

**Міністерство освіти і науки України**  
**Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя**  
(повне найменування вищого навчального закладу)

**Центр перепідготовки та післядипломної освіти**

(повна назва факультету)

**електричної інженерії**

(повна назва кафедри)

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на здобуття освітнього ступеня

**магістр**

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Забезпечення надійності роботи високовольтних  
 трансформаторів напруги в розподільних мережах**

Виконав: студент (ка) 2 курсу, групи ЕТмз-61

спеціальності 141–

електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Поперечний А.Б.  
(прізвище та ініціали)

Керівник Буняк О.А.  
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Мовчан Л.Т.  
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Тарасенко М.Г.  
(прізвище та ініціали)

Рецензент   
(прізвище та ініціали)

Тернопіль  
 2023

Міністерство освіти і науки України  
**Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя**  
 ( повне найменування вищого навчального закладу )

Факультет \_\_\_\_\_ центр перепідготовки та післядипломної освіти \_\_\_\_\_  
 (повна назва факультету)  
 Кафедра \_\_\_\_\_ електричної інженерії \_\_\_\_\_  
 (повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
 Завідувач кафедри ЕІ  
 \_\_\_\_\_  
 (підпис) Тарасенко М. Г.  
 \_\_\_\_\_  
 (прізвище та ініціали)  
 “ 13 ” \_\_\_\_\_ листопада 2023 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня \_\_\_\_\_ магістр \_\_\_\_\_  
 (назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
 (шифр і назва спеціальності)

студенту \_\_\_\_\_ Поперечному Андрію Богдановичу \_\_\_\_\_  
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Забезпечення надійності роботи високовольтних трансформаторів напруги в розподільних мережах

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Буняк Олег Андронікович, к.т.н., доцент \_\_\_\_\_,  
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від “10” листопада 2023 р. № 4/7-1041

2. Термін подання студентом завершеної роботи 15 грудня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи: Трансформатори напруги НКФ на ланках 110-330 кВ

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Аналітичний розділ. 2. Розрахунково-дослідницький розділ. 3. Проектно-конструкторський розділ. 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Загальні висновки. Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Схема резонансного контуру. Схеми дослідження ФРП. Симуляційні осцилограми дослідження ФРП. Схема резервного захисту.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Гурик О.Я., к.т.н., доцент		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Клепчик В.М., старший викладач		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 13 листопада 2023 року \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел та патентний пошук	15.10.23 - 01.11.23	
2	Аналітичний розділ	15.10.23 - 01.11.23	
3	Розрахунково-дослідницький розділ	15.10.23 - 01.11.23	
4	Проектно-конструкторський розділ	15.10.23 - 01.11.23	
5	Заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	15.10.23 - 01.11.23	
6	Формування пояснювальної записки та плакатів по кваліфікаційній роботі	01.11.23 - 15.12.23	
7	Попередній захист кваліфікаційної роботи	15.12.23 - 20.12.23	

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Поперечний А.Б.

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

Буняк О. А.

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

**Кваліфікаційна робота.** Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Центр перепідготовки та післядипломної освіти. Кафедра електричної інженерії, група ЕТмд-61. – Тернопіль.: ТНТУ, 2023.

В кваліфікаційній роботі розглянуто питання підвищення надійності первинних перетворювачів напруги в схемах обліку електричної енергії.

Здійснений аналіз причин пошкодження *ТН* та подана оцінка виникнення *ФРП* у нелінійних колах змінного струму.

Побудовані структурні моделі основних елементів мережі для дослідження розвитку та проходження *ФРП*.

Розглянуті заходи запобігання виникнення на зриву *ФРП* для зниження пошкодження *ТН*.

Проведені симуляційних дослідження щодо вибору методу надійного захисту трансформаторів напруги від *ФРП*.

**Ключові слова:** трансформатор напруги, структурна модель ферорезонансний процес.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП .....</b>	<b>5</b>
<b>1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА .....</b>	<b>8</b>
1.1 Аналіз пошкоджуваності трансформаторів напруги при експлуатації в розподільних мережах .....	8
1.2 Ферорезонансні процеси в розподільних мережах .....	10
1.3 Методика визначення можливості виникнення ферорезонансу в розподільних злагодях 110÷500кВ .....	11
1.4 Висновки до першого розділу .....	14
<b>2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ .....</b>	<b>16</b>
2.1 Моделювання елементів розрахункової схеми .....	16
2.2 Дослідження виникнення <i>ФРП</i> на розподільній злагоді 220кВ .....	25
2.3 Висновки до другого розділу .....	28
<b>3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ .....</b>	<b>30</b>
3.1 Аналіз заходів запобігання виникнення <i>ФРП</i> .....	30
3.2 Пристрої для зриву <i>ФРП</i> .....	32
3.3 Дослідження ефективності методів придушення <i>ФРП</i> .....	36
3.4 Резервний захист .....	52
3.5 Висновки до третього розділу .....	56
<b>4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ</b>	<b>58</b>
4.1 Заходи з охорони праці та техніки безпеки на підстанції .....	58
4.2 Заходи щодо підвищення стійкості роботи трансформаторної підстанції за умов надзвичайних ситуацій .....	62
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>65</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....</b>	<b>67</b>

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Основним завданням енергетичної системи є безперебійне електропостачання споживачів, що залежить від надійності роботи елементів розподільних мереж. Як показують дослідження, найбільш вразливими елементами є первинні перетворювачі напруги (*ППН*), які використовуються в схемах обліку електричної енергії та релейного захисту. Устаткування підстанцій, їх шини мають ємності, активні провідності на землю, які зумовлені розмірами обладнання та зношеністю ізоляції. Високовольтний трансформатор напруги (*ТН*) характеризується в першу чергу нелінійною характеристикою намагнічування магнітопроводу та малим активним опором [1].

Однією з причин аварій *ППН* – наявність в розподільних мережах нелінійних індуктивних елементів, що призводить до виникнення ферорезонансних перенапруг (*ФП*), які виникають в розподільних мережах високої напруги внаслідок несприятливого поєднання схем приєднання та відповідних енергетичних процесів. Вказані процеси починаються не очікувано, розвиваються стрімко та супроводжуються високими напругами та струмами. Основні елементи розподільних мереж пошкоджуються внаслідок електричного пробою ізоляції та через термічну дію [2].

Постійні процеси перемикання обладнання в розподільних мережах, атмосферні явища, підключення/відключення трансформаторів або навантажень, короткі замикання, обслуговування обладнання без зняття напруги, можуть стати умовою переходу від усталеного режиму до ферорезонансного усталеного режиму, що призводить до пошкодження трансформаторів напруги.

Класичні методи боротьби з перенапругами не вирішують проблеми, яка викликана ферорезонансними процесами (*ФРП*) із за короткочасної дії.

Тому актуальним питанням є розробка заходів недопущення *ФРП* та аналіз пристроїв їх придушення.

**Мета і завдання дослідження.** Метою кваліфікаційної роботи є забезпечення надійності експлуатації *ТН* в розподільних мережах 220 кВ за рахунок запобігання та придушення *ФРП* й вибору пристроїв захисту.

