теоретичних та експериментальних досліджень, що виносяться на захист дисертаційної роботи, одержані здобувачем самостійно. Серед них: проведені експериментально розрахункові дослідження електрофізичних властивостей варисторів та ОПН в зібраному стані, що дозволило удосконалити моделі електричних та теплових процесів в ОПН при наявності в складі діючої напруги вищих гармонік, проведені експериментальні дослідження ВАХ ОПН в зоні струмів витоку, що дало можливість визначити напругу переходу апарату до стану провідника та розробити метод вибору енергетичних характеристик апарату з урахуванням впливу вищих гармонік напруги для захисту систем електропостачання. Сформульовані та науково обґрунтовані основні засади вибору та експлуатації ОПН для захисту систем електропостачання при впливі вищих гармонік напруги.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на Міжнародних науково-технічних конференціях «Стан електричних мереж обленерго й основні напрямки підвищення їхньої ефективності. Зменшення втрат електроенергії в електромережах» (Кореїз, АР Крим, 2006 - 2013рр.), Міжнародних науково-технічних конференціях викладачів, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів» (Донецьк, 2013, 2014рр.), Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування

електроустановками (ОКЕУ-2013)» (Вінниця, 2013), Міжнародних науково-практичних конференціях «Кабельна техніка сучасного рівня й ізоляція, Перегляд «Норм і методів випробувань і вимірювань електроустаткування й апаратів електроустановок споживачів»» (Харків, 2008 -2014рр.), Міжнародних науково-практичних конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2010-2013рр.), Міжнародних науково-практичних семінарах МОН України «Перенапруги в електроенергетичних системах і захист від них» (м.Харків, 2013 – 2014 р.), Міжнародних симпозіумах Проблеми удосконалення електричних машин та апаратів. Теорія, практика. «SIEMA» ( Харків, 2010, 2013, 2014рр.), Всеукраїнській науковій конференції "Підвищення ефективності роботи електричних мереж" (м. Чернігів, 2013), BioEM2013, (Салоники, Греція, 2013), Progress In Electromagnetic Research Symposium Proceedings, (Стокгольм, Швеція, 2013) Proceedings of 18th International Symposium on High Voltage Engineering, (Сеул, Корея, 2013).

**Публікації.** Результати наукових досліджень викладено в 40 друкованих працях, з них 4 монографії, 25 публікацій у наукових фахових виданнях України (6 – у науково метричних базах), 2 – у іноземних фахових періодичних виданнях, , 2 – технічний нормативний документ України, 4 – у матеріалах наукових конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 385 сторінки з них 85 рисунків по тексту; 60 рисунків на 30 окремих сторінках; 39 таблиці по тексту; 10 таблиць на окремих 6 сторінках; списку використаних джерел з 242 найменувань на 28 сторінках, 6 додатків на 37 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми дослідження, сформульовано мету та основні задачі дисертаційної роботи, наведена загальна її характеристика.

**У першому розділі** проведено аналіз методів та методик вибору та експлуатації обмежувачів перенапруг нелінійних з метою їх подальшого розвитку при врахуванні впливу вищих гармонік напруги на режими роботи ОПН. Питанням вибору та експлуатації ОПН в системах електропостачання в різні часи приділялося багато уваги провідними вченими в Україні і за кордоном такими, як Бржезицький В.О., Шумілов Ю.М., Александров Г.М., Кучинський Г.С., Дмитриєв В.Л, Дмитриєв М.В., Тиходєєв М.М., Кадомська К П., Костенко М.В., Bayadi, Alberto de Conti, A. Christodoulou, Fernandez F., Hinrichsen V. та іншими. Однак, всі дослідники, достатньо детально вивчали роботу ОПН при дії перенапруг та не приділяли достатньо уваги режимам їх роботи при дії напруги з вмістом вищих гармонік напруги. Це підтверджується змістом діючих нормативних рекомендацій по вибору та експлуатації ОПН.

Відзначено, що основним завданням при виборі ОПН є обмеження перенапруг до безпечного для електрообладнання, що захищається, рівня і в цей же час забезпечення стійкості обмежувачів до небезпечних для них перенапруг.

Основною характеристикою ОПН є найбільша тривало допустима робоча напруга ОПН  $U_{\text{про}}$ . Це найбільше значення діючої напруги промислової частоти, яке може бути докладено безперервно до ОПН протягом всього терміну його експлуатації, і не призводить до пошкодження або термічної нестійкості ОПН.

Відзначено, що для аналізу роботи ОПН доцільно визначити захисні властивості, які ґрунтуються на нелінійності вольт-амперної характеристики робочих елементів (варисторів), що забезпечує помітне зниження опору в разі підвищення напруги і повернення в початковий стан після зниження напруги. Нелінійність і стабільність характеристик металооксидного варистора залежать від наявності і складу оксидів інших металів у кераміці, режиму запікання матеріалу, температури варистора і довкілля, тривалості і форми струму, який протікає через варистор. На характеристики ОПН впливають технологія виготовлення і конструктивні особливості апарату, умови його вибору і особливості його експлуатації.

Доведено, що теплова стабільність параметрів і теплова стійкість варисторів є найважливішими характеристиками ОПН, оскільки визначають здатність забезпечувати правильну роботу ОПН в умовах виділення енергії в експлуатаційних режимах з урахуванням перенапруг та якості електричної енергії в місці встановлення. У загальному випадку під час протікання струму через нелінійний резистор виділення енергії в ньому визначається струмом  $i(t)$  і вольт-амперною характеристикою  $u=u(i)$ . Здатність варисторів витримувати без пошкодження і втрат термічної стійкості нормовані струмові навантаження (із заданими амплітудою, фронтом, тривалістю і числом імпульсів за нормованих початкових температур і деяких інших параметрів) характеризується поняттям пропускнуої спроможності.

Проведені дослідження термічній стійкості ОПН, які виконувалися в провідних наукових організаціях світу показали, що одним з важливіших показників працездатності ОПН є його спроможність підтримувати тепловий баланс. Ця обставина обумовлює доцільність аналізу теплових режимів ОПН у разі низької якості електричної енергії в мережі. Подібний аналіз виконується, при аналізі роботи ОПН, тому, що підвищення частоти діючої напруги призводить до підвищення виділення активної потужності в об'єкті.

Таким чином розвиток і вдосконалення методів та методик вибору ОПН повинен полягати у врахуванні впливу вищих гармонік напруги на тепловий баланс ОПН, що дозволить вже на етапах виробництва та вибору обрати необхідні для нормальної роботи апарату характеристики.

**У другому розділі** визначені методологічні основи пропонованого врахування впливу вищих гармонік на вибір та експлуатацію ОПН за допомогою математичного моделювання та статистичного аналізу результатів експериментів.

При несинусоїдальних періодичних токах і ЕРС в електричному колі вводяться поняття діючих значень аналогічно тому, як це було зроблено для синусоїдальних величин. Діючі значення струму  $I$  визначається за допомогою миттєвих, як

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt.$$

Якщо представити періодичний несинусоїдальний струм рядом Фур'є, то

$$i = I_0 + I_1 \sin(\alpha + \psi_1) + I_2 \sin(2\alpha + \psi_2) + \dots + I_k \sin(k\alpha + \psi_k) + \dots,$$

при цьому:

$$i^2 = I_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km}^2 \sin^2(k\omega t + \psi_k) + \sum_{\substack{p=0 \\ q=0 \\ p \neq q}}^{\infty} I_{pm} I_{qm} \sin(p\omega t + \psi_p) \sin(q\omega t + \psi_q),$$

$$\int_0^T \sin^2(k\omega t + \psi_k) dt = \frac{T}{2} \int_0^T \sin(p\omega t + \psi_p) \sin(q\omega t + \psi_q) dt = 0,$$

отже діюче значення струму  $I$  обчислюється по формулі

$$I = \sqrt{I_0^2 + \frac{I_{1m}^2}{2} + \frac{I_{2m}^2}{2} + \frac{I_{3m}^2}{2} + \frac{I_{4m}^2}{2} + \dots}$$

Середню потужність  $P$  в електричному колі при несинусоїдальних токах і напругах визначається за виразом

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt.$$

Підставляючи в цей вираз напругу і струм, представлені рядами Фур'є, отримано розрахункове значення

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T (U_0 + u_1 + u_2 + u_3 + \dots + u_k + \dots)(I_0 + i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_k + \dots) dt = \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_k i_k dt + \sum_{\substack{p=0 \\ q=0 \\ p \neq q}}^{\infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_p i_q dt. \end{aligned}$$

З цього виразу випливає, що середня або активна потужність у електричному колі з несинусоїдальними струмами і напругами дорівнює сумі середніх або активних потужностей окремих гармонік. Ця математична залежність дає змогу оцінити наявність гармонійних складових в складі діючої в мережі напруги та визначити їх амплітудні значення. Отримання таких даних дозволить аналізувати роботу ОПН при дії на нього гармонійних складових напруги.

Проаналізовано енергетичні параметри ОПН у в системах електропостачання з низькою якістю електричної енергії. У загальному випадку під час протікання струму через варистор виділення енергії в ньому визначається

струмом  $i(t)$  і вольт-амперною характеристикою  $u=u(i)$ . ОПН в режимі дії найбільшої робочої напруги представляє собою ємність, тому активна складова струму через нього практично дорівнює нулю. Втрати потужності та енергії розраховуються за виразами для конденсаторів. Отримавши значення втрат потужності в ОПН визначається енергія яку апарат поглинає на протяжні встановленого відрізка часу.

Отримано вирази для розрахунків втрат потужності у ОПН при дії найбільшої допустимої напруги для паралельної  $P_1$  та послідовної  $P_2$  схем заміщення відповідно.

$$P_1 = \frac{U^2 \omega \pi r^2 \varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta}{h}, \quad P_2 = \frac{U^2 \omega \pi r^2 \varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta}{h(1 + \operatorname{tg}^2 \delta)}.$$

Відповідно до рівності Парсеваля середнє значення теплової потужності, що виділяється в ОПН, дорівнює сумі середніх потужностей окремих гармонік

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} P_k .$$

Таким чином, розрахунок втрат потужності в ОПН при дії несинусоїдальної напруги можна провадити для кожної гармоніки окремо. Отримані значення енергії визначають вибір типу ОПН з точки зору визначення його класу пропускної здатності.

Необхідність виконання експериментальних досліджень ВАХ ОПН викликана тим, що вона характеризується двома зонами кожна з яких повинна досліджуватись окремо. Для оцінювання впливу якості електричної енергії на режими роботи ОПН слід визначити ВАХ в зоні струмів витоку. Характерні осцилограми вимірювань наведені на рис 1 та рис. 2

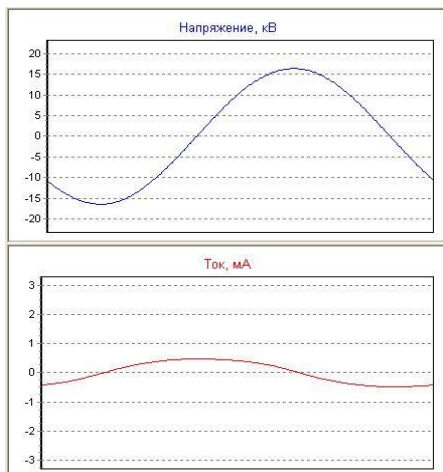


Рисунок 1 - Характерні осцилограми струмів та напруг без активної складової струму

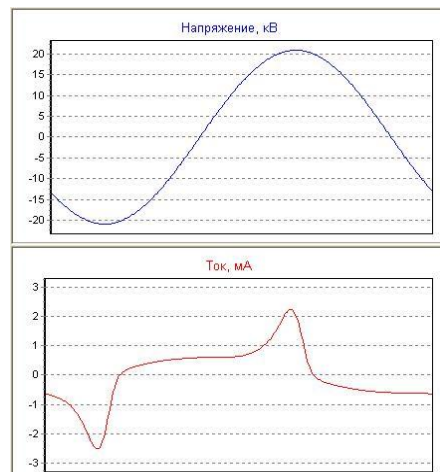


Рисунок 2 - Характерні осцилограми струмів та напруг з активною складовою струму.

Експериментальні дослідження ВАХ варисторів виконувалися не тільки для поодиноких варисторів, а й для пар варисторів, які використовуються для

вироблення визначених типів ОПН та для повністю готових до роботи ОПН вкритих ізолюючою покривкою.

Для аналізу отриманих ВАХ варисторів та ОПН та визначення їх характеру застосовувалися методи статистичного аналізу експериментальних даних. Використано дисперсійний аналіз для перевірки на відхилення від лінійності, коваріаційний аналіз двовимірних спостережень, регресійний аналіз результатів експерименту. Розрахунки виконувалися за допомогою програми «OTKLINE», «KOVAN», «REGRAN» розробленими на кафедрі передачі електричної енергії НТУ «ХПІ».

