

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



БЕСАРАБ ОЛЕКСАНДР БОРИСОВИЧ

УДК 621.311.1

**АНАЛІЗ ЗОН СТАБІЛЬНОСТІ ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ
ПРОЦЕСІВ В РОЗПОДІЛЬНИХ ПРИСТРОЯХ ЕЛЕКТРИЧНИХ
МЕРЕЖ ВИСОКОЇ НАПРУГИ**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електричних мереж та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» МОН України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Тугай Юрій Іванович** – Інститут електродинаміки НАН України, завідувач відділу оптимізації систем електропостачання.

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, професор **Лежнюк Петро Дем'янович** – Вінницький національний технічний університет МОН України, завідувач кафедри електричних станцій та систем;

– кандидат технічних наук, доцент **Черкашина Вероніка Вікторівна** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» МОН України, доцент кафедри передачі електричної енергії.

Захист відбудеться «19» січня 2016 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.002.06 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» (03056, Україна, м. Київ, просп. Перемоги 37, корп. 20, ауд. 3).

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» (03056, Україна, м. Київ, просп. Перемоги 37).

Автореферат розісланий «18» грудня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
К 26.002.06, канд.техн.наук, доц.



В.О. Шостак

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Задача оперативного керування роботою електроенергетичних систем вимагає достовірної та своєчасної інформації про поточні параметри режимів. Основним джерелом цієї інформації є вимірювальні трансформатори. Пошкодження чи відмова вимірювальних трансформаторів може стати причиною системної аварії з перервою електропостачання на тривалий час та великими витратами на ліквідацію наслідків. З практики експлуатації відомо, що основною причиною виходу з ладу трансформаторів напруги (ТН) є виникнення ферорезонансних процесів (ФРП). Слід відзначити, що особливу небезпеку становлять усталені ферорезонансні режими, тому що саме тривале протікання надструмів під час відповідних процесів призводить до ушкодження ізоляції обмоток вимірювальних трансформаторів.

Проблеми експериментального вивчення ФРП пов'язані із небезпекою ймовірного пошкодження обладнання діючих підстанцій, а також відсутністю можливості врахування на практиці усіх значень параметрів схеми та режиму. Тому основними методами дослідження ФРП історично стали аналітичні методи та математичне моделювання. Дослідженню ФРП присвячена значна кількість робіт як вітчизняних, так і іноземних авторів, серед яких слід відзначити: Белякова Н.Н., Гашимова А.М., Джуварли Ч.М., Дмитрієва Є.О., Євдокуніна Г.А., Журахівського А.В., Кадомської К.П., Кузнецова В.Г., Максимова В.М., Ferracci P., Jacobson D.A.N. та інших. Однак попередній аналіз їх робіт показав, що при використанні як аналітичних методів, так і методів математичного моделювання, автори вдаються до суттєвого спрощення розрахункових моделей, а це, у свою чергу, призводить до значних розбіжностей між прогнозованими та реальними границями зон стабільності ФРП.

В цілому можна зробити висновок, що вдосконалення математичних моделей та розробка нових методів для визначення границь зон стабільності ФРП у електричних мережах високої напруги є актуальною науково-технічною задачею, вирішенню якої і присвячена дана робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі електричних мереж та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» у рамках виконання науково-дослідної роботи «Розробка математичних моделей та методів аналізу і оптимізації розвитку основних мереж енергосистем в умовах ринкових відносин» (№ ДР 0112U002423), у якій здобувачем розв'язувалися питання виявлення ферорезонансних процесів та боротьби із ними в електричних мережах високої напруги.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є вдосконалення математичних моделей та розробка нових методів для визначення границь зон стабільності ферорезонансних процесів в розподільних пристроях електричних мереж високої напруги.

Для досягнення поставленої мети в роботі були вирішені наступні задачі:

- розробка розрахункової схеми та математичної моделі розподільних пристроїв (РП) електричних мереж високої напруги з урахуванням параметрів обладнання РП та впливу суміжних фаз з метою підвищення точності аналізу процесів у ферорезонансному колі;

- дослідження впливу зміни значень параметрів елементів РП на розвиток та перебіг ферорезонансного процесу для врахування взаємного впливу фаз при визначенні границь зон стабільності ФРП;

- вдосконалення традиційної моделі ТН за рахунок врахування каскадності конструкції, явища гістерезису та динамічних властивостей феромагнетиків при дослідженні процесів у колах із нелінійною індуктивністю для забезпечення адекватного відтворення процесів під час ФРП;

- дослідження впливу кількості паралельно працюючих ТН на варіювання границь зон стабільності ФРП;

- визначення ймовірних зон існування небезпечних ФРП шляхом використання апарату нечіткої логіки при розробці відповідної моделі для уточнення наявності необхідних та достатніх умов розвитку ФРП в діючих електромережах;

- розробка програмного забезпечення для визначення границь зон ФРП та необхідних коригуючих впливів на параметри елементів розподільних пристроїв для усунення небезпеки розвитку аномального режиму.

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є стаціонарні та квазістаціонарні електромагнітні процеси у розподільних пристроях електричних мережах високої напруги.

Предметом дослідження є моделі та методи аналізу аномальних режимів в електричних мережах високої напруги, що спричинені ферорезонансними процесами у розподільних пристроях з електромагнітними трансформаторами напруги.

Методи дослідження. Для аналізу та розв'язання поставлених задач використані: методи дослідження лінійних та нелінійних електричних кіл; теорія електричних кіл і електричних систем; методи математичного моделювання; елементи нейромережевого моделювання й математичного апарату нечіткої логіки; теорія математичної статистики обробки даних; методи прикладного програмування.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- розроблено вдосконалену математичну модель ТН в трифазному РП високої напруги, що на відміну від попередніх, враховує каскадність конструкції реальних ТН, електромагнітну взаємодію між процесами в окремих фазах, явище гістерезису в осердях, динамічні властивості феромагнетиків та використовує неперервну функцію для апроксимації кривих намагнічування, що важливо при дослідженнях ФРП, які мають високу чутливість до відхилень у значеннях вихідних параметрів;

- вперше, використовуючи розроблену математичну модель РП, встановлені закономірності впливу міжфазних параметрів РП на розташування границь зон стабільності ФРП з метою підвищення точності виявлення вогнищ небезпечних аномальних режимів в електричних мережах високої напруги;

- вперше досліджено вплив зміни характеристик ТН протягом терміну його експлуатації на розташування границь зон стабільності ФРП, що дає змогу вести моніторинг умов експлуатації ТН та своєчасно впроваджувати заходи попередження ФРП в даному РП;

- вперше з використанням апарату нечіткої логіки розроблена та реалізована спеціалізована нейро-нечітка мережа для визначення ступеня небезпеки ФРП у РП діючих електричних мереж високої напруги з електромагнітними ТН, що дає змогу оцінити на практиці доцільність реалізації спеціальних засобів по запобіганню або ліквідації ФРП за конкретних умов.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

- на основі виконаних досліджень та встановлених закономірностей розроблено новий метод виявлення ферорезонансних процесів у РП електричних мереж, який реалізовано у вигляді методичних матеріалів та програмних засобів;

- методичні матеріали з зонами можливого виникнення ферорезонансу в мережах високої напруги були передані в "Харківобленерго" та використовуються при плануванні профілактичних і ремонтних робіт;

- розроблені математичні моделі обладнання РП були надані ДП «Науково-виробничий центр «Енергоімпульс» ІЕД НАН України для проведення аналізу резонансних та ферорезонансних процесів в системах електропостачання з сонячними електростанціями;

- результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут".