Відповідно до вказаної мети необхідно розв'язати наступні завдання:

- провести аналіз пошкоджуваності *ТН*, які пов'язані з їх магнітними характеристиками та дослідити характер їх зміни в процесі експлуатації;
- здійснити побудову математичних моделей для дослідження виникнення та проходження *ФРП* в розподільних мережах з *ТН*;
- за результатами досліджень запропонувати способи запобігання й придушення *ФРП* та пристрої захисту.

**Об'єкт дослідження** – процеси в розподільних мережах з первинними перетворювачами напруги.

**Предмет дослідження** – підвищення надійності експлуатації розподільних мереж зниженням пошкоджуваності високовольтних трансформаторів напруги.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

- отримало подальший розвиток побудова математичних моделей для дослідження розвитку *ФРП* з розподільних мережах з трансформаторами напруги.

**Практичне значення отриманих результатів.** Запропоновані способи запобігання й придушення *ФРП* дозволять підвищити надійність роботи трансформаторів напруги.

**Апробація.**

Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на XII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“ (6-7 грудня 2023 року), Тернопіль, Тернопільський національний університет імені Івана Пулюя.

**Структура роботи.** Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (20 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини – 69 сторінок, 3 таблиці, 31 рисунок.



## 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

### 1.1 Аналіз пошкоджуваності трансформаторів напруги при експлуатації в розподільних мережах

Надійність та безперебійність функціонування енергетичної системи залежить від надійної роботи електрообладнання. Важливу роль у надійності та неперервності функціонування системи електропостачання відіграють первинні перетворювачі напруги (*ППН*). Вони відокремлюють від ланок високої напруги вторинні кола, до яких приєднані пристрої вимірювання, автоматики та забезпечують задане значення вторинної напруги ( $100\text{ В}$ ) за різних номінальних первинних напругах. Від їх роботи залежить точність вимірювання та обліку електроенергії, а також правильність роботи релейного захисту та системної автоматики. Тому, первинні перетворювачі напруги повинні забезпечувати високу надійність роботи, як апарати високої напруги, та необхідну точність, як вимірювальні пристрої [1-4].

Первинно в цьому випадку необхідно провести аналіз відмов обладнання в високовольтних розподільних мережах, враховуючи постійне зростання кількості зношеного силового устаткування – 17,3 % обладнання підстанцій і 56 % ліній електропередачі мають термін експлуатації більше 40 років. Як правило, це обладнання ланок  $220\text{ кВ}$  та вище. Як приклад представимо розподіл відмов за основним силовим обладнанням ланок  $330\text{ кВ}$  (рисунок 1.1) [1-4].

На наш погляд велику частку відмов становлять високовольтні трансформатори напруги (*ТН*).

На сучасному рівні оцінку технічного стану трансформаторного устаткування проводять фізико-хімічними методами дослідження ізоляції.

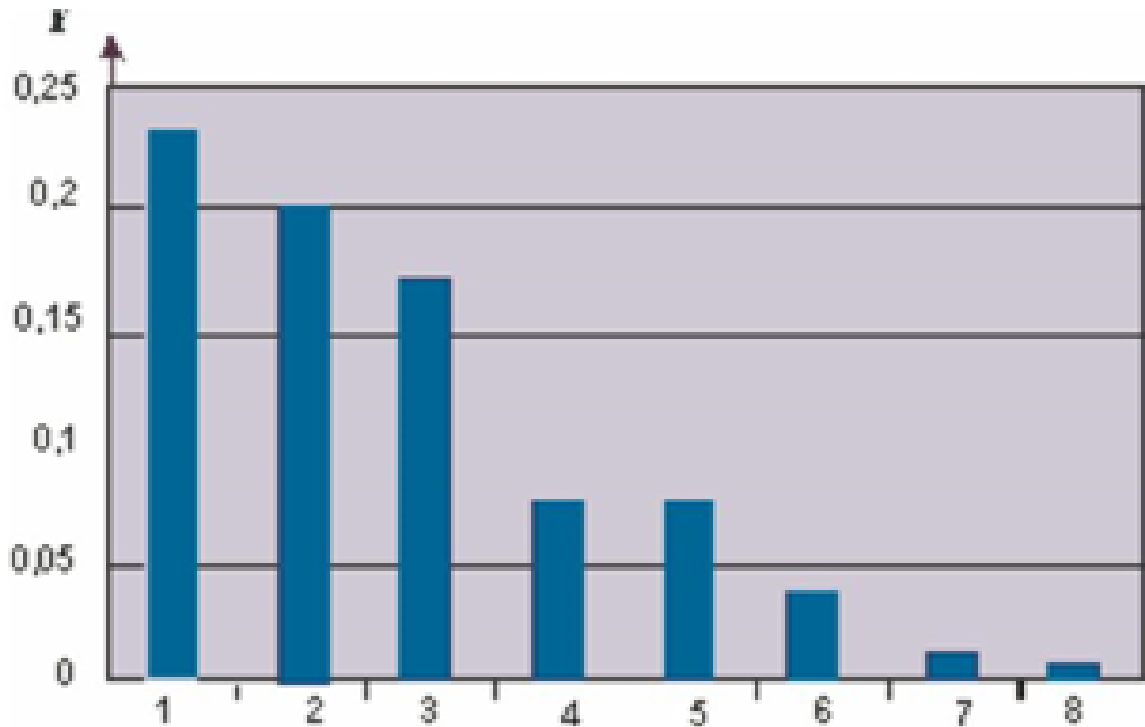


Рисунок 1.1 – Розподіл питомої частоти відмов обладнання розподільних ланок 330 кВ:

1 – вимикачі повітряні; 2 – силові трансформатори; 3 – роз'єднувачі;  
 4 – вимикачі оливні; 5 – трансформатори струму; 6 – збірні шини;  
 7 – трансформатори напруги; 8 – розрядники.

На наш погляд велику частку відмов становлять високовольтні трансформатори напруги.

На сучасному рівні оцінку технічного стану трансформаторного устаткування проводять фізико-хімічними методами дослідження ізоляції.

Як показує аналіз основними причинами пошкодження високовольтних трансформаторів напруги є ферорезонансні процеси (ФРП). Крім ФРП Основні причини пошкодження *ТН* :

- пробій основної ізоляції обмотки (зволоження) з спрацюванням релейного захисту та переведення *ТН* в режим короткого замикання (процес розвивається на протязі декількох місяців (хроматографічний метод дослідження));

- пробій виткової ізоляції (зволоження, дефект) з спрацювання

релейного захисту та пошкодженням *ТН* (процес розвивається на протязі декількох хвилин).

## 1.2 Ферорезонансні процеси в розподільних мережах

В процесі експлуатації розподільних мереж в енергосистемі виникає необхідність вимкнення/ввімкнення груп енергетичних об'єктів (лінії, силові трансформатори) або проведення оперативних перемикачів.