Визначено, що одним з перспективних напрямків прогнозування ВАХ варисторів є застосування нейронних мереж. Нейронні мережі дозволяють справлятися з такими проблемами прогнозування, як неповнота і зашумленість вхідних даних, і володіють миттєвим відгуком. Використання нейронних мереж дозволяє істотно скоротити кількість параметрів, які заміряються, що відповідно зменшує необхідну кількість експериментальних досліджень для зданого типу варистора. Завдання прогнозування ВАХ варисторів із застосуванням штучних нейронних мереж зводиться до вибору типу мережі, визначення параметрів архітектури та її навчання.

Для аналізу теплових процесів, що відбуваються в ОПН в умовах наявності в системі електропостачання вищих гармонійних складових напруги, удосконалена математична модель, добре сумісна з моделями, які застосовуються для аналізу якості електричної енергії системи електропостачання та розрахунків перехідних та сталих її режимів. При цьому розрахункова теплова модель дає змогу оцінити як перехідний процес теплопередачі, так і усталений режим роботи ОПН, що є підґрунтям для оцінки як часу нагріву до критичних температур, так і сталої температури ОПН у випадку тривалого впливу гармонійних коливань.

Обмежувач перенапруг являє собою апарат, площа бічної поверхні якого значно перевершує площу торцевих частин. Тому з деякою похибкою вважається, що охолодження апарату відбувається внаслідок конвективного тепловідводу з бічної поверхні. Крім того, як видно з рис. 3, температура вже досить близько від контактних металевих фланців ОПН рівномірно розподілена по висоті апарату за винятком невеликих збурень, що викликані наявністю юбок ізоляційної покривки.

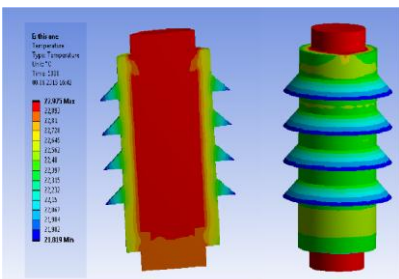


Рисунок 3 - Розподіл температури у варисторному блоці ОПН

Для наближеного опису процесів нагріву і теплопередачі в конструкції обмежувача перенапруг використовується одомірне рівняння вісесиметричної теплопровідності справедливе в межах висоти варисторної колонки апарату

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( \lambda r \frac{dT}{dr} \right). \quad (1)$$

Врахувавши температури навколишнього середовища, ізоляційного тіла ОПН

та варисторної колонки отримана у матричному вигляді система з двох звичайних диференціальних рівнянь у формі Коші для розрахунку теплових режимів ОПН

$$\frac{dT}{dt} = AT + BU. \quad (2)$$

при початкових умовах

$$T(t_0) = T_{oc},$$

де  $T_{oc}$  – температура оточуючого середовища.

Таким чином, здійснена оцінка температури нагріву варисторної колонки та ізоляції при впливах усіх видів перенапруг та визначати вплив якості електричної енергії на спроможність апарату підтримувати тепловий баланс на протязі всього строку експлуатації.

**В третьому розділі** розроблена уточнена схема заміщення ОПН при роботі в зоні струмів витоку ВАХ, яка дозволяє поводити розрахунки режимів роботи ОПН при впливі вищих гармонік напруги.

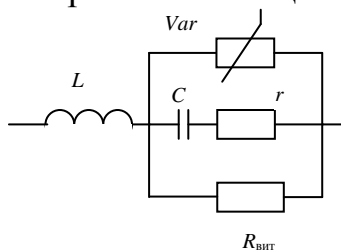


Рисунок 4 - Повна схема заміщення ОПН

Наведена схема дозволяє врахувати можливість виникнення резонансних явищ при розрахунках режимів роботи ОПН та оцінити величини струмів витоку по їх поверхні, що дає можливість оцінювати величини вологорозрядних напруг та здійснювати розрахунок току витоку через варистори під час експлуатації в районах з різними ступенями забруднення атмосфери.

Для аналізу втрат потужності в ОПН, визначаються параметри схеми заміщення, які залежать від електрофізичних характеристик матеріалу варисторів. Окрім того, для коректного аналізу впливу гармонійних коливань–напруги на теплові режими ОПН, необхідно мати відомості про залежність від частоти параметрів схеми заміщення та тангенса кута діелектричних втрат.

Вимірювання ємності та  $\text{tg } \delta$  виконані для трьох значень частоти 100 Гц, 1000 Гц, 10000 Гц. Такий вибір частот обумовлений тим що в електричних мережах України враховують гармонійні коливання до частот 41 гармоніки, що дорівнює 2050 Гц. Результати експериментальних досліджень наведені на рис.5,6,7.

Для вирішення задачі вибору ОПН, як правило слід застосовувати верхню межу інтервалу коливання  $\text{tg } \delta$  для отримання більших значень потужності, що діє на нього. Таке припущення дозволить вибирати ОПН з запасом по енергетичним характеристикам. Характер залежності ємності від частоти, що представлений на рис 6. та рис.7 свідчить, що у діапазоні частот, які потрібні для виконання аналізу впливу гармонік (до 2050 Гц) залежність ємності від частоти практично відсутня.

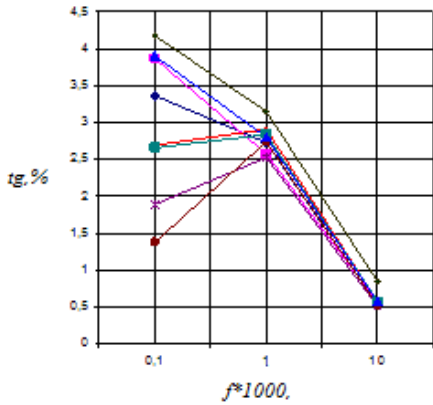


Рисунок 5 - Залежність тангенса кута діелектричних втрат від частоти.

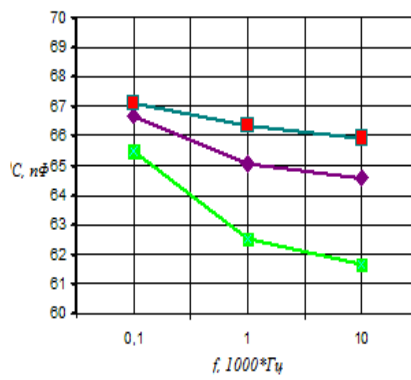


Рисунок 6 - Залежність ємності ОПН від частоти для ОПН 10 кВ

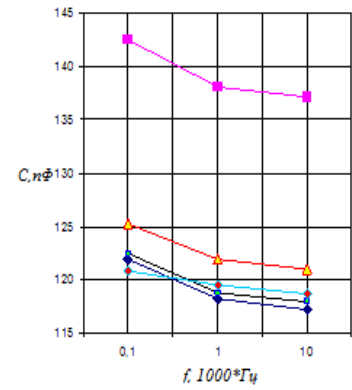


Рисунок 7 - Залежність ємності ОПН від частоти для ОПН 6 кВ.

Результати розрахунку відносної діелектричної проникності для різних частот діючої напруги наведені на рис. 8. Характер залежності діелектричної проникності, дає можливість зробити висновок, що у дослідженому діапазоні частот значення відносної діелектричної проникності ОПН має слабку залежність від частоти. Цей факт показує, що існує можливість, використовувати для інженерних розрахунків

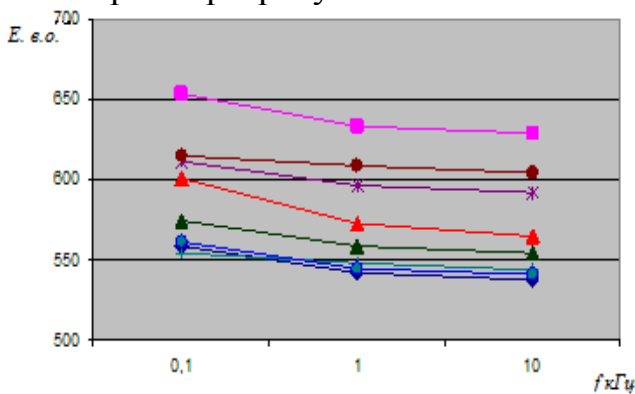


Рисунок 8 - Залежність відносної діелектричної проникності від частоти

параметрів ОПН єдине усереднене значення для всіх частот, що характерні для гармонійних коливань існуючих у електричних мережах, яке дорівнює 585. При цьому максимальна похибка визначення відносної діелектричної проникності становить менше 10 відсотків. Одним з головних питань методики вибору ОПН, є визначення граничного значення потужності втрат, яке може витримати ОПН. Таким значенням прийнята величина активної потужності, яку ОПН розсіює при дії на нього

максимальної робочої напруги мережі на протязі всього часу експлуатації без втрати теплової рівноваги.

Математична модель теплової стійкості ОПН має вигляд нерівності

$$P_{кр} \geq \frac{\pi r^2 \varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta}{h} \times \sum_{k=0}^{\infty} (U_k^2 \omega_k).$$

Експериментальні дослідження ВАХ варисторів в зоні струмів витоку проведені для більш ніж 1000 варисторів різних типів, які використовуються виробниками ОПН на класи напруги 6 – 10 кВ. Конструкція ОПН на ці класи напруги може включати в себе декілька варисторів тому ВАХ вимірювалися для пар варисторів, що використовуються при виробництві. Характерний вигляд ВАХ

наведено на рис 9 та 10. Всі графіки зображені в координатах струм – відношення напруг. В якості відношення напруг використано відношення напруги діючої на варистор до найбільшої робочої напруги.

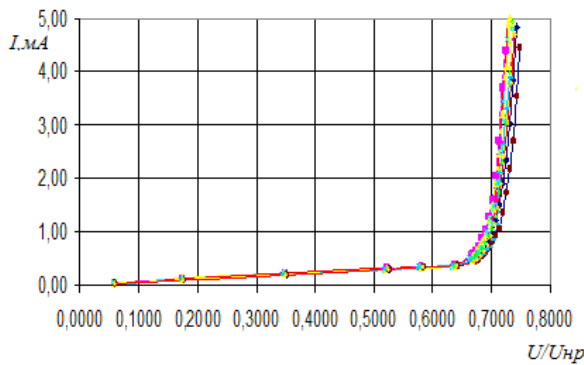


Рисунок 9 - Характерні ВАХ пар варисторів 5 кВ виробництва АВВ

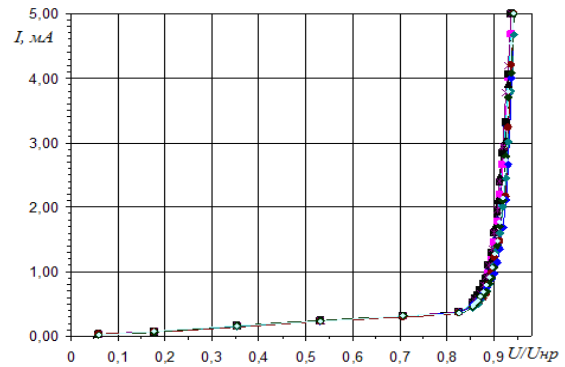


Рисунок 10 - Характерні ВАХ пар варисторів 6 кВ виробництва АВВ.

З отриманих експериментально ВАХ (рис. 9 та 10) відзначено, що в зоні струмів витоку існують два характерних відрізки. Перший, який характеризується практично лінійним повільним ростом струму при зростанні напруги та другий, що характеризується швидким зростанням струму при незначному рості напруги. Це обумовлено, тим, що у структурі варистора з'являються провідні кола кількості, яких при підвищенні напруги зростає лавинообразно. Аналіз отриманих результатів показує, що на кожному з характерних відрізків ВАХ варисторів апроксимуюча функція має різні коефіцієнти, що дуже ускладнює її практичне використання при виборі необхідної моделі ОПН. Подальший аналіз отриманих експериментально ВАХ варисторів дозволив зробити важливий висновок, що діелектричні властивості варисторної кераміки впливають на величину втрат активної потужності у ОПН тільки коли активна складова струму витоку дуже мала.

Наведені результати демонструють необхідність уточнення математичної моделі та методу для визначення енергії, що розсіює ОПН в зоні струмів витоку ВАХ з їх урахуванням. Важливим параметром моделі є величина напруги при дії, якої варистор перетворюється на провідник. Визначення такого значення напруги проведемо за допомогою характерних ВАХ отриманих у результаті експерименту. З рисунку 11 витікає, що до значення відношення діючої напруги до найбільшої робочої мережі, що дорівнює 0,65, ВАХ усіх досліджених варисторів практично ідентичні, а після цього значення вони починають суттєво розрізнятися.