Особистий внесок здобувача. Результати, викладені в дисертаційній роботі, одержані автором особисто. У наукових працях, що були опубліковані у співавторстві здобувачу належать: в [1] – обґрунтовано та розроблено математичну модель розподільного пристрою; в [2] – розроблено концепцію нечіткого логічного висновку; в [3] – на розробленій моделі здійснено дослідження впливу старіння електротехнічної сталі; в [4] – розроблена модель та виконано дослідження впливу кількості паралельно працюючих трансформаторів напруги на границі зон ферорезонансу; в [5] – синтезовано гістерезисну модель трансформатора напруги; в [8] – проведено дослідження впливу параметрів розподільного пристрою на виникнення та перебіг ферорезонансів; в [10] – обґрунтована доцільність застосування апарату нечіткої логіки для аналізу коливальних кіл із нелінійним індуктивними елементами; в [11] – реалізована удосконалена модель трансформатору напруги.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи та її результати доповідалися, обговорювалися та були схвалені на таких міжнародних науково-технічних конференціях: XXX Науково-технічна конференція «Моделювання» (м. Київ, 2011 р.); VII Mezinárodní vědecko-praktická konference «Aktuální vymoženosti vědy – 2011» (м. Прага, 2011 р.); Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики» (м. Київ, 2011 р.); XXXI Науково-технічна конференція «Моделювання» (м. Київ, 2012 р.); Міжнародна науково-технічна

конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики» (м.Київ, 2012 р.); IEEE International Conference «Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)», (Kyiv, 2014).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 11 наукових праць, в тому числі 5 статей у наукових фахових виданнях України (2 статті у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз) та 6 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, додатків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи становить 147 сторінок, у тому числі 114 сторінок основного тексту, 54 рисунки, список використаних джерел зі 123 найменувань та 2 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційного дослідження, сформульовані мета та задачі дисертаційної роботи, викладені наукова новизна та практична цінність роботи, наведені відомості про публікації, апробацію та впровадження основних результатів дисертаційних досліджень.

У першому розділі розглянуто фізичну природу резонансних коливань в лінійних та нелінійних електричних колах, виконана класифікація та описані основні властивості ферорезонансних кіл.

Наведено результати вивчення та аналізу інформаційних джерел за темою дисертаційної роботи. Встановлено, що відомі аналітичні методи та методи математичного моделювання спираються на значні спрощення при формуванні розрахункових моделей та не можуть забезпечити гарантоване виявлення ФРП, особливо у приграничних областях зон стабільності цих процесів.

Зроблено висновки про необхідність вдосконалення математичних моделей та розробки нових методів для дослідження ФРП.

У другому розділі виконано детальне моделювання РП для дослідження процесів у ньому. Через чутливість ФРП до точності моделювання коливального контуру, особливу увагу було приділено розробці моделі вимірювального електромагнітного ТН. В електричних мережах високої напруги найбільш поширеними є каскадні електромагнітні трансформатори типу НКФ. Це означає, що кожен вимірювальний трансформатор типу НКФ складається із окремих модулів, каскадів. Так сучасні трансформатори НКФ-110 мають один каскад, НКФ-150, НКФ-220 та НКФ-330 – 2 каскади, НКФ-400 та НКФ-500 – 3 каскади (попередні моделі трансформаторів НКФ-330 мають 3 каскади, а НКФ-500 – 4).

Слід відзначити, що для попередження квазістаціонарних ФРП, останнім часом були розроблені та виготовляються так звані антирезонансні вимірювальні трансформатори типів НАМИ та НФКА. Вони виконані за аналогічним каскадним принципом, а антирезонансні властивості досягаються за рахунок використання товстолистової конструкційної сталі (товщина листа – 6 мм, з масою листів 30% від загальної маси магнітопроводу). Тим самим досягають збільшення втрат холостого

ходу в осерді ТН з метою погіршення добротності резонансного контуру та демпфування коливань в ньому. Але збільшення частки конструкційної сталі у магнітопроводі вимірювальних трансформаторів і відповідне зростання втрат, суттєво погіршує клас точності вимірювань, а тому вказані ТН мають обмежене застосування.

Враховуючи той факт, що кожен каскад вимірювального ТН має нерозгалужений магнітопровід, а також наявність вирівнюючих обмоток, при моделюванні значення магнітного потоку було прийнято незмінним через усі обмотки у межах одного каскаду. Електрична схема заміщення каскаду ТН представлена на рис. 1.

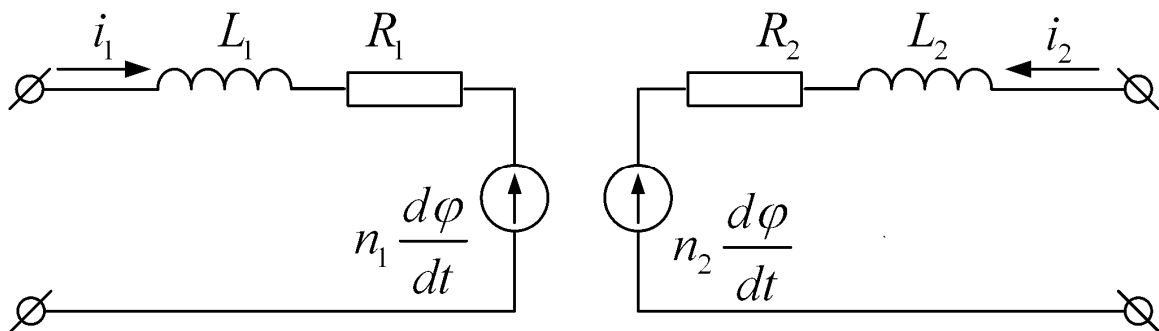


Рисунок 1 – Електрична схема заміщення каскаду трансформатора

Активні опори та індуктивності розсіювань первинної та вторинної обмоток представлені елементами R_1, R_2, L_1, L_2 . А кількості витків первинної та вторинної обмоток становлять n_1, n_2 , відповідно. Напруженість магнітного поля, викликана струмами у обмотках трансформатора, визначається за співвідношенням $H = \frac{i_1 n_1 + i_2 n_2}{l_{cp}}$, де l_{cp} – середня довжина магнітної силової лінії каскаду

вимірювального ТН. Моделювання нелінійних індуктивних елементів, як правило, здійснюють за основною кривою намагнічування. Вона представляє собою геометричне місце вершин гістерезисних циклів, що були отримані при циклічному перемагнічуванні феромагнітного осердя. На практиці часто використовують функції арктангенсу для апроксимації кривих намагнічування нелінійних індуктивних елементів, оскільки при цьому можливим стає порівняно просте обчислення як самої функції так і її похідної. Тому в роботі для проведення аналізу була застосована апроксимація кривої намагнічування функцією арктангенсу з трьома коефіцієнтами та лінійним членом:

$$B = \alpha \cdot \arctg(\beta H) + \gamma H, \quad (1)$$

де B – магнітна індукція; H – напруженість магнітного поля; α, β, γ – коефіцієнти апроксимації.

Традиційно при моделюванні ТН за основною кривою намагнічування явище

гістерезису враховують введенням до розрахункової схеми активної поперечної провідності. Однак таке врахування явища гістерезису не є повністю адекватним, що у поєднанні із чутливістю ФРП до малих змін параметрів, може призвести до суттєвих відхилень в результатах. Тому при моделюванні ФРП доцільно використовувати моделі з більш точним врахуванням явища гістерезису. У більшості комп'ютерних симуляторів явище гістерезису описують за моделями Дж.Чана та Джилса-Атертона. Реалізація моделі Дж.Чана є значно простішою, однак проведені експериментальні реалізації показали, що вона не дає можливості з достатнім ступенем точності відтворити основну криву намагнічування. Тому використання цієї моделі було визнано недоцільним при моделюванні ФРП. Основою моделі Джилса-Атертона є безгістерезисна крива, яка представляє собою залежність безгістерезисної намагніченості від напруженості магнітного поля. Модель Джилса-Атертона дозволяє максимально точно відобразити основну криву намагнічування, тому в роботі саме її обрано при дослідженні ФРП.

Зв'язок між магнітною індукцією, напруженістю магнітного поля та намагніченістю описується співвідношенням:

$$B = \mu_0(M + H). \quad (2)$$

де M – намагніченість магнітопроводу трансформатора напруги.