*ФРП* можливі в електричних мережах усіх класів напруг, але, як показує аналіз [1-3] найбільшу небезпеку вони становлять в розподільних мережах 110–500 кВ, де присутні великі струми замикання на землю. Вказані явища частіше виникають після вимкнення секції шин з приєднаним до них трансформатором напруги або при неповнофазному увімкненні/вимкненні не на робочому ході силових трансформаторів вакуумними (елегазовими) вимикачами з ємнісними дільниками напруги. Під час виникнення таких режимів пошкоджується ізоляція витків *ППН*, що призводить до можливості пошкодження та виникненні пожежі на розподільній зладі підстанції, що може призвести до довгочасних аварійних перерв [5]. Описана ситуація є недопустима з позиції надійності електропостачання та забезпечення споживачів електричної енергією необхідної якості.

Вихід з ладу *ППН* є одна з основних причин зниження рівня електричної безпеки в мережах із заземленою нейтраллю, бо, як було означено у вступі кваліфікаційної роботи *ППН* застосовуються у схемах у схемах обліку електроенергії та контролю напруги [5].

*ФРП* при яких пошкоджуються *ППН*, виникають в розподільних мережах із заземленою нейтраллю, коли система шин з приєднаними до неї трансформаторами напруги (*ТН*) типу *НКФ* втрачає безпосередній «зв'язок» з мережею, яка знаходиться під напругою. «Зв'язок» відбувається

лише через ємнісні подільники вимкнених вимикачів, загальна кількість яких для кожної системи шин у розподільних ланках може змінюватись у великих діапазонах, в залежності від режиму [5, 11].

Наприклад, від одного (секційний вимикач, якщо всі інші вимкнені та секції не отримують робочої напруги чи відділені шинними роз'єднувачами) до максимальної кількості, яка дорівнює кількості всіх приєднань (якщо всі вимкнені вимикачі знаходяться під робочою напругою за увімкнених шинних роз'єднувачів) [5].

Це призводить до створення ферорезонансного контуру: сумарна ємність дільників напруги повітряних вимикачів – ємність шин – нелінійна індуктивність  $TН$ , що можливо як при ремонтних перемиканнях, так і при спрацюванні захисту шин.

При цьому процес пошкодження  $TН$  розвивається так [12, 13]:

– при вимкненні останнього вимикача, що сполучає шини з системною напругою, виникає тривалий ферорезонанс, який призводить до неприпустимого рівня струму у первинній обмотці  $TН$ , який викликає перегрів обмотки, пошкодження ізоляції та значного зростає напруги, яка прикладена до  $TН$ . При цьому, перетоки енергії через ємнісні дільники вимикачів відносно незначні (потужність джерела енергії обмежена відносно великим опором ємнісного зв'язку) і тому суттєвих пошкоджень  $TН$  на цьому етапі не відбувається.

– після вимкнення останнього з шинних роз'єднувачів у вимикачів розриваються всі ємнісні зв'язки з джерелом живлення й ферорезонансний процес припиняється;

– при наступному увімкненні вже фактично пошкодженого  $TН$  на робочу напругу та відтворення початкової схеми роботи підстанції відбувається повне руйнування  $TН$ , внаслідок великих внутрішніх струмів.

### 1.3 Методика визначення можливості виникнення ферорезонансу в розподільних мережах 110 ÷ 500 кВ

Основним різновидом *ЛПН* [14] є електромагнітний *ТН* із замкненим феромагнітним осердям. На первинну обмотку *ТН* подається вимірювана напруга, а на затискачах вторинної – отримується напруга, яка пропорційна первинній. Звичайні одно каскадні *ТН* для високих напруг є громіздкі та дорогі. Тому за  $U_{ном} > 110 \text{ кВ}$  *ТН* виконуються електромагнітними каскадами (рисунок 1.2).

Масляні каскадні *ТН* [15] складаються з одного (*НКФ* – 110), двох (*НКФ* – 220), трьох (*НКФ* – 330), чотирьох (*НКФ* – 400, *НКФ* – 500) послідовно увімкнених блоків (каскадів). Кожен блок складається з двох стрижневого магнітопроводу з двома обмотаними стрижнями (рисунок 1.3). Первинна обмотка (*ВН*) рівномірно розподілена по стрижнях магнітопроводу. Обидві вторинні обмотки (*НН*) – основна та додаткова, розташовані на нижньому стрижні магнітопроводу останнього каскаду, що має найнижчий потенціал за відношенням до землі (один кінець його *ВН* заземляється). На решті стрижнів розташовані також проміжні – вирівнювальна та зв'язуюча обмотки, необхідні для рівномірного розподілу напруги та навантаження між електромагнітними каскадами (блоками).

У склад кожного блоку входить активна частина (магнітопровід з обмотками). На активній частині розміщена фарфорова покришка, заповнена трансформаторною олією та закрита оливо розширювачем. Лінійний вивід *А* обмотки *ВН* знаходиться на кришці верхнього оливо розширювачем, а вивід заземлення обмотки *ВН* – *Х* та виведення обмоток *НН* підведені до панелі затискачів, які розташовані в основі останнього каскаду. З'єднання блоків виконується електрично за допомогою перемичок, через з'єднання введення на кришці оливо розширювача нижнього блоку з дном верхнього блоку.

Для проведення заходів для запобігання та придушення ферорезонансу в розподільних мережах електростанцій та підстанцій необхідно [16, 17]:

- виявити розподільні злагоди 110 ÷ 500 кВ електростанцій (підстанцій) енергетичної системи та схеми розподільних мереж, в яких можливе виникнення ферорезонансу, та оцінити по черговість оперативних переключень;