Тому величина енергії, що розсіює ОПН в зоні струмів витоку ВАХ знаходиться наступним чином:

$$\text{Якщо, } U < 0,65U_{np}, \text{ то } w(t) = \text{tg} \delta \cdot \int_0^t u(t) \cdot i(t) dt ;$$

$$\text{Якщо, } U \geq 0,65U_{np}, \text{ то } w(t) = \int_0^t u(t) \cdot i(t) dt .$$

Таке удосконалення моделі для визначення енергії, що розсіює ОПН в зоні струмів витоку

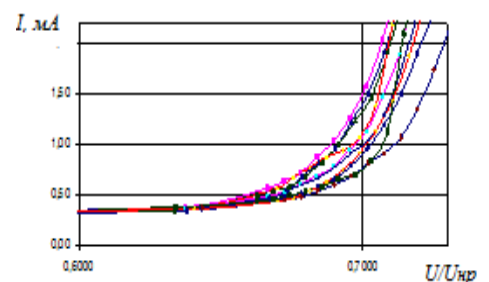


Рисунок 11 - Характерні ВАХ пар варисторів 5 кВ виробництва АВВ.

ВАХ дозволить врахувати обидва стани ОПН, а саме коли він є діелектриком та коли стає провідником, що дасть можливість розробити метод оцінювання спроможності ОПН підтримувати тепловий баланс на протязі всього строку експлуатації. Ідея такого методу полягає в тому, що для визначення спроможності роботи ОПН без втрати теплового балансу, повинна бути розрахована енергія втрат активної потужності в ньому на протязі однієї секунди. Отримане значення втрат активної потужності повинно бути меншим за припустимі втрати зазначені в каталозі виробника варисторів. У випадку коли ОПН складається з декількох варисторів каталожні дані потужності для них мають бути додані одне до одного.

Як свідчать виконані розрахунки, з використання наведеного методу та відповідно удосконаленої математичної моделі, всі типи ОПН повинні нормально працювати в умовах мереж з якістю електричної енергії, яка відповідає ГОСТ. У разі наявності в мережі вищих гармонік напруги в системі електропостачання ситуація докорінно змінюється. Вираз моделі визначення енергії в такому випадку записується наступним чином:

$$\text{Якщо, } U < 0,65 U_{нр}, \text{ то } w(t) = \int_0^1 \sum_0^k \operatorname{tg} \delta_k \cdot p_k(t) = \sum_0^k \int_0^1 \operatorname{tg} \delta_k \cdot u_k(t) \cdot i_k(t) dt ;$$

$$\text{Якщо, } U \geq 0,65 U_{нр}, \text{ то } w(t) = \int_0^1 \sum_0^k p_k(t) = \sum_0^k \int_0^1 u_k(t) \cdot i_k(t) dt .$$

Для реалізації методу визначення втрат активної потужності в ОПН при низькій якості електричної енергії необхідно мати відомості про його ВАХ в зоні струмів витоку. Тому виконана спроба узагальнити отримані експериментальним шляхом ВАХ при роботі ОПН в зоні витоку. Зазвичай ВАХ ОПН визначають за виразами  $U=AI^\alpha$  або  $I=KU^\beta$ . Однак спроби використати ці вирази для зони струмів витоку ВАХ дають дуже великі похибки по відношенню до експериментально отриманих. Це ускладнює аналіз роботи ОПН в зоні струмів витоку ВАХ та робить практично неможливим оцінювання спроможності роботи ОПН без порушень теплового балансу в процесі експлуатації при впливі на нього вищих гармонік напруги. Типова ВАХ, яку зазвичай наводять виробники в каталогах на ОПН має вигляд показаний на рис 12. ВАХ ОПН має три характерні відрізки. Для аналізу роботи ОПН в зоні струмів витоку ВАХ необхідно проаналізувати два перші з них. Кожен з цих відрізків ВАХ ОПН має свою апроксимуючу функцію, яка суттєво відрізняється від апроксимуючої функції сусіднього відрізка ВАХ ОПН. Однак з отриманих експериментальних даних, що наведені на рис. 13

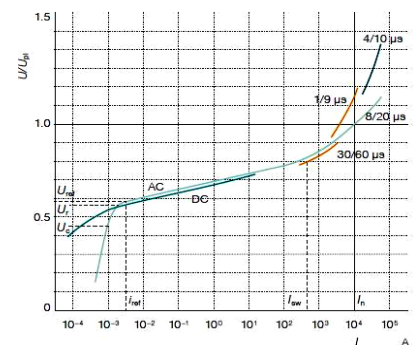


Рисунок 12 - Типова ВАХ ОПН.

зроблено висновок, що на кожному з відрізків ВАХ ОПН може бути відображена за допомогою прямих ліній. Для аналізу статистичних залежностей отриманих результатів за методикою викладеною в розділі 2 виконано дисперсійний аналіз

отриманих експериментальних даних. Результати розрахунків наведені в таблицях 1-3. У таблиці 1 наведені результати розрахунку критеріїв  $F_0$ ,  $F\alpha$ ,  $Fw$ ,  $F_{S0}$ , а також критеріїв  $F_{WG}$  та  $F_G$ , які використані для оцінки рівномірності розсіювання адитивних відхилень щодо середнього значення вільного члена лінійної регресії

$$M[\alpha_t] = \bar{Y} - B_0 \cdot \bar{T}$$

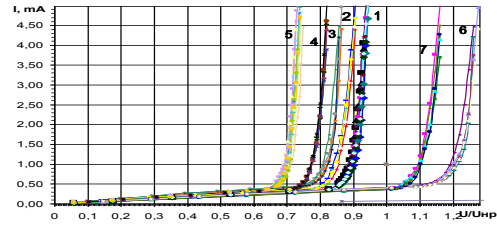


Рисунок 13. - Експериментальні ВАХ варисторів та пар варисторів різних виробників. 1 – Пари варисторів виробництва АВВ 6 кВ; 2 – пари варисторів 5 кВ виробництва АВВ, орієнтованих на зустріч одне одному; 3 – варистори 6 кВ виробництва АВВ; 4 – пари варистори 5 кВ виробництва АВВ; 5 – варистори 5 кВ виробництва АВВ; 6 – пари варисторів 6 кВ виробництва АВВ, орієнтованих на зустріч одне одному; 7 – пари варисторів 3 та 5 кВ виробництва EPCOS.

Виконаний коваріаційний аналіз не виявив, наявності адитивного та мультиплікативного зсуву між окремими рядами показників, але показав значиму систематичну складову, що свідчить про наявність нелінійності ВАХ в зоні струмів витоку.

Таблиця 1 - Результати коваріаційного аналізу експериментальних ВАХ варисторів.

Статистичний критерій	Отримане значення статистичного критерію	Критичне значення статистичного критерію
$F_0$	316.381942	3.8415
$F_{wg}$	5.04000778	3.8415
$F_g$	0.32119623	1.3826
$F_w$	0.11368116	1.3788
$F\alpha$	0.45011296	1.3788
$F_{s0}$	0.27106155	1.485

Результати отримані під час проведення аналізу на відхилення від лінійності наведено в таблиці 2.

Для отримання математичних моделей відрізків ВАХ варисторів виконано регресійний аналіз експериментальних даних. Моделі ОПН на відрізках ВАХ для всіх груп досліджених варисторів, що представляють з себе дві прямі лінії які апроксимують ВАХ варистора. Для визначення точки переходу від одного відрізка моделі до другого знайдено координати єдиної точки перетину.

Таблиця 2 - Результати аналізу відхилення від лінійності ВАХ варисторів.

Данні	$k$	$N$	Додатки дисперсійного розкладання				Число ступенів свободи		$F$ - статистика		Рішення
			$Q_{\text{пол}}$	$Q_{\text{лин. регр}}$	$Q_{\text{откл}}$	$Q_{\text{ост}}$	$\nu_{\text{откл}}$	$\nu_{\text{ост}}$	$F_{\text{расч}}$	$F_{\text{крит}}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
М-1	3	227	2.44248	1.90418	0.2037	0.33460	1	224	136.3	1018.	$H_0$ не відкидається
М-2	5	50	84.0080	78.9789	2.3746	2.65439	3	45	13.41	14.02	$H_0$ не відкидається
М-3	4	40	48.5804	44.9636	0.7568	2.85999	2	36	4.763	39.46	$H_0$ не відкидається
М-4	4	17	22.0648	18.3518	0.4648	3.24813	2	13	0.93019	39.420	$H_0$ не відкидається
М-6	4	19	14.2857	10.7371	0.2362	3.31231	2	15	0.534	39.43	$H_0$ не відкидається
М-7	6	26	23.1969	22.0358	0.5720	0.58904	4	20	4.855	8.559	$H_0$ не відкидається
М-8	5	23	25.6715	23.6713	0.3329	1.66722	3	18	1.198	14.20	$H_0$ не відкидається

Визначивши координати цієї точки отримуються умови переходу від одного відрізка ВАХ до другого. Система рівнянь для точки перетину має вигляд:

$$\begin{cases} I = A_0 + B_0 \cdot U \\ I = A_i + B_i \cdot U \end{cases}$$

Вирішивши цю систему відносно  $U$  та  $I$  отримані координати точки переходу від одного відрізка ВАХ до іншого:

$$U_n = \frac{A_i - A_0}{B_i - B_0}, \quad I_n = A_0 + B_0 \times \frac{A_i - A_0}{B_i - B_0}.$$

Таким чином отримується модель ВАХ ОПН в зоні струмів витоку:

$$\begin{cases} U \leq \frac{A_i - A_0}{B_i - B_0} \rightarrow I = A_0 + B_0 \cdot U; \\ U_i \geq \frac{A_i - A_0}{B_i - B_0} \rightarrow I = A_i + B_i \cdot U. \end{cases} \quad (3)$$

де  $i$  – номер групи варисторів.

Отримані умови роботи варисторів (3) дають декілька завищені значення струмів, однак максимальна похибка становить не більше 10 відсотків, що є достатнім для виконання інженерних розрахунків режимів роботи ОПН в зоні струмів витоку, що відповідає найбільшій робочій напрузі мережі.

Значення коефіцієнтів  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $A_i$ ,  $B_i$  для кожної з груп варисторів наведені в табл. 3.

Таблиця 3. Коефіцієнти апроксимуючих прямих для груп варисторів.

Номер групи	Коефіцієнти апроксимуючих прямих			
	$A_0$	$B_0$	$A_i$	$B_i$
ММ-1	-0.001394125	0.5419601421	-52.59383000	62.8399301854
ММ-2	-0.001394125	0.5419601421	-71.62424478	92.5351288056
ММ-3	-0.001394125	0.5419601421	-73.14792763	90.2913858753
ММ-4	-0.001394125	0.5419601421	-77.34155454	110.1748384640
ММ-5	-0.001394125	0.5419601421	-81.42292342	114.4777201490
ММ-6	-0.001394125	0.5419601421	-90.4633579	101.5741038208
ММ-7	-0.001394125	0.5419601421	-116.1008485	128.3104371101

Моделі апроксимації ВАХ отримані в результаті дисперсійного аналізу експериментальних даних покладені в основу методу визначення ВАХ ОПН в зоні струмів витоку. Ідея методу полягає в розділенні ВАХ ОПН на відрізки та заміна їх на цих відрізках кривими першого порядку (прямими). Такий метод представлення ВАХ ОПН дозволяє спростити визначення їх характеристик під час вибору на етапі проектування.

Прогнозування ВАХ ОПН в зоні струмів витоку є доцільним для вирішення задачі їх коректного вибору в мережах з наявністю вищих гармонійних складових на етапі проектування систем захисту від перенапруг. Складність задачі прогнозування ВАХ ОПН полягає у тому, що для побудови адекватної моделі прогнозу необхідно враховувати не тільки вплив напруги та тип ОПН, але й складний, нелінійний характер зміни параметрів варисторів, який залежить від їх складу та технології виробництва. Завдання значно ускладнює та обставина, що вихідна інформація про параметри варисторів є не повною і в ряді випадках умовно – визначеною. Тому для вирішення завдання прогнозу доцільно використовувати математичний апарат, який би враховував нелінійний характер залежностей параметрів варисторів, наприклад нейронні мережі. Загальний вигляд створеної нейронної мережі представлений на рис. 16.