Виразивши із рівності (2) намагніченість та підставивши магнітну індукцію із (1) отримаємо залежність безгістерезисної намагніченості від напруженості магнітного поля:

$$M_{an}(H) = \frac{1}{\mu_0} B_{an}(H) - H = \frac{\alpha}{\mu_0} \cdot \arctg(\beta H) + H \left(\frac{\gamma}{\mu_0} - 1 \right). \quad (3)$$

Похідна безгістерезисної намагніченості від напруженості магнітного поля має наступний математичний запис:

$$\frac{dM_{an}}{dH} = \frac{1}{\mu_0} \left(\gamma + \frac{\alpha \cdot \beta}{1 + (\beta \cdot H)^2} \right) - 1 \quad (4)$$

Опис гістерезисних процесів у феромагнетику ґрунтується на теорії руху доменних стінок у змінному магнітному полі. Ефект відставання внутрішнього поля при перемагнічуванні подібний до ефекту сухого тертя між доменними стінками. Реальні процеси перемагнічування феромагнітних матеріалів супроводжуються пружним вигином доменних границь. Тому гістерезисна модель має враховувати ефект в'язкого тертя, що досягається урахуванням добавки пропорційної до похідної безгістерезисної намагніченості від напруженості магнітного поля. У результаті

отримуємо рівняння:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{M_{an} - M}{H_C} \cdot \delta + \frac{C}{1+C} \cdot \frac{dM_{an}}{dH} \quad (5)$$

де H_C – величина коерцитивної сили петлі гістерезису; δ – коефіцієнт що враховує напрям перемагнічування (визначається за табл. 1); C – відношення початкової до безгістерезисної магнітних проникностей при $H = 0$.

Таблиця 1 – Визначення коефіцієнту напрямку перемагнічування

Значення $\frac{dM}{dH}$	Значення намагніченості	Коефіцієнт що враховує напрям перемагнічування
$dM/dH > 0$	$M < M_{an}$	$\delta = 1$
$dM/dH = 0$	$M = const$	$\delta = 0$
$dM/dH < 0$	$M > M_{an}$	$\delta = -1$
$dM/dH = 0$	$M = const$	$\delta = 1$

Однією із основних характерних рис ФРП є значне спотворення форми кривих струму та напруги, тобто виникнення вищих гармонійних складових. Також особливістю ферорезонансних схем є можливість виникнення усталених коливань на частотах відмінних від частоти мережі, перш за все на третій субгармоніці.

При змінних значеннях швидкості намагнічування, що спостерігається при ФРП, класична модель Джилса-Атертона може давати значні розбіжності порівняно з результатами експериментів. Врахуємо динаміку процесу. Основним параметром, що характеризує динамічні властивості (насамперед втрати) феромагнітних матеріалів є залежність коерцитивної сили від швидкості перемагнічування:

$$H_C = H_{C0} + K_{hcf} \cdot \left| \frac{dH}{dt} \right|, \quad (6)$$

де H_{C0} , K_{hcf} – коефіцієнти лінійної регресії.

Підставивши значення розрахованої за (6) коерцитивної сили у рівняння (5) отримаємо повне рівняння перемагнічування феромагнітного осердя ТН:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{M_{an} - M}{H_{C0} + K_{hcf} \cdot \left| \frac{dH}{dt} \right|} \cdot \delta + \frac{C}{1+C} \cdot \frac{dM_{an}}{dH} \quad (7)$$

Отримані рівняння (2), (3) (4) та (7) представляють собою розроблену математичну модель для опису магнітної системи кожного окремого каскаду електромагнітного ТН. Ця модель була реалізована в середовищі MATLAB/Simulink, відповідна структурна схема представлена на рис. 2. Для каскадів, які мають декілька вторинних обмоток, до моделі додаються відповідні елементи, що відображають додаткові обмотки.

Також значна увага в роботі була приділена моделюванню іншого обладнання РП, яке у розрахунковій моделі відображається ємностями, активними опорами та провідностями. Ємності обладнання можуть бути виміряні на практиці, а у випадку неможливості – визначені із системи рівнянь Максвелла для багатопровідних ліній.

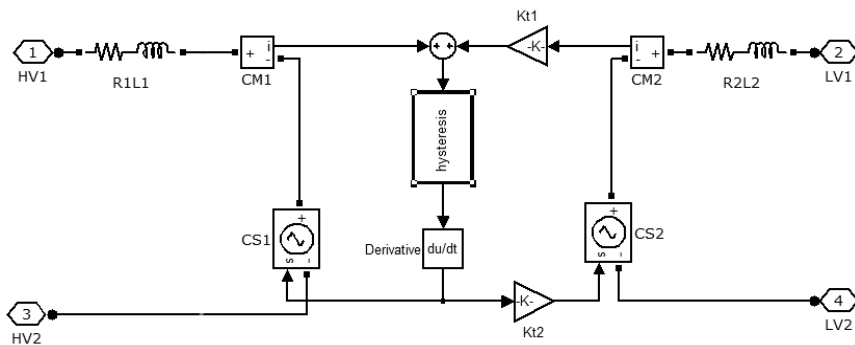


Рисунок 2 – Структурна схема каскаду трансформатора у MATLAB/Simulink

З метою дослідження впливу міжфазних зв'язків у РП була розроблена трифазна розрахункова модель (рис. 3). У розрахунковій моделі кожен електромагнітний вимірювальний ТН представлено із врахуванням каскадності.

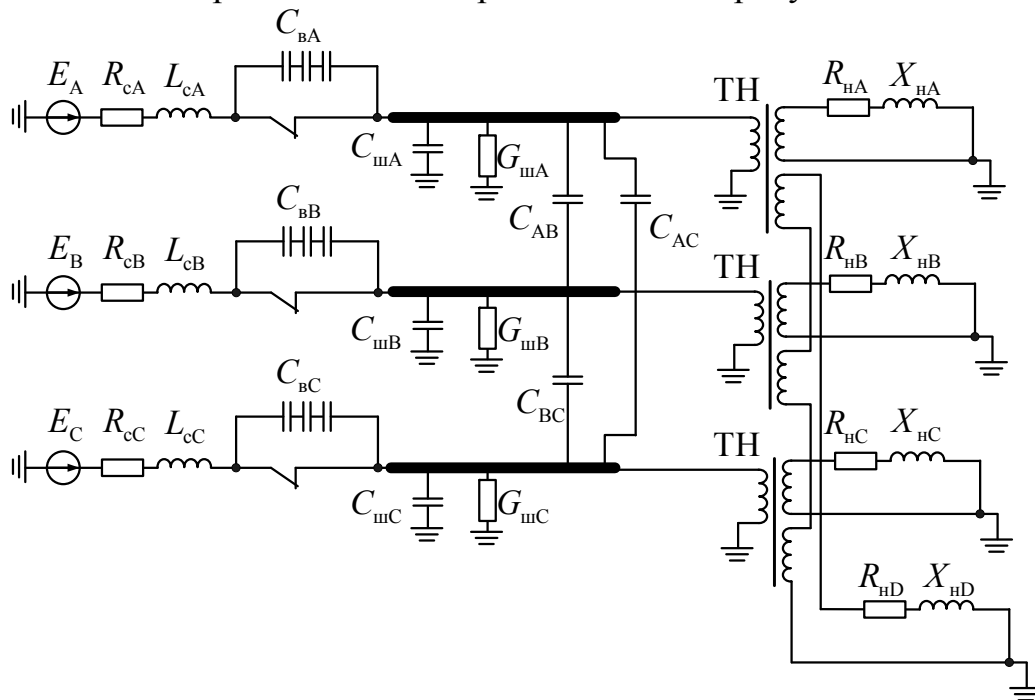


Рисунок 3 – Схема розрахункової моделі РП

Адекватність розробленої моделі була підтверджена прийнятною кореляцією розрахункових даних із натурними осцилограмами.

У **третьому розділі** представлено результати дослідження впливу зміни значень параметрів РП на границі зон стабільності ФРП. Значення ємностей шин та дільників напруги вимикачів мають найбільший вплив на параметри режиму у ферорезонансному коливальному колі РП, тому пошук границь зон стабільності ФРП здійснювався у координатах осей цих величин. Дослідження процесів виконувались на розробленій моделі, значення параметрів елементів якої приймалися у відповідності до типових схем РП підстанцій напругою 110-500 кВ.

Перш за все було досліджено вплив міжфазних зв'язків на характер протікання ФРП у РП. Міжфазні зв'язки у розрахунковій моделі (рис. 3), представлені міжфазними ємностями та резисторами, підключеними до додаткових вторинних обмоток (з'єднаних за схемою розімкненого трикутника). Дослідження показали, що значення міжфазних ємностей впливають на процеси у коливальному контурі, аналогічно значенням фазних ємностей шин (рис. 4а). Статистичний аналіз результатів моделювання, що наведені на рис. 4а, виявив закономірність впливу міжфазних ємностей на границі існування ФРП. А саме було виявлене рівномірне зміщення границі ферорезонансної області уздовж осі абсцис пропорційно величині міжфазної ємності. В цілому підтверджено, що дослідження ФРП в електричних мережах з ефективним заземленням нейтралі за однофазними схемами, які отримують шляхом приведення фазної та міжфазних ємностей до еквівалентної ємності фази, є цілком допустимим, оскільки похибка від еквівалентування не перевищує вимірювальної.