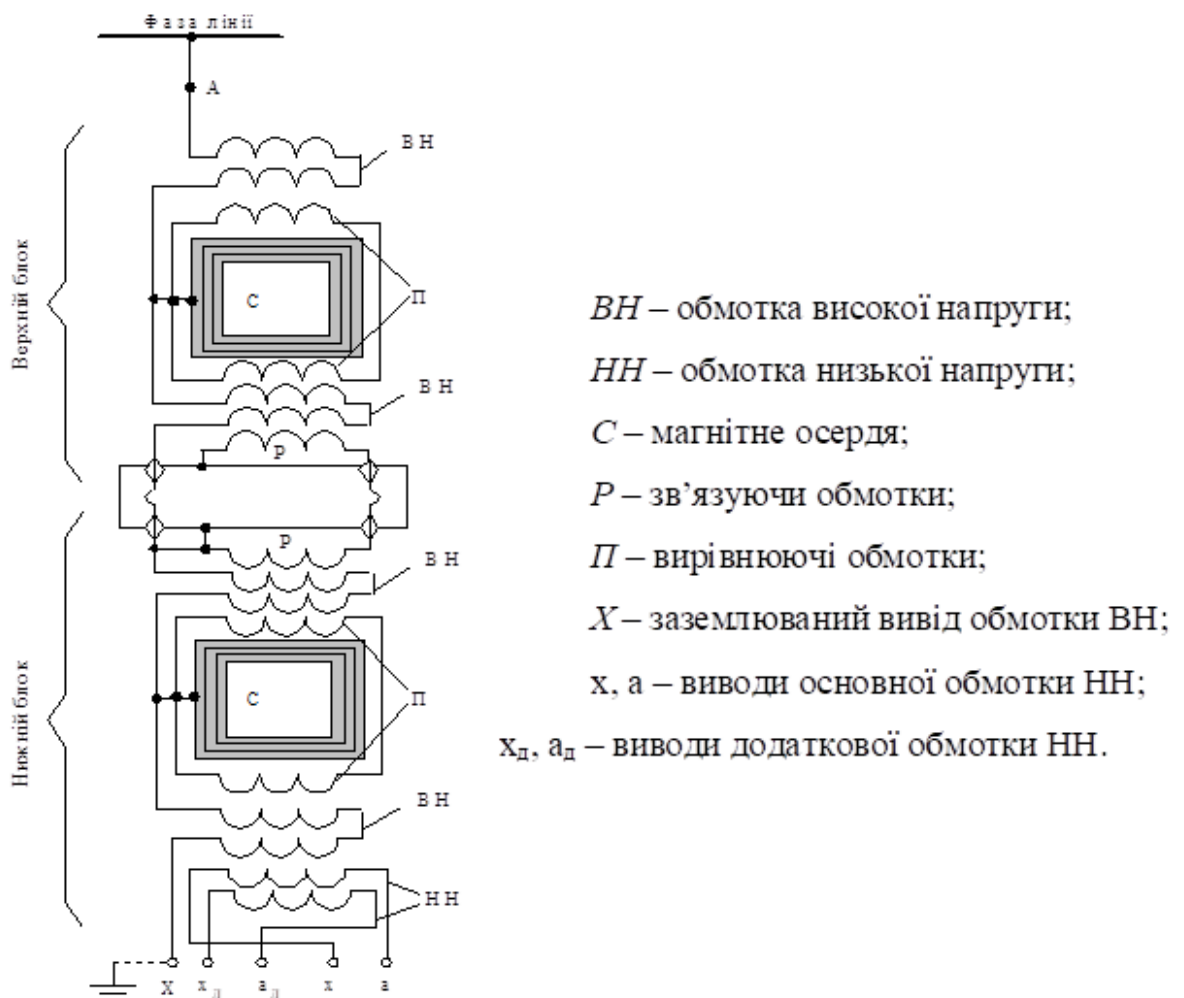


Рисунок 1.2 – Принципова електрична схема двокаскадного трансформатора напруги типу НКФ – 220.

- здійснити побудову первинної та спрощеної розрахункових схем

розподільної злагоди (частин розподільної злагоди) 110 ÷ 500 кВ, в яких можливий ферорезонанс;

- визначити можливість виникнення ферорезонансу та параметри цього режиму з використанням програмних заходів розрахунку;

- при виникненні, оцінити ферорезонанс за рівнями резонансного зростання напруги та струму, що виникають в *ТН*.

Визначення схем розподільної злагоди, в яких можливий ферорезонанс, повинно виконуватись для робочих (нормативних), схем при оперативних перемиканнях, схем, автоматичного вимкнення в разі спрацювання елементів *РЗА*.

Під час складання розрахункових схем розподільної злагоди (частин розподільної злагоди) необхідно користуватися паспортними (експлуатаційними) значеннями ємності частин розподільних пристроїв та обладнання, паспортними (експлуатаційними) значеннями ємнісних подільників напруги вимикачів.

#### 1.4 Висновки до першого розділу

Основні причини, які викликають пошкодження *ТН*, пов'язані зі специфічними процесами, які мають місце у нелінійних колах змінного струму та пов'язані з замиканням фази електромережі на землю. Переважно *ФРП* виникають в результаті резонансу нелінійних індуктивностей намагнічування трансформаторів напруги, нейтраль яких заземлена, з ємностями фаз відносно землі електрично зв'язаних з *ТН* елементів мережі.

Під час таких процесів магнітопроводи трансформаторів напруги переходять в стан глибокого насичення і струми намагнічування, які протікають по обмотках високої напруги *ТН* зростають в декілька, а то й десятки разів у порівнянні з допустимими. Протікання таких струмів є небезпечним з точки зору термічної стійкості обмоток високої напруги *ТН*,

про що свідчать статистичні дані.

Метою запобігання та припинення ферорезонансних процесів в схемах розподільної злагоди 110 ÷ 500 кВ, що мають електромагнітні *ТН* та вимикачі з ємнісними дільниками напруги є недопущення пошкоджень електромагнітних *ТН* і пов'язаних з цим вимкнень шин та іншого електрообладнання, а також забезпечення правильності дій пристроїв *АПВ* шин та безпеки роботи персоналу.

Проведений аналіз показує, що необхідно розглянути найбільш ефективні існуючі заходи та засоби по недопущенню виникнення або зриву ферорезонансних процесів з метою відвернення пошкодження трансформаторів напруги.



## 2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Моделювання елементів розрахункової схеми

Дослідження виникнення та проходження *ФРП* розпочинаємо проводити з побудови структурних моделей елементів розподільної мережі з врахуванням усіх факторів [4, 14].

Розглядаємо спрощену схему електроенергетичної системи яку представлено на рисунку 2.1, *а*. Розрахункова схема ферорезонансного контуру рисунок 2.1, *б*, «*ТН* – вимикач – шина».

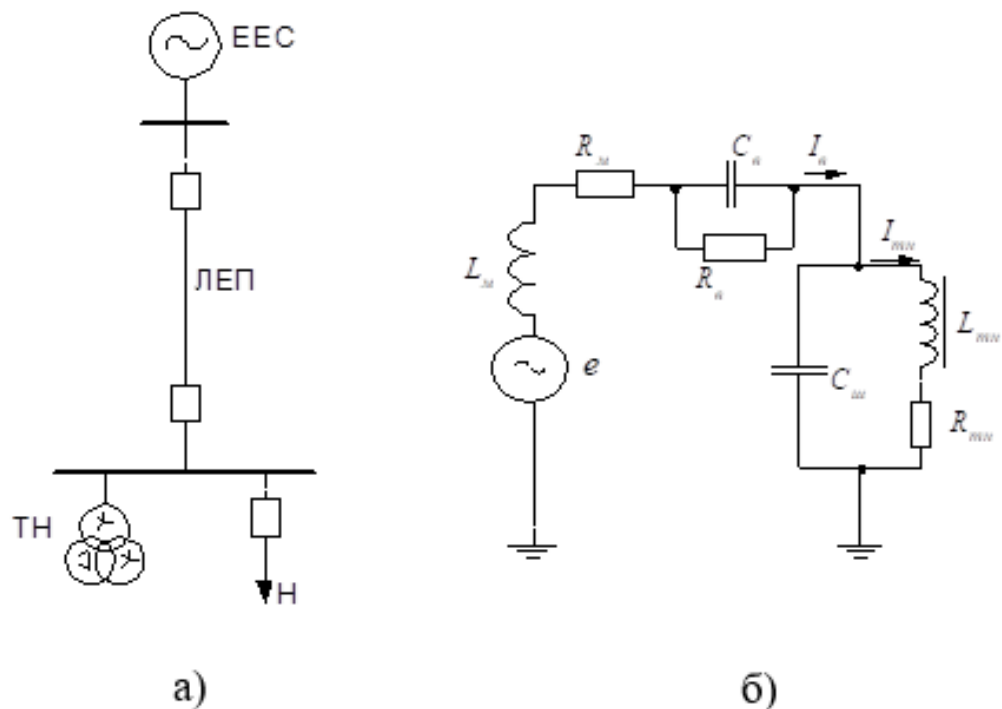


Рисунок 2.1 – Спрощена схема електроенергетичної системи (*а*);  
розрахункова схема ферорезонансного контуру (*б*).