У створеній мережі 14 входів, 9 входів за випробувальною напругою та 7 входів по типу варисторів. Вибрано дві функції приналежності для кожної вхідної змінної. В якості функцій приналежності для кожного з термів обрана трапецеїдальна функція, математичний вираз якої має вигляд:

$$f_T(x, a, b, c, d) = \left. \begin{array}{ll} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{array} \right\}$$

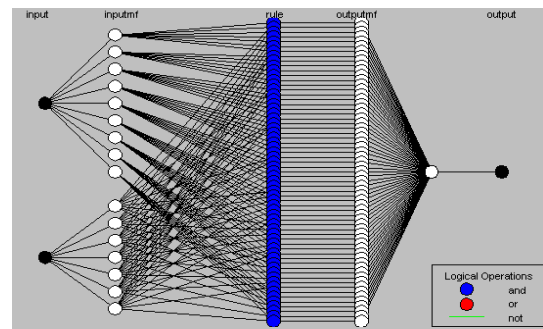


Рисунок 14 – Топологія нейронної мережі для прогнозування струму через ОПН в зоні струмів витоку ВАХ.

В результаті проведених розрахунків поведінку, мережі можна вважати цілком адекватною, середньоквадратичне похибка прогнозу склала 0,00292 мА, що, враховуючи обмежений обсяг навчальної вибірки, є прийнятним

Розрахунки теплових режимів ОПН виконувалися на основі методики наведеної в розділі 2 цієї роботи. При дослідженнях температурних режимів ОПН мають бути враховані електрофізичні властивості варисторів. Як було показано вище при роботі ОПН в зоні струмів витоку ВАХ необхідно враховувати ту обставину, що при підвищенні напруги апарат переходить зі стану діелектрика, коли переважає ємнісна складова струму в привідний стан. Це дозволяє уточнити температурний режим ОПН в процесі роботи.

При напрузі нижчої або рівної  $0,65U_{\text{нр}}$  параметри моделі температурного режиму ОПН (2) за низької якості електричної енергії в мережі коефіцієнти рівняння (2) мають вигляд:

$$T = \begin{vmatrix} T_1 \\ T^* \end{vmatrix}; U = \begin{vmatrix} \sum_{i=0}^{\infty} u_i(t) i_i(t) \cdot \text{tg} \delta \\ T_{\alpha} \end{vmatrix}; B = \begin{vmatrix} 1 & \beta \frac{\chi}{3 + \chi} \\ mc & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix};$$

$$A = \begin{vmatrix} \beta \left( \frac{1}{3 + \chi} \right) & 4\beta \left( 1 - \frac{1}{3 + \chi} \right) \\ D_i \left( \frac{4}{h^2} - \frac{1}{hR^*} \right) - \frac{D_i}{3\chi} \left( \frac{4}{h^2} + \frac{1}{hR^*} \right) & D_i \left( \frac{4}{h^2} + \frac{1}{hR^*} \right) \frac{4}{3\chi} - D_i \frac{8}{h^2} \end{vmatrix},$$

$$\text{де } \chi = \frac{2\pi R_1 h_d \lambda^*}{mch}; \quad D_i = \frac{\lambda_i}{\rho_i c_i}.$$

При напрузі вищій за  $0,65U_{\text{нр}}$  параметри моделі температурного режиму ОПН при низької якості електричної енергії в мережі коефіцієнти рівняння (2) мають вигляд:

$$T = \begin{vmatrix} T_1 \\ T^* \end{vmatrix}; U = \begin{vmatrix} \sum_{i=0}^{\infty} u_i(t) i_i(t) \\ T_{\alpha} \end{vmatrix}; B = \begin{vmatrix} 1 & \beta \frac{\chi}{3 + \chi} \\ mc & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix};$$

$$A = \begin{vmatrix} \beta \left( \frac{1}{3 + \chi} \right) & 4\beta \left( 1 - \frac{1}{3 + \chi} \right) \\ D_i \left( \frac{4}{h^2} - \frac{1}{hR^*} \right) - \frac{D_i}{3\chi} \left( \frac{4}{h^2} + \frac{1}{hR^*} \right) & D_i \left( \frac{4}{h^2} + \frac{1}{hR^*} \right) \frac{4}{3\chi} - D_i \frac{8}{h^2} \end{vmatrix},$$

$$\text{де } \chi = \frac{2\pi R_1 h_d \lambda^*}{mch}; \quad D_i = \frac{\lambda_i}{\rho_i c_i}.$$

Виконання розрахунків згідно наведених співвідношень дозволить на етапі вибору ОПН визначити пропускну здатність, що суттєво підвищить надійність електропостачання споживачів електричної енергії.

Проведені дослідження стаціонарних теплових режимів обмежувачів перенапруг для випадків синусоїдальної напруги, вплив гармонійних коливань в мережі синусоїдальної напруги, виникнення часткових дугових розрядів в тілі ОПН та вплив розмірів цих розрядів, а також дослідження впливу теплових властивостей матеріалів, а саме: теплоємність та теплопровідність матеріалів, з яких виконана оболонка, на розподіл температури всередині та на поверхні апарату. Зазначені розрахунки виконані за допомогою програмного пакету ANSYS 14.0. Температурне поле  $T(r, t)$  визначається чисельно шляхом розв'язання диференціального рівняння статичної теплопровідності  $\nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) + q_v(r, t) = 0$ , яке визначає зв'язок між просторовими та часовими змінами температури у гетерогенному ізотропному тілі.

Набагато більший вплив на спроможність ОПН підтримувати тепловий баланс оказує температура навколишнього середовища. У роботі виконані розрахунки нагріву ОПН при різних температурах навколишнього середовища. Результати розрахунків наведені на рис 15 та рис. 16 та ілюструють вплив температури навколишнього середовища на спроможність ОПН підтримувати тепловий баланс.

Використання виробниками різних ізоляційних матеріалів призводить до необхідності аналізу розподілу температури в тілі ОПН при зміні таких параметрів, як теплоємність та теплопровідність.

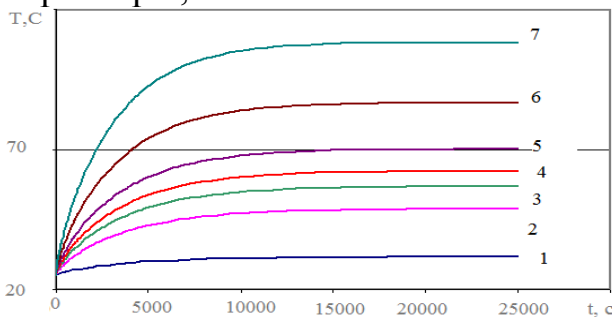


Рисунок 15 – Результати розрахунків температури ОПН при впливі першої третьої п'ятої та сьомої гармонік напруги при температурі оточуючого середовища 25 С.

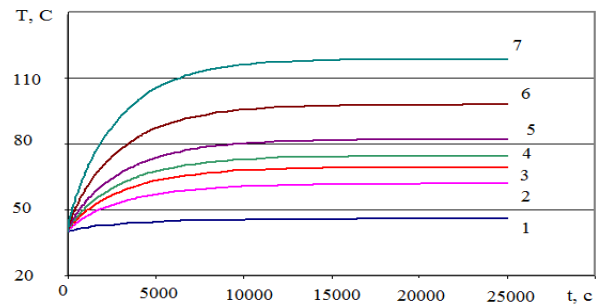


Рисунок 16 – Результати розрахунків температури ОПН при впливі першої третьої п'ятої та сьомої гармонік напруги при температурі оточуючого середовища 40 С.

Розрахунки які проводилися для різноманітних значень відсоткового складу гармонійних коливань напруги, виявили, що характер кривих є незмінним. Результати наведено на рис.17 рис 18.

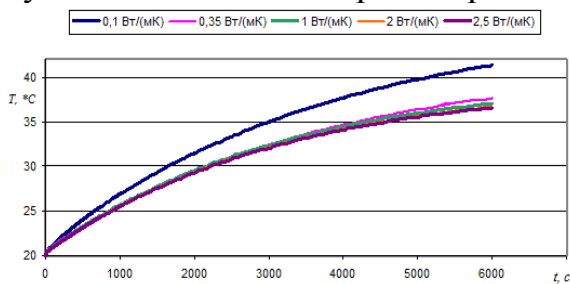


Рисунок 17 – Процес нагрівання ОПН під дією синусоїдальної напруги і вмістом третьої та п'ятої гармонік у розмірі 15%, в залежності від коефіцієнта теплопровідності ізоляційної оболонки.

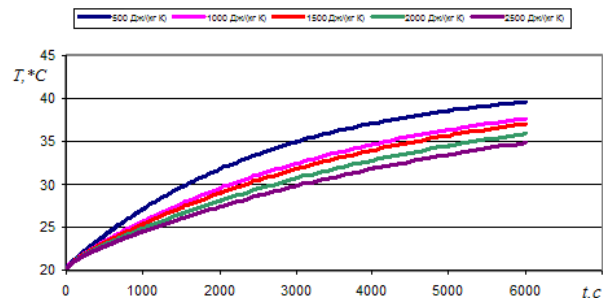


Рисунок 18 – Процес нагрівання ОПН під дією синусоїдальної напруги і вмістом третьої та п'ятої гармонік у розмірі 30%, в залежності від теплоємності оболонки

Аналізуючи отримані дані, визначено, що теплопровідність оболонки повинна бути не менш ніж  $0,35 \text{ Вт/(мК)}$ . Подальше збільшення цього показника не дає суттєвих змін у максимальній температурі. Використання такої властивості матеріалу, як теплоємність, для зменшення температури ОПН, не є раціональним. Але його можна використовувати у парі з іншими параметрами, для вибору кращого варіанту конструктивного виконання ОПН.

**В четвертому розділі** виконано експериментальні дослідження високочастотних коливань, що виникають в підвісних скляних ізоляторах.

Підвісні ізолятори можуть бути джерелом високочастотних коливань на лінії електропередачі, які сприяють аварійним відключенням. Для підтвердження цього виконані експериментальні дослідження. При проведенні експериментів, використані 2 ізолятора типу ПС 120Б з гірлянди, яка мала перекриття з ділянки ПЛ-330 (з них ізолятор з умовним номером 1 є першим в гірлянді від траверси, і 2-й - наступний за ним в гірлянді). Для 1-го ізолятора характерним є наявність стійкого поверхневого забруднення кольору іржі, яке пояснюється стіканням іржі з поверхонь траверси. Поверхня 2-го ізолятора є порівняно чистою. В лабораторії НТУ «ХП» проведено експерименти для визначення струму, що протікає через ізолятор при прикладенні до його стрижня високого змінної напруги. У коло заземлювального провідника, підключеного до шапки, включався резистор опором  $110 \text{ Ом}$ , з виходу якого напруга надходила на вхід осцилографа. На рис. 19 показана осцилограма електричного струму 2-го ізолятора при напрузі  $28 \text{ кВ}$ . Осцилограма демонструє близьку до синусоїдальної форму емнісного струму, що протікає через ізолятор. На рис. 20 показана осцилограма того ж струму при напрузі  $30 \text{ кВ}$  (масштаби по осях є тими же).

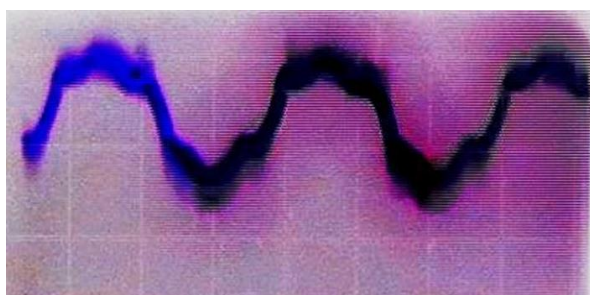


Рисунок 19. – Осцилограма електричного струму при напрузі на ізоляторі  $28 \text{ кВ}$

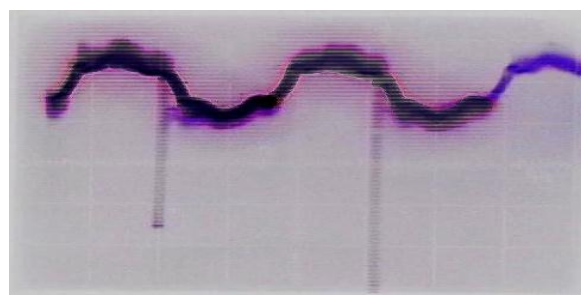


Рисунок 20. – Осцилограма електричного струму при напрузі на ізоляторі  $30 \text{ кВ}$

Характерним у даній осцилограмі є поява високочастотних коливань струму, амплітуда яких в 5 і більше разів перевищує амплітуду сигналу частоти  $50 \text{ Гц}$ . Дані коливання є наслідком наступних явищ: пробоем по товщі або поверхневим перекриттям цементного закладення стрижня, виникненням ковзного розряду по поверхні.

Візуальні спостереження в темряві показують, що на тарілчастому ізоляторі виникають дві іскри, які служать джерелом високочастотних коливань. Перша з них, іскра між краєм шапки і стеклодеталей, є джерелом мелкомасштабної структури - високочастотних коливань (рис. 20) тому, що обумовлена ковзаючим розрядом на поверхні стеклодеталі. Друга, іскра між пестиком і складдеталлю, є джерелом великомасштабного викиду струму (рис. 20). Така відмінність амплітуд

першої і другої іскри обумовлено розподілом електричного поля по конструкції ізолятора (рис. 21, 22).