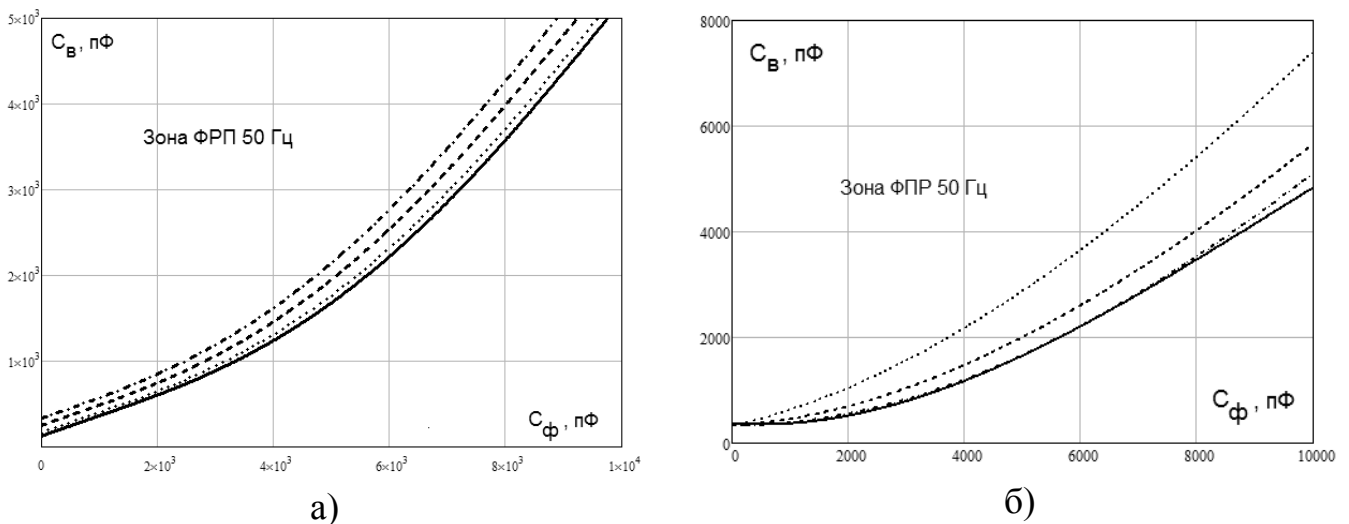


Рисунок 4 – Границі зони стабільності ФРП на 50 Гц при варіюванні міжфазних ємностей (а), та навантаження додаткових вторинних обмоток (б)

— $C_{мф} = 0$ пФ; $C_{мф} = 100$ пФ; $R_{нД} = 1$ Ом; - - $R_{нД} = 5$ Ом;
 - - $C_{мф} = 300$ пФ; - - - $C_{мф} = 500$ пФ. - - - $R_{нД} = 25$ Ом; — $R_{нД} = 1000$ Ом.

Також було досліджено залежність впливу значення опору резистора, що введений в схему розімкненого трикутника додаткових вторинних обмоток ТН, на

границі зон стабільності ФРП (рис 4б). Дану залежність неможливо дослідити за однофазними розрахунковими моделями. Разом із тим встановлено, що при граничних значеннях ємностей дільників напруги вимикачів усталений ФРП може існувати лише у одній із фаз. Це зумовлене тим, що втрати енергії у резонансному коливальному контурі залежать від значення струму, який протікає в колі. В свою чергу значення струму залежить від кількості енергії, якою обмінюються ємнісні та індуктивні елементи резонансного кола. Очевидно, що за усталеного ФРП в одній з фаз, виникнення ФРП в іншій фазі призведе до зростання міжфазної напруги. Але від значення цієї напруги кількість енергії у міжфазній ємності залежить квадратично. Таким чином, ФРП в двох або трьох фазах одночасно повинні супроводжуватися більшим значенням активних втрат у кожній з фаз ніж за ФРП в одній фазі. Виявлення ФРП може здійснюватися для кожної із фаз за однофазними моделями із відповідним урахуванням міжфазних зв'язків.

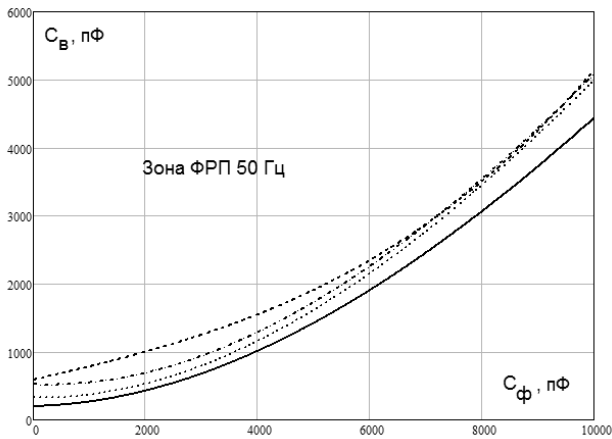
Було досліджено вплив інших параметрів РП на границі зон стабільності ФРП. Аналіз впливу швидкості переміщення і відповідно зміни величини активних втрат у магнітопроводі на границі зон ФРП показав, що за ФРП на основній частоті неврахування даної залежності призводить до зменшення граничного значення еквівалентної ємності дільників напруги на 50 пФ, а для субгармонійних ФРП на частотах 16,6 Гц та 10 Гц до збільшення – відповідно на 100 пФ та 170 пФ.

Підтверджено, що активне навантаження основних вторинних обмоток вимірювальних трансформаторів напруги призводить до екстракції енергії з коливального ферорезонансного контуру і відповідного демпфування ФРП. Виявлена залежність між збільшенням навантаження та відповідним зростанням граничного значення ємності дільників напруги вимикачів (рис. 5а).

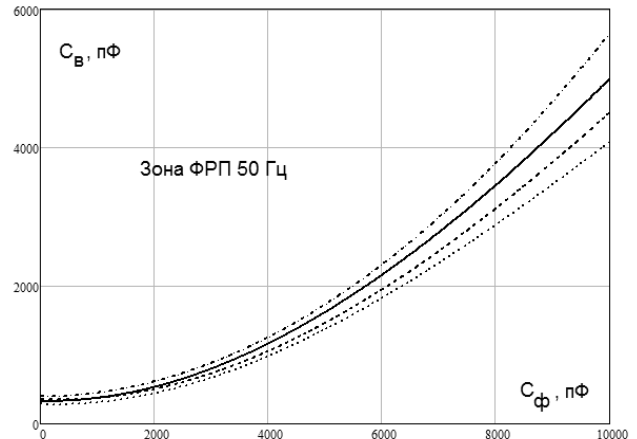
Кількість енергії, що отримує коливальний ферорезонансний контур із мережі, залежить також від рівня напруги на шинах РП. Підвищення рівня напруги призводить до розширення області стабільності ФРП (рис. 5б).

Тривала експлуатація електромагнітних вимірювальних ТН неодмінно призводить до дрейфу характеристик намагнічування магнітопроводу. Серед факторів, що призводять до даного явища можна виділити наступні: старіння електротехнічної сталі, виникнення міжвиткових замикань, проведення ремонтів, деформації магнітопроводу, тощо. Встановлено, що дрейф характеристик намагнічування призводить до наближення робочої точки потокозчеплення до зони насичення, що у свою чергу призводить до зменшення критичного значення еквівалентної ємності дільників напруги вимикачів (необхідної умови для існування стійкого ФРП).

Аналогічні результати впливу параметрів РП на границі зон стабільності ФРП були отримані і для субгармонійних ФРП. Встановлено, що субгармонійний ФРП у реальних РП може мати місце лише на частотах 16,66 Гц та 10 Гц, відповідно на 3-й та 5-й субгармоніках. Інші види ФРП не можуть мати місце у реальних електричних мережах.