Як видно із рисунка 2.1, *б*, в послідовно-паралельному резонансному контурі, резонанс виникає за рахунок послідовного увімкнення ємності  $C_a$  вимкненого вимикача з нелінійною індуктивністю  $L_{mn}$  обмотки *ВН ТН*.

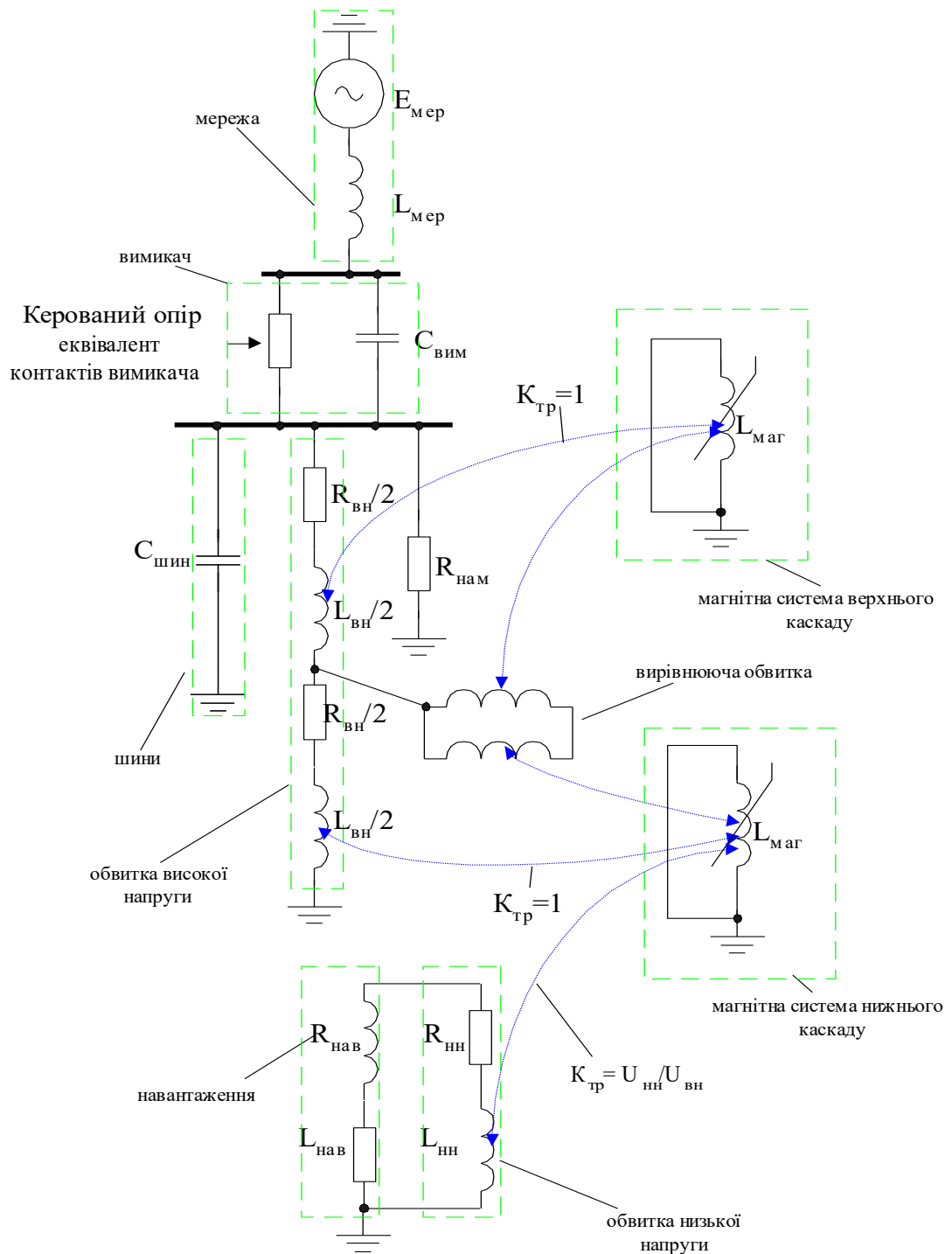


Рисунок 2.2 – Однофазна схема ферорезонансного контуру з двокаскадним *ТН*.

Моделювання *ФРП* за схемою на рисунку 2.1, б здійснюємо за допомогою програмного комплексу для дослідження електротехнічних систем) [11].

Розрахункова схема заміщення (рис. 2.2) побудована з врахуванням допущень:

- ємності фаз по відношенню до землі – зосереджені;
- навантаження споживачів не враховується;
- залишкова намагніченість  $TН$  рівна нулю;
- опір ізоляції мережі (вважається ідеальною) не враховується.

У схемі заміщення взаємозв'язаних електричних та магнітних кіл останні замінюємо електричними вітками, в яких потокозчеплення відповідає струму, зведений магнітний опір – індуктивності, коефіцієнт трансформації – взаємо індуктивності.

На підвищених частотах спостерігають коливання, пов'язані з хвильовими процесами, які схемою з зосередженими параметрами не враховує, але з достатньою достовірністю відображає середньостатистичні коливання та аперіодичні процеси. Тому, запропонована схема заміщення з прийнятими допущеннями придатна для дослідження  $\Phi PП$  у  $TН$ .

### **Параметри системи електропостачання.**

На рисунку 2.3 подана трифазна система електропостачання, яка задається наступними параметрами [6]:

- джерелами  $EPC$  (амплітудою, фазою, частотою) кожної фази;
- активними, індуктивними опорами кожної фази.

Значенням напруги системи приймаємо напругу на шинах – 220 кВ.

При цьому миттєві значення  $EPC$  фаз рівні:

$$e_A = \frac{220 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\omega t); \quad e_B = \frac{220 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\omega t - 120); \quad e_C = \frac{220 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\omega t + 120).$$

Враховуючи прийняте допущення – нехтування струмами навантаження споживачів, активні, індуктивні опори системи задаємо як постійні параметри, що характеризують потужність мережі електропостачання

220 кВ.