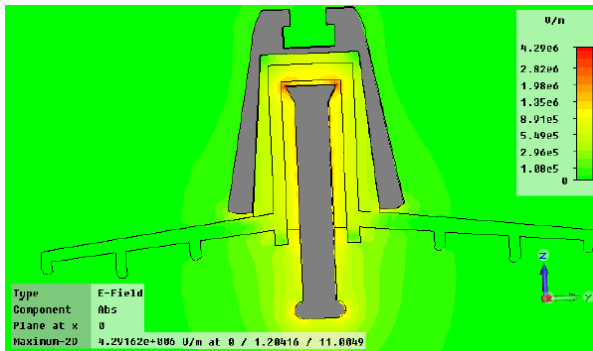


Рисунок 21 - Розподіл напруженості електричного поля у ізоляторі ПС 120Б (CST EM Studio)

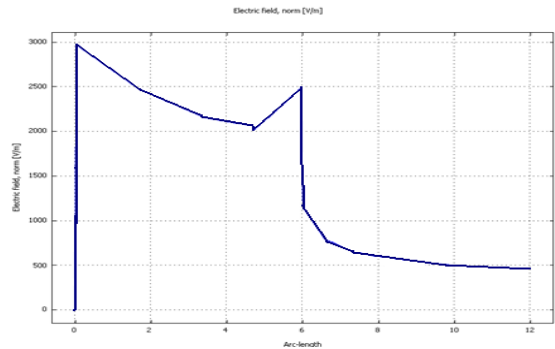


Рисунок 22 - Розподіл напруженості електричного поля в середньому перерізі тарілчастого ізолятора ПС 120Б при прикладеній напрузі 30 кВ.

Диференціальне рівняння, що описує розподіл електричного потенціалу в сталому синусоїдальному режимі, має наступний вигляд

$$\nabla(\epsilon_0 \epsilon_r \nabla \varphi) = \rho_v, \quad (4)$$

де  $\epsilon_r$  - відносна діелектрична проникність середовища,  $\epsilon_0$  - діелектрична постійна, рівна  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $\rho_v$  - об'ємна щільність заряду.

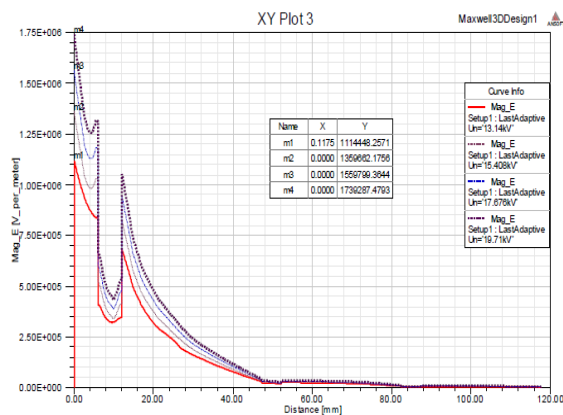


Рисунок 23 - Розподіл напруженості електричного поля  $E$  і максимальні значення під поверхнею ізолюючого тіла в напрямку від цементного закладення до краю ізолятора ПС 120Б при зміні значень прикладеної напруги

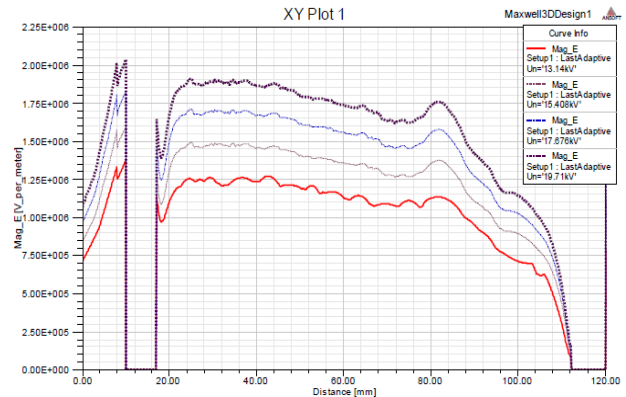


Рисунок 24 - Розподіл напруженості електричного поля  $E$  по довжині пестика в напрямку від конічного потовщення до краю у формі еліпсоїда обертання для ізолятора ПС 120Б при зміні значень прикладеної напруги

Чисельні розрахунки напруженості електричного поля в об'ємі ізолятора на основі (5) при відповідних граничних умовах та доданій напрузі 30 кВ наведено на рис. 23 та рис. 24. Визначено, що при появі падіння напруги на ізоляторі на рівні 30 кВ в ньому виникають поверхневі розряди, які можуть ініціювати перекриття гірлянди в цілому.

В даному розділі проведено аналіз рівнів вищих гармонік на підстанціях, до яких підключені підприємства, що належать до таких галузей промисловості, як металургія, машинобудування, магістральний електротранспорт. Коефіцієнти, що характеризують вищі гармоніки в протоколах вимірів.

Таблиця 4 – Узагальнений результат вимірювань коефіцієнта  $n$ -ї гармонічної складової на ТП 220/110 кВ металургійного заводу

Металургійний завод						
№	ТП 220/110 кВ Точка вимірювання	Вимір. напр.,кВ	Кіл-ть вимір.	Номер гармоніки	Вихід за НДЗ	Вихід за ГДЗ
1.	ВЛ-110кВ ГПП-1	110	28801	6	91	19
2.	ВЛ-110кВ ГПП-2	110	28800	6	100	17
3.	ВЛ-110кВ ГПП-3	110	28800	6	16	9
4.	ВЛ-110кВ ГПП-4	110	28801	6	103	28
5.	ВЛ-110кВ ГПП-5	110	28801	6	99	17
6.	ВЛ-110кВ ГПП-6	110	28801	6	104	16

Таблиця 5 – Узагальнений результат вимірювань коефіцієнта  $n$ -ї гармонічної складової на ТП 330/110 кВ машинобудівного заводу

Машинобудівний завод						
№	ТП 330/110 кВ Точка вимірювання	Вимір. напр.,к В	Кіл-ть вимір.	Номер гармоні ки	Вихід за НДЗ	Вихід за ГДЗ
1.	ВЛ- 110кВ ГПП-1	110	28800	3	2	0
				4	16	2
				6	1	0
2.	ВЛ- 110кВ ГПП-2	110	28800	3	1	0
				4	14	1

Аналіз таблиць 4 – 6 дозволяє зробити висновок, що для всіх категорій споживачів (металургія, машинобудування і магістральний електротранспорт) зафіксовані порушення допустимих значень коефіцієнта  $n$ -ої гармонійної складової напруги. Для споживачів найгірша ситуація щодо несинусоїдальності напруги виникає в системах електропостачання на кордоні з магістральним електротранспортом, де присутній практично весь спектр вищих гармонік.

Таблиця 6 – Узагальнений результат вимірювань коефіцієнта n-ї гармонічної складової на ТП 330/110 кВ ПЛ-110 кВ Тягова

Магістральний електротранспорт						
	ТП 330/110 кВ Точка вимірювання	Вимір. напр.,кВ	Кіл-ть вимір.	Номер гармоніки	Вихід за НДЗ	Вихід за ГДЗ
	ВЛ-110 кВ Тяговая	110	28799	2	0	100
				3	8	99
				5	0	99
				6	0	99
				7	0	99
				9	145	108
				10	15	84
				11	0	99
				13	0	99
				14	99	0
				15	0	99
				16	99	0
				17	0	99
				19	0	99
				21	0	99
				23	13	0
				24	90	0
				27	93	0
				33	44	0
				39	3	0

**В п'ятому розділі** викладені основні засади використання, експлуатації та методики вибору ОПН для захисту систем електропостачання. Нормативні документи України вимагають використовувати для захисту систем електропостачання виключно ОПН. ОПН призначено для захисту від грозових і комутаційних перенапруг ізоляції електроустаткування електроустановок систем електропостачання напругою 6-750 кВ змінного струму промислової частоти 50 Гц.

Розроблено перелік технічних характеристик необхідних для вибору ОПН, які мають бути отримані від їх виробників: клас напруги ОПН, кВ; максимальну активну потужність, яку ОПН спроможен розсіювати під впливом найбільшої допустимої напруги мережі або ту ж потужність для варисторів (в цьому випадку необхідно знати кількість варисторів які містить ОПН); найбільша тривало допустима робоча напруга ОПН  $U_{нРО}$ , кВ; номінальна напруга обмежувача  $U_{н.ОПН}$ , кВ; клас пропускну здатності ОПН; питома енергоемність ОПН з визначенням, до якої напруги її приведено (номінальної напруги  $U_{н.ОПН}$  чи найбільшої тривало допустимої робочої напруги  $U_{нРО}$ ), а також кількості імпульсів струму «довгого» імпульсу, за яких виконували випробування – один або два імпульси, кДж/кВ; рівні залишкових напруг за комутаційного імпульсу струму 30/60 згідно з МЭК 60099-4; рівні залишкових напруг за грозового імпульсу струму 8/20 згідно з МЭК 60099-4; довжина шляху витоку зовнішньої ізоляції ОПН, см, і ступінь забруднення атмосфери (максимальний допустимий СЗ); кліматичне виконання та діапазон робочих температур навколишнього середовища, °С; максимальна висота

над рівнем моря, на якій можна встановлювати ОПН, м; висота ОПН  $H_{ОПН}$  (м), зовнішній діаметр  $d$  (мм) і висота ізоляційної частини покриття обмежувача  $h$  (м) (за наявності ступенів ОПН з різними розмірами необхідно зазначити висоту ступеня, діаметр покриття та її висоту для кожного ступеня); момент допустимого статичного навантаження  $M_{ст}$ , Н·м, або допустиме статичне навантаження в горизонтальному напрямку, Н; максимальний струм короткого замикання тривалістю 0,2 с  $I_{кз\max}$ , який може витримати ОПН, кА.

Якщо надані виробником дані щодо ОПН є неповними, такі обмежувачі перенапруг доцільно знімати з розгляду і вибрати ОПН інших виробників.

За системними результатами досліджень при виборі ОПН вирішуються наступні завдання:

– ОПН має надійно працювати без руйнування та зміни параметрів під час безперервної дії тривалих робочих напруг, короточасних підвищень напруг в робочих режимах та впливі гармонійних коливань напруги;

– ОПН має обмежувати комутаційні та грозові перенапруги до значень, за яких буде забезпечено надійну роботу ізоляції захищеного електрообладнання протягом всього терміну служби ОПН.

Для вирішення цих завдань необхідно виконати: вибір найбільшої робочої напруги ОПН  $U_{нро}$ ; розрахунки активної потужності, що виділяється в ОПН за дії гармонійних коливань напруги мережі в місці його встановлення; уточнення вибору  $U_{нро}$ , якщо в мережі можливі тривалі підвищення напруги понад нормоване значення найбільшої робочої напруги мережі  $U_{нрм}$ ; вибір номінального розрядного струму  $I_{н}$ ; вибір питомої енергоємності  $W_{пит.ОПН}$  і струму пропускної здатності ОПН  $I_{2000}$ ; вибір залишкових напруг ОПН для захисту від комутаційних  $U_{зал.к}$  та грозових  $U_{зал.г}$  перенапруг; вибір ОПН за умовами забезпечення вибухобезпечності; вибір ОПН залежно від умов експлуатації; вибір місця встановлення ОПН.

Для визначення робочої напруги ОПН у разі наявності в мережі гармонійних коливань напруги враховується їх вплив за системою нерівностей:

$$U_{нро} \geq \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(U_k^2 \omega_k)}{\omega_1}, \text{ або } U_{нро} \geq U_k \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} N_{k\%} k}.$$

Наведені вирази для вибору найбільшої робочої напруги ОПН дозволяють запобігти його руйнуванню при впливі визначеного складу гармонійних коливань напруги мережі. Отримане значення напруги перевіряється на спроможність обраного ОПН розсіювати активну потужність. Розрахунки активної потужності, що розсіюється в ОПН при впливі гармонійних коливань напруги проводяться за методикою викладеною в розділі 3 цієї роботи. Для цього використані наступні нерівності:

$$P_{кр} \geq C \cdot \text{tg} \delta \sum_{k=0}^{\infty} (U_k^2 \omega_k),$$

або

$$P_{кр} \geq \frac{\pi r^2 \varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta}{h} \times \sum_{k=0}^{\infty} (U_k^2 \omega_k)$$

Критичне значення активної потужності  $P_{кр}$  визначається як сума активних потужностей, які можуть розсіяти варистори, що складають ОПН. Якщо отримане розрахункове значення буде більше за критичне необхідно вибрати ОПН з іншими характеристиками варисторів. Наприклад, вибрати ОПН з більшим радіусом варисторів та тою ж найбільшою робочою напругою. Якщо даних отриманих від виробника недостатньо для використання наведених виразів доцільно скористатися методом розрахунку активної потужності, що розсіює ОПН, на основі використання апроксимації ВАХ в зоні струмів витoku наведеною у розділі 3 цієї роботи.