а)



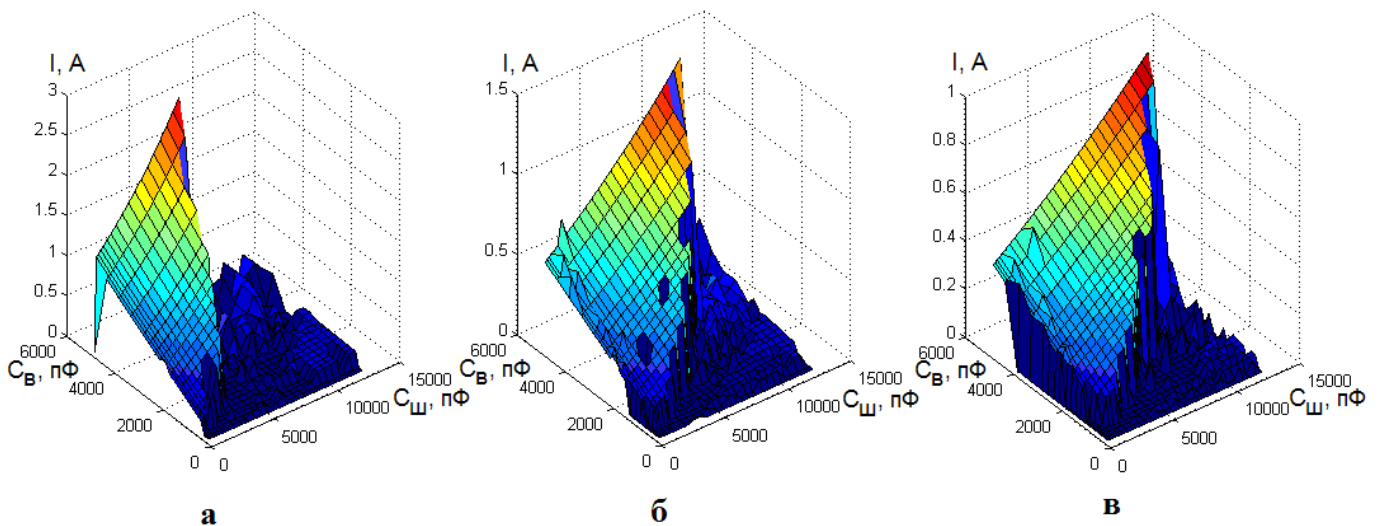
б)

Рисунок 5 – Границі зони стабільності ФРП на частоті 50 Гц при варіюванні навантаження основних обмоток (а), та напруги мережі (б)

— $P_H = 0$ Вт; $P_H = 400$ Вт;
 -.- $P_H = 800$ Вт; -- $P_H = 2000$ Вт;

-.- $0.95 U_{ном}$; — $U_{ном}$;
 -- $1.05 U_{ном}$; $1.1 U_{ном}$.

В певних режимах роботи обладнання РП електричних мереж із ефективним заземленням нейтралі використовуються конфігурації за яких два або більше електромагнітних вимірювальних ТН вмикаються на паралельну роботу. Тому було виконано дослідження впливу кількості паралельно працюючих ТН на границі зон стабільності ФРП. На рис. 6 показано залежність значення струмів первинних обмоток вимірювальних ТН за стабільного ФРП при різній кількості паралельно працюючих трансформаторів (а – одного, б – двох, в – трьох).



а

б

в

Рисунок 6 – Результати моделювання ФРП для різної кількості паралельних ТН

У четвертому розділі для більш достовірного визначення границь зон стабільності ФРП застосовано апарат нечітких множин та нечіткої логіки. Описані у попередньому розділі вдосконалені моделі для дослідження ФРП вимагають інформації про значення певної кількості параметрів, які зазвичай не враховувалися

при застосуванні традиційних методів аналізу ФРП, розглянутих в першому розділі даної роботи. Врахування впливу цих параметрів у аналітичних моделях, призводить до експоненціального зростання ступеню складності моделей, що неодмінно призводитиме до значних втрат часу при їх формуванні, а також може спричинити принципову неможливість віднаходження аналітичних розв'язків. Тому для вирішення задач виявлення ФРП доцільно використовувати апарат нечіткої логіки.

На першому етапі розробки моделі нечіткого логічного висновку задаються вхідні та вихідні лінгвістичні змінні. У якості вхідних лінгвістичних змінних в роботі було прийнято:

- 1) Еквівалентну ємність шин.
- 2) Напругу на досліджуваних шинах РП у момент розмикання контактів останнього вимикача.
- 3) Відхилення основної кривої намагнічування.
- 4) Навантаження ТН.
- 5) Опір резистора, що введений в схему розімкненого трикутника додаткових вторинних обмоток ТН.

У якості вихідної лінгвістичної змінної прийнято значення еквівалентної ємності дільників напруги вимикачів досліджуваної фази. Для формування бази правил моделі нечіткого логічного висновку попередньо визначено терм-множини значень нечітких вхідних та вихідних змінних. Для усіх лінгвістичних змінних були використані трикутні функції належності. Область визначення вхідної лінгвістичної змінної «Еквівалентна ємність шин» було розподілено на 3 терм-множини, (рис. 7.). Для решти вхідних змінних області визначення було також розподілено на 3 терм-множини кожену. Для вихідної лінгвістичної змінної «Ємність дільників напруги вимикачів» область визначення була розподілена, на 9 терм-множин.

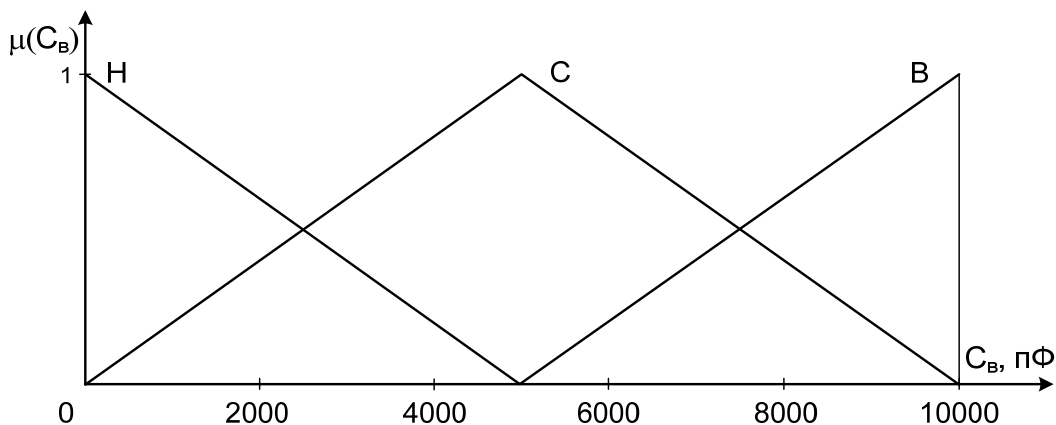


Рисунок 7 – Функції приналежності вхідної лінгвістичної змінної «Еквівалентна ємність шин»

На наступному етапі розробки моделі нечіткого логічного висновку виконувалось формування початкової бази нечітких правил. У роботі було застосовано підхід до формування початкової бази правил заснований на тому, що кожному прикладу із навчальної вибірки ставиться у відповідність окреме правило.

Для кожного набору вхідних та вихідної змінних було визначено ступінь належності значень заданих змінних до відповідних терм-множин. Після цього значенням у кожному навчальному прикладі було поставлено у відповідність ті терм-множини, ступені належності до яких у відповідних значень змінних із даного прикладу, є максимальними. Сформована таким чином множина правил є початковою та надлишковою, з однаковими передумовами та різними висновками, у подальшому була виконана її оптимізація та скорочення шляхом адаптації до наявних експериментальних даних.

Скорочення бази правил проводилося за групами правил, що суперечили одне одному. Із груп подібних правил було залишене тільки одне, те, що мало найбільший рейтинг – відповідало найбільшій кількості експериментальних даних. Таким чином було вирішено проблему суперечливих правил, а також суттєво зменшено загальну їх кількість.

Висновок у розробленій моделі нечіткого логічного висновку Мамдані здійснюється у п'ять етапів:

1) Фазифікація вхідних змінних – приведення їх до нечіткості: інтерпретація точного значення вхідної змінної як нечіткого. Метою виконання даного етапу є отримання значень істинності для відповідних підумов із бази правил.