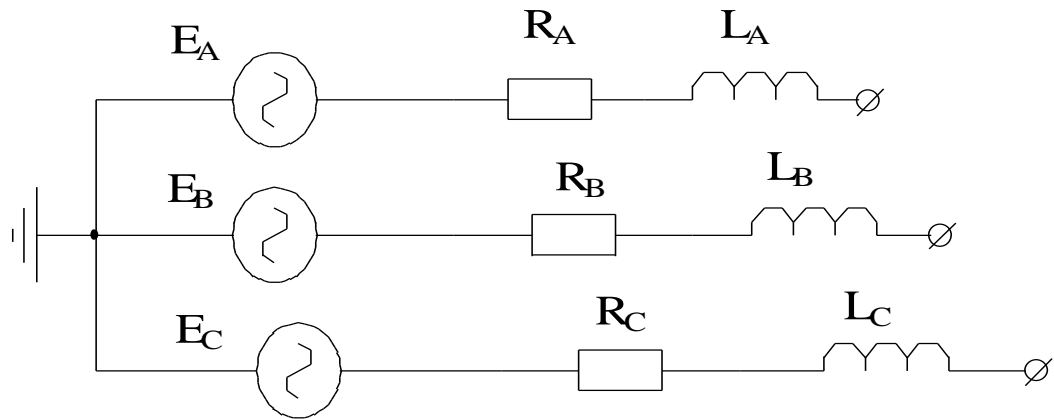


Рисунок 2.3 – Схема заміщення системи електропостачання.

### Моделювання трансформатора напруги.

*ТН* працюють у режимі, близькому до неробочого ходу вторинної обмотки, а режим короткого замикання – недопустимий [15]. В залежності від значення вторинного навантаження *ТН* можуть працювати з певним класом точності.

При зростанні навантаження понад номінальне у певному класі точності, *ТН* працює з гіршим класом точності. Тому під час моделювання *ТН*, опір вторинної обмотки вибираємо таким, щоби задовольняти умови режиму неробочого ходу вторинної обмотки. Це суттєво не впливає на результати дослідження [11, 12].

Магнітна система трансформатора *ТН* в обчислювальному комплексі *RE* [16] задаємо нелінійною індуктивністю з характеристикою  $\psi = f(i)$ , що відповідає характеристиці намагнічування трансформаторної сталі ( таблиця 2.1, рис. 2.4) ( $\psi^*$ ,  $i^*$  – відносні величини робочого потокозчеплення та струму намагнічування, відповідно).

*ТН* в обчислювальному комплексі [16] описуємо аналогічно силовому трансформатору. *ТН* у розрахунковій схемі рисунку 2.2 задаємо з наступними параметрами:

- активними опорами, індуктивними опорами розсіювання кожної обмотки;
- динамічною індуктивністю основного потоку, згідно вебер-амперної характеристики;
- коефіцієнтами трансформації.

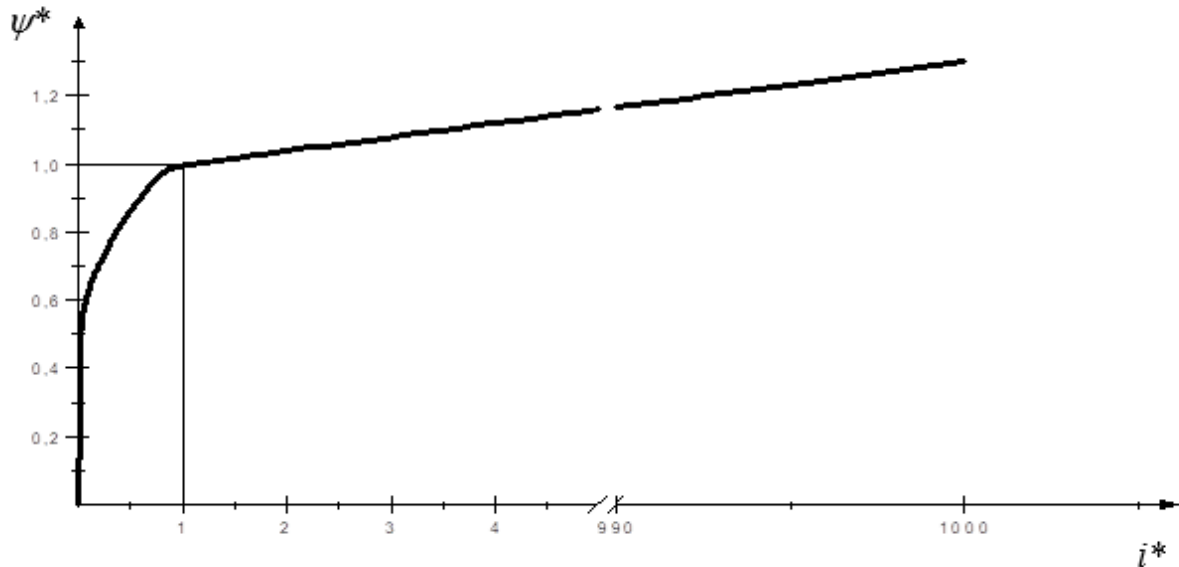


Рисунок 2.4 – Характеристика намагнічування трансформаторної сталі.

Таблиця 2.1 – Характеристика намагнічування трансформаторної сталі

	1	2	3	4	5	6	7	8
$\psi^*$	0.878	0.174	0.261	0.348	0.435	0.522	0.609	0.696
$i^*$	$3,16e^{-3}$	$6,34e^{-3}$	0,01	0,013	0,014	0,017	0,068	0,186

9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0.739	0.783	0.826	0.88	0.913	0.957	1	1.1	1.2	1.3
0,251	0,331	0,406	0,586	0,722	0,856	1	10	100	1000

Значення параметрів схеми заміщення *ТН* згідно рис. 2.2 приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри схеми заміщення *ТН*

Параметри каскаду обмотки		Параметри вторинної основної обмотки		Параметри вторинної додаткової обмотки		Параметри зв'язувальної обмотки	
$r_{BH(\kappa)}$ , <i>Ом</i>	$L_{BH(\kappa)}$ , <i>мГн</i>	$r_{BH(z)}$ , <i>Ом</i>	$L_{BH(z)}$ , <i>мГн</i>	$r_{BH(p)}$ , <i>Ом</i>	$L_{BH(p)}$ , <i>мГн</i>	$r_{\omega o}$ , <i>Ом</i>	$L_{\omega o}$ , <i>мГн</i>
4500	186000	0.107	0.44	0.14	0.58	0.223	0.918

Активний опір вітки намагнічування –  $R_m = 1.1 \cdot 10^{10}$  Ом.

Розрахунок коефіцієнтів трансформації:

$$K_{T1} = 1;$$

$$K_{T2} = \frac{U_{HH(z)}}{U_{BH(\kappa)}} = \frac{100/\sqrt{3}}{110000/\sqrt{3}} = \frac{1}{1.1 \cdot 10^3} = 0,00091;$$

$$K_{T3} = \frac{U_{HH(p)}}{U_{BH(p)}} = \frac{100}{110000/\sqrt{3}} = 0,00157;$$

$$K_{T(30)} = \frac{U_{HX(\omega o)}}{U_{BH(\kappa)}} = \frac{121,4}{110000/\sqrt{3}} = 0,0019116.$$

де  $U_{BH(\kappa)}$  – лінійна напруга *BH*, що припадає на каскад *ТН*;

$U_{HH(z)}$  – лінійна напруга на основній обмотці *HH* («зірка»);

$U_{HH(p)}$  – фазна напруга у додатковій обмотці *HH* (розімкнений «трикутник»);

$U_{HX(\omega o)}$  – напруга неробочого ходу каскаду;

$K_{T1}$  – коефіцієнт трансформації між обмоткою *BH* та магнітопроводом;

$K_{T2}$  – коефіцієнт трансформації між обмоткою *BH* та основною обмоткою *HH*;

$K_{T3}$  – коефіцієнт трансформації між первинною та додатковою обмотками  $HN$ ;

$K_{T(30)}$  – коефіцієнт трансформації між первинною та зрівнювальною обмотками.