З рис. 25 витікає, що навіть при невеликому вмісті гармонійних коливань в напрузі системи електропостачання слід обирати ОПН з підвищеною найбільшою робочою напругою, для забезпечення його спроможності підтримувати тепловий баланс.

Довжину шляху витoku зовнішньої фарфорової ізоляції ОПН визначають за формулою

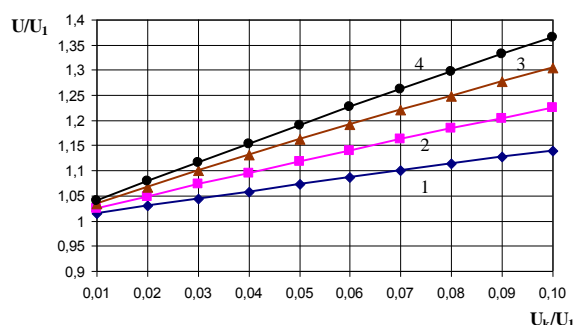


Рисунок 25 - Найбільша допустима напруга ОПН при наявності вищих гармонік напруги

$$l_{опн} = \lambda_e \cdot U_{нрм} \cdot K_i.$$

та приймають за даними заводу-виробника відповідно до ступеня забруднення атмосфери (СЗ) в місці встановлення ОПН. Провідні виробники ОПН рекомендують знижувати довжину шляху витoku полімерної ізоляції на 25-30% для 1 – 3 СЗ. Проведені розрахунки вологорозрядної напруги для ОПН виробництва ТОВ «Таврида Електрик Україна» (м. Київ) на напругу 6 та 10 кВ, які мають довжину шляху витoku розрахованою за діючими на час затвердження технічних умов. Результати розрахунків дали позитивні результати з точки зору можливості використання вказаних ОПН в районах до 3 по СЗ. Характерні результати наведені на рис 26. На базі отриманих результатів внесено пропозицію по зменшенню рекомендованих ПУЕ України відстаней по повітрю між струмопровідними та заземленими частинами електроустановок. Відповідність довжини шляху витoku  $l_{опн}$  СЗ має бути експериментально підтверджена випробуваннями виробника ОПН.

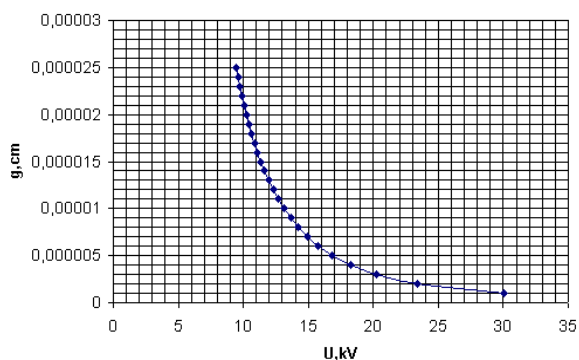


Рисунок 26 - Влагоразрядні напруги ОПН 10 кВ

Проведено аналіз та систематизацію вимог до монтажу ОПН, які сприяють спрощенню та впорядкуванню проведення подібних робіт персоналом систем електропостачання. Перелічені особливості монтажу ОПН різних номінальних напруг. Визначені та систематизовані вимоги до експлуатації ОПН різних класів напруги при їх використанні для захисту систем електропостачання.

Проаналізовано вимоги по експлуатаційним випробуванням ОПН різних класів напруги при їх використанні для захисту систем електропостачання. Визначено, що вимірювання струму витoku за допомогою амперметра призводить до суттєвих похибок. Це пов'язано з складом струму витoku, який складається з декількох струмів, кожний з яких характеризує окремі елементи конструкції ОПН та не може бути відокремлений від вимірюваного повного струму провідності. Струм витoku ОПН носить ємнісний характер. Характерні осцилограми струмів наведені на рис 27 та рис. 28 та підтверджують тезу про неможливість використання струму витoku ОПН в якості діагностичного параметру при оцінюванні стану ОПН під час експлуатації.



Рисунок 27 - Характерна осцилограма струму через ОПН 6 кВ отримана о 16 годині.

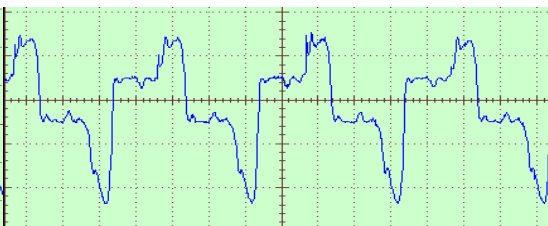


Рисунок 28 - Характерна осцилограма струму через ОПН 10 кВ отримана у 11 годин ранку.

Якщо експлуатуюча організація проводить подібні випробування вона має забезпечити використання джерела напруги з параметрами якості електричної енергії, які відповідають вимогам ГОСТ 13109-97.

Альтернативою вимірюванню струму провідності мають стати інфрачервоні засоби діагностики обладнання електричних мереж такі, як пірометри та тепловізори. За допомогою таких пристроїв може бути виміряна температура або отримана теплограма ОПН. Для оцінювання можливості використання тепловізорів доцільно визначити на скільки буде змінюватися температура ОПН при існуванні локальних порушень або дії гармонійних коливань напруги. Результати розрахунку стаціонарного теплового поля конструкції ОПН-35 при дуговому пробі в тілі ізоляції наведено на рис 29.

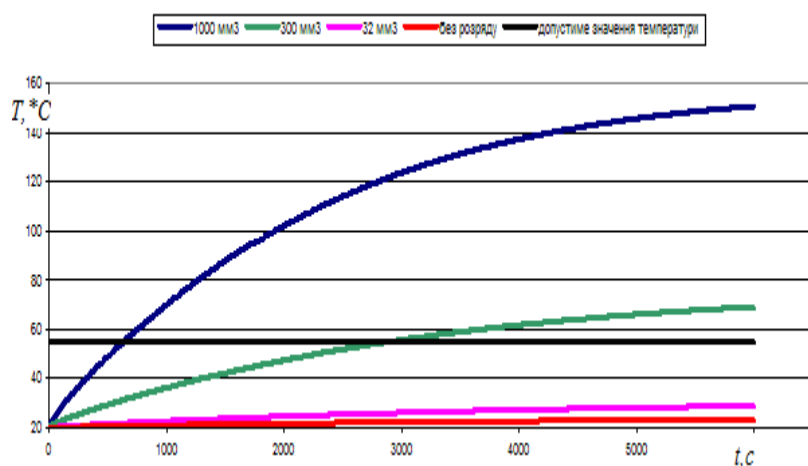


Рисунок 29 – Залежність максимальної температури варисторів при дуговому розряді різних розмірів: 1 – 1000мм<sup>3</sup>, 1 – 300мм<sup>3</sup>, 1 – 32мм<sup>3</sup>, 1 – 0мм<sup>3</sup>.

Проведені розрахунки дозволяють зробити висновок, що для діагностування ОПН можуть бути використані тепловізори. Діапазон зміни температури при дефектах типу часткових дуг всередині варисторної колонки ОПН є достатнім для розпізнавання тепловізором. Таким чином інфрачервоні методи діагностики стану ОПН є інформативними з точки зору виявлення дефектів.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі поставлена та вирішена науково-технічна проблема визначення пливущих вищих гармонік напруги на вибір та експлуатацію обмежувачів перенапруг для захисту електротехнічних комплексів та систем, що має важливе значення для надійності функціонування систем електропостачання. В рамках даного напрямку отримані наступні результати:

1. Виконано аналіз існуючих вимог до вибору та експлуатації перенапруг нелінійних (ОПН) в системах електропостачання різних класів напруги. Виявлено, що в них не враховується вплив вищих гармонік напруги на вибір обмежувачів перенапруги ;
2. Проведено експериментальні дослідження електрофізичних характеристик варисторів та ОПН в зібраному стані провідних світових виробників при різних частотах прикладеної напруги. Результати досліджень показали практичну відсутність впливу частоти випробувальної напруги на електрофізичні параметри ОПН, що дозволяє використовувати в розрахунках впливу гармонійних коливань напруги фіксовані їх значення;
3. Удосконалено математичну модель для вибору енергетичних характеристик ОПН при низькій якості електричної енергії в системі електропостачання на базі схем заміщення ОПН в зоні струмів витоку їх вольт-амперної характеристики (ВАХ);
4. Виконано експериментальні дослідження вольт амперних характеристик варисторів та ОПН в зібраному стані в зоні струмів витоку. Експериментально визначена напруга переходу ОПН в стан провідника, що дозволило уточнити математичесую модель для розрахунку енергії виділеної в ньому;
5. Запропановано метод визначення втрат активної потужності в ОПН на базі отриманих ВАХ в зоні струмів витоку, та проведено аналіз впливу несинусоїдальності напруги на величину енергії, що діє на ОПН, а також

визначено вплив на нормальну роботу ОПН перенапруг грозового і комутаційного імпульсів струму та підвищеної напруги промислової частоти;

6. Запропоновано методи визначення ВАХ ОПН в зоні струмі витоку на основі отриманих експериментальних ВАХ ОПН, які базуються на нейронних мережах та апроксимацією ВАХ двома кривими першого порядку, що дає можливість на етапі проектування провести розрахунки енергії, яка виділяється в ОПН при впливі вищих гармонік напруги;

7. Удосконалено математичну модель теплових режимів ОПН при низькій якості електричної енергії в системі електропостачання та виконані дослідження впливу різних чинників на теплову стабільність ОПН. Проведені дослідження дозволяють виробникам ОПН на етапі розробки конструкції врахувати вплив властивостей матеріалів, що використані у конструкції ОПН на його здатність підтримувати тепловий баланс. Використання поліпшеної математичної моделі дозволяє оцінити тепловий режим ОПН при дії перенапруг будь-якої форми;

8. Експериментально досліджено наявність порушень якості електричної енергії в системах електропостачання різних видів промисловості України. Проведені дослідження виявили наявність вищих гармонік напруги у всіх розглянутих системах електропостачання. Найбільша кількість порушень якості наблюдалася в мережах до котрим приєднані тягові підстанції. Отримані результати вказують на необхідність врахування вміста гармонік напруги при виборі ОПН, що суттєво підвищить надійність захисту систем електропостачання;

9. Удосконалено методи вибору ОПН в системах електропостачання з низькою якістю електричної енергії. Розроблено методику вибору ОПН з урахуванням складу вищих гармонік напруги в місці його приєднання, що дозволить скоротити число виходів його з ладу через порушення теплового балансу при впливі найбільшої допустимої напруги;

10. Розроблено та впроваджено у нормативних документах України основні засади застосування та експлуатації ОПН. Визначено, що проводити експлуатаційні випробування установками, що не забезпечують якості електричної енергії не доцільно. Обґрунтовано використання тепловізорів і пірометрів для експлуатаційного контролю стану ОПН. Такий вивод зроблений на підставі розрахунків температурних режимів роботи ОПН. Розрахунки показали, що температура на поверхні ізоляції ОПН навіть при малих обсягах часткових розрядів всередині варістрів змінюється, що легко може бути виявлено тепловізором або пірометром;

11. Результати дисертаційної роботи використані при розробці наступних нормативних документів: Правила Улаштування електроустановок, Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 6-35 кВ (Настанова щодо вибору та застосування у розподільчих установках, СОУ-Н МЕВ 40.1-00100227-67:2012), Засоби захисту від перенапруг. Інструкція.

12. Результати дисертаційної роботи використані НЕК «Укренерго», АК «Харківобленерго» при виборі типу ОПН та в навчальному процесі НТУ «ХПІ» для студентів електротехнічних спеціальностей.