2) Композиція вхідної змінної і умовної частини правила – агрегування підумов: обчислення рівня придатності правила до ситуації. Підумови у кожному правилі зв'язані оператором кон'юнкції, а метою виконання даного етапу є визначення істинності виконання правила, шляхом віднаходження мінімального значення істинності усіх його підумов.

3) Обчислення нечіткої імплікації – активація підвисновків. На даному етапі здійснюється перехід від умов до підвисновків. Для кожного підвисновку розраховується значення істинності як добуток істинності правила на його ваговий коефіцієнт.

4) Агрегація – акумуляція підвисновків: побудова нечіткого значення виходу за результатами попередніх етапів. Для вихідної лінгвістичної змінної розраховується значення функції приналежності як максимум значень підвисновків.

5) Дефазифікація вихідного значення полягає у отриманні кількісного значення вихідної змінної за її нечітким значенням, отриманим в результаті агрегації. Дефазифікація у розробленій моделі здійснювалась за методом центру ваги.

Для розробленої моделі нечіткого логічного висновку було проведено перевірку адекватності її рішень за середньоквадратичним значенням розузгодження із даними навчальної вибірки:

$$\xi_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - F(X_i))^2} = 375.4 \quad (8)$$

де n – розмір навчальної вибірки, y_i – значення вихідної змінної із навчальної вибірки; $F(X_i)$ – значення виходу нечіткої моделі при значенні вектору входів X_i із навчальної вибірки.

Розроблена модель нечіткого логічного висновку вимагала налаштування, яке було здійснено методом найменших квадратів, за даними навчальної вибірки. Налаштування проводилося шляхом настроювання параметрів нечіткої моделі, а саме координат максимумів та мінімумів функцій належності термів вхідних та вихідних змінних, а також значень вагових коефіцієнтів бази правил. Коригування регульованих параметрів моделі проводилося за градієнтним методом.

У результаті проведеного налаштування середньоквадратичне значення розузгодження вдалося знизити до $\xi_{RMS} = 137.2$. Але в рамках поставленої задачі це значення залишається неприйнятним. Тому було здійснено перетворення розробленої моделі до нейро-нечіткої мережі на основі моделі нечіткого логічного висновку Сугено.

Висновок у моделі нечіткого логічного висновку Сугено також здійснюється за базою нечітких правил, однак на відміну від моделі нечіткого логічного висновку Мамдані, де висновки по кожному із правил формують значення належності дійсного вихідного значення терм-множинам вихідної лінгвістичної змінної, у класичній моделі нечіткого логічного висновку Сугено висновки по кожному із правил задаються лінійною функцією значення вихідної змінної від дійсних значень вхідних змінних, а у спрощених алгоритмах – константою.

Агрегація у моделі нечіткого логічного висновку Сугено фактично здійснюється шляхом розрахунку значень лінійних функцій, для яких значення імплікації відмінне від нуля. Дефазифікація зводиться до розрахунку середньозважених, за величиною імплікації, агрегованих значень. Для вхідних лінгвістичних змінних розбиття областей визначення було залишено без змін. У моделі нечіткого логічного висновку було скориговано 2 останні етапи, а саме етапи агрегації та дефазифікації.

Для порівняння було розроблено дві нейро-нечіткі мережі: спрощену, у якій висновки по кожному із правил задаються константою, та класичну, у якій висновки по кожному із правил задаються лінійною залежністю виходу від входів.

База правил для обох нових мереж налічує $3^5 = 243$ правила, що відповідають усім можливим комбінаціям термів вхідних змінних.

Для спрощеної нейро-нечіткої мережі константи були розраховані за даними навчальної вибірки, як середньоарифметичне значень вихідної змінної, для яких значення вхідних змінних задовольняють відповідним правилам нечіткої бази.

Для класичної нейро-нечіткої мережі коефіцієнти багатомірної лінійної регресії були розраховані за наступним співвідношенням:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (9)$$

де X – матриця вхідних змінних із навчальної вибірки, доповнена зліва одиничним вектором, Y – вектор вихідних змінних навчальної вибірки.

Для кожного правила розраховано свій вектор коефіцієнтів лінійної регресії B , за значеннями X , що задовольняють правилу, та відповідними значеннями Y .

Для обох нейро-нечітких мереж було виконано їх налаштування методом найменших квадратів за даними навчальної вибірки, аналогічно до того, яке виконувалося раніше для розробленої моделі нечіткого логічного висновку Мамдані. У даному випадку регулюванню піддавалися: параметри функцій приналежності вхідних змінних; вагові коефіцієнти бази правил; коефіцієнти лінійних регресій. Перерозподілена область визначення вхідної лінгвістичної змінної «Еквівалентна ємність шин», для класичної моделі, показана на рис. 8.

Після налаштування середньоквадратичне значення розузгодження для спрощеної нейро-нечіткої мережі виявилось на рівні $\xi_{RMS} = 105.4$, а для класичної – $\xi_{RMS} = 10.51$. Для класичної нейро-нечіткої мережі максимальне розузгодження результатів із значеннями навчальної вибірки не перевищує 15 пФ, що є цілком прийнятним.

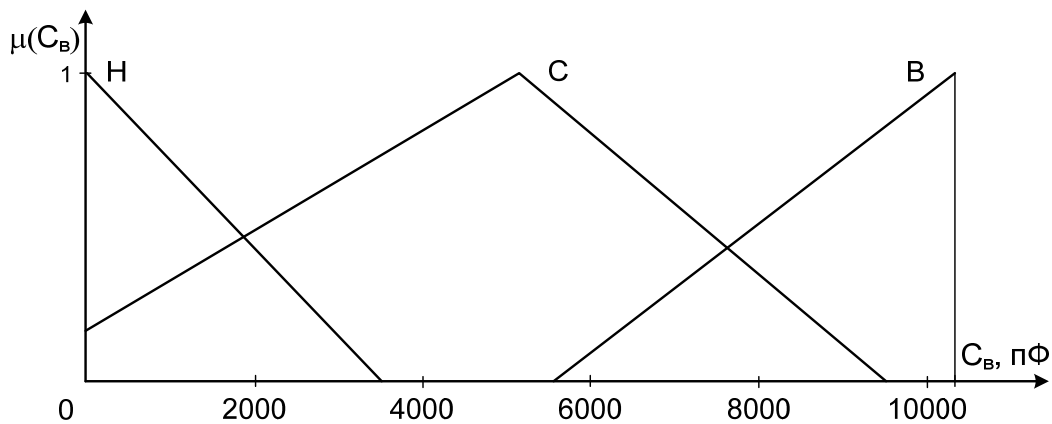


Рисунок 8 – Функції приналежності вхідної лінгвістичної змінної «Еквівалентна ємність шин», після налаштування параметрів.

Розроблена класична нейро-нечітка мережа була реалізована у вигляді програмного засобу, розробленого у середовищі програмування Microsoft Visual Studio Express, діалогове вікно програми представлено на рис. 9. Вхідною інформацією для розробленої програми є: тип та кількість паралельно працюючих трансформаторів напруги; еквівалентні ємності шини та дільників напруги досліджуваної фази (пФ); сумарне активне навантаження вторинних обмоток трансформатора(-ів) напруги (Вт); відхилення діючого значення лінійної напруги від номінального значення (%); відхилення реальної кривої намагнічування трансформатора напруги від базової (%); значення активного опору (Ом), що введений в схему розімкненого трикутника додаткових вторинних обмоток ТН.

Результатом роботи програми є графічне зображення границь областей ФРП на різних частотах (синя крива – границя ФРП на 50 Гц, червона крива – на 16,6 Гц) у координатах сумарних ємностей шин та дільників напруги вимикачів, а також точка, що відповідає параметрам досліджуваної фази РП.