Параметри магнітного кола, розраховуємо за значеннями в таблиці 2.1, враховуючи, що:

$$i_{nx(вк)} = I_{nx(вн)} \cdot K_T = \sqrt{2} \cdot 26,8 \cdot \frac{100}{110 \cdot 10^3} = 0,03446 \text{ A};$$

$$i_{nx(нк)} = I_{nx(нн)} \cdot K_T = \sqrt{2} \cdot 26,75 \cdot \frac{100}{110 \cdot 10^3} = 0,03428 \text{ A};$$

$$\psi_{nx(к)} = \frac{U_{вн(к)}}{\omega} = \frac{110 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{2}}{314 \cdot \sqrt{3}} = 286,034 \text{ Вб},$$

де  $i_{nx(вк)}$  – струм верхнього каскаду (неробочий хід);

$i_{nx(нк)}$  – струм нижнього каскаду (неробочий хід);

$I_{nx(вн)}$  – струм верхнього каскаду, зведеного до низької сторони (неробочий хід);

$I_{nx(нн)}$  – струм неробочого ходу нижнього каскаду, зведеного до низької сторони;

$U_{вн(к)}$  – номінальна напруга каскаду;

$K_T$  – коефіцієнт трансформації;

$\psi_{nx(к)}$  – потокозчеплення при номінальній напрузі каскаду.

### **Моделювання шин 220 кВ.**

Параметри шин 220кВ мають визначальний вплив на виникнення та проходження ФРП, оскільки під час ФРП до ємностей шин у ферорезонансному контурі підводиться напруга, необхідна та достатня для ФРП [5]. *Висновок:* параметри ємності шин необхідно відтворити якомога точніше.

Погонний активний опір шини:

$$r_0 = \frac{\rho_{Al}}{F}, \quad (2.1)$$

де  $\rho_{Al}$  – питомий опір алюмінію,  $\rho_{Al} = 28,9 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{км}$ ;

$F$  – поперечний переріз проводу (шини),  $\text{мм}^2$ .

Погонний індуктивний опір шини:

$$X_0 = 144,5 \cdot 10^{-3} \cdot \lg\left(\frac{D_{cp}}{a}\right) + 0,016 \quad (2.2)$$

де  $D_{cp} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}$  – середня відстань між осями шин;

$a$  – радіус шини.

Індуктивність шини:

$$L_0 = X_0 / \omega \quad (2.3)$$

Погонну електричну ємність ліній та шин розраховуємо за методом дзеркальних відображень [7]. Задаємося геометричними розмірами проводів фаз, взаємним їх розміщенням та розташуванням відносно землі (рис. 2.5, 2.6).

Визначаємо потенціальні коефіцієнти з системою рівнянь:

$$\begin{aligned} \alpha_{11} &= \frac{2}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot H_1}{a}\right); \quad \alpha_{22} = \frac{2}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot H_2}{a}\right); \\ \alpha_{33} &= \frac{2}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot H_3}{a}\right); \\ \alpha_{12} = \alpha_{21} &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \ln\left(\frac{D_{12'}}{D_{12}}\right); \quad \alpha_{13} = \alpha_{31} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \ln\left(\frac{D_{13'}}{D_{13}}\right); \\ \alpha_{23} = \alpha_{32} &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \ln\left(\frac{D_{23'}}{D_{23}}\right). \end{aligned} \quad (2.4)$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність повітря,  $\varepsilon = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ К} / (\text{В} / \text{м})$ .

$H_1, H_2, H_3$  – відстань від відповідної фази до землі;

$D_{12}, D_{13}, D_{23}$  – міжфазні відстані;

$D_{12'}, D_{13'}$  – відстань між фазою 1 та дзеркальним відображенням відносно фаз 2, 3;



$D_{23'}$  – відстань між фазою 2 та дзеркальним відображенням фази 3.

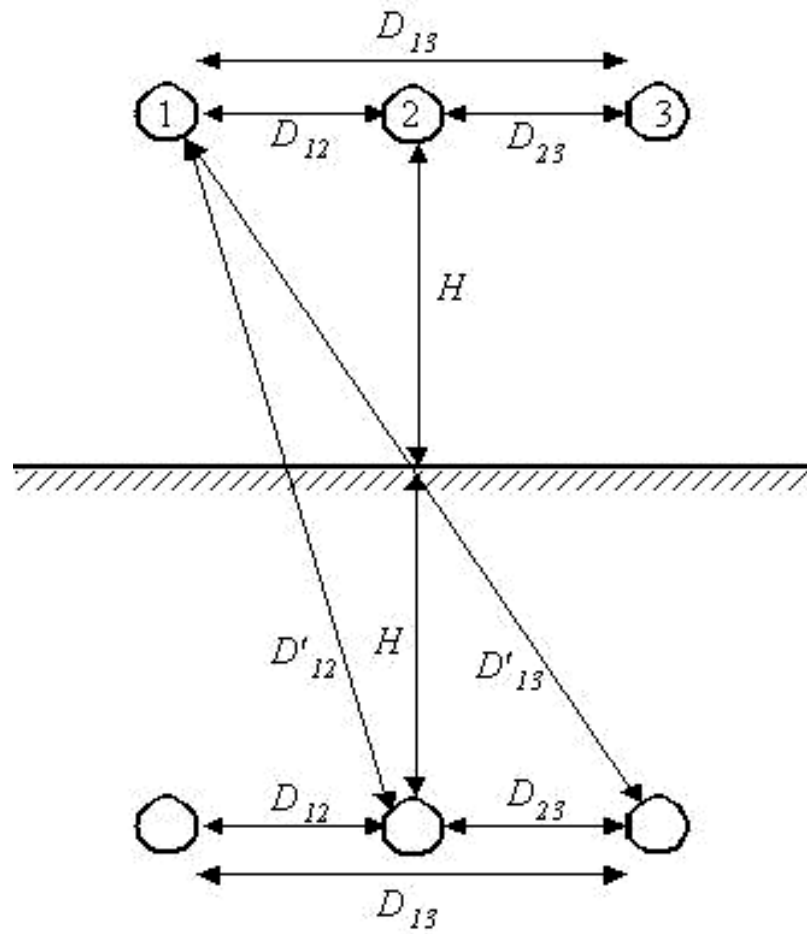


Рисунок 2.5 – Розріз трифазної системи шин із дзеркальним відображенням.