### Список опублікованих праць за темою дисертації:

1. Качество электрической энергии. Экономико-правовая база Качества электрической энергии в Украине и Евросоюзе [монографія] / [О. Г. Гриб, Е. И. Сокол, С.Ю. Шевченко и др]; под редакцией О.Г. Гриба. - Харьков: Видавництво ПП «Граф-Ікс», 2014.-300 с. *Здобувачем здійснено узагальнення правової бази якості електричної енергії в Україні та Євросоюзі.*
2. Качество электрической энергии. Контроль качества электрической энергии [монографія] / [О. Г. Гриб, Е. И. Сокол, С.Ю. Шевченко и др]; под редакцией О.Г. Гриба. - Харьков: Видавництво ПП «Граф-Ікс», 2014.-244 с. *Здобувачем здійснено обґрунтування необхідності контролю якості електричної енергії в електричних мережах усіх номінальних напруг.*
3. Качество электрической энергии Методы и средства повышения качества электрической энергии. [монографія] / [О. Г. Гриб, Е. И. Сокол, С.Ю. Шевченко и др]; под редакцией О.Г. Гриба. - Харьков: Видавництво ПП «Граф-Ікс», 2014. - 292 с. *Здобувачем здійснено узагальнення методів та засобів підвищення якості електричної енергії в Україні та Євросоюзі.*
4. Обмежувачі перенапруг нелінійні : застосування, монтаж та вибір. [монографія] / [С.Ю. Шевченко, П.В. Петров, Г.М. Катренко, О.М. та інш.] под редакцією С.Ю. Шевченко. - Харків: Видавництво «Форт» 2015. - 286 с. *Здобувачем здійснено узагальнення методик вибору ОПН, наведені приклади розрахунків параметрів ОПН для забезпечення його нормальної роботи, виконана обробка експериментальних досліджень ізоляції ОПН, розроблені основні засади вибору, застосування, монтажу та експлуатації ОПН, виконано загальне редагування монографії.*
5. Шевченко С.Ю. Оцінка можливості використання даних державних метеостанцій для контролю стану об'єктів електричних мереж / С.Ю. Шевченко, В.В. Волохін // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – №21. – С. 143–147. *Здобувачем проведено аналіз та оцінку роботи державних метеостанцій, розглянута можливість використання інформації з метеостанцій для контролю стану об'єктів електричних мереж.*
6. Шевченко С.Ю. Моделювання розподілу електромагнітних полів у відкритому біконічному резонаторі / С.Ю. Шевченко, В.В. Волохін // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ: Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – 2008. – № 20. – С. 65–69. *Здобувачем удосконалено математичну модель розподілу електромагнітних полів біконічного резонатора, що дозволило зробити його торці відкритими.*
7. Шевченко С.Ю. Дослідження хвильових процесів у відкритому біконічному резонаторі в умовах виникнення ожеледі / С.Ю. Шевченко, В.В. Волохін // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ: Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – 2009. – № 22. – С. 86–91. *Здобувачем отримані залежності потужності коливань електромагнітного поля резонатора від метеофакторів, котрі супроводжують появу ожеледі та проведена обробка результатів.*

8. Шевченко С.Ю. Влияние электромагнитных полей энергетического оборудования на окружающую среду. / С.Ю. Шевченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». - 2010. - № 16. - С. 153-156.
9. Шевченко С.Ю. Высокочастотные колебания возникающие на изоляции воздушных линий электропередачи. / С.Ю. Шевченко, А.И. Ганус // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». - 2010. - № 36. - С 127-130. *Здобувачем здійснено аналіз можливостей виникнення коливань високої частоти на повітряних лініях електропередавання.*
10. Шевченко С.Ю. Анализ методов расчёта электрических полей установок высоких напряжений / С.Ю. Шевченко, А.А. Окунь // Електротехніка і електромеханіка. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2010. – № 4. – С. 59–62. *Здобувачем здійснено узагальнення загальнозживаних чисельних методів в контексті розрахунків електричних полів електроенергетичних об'єктів.*
11. Шевченко С.Ю. Моделирование электрического поля стеклянного изолятора ВЛ 110 кВ / С.Ю. Шевченко, А.А. Окунь // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – № 3. – С. 136–144. *Здобувачем виконано аналіз розрахунків напруженості електричного поля в об'ємі сухого чистого ізолятора при зміні прикладеної напруги.*
12. Шевченко С.Ю. Анализ программных средств расчета электрических полей установок высоких напряжений / С.Ю. Шевченко, В.В. Волохин, А.А. Окунь // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – № 49. – С. 190–194. ISSN 2079-3944. *Здобувачем подано характеристику програмних засобів на основі чисельних методів.*
13. Шевченко С.Ю. Исследование причин электрического перекрытия поддерживающих изолирующих подвесок средней фазы воздушной линии электропередачи. / В.О. Бржезицький , А.Д. Подольцев , Е.А. Троценко, А.А. Щерба, С.Ю. Шевченко // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – Київ: НТУУ «КПІ». – 2011. – №6 – С 36-41. *Здобувачем виконані експериментальні дослідження струму витоку по ізолятору, який знаходився у гірлянді лінії електропередавання на протязі більш ніж 30 років.*
14. Шевченко С.Ю. Краткосрочное прогнозирование электропотребления промышленных предприятий / С.Ю. Шевченко, О.І. Ганус, Н.А. Савченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – № 55. – С. 125-127. *Здобувачем визначені основні засади використання нейронних мереж для прогнозування навантажень промислових підприємств.*
15. Шевченко С.Ю. Мережа відомчих атоматизованих метеопостів як основа підвищення ефективності боротьби з ожеледнопаморозевими утвореннями / С.Ю. Шевченко, В.В. Волохин, О.І. Ганус // Вісник Чернігівського Державного Технологічного Університету. Серія – технічні науки. – Чернігів: ЧДТУ – 2011. –

№ 1(47). – С. 160-163. *Здобувачем доведена необхідність використання автоматизованих метеопостів для визначення атмосферних явищ на об'єктах електроенергетики.*

16. Шевченко С.Ю. Расчет электрического поля вблизи опоры линии электропередачи высокого напряжения / С.Ю. Шевченко, А.А. Окунь // Энергетика та електрифікація. – Киев: Топлевно-енергетический комплекс Украины. – 2011. – № 9. – С. 54–58. *Здобувачем проведено розрахунки та аналіз результатів розрахунку електричного поля поблизу опори ЛЕП, на основі якого вдосконалена розрахункова модель металевих конструкцій підстанцій та повітряних ЛЕП.*

17. Шевченко С.Ю. Сравнение методик выбора ограничителей перенапряжений нелинейных 6-750 кВ. / В.А. Бржезицкий, С.Ю. Шевченко, Д.С. Крысенко // Міжфакультетський журнал Енергетика: економіка, технології, екологія. Київ: - НТУУ «КПІ». - № 2 (31). - 2012 - С. 96-103. *Здобувачем здійснено аналіз методик вибору ОПН на напругу 6-35 кВ.*

18. Шевченко С.Ю. Определение магнитного поля подстанций высокого напряжения на основе метода конечных элементов / С.Ю. Шевченко, В.В. Волохин, А.А. Окунь // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: УкрДУЗТ, ПП «Технологічний центр». – 2012. – № 2/4(56). – С. 35–39. *Здобувачем запропоновано розрахункову модель підстанції високої напруги для кількісного визначення величин магнітної індукції.*

19. Шевченко С.Ю. Особливості вибору обмежувачів перенапруг в мережах 6 - 35 кВ./ С.Ю. Шевченко, О.М. Довгалюк, О.Є. Піротті // Вісник Чернігівського державного технологічного Університету. Серія: технічні науки. – Чернігів: ЧДТУ. – 2013. – № 2(65). – С 224-230. *Здобувачем виявлені та обґрунтовані основні засади вибору ОПН в мережах 6-35 кВ.*

20. Shevchenko S. A comparison of magnetic fields inside and outside high voltage urban 110 kV power substations with the exposure recommendations of the Ukrainian Regulatory Authorities / S. Shevchenko, O. Okun, L. Korpinen // Radiation Protection Dosimetry. Oxford: – 2013. – Vol. 154. – №. 4. – P 417-429. *Здобувачем здійснено аналіз отриманих розрахунків та розроблені рекомендації, щодо можливості обмеження полів на території підстанцій.*

21. Шевченко С.Ю. Захист кабельних мереж від перенапруг. / С.Ю. Шевченко, О.М. Довгалюк, О.Є. Піротті, Б.Ф. Єрмоленко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. - Харків: ХНТУСГ. - 2013. – Тематичний вип. 141. - С. 13-15. *Здобувачем визначені основні вимоги до захисту кабельних мереж ОПН.*

22. Шевченко С.Ю. Особенности защиты оборудования подстанции от перенапряжений. / С.Ю. Шевченко, О.М. Довгалюк, О.Є. Піротті // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Серія: електротехніка та енергетика. - Донецьк: ДВНЗ. «ДонНТУ». - 2013. - № 1(14). - С. 308 - 312. *Здобувачем продемонстровані основні особливості захисту електричних підстанцій за допомогою ОПН.*

23. Шевченко С.Ю. Дослідження високочастотних складових електромагнітних полів, що виникають на ізоляції повітряних ліній. / С.Ю. Шевченко,

О.М. Довгалюк, О.Е. Піротті, Б.Ф. Єрмоленко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. - Харків: ХНТУСГ. - 2014. – Тематичний вип. 153. - С. 47-50. *Здобувачем визначені джерела виникнення високочастотних складових на повітряних лініях електропередавання.*

24. Шевченко С.Ю. Работа средств защиты от перенапряжения при наличии в электрических сетях высших гармоник. / О.Г. Гриб, С.Ю. Шевченко, Д.А. Гапон, Т.С. Иерусалимова, Р.В. Жданов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – №41(1084) – С. 78-86. *Здобувачем визначено вплив на нормальну роботу засобів захисту від перенапруг якості електричної енергії.*

25. Шевченко С.Ю. Автоматизированная система контроля уровня перенапряжений и качества электрической энергии. / О.Г. Гриб, С.Ю. Шевченко, Н.С. Белов, Д.А. Гапон, Т.С. Иерусалимова // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 56 (1098). – С 45-50. *Здобувачем виконано аналіз якості електричної енергії за видами промисловості.*

26. Шевченко С.Ю., Актуальність урахування впливу показників якості напруги при обліку електричної енергії. / С.Ю.Шевченко, В.В. Волохін, І.М. Дяговченко, Д.М. Макуха Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків. : НТУ «ХПІ». – 2015. – № 20 (1129). – С. 156-165. *(Здобувачем здійснено узагальнення показників якості електричної енергії, які мають вплив на облік електричної енергії.*

27. Шевченко С.Ю., Исследование влияния несинусоидальности напряжения на работу ограничителей перенапряжения нелинейных в сети 110 кВ. / С.Ю. Шевченко, О.Н. Довгалюк, О.Є. Піротті, Б.Ф. Ермоленко // Энергетика и энергоэффективные технологии: межвузовский сборник статей. – Белгород: БГТУ. – 2015. – С. 305-309 – Вып. 3. *Здобувачем виконано аналіз розрахунків енергії, що виділяється в ОПН під час експлуатації за наявності в мережі вищих гармонійних коливань напруги.*

28. Шевченко С.Ю. Особенности тепловых режимов обмежувача перенапруг нелинейного в умовах низької якості електричної енергії. / С.Ю. Шевченко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: УкрДУЗТ, ПП «Технологічний центр». – 2015. – № 4/8(76). – С. 11–16.

29. Шевченко С.Ю. Аналіз режиму роботи обмежувачів перенапруг за наявності впливу несинусоїдальної напруги. / С.Ю. Шевченко // "Технологический аудит и резервы производства". – Харків: УкрДУЗТ, ПП «Технологічний центр». – 2015. – № 4/1(24). – С. 15–19.

30. Шевченко С.Ю. Експериментальні дослідження електричних характеристик ОПН. / С.Ю. Шевченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 19 (1128). – С. 60-67.

31. Шевченко С.Ю. Метод визначення Спроможності Обмежувача перенапруг нелинейного поглинати енергію без втрати теплового балансу. / С.Ю. Шевченко // Електротехніка та електромеханіка. – Харків: 2015. – №4. – С. 69-73.