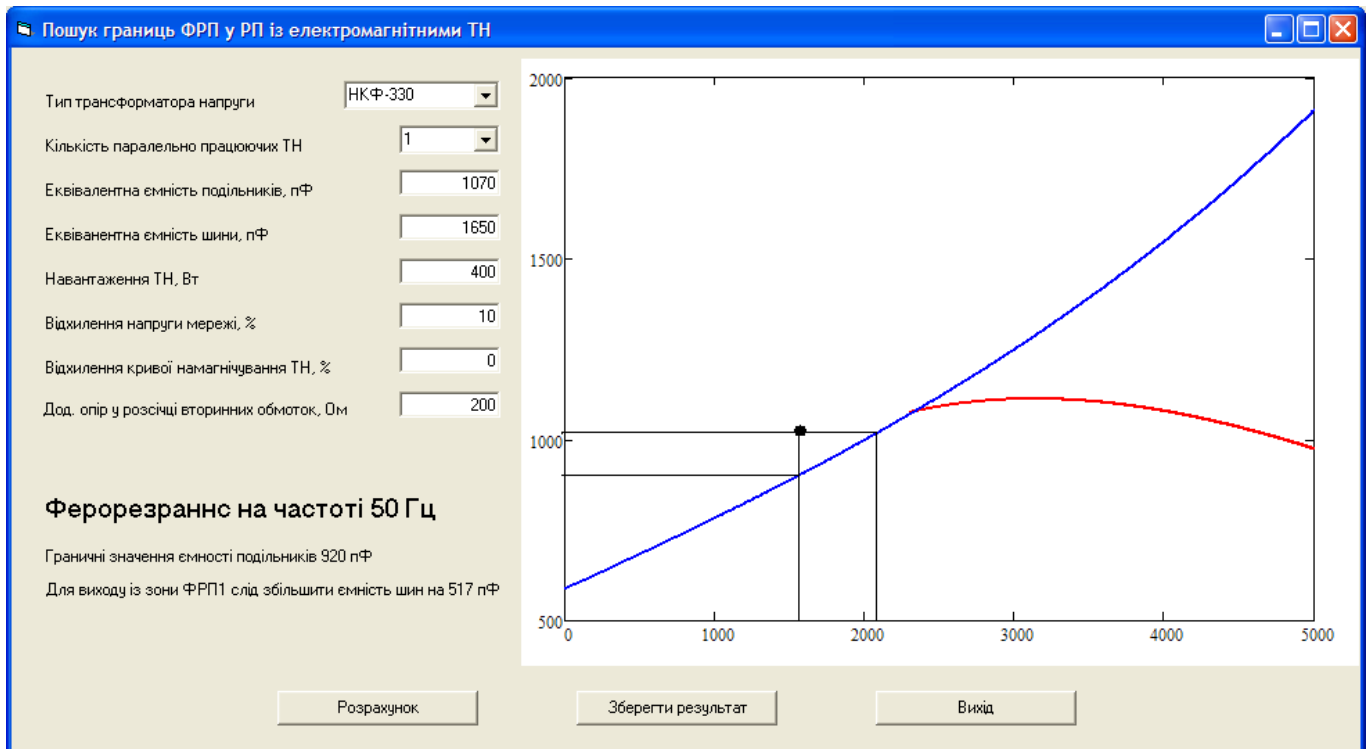


Рисунок 9 – Діалогове вікно програми аналізу ферорезонансних процесів

За можливості існування стійких ФРП програмою здійснюється відповідне попередження, а також, визначається мінімально необхідне значення збільшення еквівалентної ємності фази для виведення параметрів РП за межі небезпечних областей ФРП. Також розроблена програма дозволяє перевіряти можливість розладнання ферорезонансного контуру за рахунок всієї множини параметрів (збільшення навантаження, зменшення опору введеного в схему розімкненого трикутника додаткових вторинних обмоток ТН).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі було вирішене актуальне науково-технічне завдання розробки вдосконалених математичних моделей та нових методів для аналізу ферорезонансних процесів з метою ефективного виявлення границь зон небезпечних значень параметрів мережі. Практичне впровадження результатів досліджень сприяє підвищенню надійності роботи електричних мереж високої напруги, оскільки попереджує пошкодження основного обладнання розподільних пристроїв.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному.

1. В результаті проведеного критичного аналізу відомих моделей і методів аналізу ФРП показана необхідність врахування додаткових, порівняно з традиційними, факторів при дослідженні границь зон небезпечних значень параметрів елементів електричної мережі. Це дозволяє, на відміну від існуючих підходів, отримати більш точні значення координат границь і, тим самим, обрати економічно обґрунтовані заходи попередження ФРП.

2. Вперше враховано та показано вплив динамічної залежності значення коерцитивної сили від швидкості перемагнічування магнітопроводу на границі зон

стабільності ФРП. Обґрунтовано урахування даної залежності у гістерезисних моделях електромагнітних трансформаторів напруги.

3. Досліджено та підтверджено на прикладах ступень впливу зміни значень окремих параметрів елементів РП на розвиток та перебіг ФРП, що, зокрема, дозволило врахувати електромагнітну взаємодію між фазами РП та скоригувати похибку, яка вноситься при дослідженні ФРП на традиційній однофазній моделі.

4. Виходячи з теорії процесів старіння металу, вперше досліджено вплив зміни характеристик ТН протягом його експлуатації на розташування границь зон стабільності ФРП. Це при наявності відповідного моніторингу параметрів обладнання в даній мережі дає можливість своєчасно впроваджувати ефективні заходи попередження ФРП.

5. Використовуючи запропоновану трифазну модель РП вперше досліджено вплив кількості паралельно працюючих ТН на варіювання границь зон стабільності ферорезонансного процесу, що має суттєве значення для практики експлуатації електричних мереж високої напруги.

6. На підставі теорії нечітких множин запропоновано та реалізовано нейро-нечітку модель ФРП, що вперше дало можливість при оцінці результатів прогнозування можливості виникнення ферорезонансу враховувати ступень достовірності інформації в реальній електричній мережі та приймати відповідні обґрунтовані рішення.

7. Розроблено програмне забезпечення для визначення границь зон небезпечних ФРП та необхідного впливу на параметри РП для виведення їх за межі небезпечних зон. Достовірність та працездатність запропонованих у роботі методів і алгоритмів перевірено шляхом проведення розрахунків за даними реальних електроенергетичних систем.

8. В подальшому результати роботи рекомендуються до використання на підприємствах енергетичної галузі України для проектування та експлуатації електричних мереж високої напруги, а також при підготовці спеціалістів відповідної кваліфікації.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Бесараб О.Б.** Моделювання ферорезонансного процесу в трансформаторі напруги прямим методом / **О.Б. Бесараб**, Ю.І. Тугай // Праці Інституту електродинаміки НАН України: Зб.наук.пр. – 2011. – Вип. 30. – С 87-90.

2. **Бесараб О.Б.** Нечітка експертна система оцінки ферорезонансного процесу в електричних мережах / **О.Б. Бесараб**, Ю.І. Тугай // Вісник Харківського національного технічного університету ім. П.Василенка. – 2012. – №129. – С. 3-5.

3. Тугай Ю.І. Моделювання ферорезонансних процесів в трансформаторах напруги з урахуванням ефекту старіння сталі / Ю.І. Тугай, **О.Б. Бесараб** // Технічна електродинаміка. – 2014. – №5. – С. 62–64. (*Журнал входить до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS*).

4. Тугай Ю.І. Ферорезонансні процеси за паралельної роботи трансформаторів напруги електромагнітного типу / Ю.І. Тугай, **О.Б. Бесараб**,

В.А. Мельничук // Вісник Харківського національного технічного університету ім. П.Василенка. – 2014. – №153. – С. 57-59.

5. Тугай Ю.І. Модель електромагнітного трансформатора напруги для дослідження ферорезонансних процесів / Ю.І. Тугай, **О.Б. Бесараб** // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2014. – № 4. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/VNTUV_2014_4_11.pdf (*Журнал входить до міжнародної наукометричної бази даних РІНЦ*).

6. **Бесараб О.Б.** Проблеми аналізу ферорезонансних процесів / **О.Б. Бесараб** // XXX Науково-технічна конференція «Моделювання»: Тези доповідей(12-13 січня 2011 р., м. Київ). – К.: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2011. – С. 39.

7. **Бесараб О.Б.** Попередження ферорезонансних процесів в електричних мережах з ізольованою нейтраллю / **О.Б. Бесараб** // Materiały VII Międzynarodni vědecko-praktická konference «Aktuální vymoženosti vědy – 2011». Díl 19. Technické vědy (27.06.2011-05.07.2011, Praha). – Praha: Publishing House “Education and Science” s.r.o., 2011. – P. 50-53.

8. Тугай Ю.І. Моделирование феррорезонансных процессов в электрических сетях с эффективным заземлением нейтрали / Ю.І. Тугай, **А.Б. Бесараб**, В.Н. Вознюк // Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (28 листопада 2011р., м.Київ). – К.: Політехніка, 2011.

9. **Бесараб О.Б.** Проблеми моделювання ферорезонансних процесів у розподільних злагадах 110-500 кВ / **О.Б. Бесараб** // XXXI Науково-технічна конференція «Моделювання»: Тези доповідей(11-12 січня 2012 р., м.Київ). – К.: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2012. – С. 39.

10. Тугай Ю.І. Применение аппарата нечеткой логики для анализа феррорезонансных процессов / Ю.І. Тугай, **А.Б. Бесараб**, Р.В. Пляшко // Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів(11 листопада 2012р., м.Київ). – К.: Політехніка, 2012.

11. Tygai Yu.I. The mathematical model of voltage transformers for the study of ferroresonant processes / Yu.I. Tygai, **A.B. Besarab** // Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2014 IEEE International Conference (2-6 June 2014, Kyiv). – 77–80 P. (*Видання входить до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS*).

АНОТАЦІЇ

Бесараб О.Б. Аналіз зон стабільності ферорезонансних процесів в електричних мережах високої напруги. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» МОН України, Київ, 2015.

Дисертаційна робота присвячена вдосконаленню моделей та методів для визначення границь зон стабільності ферорезонансних процесів з метою попередження пошкодження ними обладнання розподільних пристроїв електричних мереж високої напруги з ефективним заземленням нейтралі.

В роботі розроблено удосконалені математичні моделі обладнання розподільних пристроїв. Найбільша увага була приділена точності моделювання електромагнітного трансформатора напруги шляхом використання гістерезисної нелінійної моделі, в якій враховується вплив швидкості перемагнічування. Модель розподільного пристрою була прийнята трифазною для урахування впливу міжфазних зв'язків. Проведено дослідження кількісних залежностей між граничними параметрами зон стабільності ферорезонансних процесів та значеннями параметрів елементів розподільного пристрою. Отримані результати було систематизовано та представлено у вигляді нейро-нечітної мережі на основі моделі нечіткого логічного висновку Сугено, що у подальшому дозволило розробити відповідне програмне забезпечення для аналізу ферорезонансних процесів.

Ключові слова: ферорезонанс, ефективне заземлення нейтралі, математичне моделювання, гістерезис, нечітка логіка.

Бесараб А.Б. Анализ зон стабильности феррорезонансных процессов в электрических сетях высокого напряжения. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети и системы. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» МОН Украины, Киев, 2015.

Диссертационная работа посвящена усовершенствованию моделей и методов для выявления феррорезонансных процессов с целью недопущения повреждения ими оборудования распределительных устройств электрических сетей высокого напряжения с эффективным заземлением нейтрали.

Изучение физической природы феррорезонансных процессов показало их высокую чувствительность к точности построения расчетных моделей для их исследования. Проведенный критический анализ существующих методов выявления границ областей феррорезонансных процессов показал их существенные недостатки, связанные с погрешностями учета параметров реального оборудования. Поэтому математическая модель распределительных устройств электрических сетей была усовершенствована с учетом динамики изменения значений параметров оборудования и влияния смежных фаз для повышения адекватности моделирования феррорезонансных процессов.

Наиболее сложной и ответственной частью модели распределительного устройства является модель электромагнитного трансформатора напряжения. Трансформаторы напряжения в электрических сетях 110-500 кВ имеют каскадное исполнение, соответственно каждый каскад был представлен отдельным трансформатором с неразветвленным магнитопроводом, что дало основание принять неизменным магнитный поток через все обмотки одного каскада. Гистерезисные свойства магнитопровода трансформатора были учтены с

использованием модели Джайлса-Атертона. Одним из основных свойств ферромагнетиков является зависимость коэрцитивной силы от скорости перемагничивания, в виду чего данная зависимость была впервые учтена в гистерезисной модели магнитопровода.

Электромагнитные измерительные трансформаторы напряжения в электрических сетях с эффективным заземлением нейтрали выполняются однофазными, из-за чего многие исследователи используют однофазные расчетные модели, не учитывающие межфазные связи. С целью учета межфазных связей и оценки их влияния на протекание феррорезонансных процессов в работе расчетная модель распределительного устройства была принята трехфазной.

На разработанной модели, прежде всего, было исследовано влияние межфазных связей, а именно межфазных емкостей и сопротивления, включенного в расщелку соединенных в треугольник дополнительных вторичных обмоток трансформатора напряжения. Установлено, что межфазные емкости оказывают влияние аналогичное эквивалентной фазной емкости шин и могут быть учтены путем соответствующей корректировки эквивалентной фазной емкости шин в однофазной модели. Доказано, что вблизи границ областей устойчивых феррорезонансных процессов, устойчивый феррорезонанс может иметь место лишь в одной из фаз. Что позволяет, при правильном учете межфазных параметров, перейти к однофазным моделям феррорезонансных схем.

Исследования показали, что при феррорезонансе на основной частоте скорость перемагничивания магнитопровода имеет большие значения, нежели при отсутствии феррорезонанса, а при субгармонических феррорезонансах скорость перемагничивания оказалась, наоборот, меньшей, нежели при отсутствии феррорезонанса. Установлено, что неучет данных зависимостей приводит к заниженным значениям граничной емкости делителей напряжения выключателей для феррорезонанса на основной частоте и завышенным – на субгармонических.

Проведены исследования и установлены зависимости между другими параметрами распределительного устройства (деформации кривой намагничивания трансформатора напряжения, отклонения напряжения на шинах распределительного устройства, величины нагрузки, количества параллельно работающих измерительных трансформаторов) и граничными значениями емкостей делителей напряжения феррорезонансных областей различных частот.

Полученные результаты исследования указывают на необходимость учета значительного количества параметров, которые ранее не учитывались в аналитических моделях исследования ФРП. Вместе с тем, учет всех этих параметров РП в аналитических моделях исследования ФРП, приводит к экспоненциальному росту степени сложности моделей и, соответственно, к значительным потерям времени при их формировании, и даже к принципиальной невозможности нахождения аналитических решений. Поэтому для решения задач обнаружения ФРП было предложено использовать аппарат нечетких множеств и нечеткой логики.

Разработаны три нечеткие модели для анализа феррорезонансных схем: модель нечеткого логического вывода Мамдани и две нейро-нечеткие сети на

основании нечеткого логического вывода Сугено (классическая, в которой выводы по каждому из правил задаются линейной функцией выходной переменной от значений входов, и упрощенная, в которой выводы по каждому из правил задаются константой).

Модель нечеткого логического вывода Мамдани имеет преимущество в прозрачности логического вывода. Однако даже после настройки ее параметров не удалось получить удовлетворительные для практики результаты.

Наивысшую точность отображения результатов показала классическая нейро-нечеткая сеть на основании модели нечеткого логического вывода Сугено.

Результаты проведенной работы нашли свое воплощение в виде программного обеспечения для анализа феррорезонансных схем.

Ключевые слова: феррорезонанс, эффективное заземление нейтрали, математическое моделирование, гистерезис, нечеткая логика.

Besarab A. The Analysis of Ferroresonance Processes Stability Domains in High Voltage Power Networks. – The manuscript.

The dissertation for scientific degree of Candidate in technical sciences on the speciality 05.14.02 – electrical power plants, networks and systems. - National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2015.

The thesis is devoted to improvement of models and development of new methods with the purpose of determination of ferroresonance processes stability domain edges in order to prevent switchgear failures in high voltage power networks with effectively grounded neutral.

The refined mathematical models of switchgear have been developed in this thesis. Great attention has been paid to representation accuracy of electromagnetic voltage transformer nonlinear model by application of hysteresis model in which the influence of magnetization reversal rate is taken into account. Three-phase switchgear model has been offered for the consideration of interphase coupling. Quantitative relations between boundary conditions of ferroresonance processes stability domain and switchgear parameters have been investigated. The results have been systematized and presented in the form of neuro-fuzzy network on the basis of Suheno fuzzy inference systems which made it possible to develop software for the ferroresonance processes analysis.

Keywords: ferroresonance effectively grounded neutral, mathematical modeling, hysteresis, fuzzy logic.