32. Шевченко С.Ю. Исследование изоляции ограничителей перенапряжений среднего класса напряжений серий ОПН–КР/TEL и ОПН–РТ/TEL. / С.Ю. Шевченко, В.В. Волохин, Б.Ф. Єрмоленко // Электрические сети и системы. – Киев: Топлевно-энергетический комплекс Украины. – 2008. – №2. – С. 18-23. *Здобувачем розроблена методика експериментальних досліджень ОПН та виконана обробка отриманих результатів.*
33. Шевченко С.Ю. Вопросы применения ограничителей перенапряжений напряжением 110 КВ и выше. / С.Ю. Шевченко // Электрические сети и системы. – Киев: Топлевно-энергетический комплекс Украины. – 2009. – №6. – С. 44-47.
34. Координация изоляции и перенапряжения. [Учебное пособие с грифом МОН Украины] / В.И. Гуль, С.Ю Шевченко., В.И. Нижевський, И.В.Хоменко. - Харьков: ООО «ЭДЕНА». - 2009. - с 287. *Здобувачем виконано аналіз методів розрахунку перенапруг.*
35. Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 6-35 кВ. Настанова щодо вибору та застосування у розподільчих установках: СОУ-Н МЕВ 40.1-00100227-67:2012 .- Офіц. вид. - К. : ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України. – 2012. 50 с. - (Нормативний документ Мінпаливенерго України . Інструкція.) *Здобувачем розроблена методика вибору обмежувачів перенапруг.*
36. Шевченко С.Ю. Особливості вибору обмежувачів перенапруги для захисту ізоляції екрану кабеля. / С.Ю. Шевченко, О.М. Довгалюк, О.Є. Піротті, Б.Ф. Єрмоленко // Збірник наукових праць І Міжнародної науково-технічної конференції викладачів, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів». - Донецьк: «ДВНЗ». ДонНТУ. - 2013. - С. 140-141. *Здобувачем розроблено вимоги до вибору ОПН для захисту екрану кабелю із зшитого поліетилену.*
37. Шевченко С.Ю. Застосування обмежувачів перенапруг для захисту кабельних ліній. / С.Ю. Шевченко, О.М. Довгалюк, О.Є. Піротті О.Є. Піротті , Б.Ф. Єрмоленко // Труды II Міжнародної науково-технічної конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2013)» (Вінниця 22-24 жовтня 2013 р.). - Вінниця: ВНТУ. - 2013. - С. 113. *Здобувачем розроблено основні вимоги до місць встановлення ОПН у кабельних мережах.*
38. Шевченко С.Ю. Защита оборудования подстанции от перенапряжений./ О.М. Довгалюк, О.Є. Піротті О.Є. Піротті // Труды XXI міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я". (Харків 23-25 квітня 2013 р.).- Ч.ІІ. - Харків: НТУ «ХПІ». - 2013. - С. 234. *Здобувачем здійснено узагальнення заходів необхідних для надійного захисту обладнання підстанцій від перенапруг.*
39. Правила Улаштування електроустановок. – Харків: Видавництво «Форт» 2015. – 2014. – с 789. (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Правила.) *Здобувачем розроблені вимоги до захисту обладнання та визначені місця встановлення ОПН в електричних мережах.*
40. Шевченко С.Ю. Особливості захисту від перенапруг кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену / С.Ю. Шевченко, О.М. Довгалюк, О.Є. Піротті , Б.Ф. Єрмоленко // Труды Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Енергетика, енергозбереження на початку XXI

століття». (Маріуполь 21-24 листопада 2014 р.) - Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ». - 2014. - С. 53. *Здобувачем здійснено узагальнення особливостей роботи ОПН, які захищають кабелі з ізоляцією із зшитого поліетилену.*

## АНОТАЦІЇ

**Шевченко С.Ю. Вплив вищих гармонік напруги на вибір та експлуатацію обмежувачів перенапруг для захисту систем електропостачання.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 - електротехнічні комплекси та системи. - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків 2015 р.

Дисертація присвячена актуальній науково-технічній проблемі визначення впливу вищих гармонік напруги на вибір та експлуатацію обмежувачів перенапруг для захисту електротехнічних комплексів та систем, що має важливе значення та забезпечує підвищення ефективності та надійності функціонування систем електропостачання. В рамках даного напрямку отримані наступні результати.

Виконано аналіз існуючих вимог до вибору та експлуатації перенапруг нелінійних (ОПН) в системах електропостачання різних класів напруги;

Проведено експериментальні дослідження електрофізичних характеристик варисторів та ОПН в зібраному стані провідних світових виробників при різних частотах прикладеної напруги та вольт амперних характеристик варисторів і ОПН в зібраному стані в зоні струмів витоку.

Удосконалено математичну модель для вибору енергетичних характеристик ОПН при низькій якості електричної енергії в системі електропостачання на базі схем заміщення ОПН в зоні струмів витоку їх вольт-амперної характеристики (ВАХ).

Запропановано метод визначення втрат активної потужності в ОПН на базі отриманих ВАХ в зоні струмів витоку, та проведено аналіз впливу несинусоїдальності напруги на величину енергії, що діє на ОПН, а також визначено вплив на нормальну роботу ОПН перенапруг грозового і комутаційного імпульсів струму та підвищеної напруги промислової частоти.

Розроблено методи визначення ВАХ ОПН в зоні струмі витоку на основі отриманих експериментальних ВАХ ОПН, які базуються на нейронних мережах та апроксимацією ВАХ двома кривими першого порядку.

Удосконалено математичну модель теплових режимів ОПН при низькій якості електричної енергії в системі електропостачання та виконані дослідження впливу різних чинників на теплову стабільність ОПН.

Експериментально досліджено наявність порушень якості електричної енергії в системах електропостачання різних видів промисловості України.

Удосконалено методи вибору ОПН в системах електропостачання різних номінальних напруг з низькою якістю електричної енергії.

Сформульовані основні засади застосування та експлуатації ОПН при впливі вищих гармонік напруги. Обґрунтовано використання тепловізорів та пірометрів для експлуатаційного контролю стану ОПН.

*Ключові слова:* система електропостачання, обмежувач перенапруг нелінійний, якість електричної енергії, вищі гармоніки напруги, математичні моделі теплових процесів, теплова стійкість обмежувача перенапруг, найбільша робоча напруга системи електропостачання, найбільша робоча напруга обмежувача перенапруг, вольт-амперна характеристика, струм витоку.

**Шевченко С.Ю. Влияние высших гармоник напряжения на выбор и эксплуатацию ограничителей перенапряжений для защиты систем электроснабжения.** - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 - электротехнические комплексы и системы. - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». Харьков 2015

Диссертация посвящена актуальной научно-технической проблеме определения влияния высших гармоник напряжения на выбор и эксплуатацию ограничителей перенапряжений для защиты электротехнических комплексов и систем, имеет важное значение и обеспечивает повышение эффективности и надежности функционирования систем электроснабжения. Влияние высших гармоник напряжения на тепловые балансы ограничителей перенапряжения может приводить к их нарушению. В рамках данного направления получены следующие результаты.

Выполнен анализ существующих требований к выбору и эксплуатации перенапряжений нелинейных (ОПН) в системах электроснабжения различных классов напряжения. Выявлено, что в них не учитывается влияние высших гармоник напряжения на выбор ограничителей перенапряжения.

Проведены экспериментальные исследования электрофизических характеристик варисторов и ОПН в собранном состоянии ведущих мировых производителей при различных частотах приложенного напряжения и вольт-амперных характеристик варисторов и ОПН в собранном состоянии в зоне токов утечки. Исследования проводились для большого количества ОПН. Результаты исследований показали практическое отсутствие влияния частоты прикладываемого напряжения на электрофизические параметры ОПН, что позволяет использовать в расчетах влияния гармонических колебаний напряжения фиксированные их значения.

Усовершенствована математическая модель для выбора энергетических характеристик ОПН при низком качестве электроэнергии в системе электроснабжения на базе схем замещения ОПН в зоне токов утечки их вольт-амперной характеристики (ВАХ). Экспериментально определено напряжение перехода ОПН в состояние проводника, что позволило уточнить математическую модель для расчета энергии выделенной в нем.

Предложены метод определения потерь активной мощности в ОПН на базе полученных ВАХ в зоне токов утечки, и проведен анализ влияния несинусоидальности напряжения на величину энергии, действующей на ОПН, а также определено влияние на нормальную работу ОПН перенапряжений

грозового и коммутационного импульсов тока и повышенного напряжения промышленной частоты.

Разработаны методы определения ВАХ ОПН в зоне тока утечки на основе полученных экспериментальных ВАХ ОПН, основанные на нейронных сетях и аппроксимацией ВАХ двумя кривыми первого порядка. Подобный подход существенно упрощает выбор ОПН на этапе проектирование систем защиты от перенапряжений.

Усовершенствована математическая модель тепловых режимов ОПН при низком качестве электроэнергии в системе электроснабжения и выполнены исследования влияния различных факторов на тепловую стабильность ОПН. Проведенные исследования позволяют производителям ОПН на этапе разработки конструкции учесть влияние свойств материалов используемых в конструкции ОПН на его способность поддерживать тепловой баланс. Использование улучшенной математической модели позволяет оценить тепловой режим ОПН при воздействии перенапряжений любой формы.

Экспериментально исследованы наличие нарушений качества электрической энергии в системах электроснабжения различных видов промышленности Украины. Проведенные исследования выявили наличие высших гармоник напряжения во всех рассмотренных системах электроснабжения. Наибольшее количество нарушений качества наблюдается в сетях к которым присоединены тыговые подстанции. Полученные результаты указывают на необходимость учета высших гармоник напряжения при выборе ОПН.

Усовершенствованы методы выбора ОПН в системах электроснабжения различных номинальных напряжений с низким качеством электрической энергии. Разработана методика выбора ОПН с учетом состава высших гармоник напряжения в месте его присоединения, что позволит сократить число выходов его из строя из за нарушения теплового баланса при воздействии наибольшего допустимого напряжения.

Сформулированы основные принципы применения и эксплуатации ОПН при воздействии высших гармоник напряжения. Определено, что проводить эксплуатационные испытания установками не обеспечивающими качества электрической энергии не целесообразно. Обосновано использование тепловизоров и пирометров для эксплуатационного контроля состояния ОПН. Такой взвод сделан на основании расчетов температурных режимов работы ОПН. Расчеты показали, что температура на поверхности изоляции ОПН даже при малых объемах частичных разрядов внутри варистров приводить к изменению температуры на несколько градусов, что легко может быть выявлено тепловизором или пирометром. Результаты полученные в работе стали основой для разработки нормативных документов Украины.

*Ключевые слова:* система электроснабжения, ограничитель перенапряжений нелинейный, качество электрической энергии, высшие гармоники напряжения, математические модели тепловых процессов, тепловая устойчивость ограничителя перенапряжений, наибольшее рабочее напряжение системы электроснабжения, наибольшее рабочее напряжение ограничителя перенапряжений, вольт-амперная характеристика, ток утечки.

**Shevchenko SY Effect of higher harmonics of the voltage on the selection and exploitation of surge arresters for protection electricity supply systems. -**

Manuscript.

The thesis for the degree of doctor of technical sciences, specialty 05.09.03 - Electrotechnical complexes and systems. - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Kharkov 2015.

Dissertation is devoted to actual scientific and technical problem of determining the effect of the higher harmonics of the voltage on the selection and exploitation of surge arresters for protection electricity supply systems is important and enhances the efficiency and reliability of power supply systems. In this area, the following results.

The analysis of existing requirements for the selection and exploitation of surge arresters in electricity supply systems of different voltage classes. Experimental studies of electrophysical characteristics of varistors and surge arresters assembled the world's leading manufacturers in the different frequencies of the applied voltage and current voltage characteristics of varistors and surge arresters in an assembled state in the area of leakage current.

Improved the mathematical model for selecting the energy characteristics of the arrester at a low power quality in the power supply system on the basis of equivalent circuits in the area of the arrester leakage current of the current-voltage characteristics (CVC).

Offered the method for determination of active power losses in the arrester on the basis of the obtained current-voltage characteristics in the area of leakage current and the analysis of the impact of non-sinusoidal voltage to the amount of energy exerted on surge arresters, as well as determined the effect of the normal operation of surge arresters Surge lightning and switching current pulses and high frequency voltage.

Developed the methods for determining the current-voltage characteristics in the area of the arrester leakage current on the basis of the experimental CVC arresters based on neural networks and approximation CVC two curves of the first order.

Improved the mathematical model of thermal modes of surge arresters in low power quality in the power supply system and to study the effect of different factors on the thermal stability of the arrester. Experimentally investigated for poor quality of electricity supply systems of various types of industry of Ukraine; An improved method for selecting surge arresters in power supply systems of different rated voltages with low quality electric energy.

Improved the basic principles for the use and operation of surge arresters under the influence of higher harmonic voltage. Justify the use of thermal imagers and pyrometers for operational monitoring of the arrester.

*Keywords:* power system, non-linear surge arresters, power quality, voltage harmonic squeals, mathematical models of thermal processes, thermal stability surge arrester, the highest operating voltage of the power supply system, the highest operating voltage surge arrester, current-voltage characteristic, the leakage current.

Відповідальний за випуск:  
д. т. н., професор кафедри автоматизація енергосистем Г. А. Сендерович

Підписано до друку 17.11.2015 р.  
Формат 60×84<sup>1/16</sup>. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.  
Друк ксерографічний. Ум. друк. арк. 1,9.  
Наклад 100 прим. Зам. №30286

---

Віддруковано в ТОВ «ДРУКАРНЯ МАДРИД»  
61024, м. Харків, вул. Ольмінського, 11  
Тел.: (057) 756-53-25  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
Серія ДК, № 4399 от 27.08.2012 р.  
[www.madrid.in.ua](http://www.madrid.in.ua) e-mail: [info@madrid.in.ua](mailto:info@madrid.in.ua)