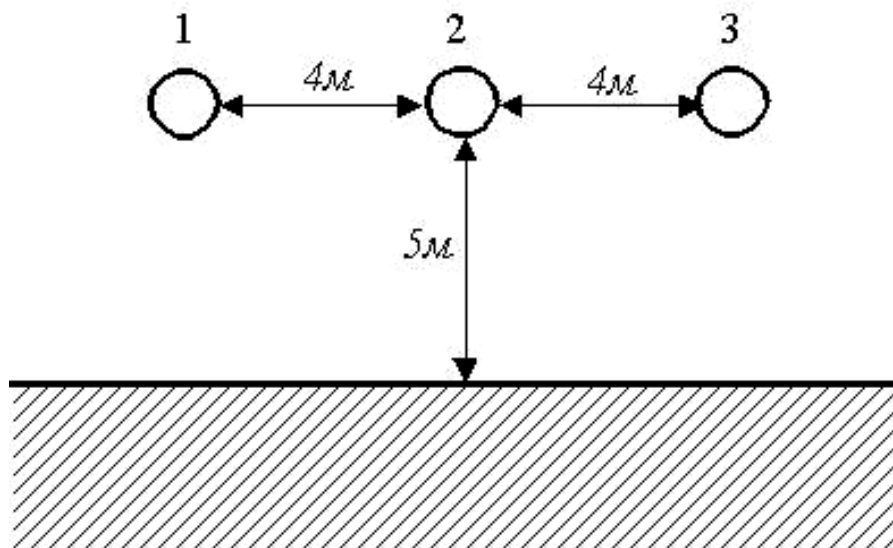


Рисунок 2.6 – Просторове розміщення проводів шин.

Використовуючи значення потенціальних коефіцієнтів (2.4), визначник матриці буде:

$$D = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{pmatrix}.$$

Розраховуємо погонні ємності шин і погонні міжфазні ємності [7]:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{\alpha_{23} \cdot (\alpha_{12} - \alpha_{23}) + \alpha_{33} \cdot (\alpha_{22} - \alpha_{12}) + \alpha_{13} \cdot (\alpha_{32} - \alpha_{22})}{D}; \\ C_2 &= \frac{\alpha_{13} \cdot (\alpha_{32} - \alpha_{13}) + \alpha_{11} \cdot (\alpha_{33} - \alpha_{23}) + \alpha_{12} \cdot (\alpha_{13} - \alpha_{33})}{D}; \\ C_3 &= \frac{\alpha_{12} \cdot (\alpha_{23} - \alpha_{12}) + \alpha_{11} \cdot (\alpha_{22} - \alpha_{23}) + \alpha_{13} \cdot (\alpha_{21} - \alpha_{22})}{D}; \\ C_{12} &= \frac{\alpha_{12} \cdot \alpha_{23} - \alpha_{13} \cdot \alpha_{32}}{D}; \quad C_{13} = \frac{\alpha_{13} \cdot \alpha_{22} - \alpha_{12} \cdot \alpha_{23}}{D}; \\ C_{23} &= \frac{\alpha_{23} \cdot \alpha_{11} - \alpha_{21} \cdot \alpha_{13}}{D}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Погонні ємності шин розраховуємо згідно схеми на рисунку 2.6 за рівняннями (2.5), прийнявши для шин розподільної злагоди 220кВ [21]:

- фази шин розміщені горизонтально на висоті 5 метрів;
- відстань між сусідніми фазами 4 метри.

## 2.2 Дослідження виникнення ФРП на розподільній злагоді 220 кВ

Для проведення досліджень в програмному середовищі [7] було створено симуляційну модель розподільчої злагоди напругою 220кВ, де враховані: фазні та міжфазні зв'язки, каскадна організацію ТП, особливості намагнічування магнітопроводу.

За існуючою схемою електричних з'єднань розподільна злагода 220кВ містить дві секції робочих шин із приєднанням до них чотирьох повітряних ліній та автотрансформаторні групи АТ1 та АТ2 (рисунок 2.7).

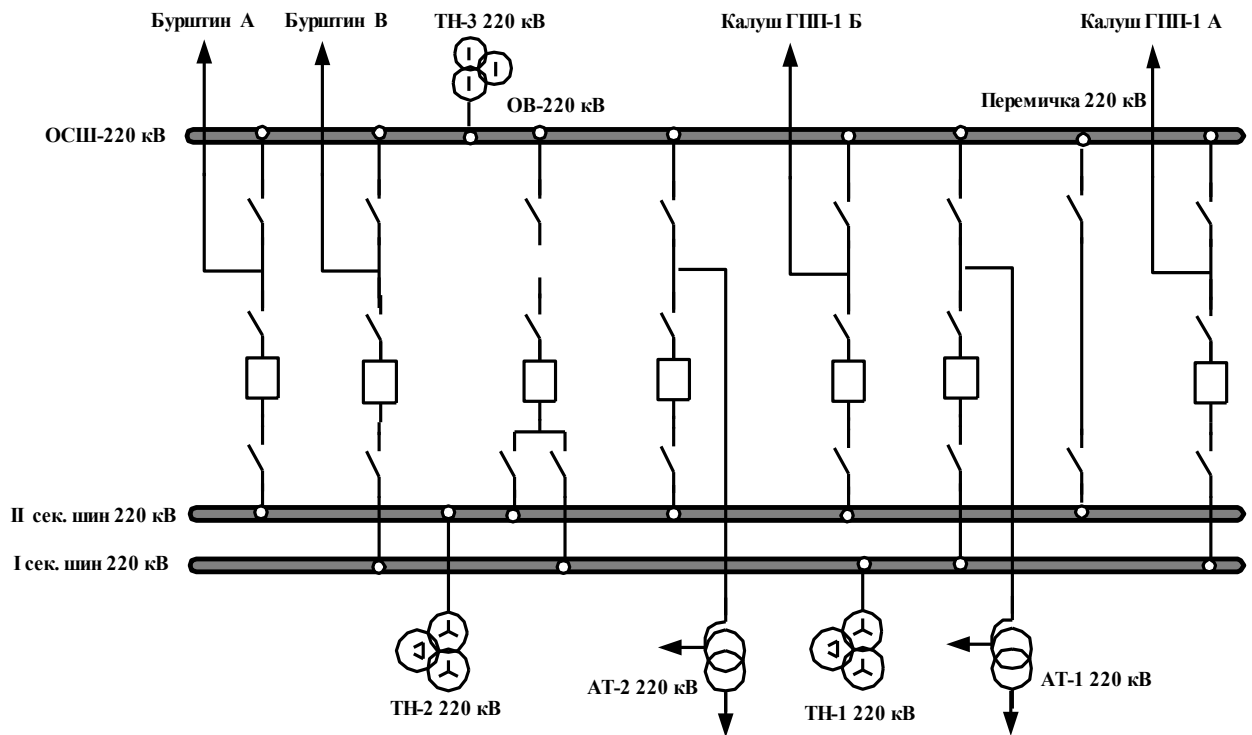


Рисунок 2.7 – Розподільна злагода 220кВ.

На розподільній злогоді 220кВ встановлено: високовольтні повітряні вимикачі  $VBB - 220 - 31,5 / 2000 - U1$ , які мають 4 дугогасильні модулі з подвійними контактними групами на фазі кожного з них, які шунтуються ємнісними ділянками напруги (конденсатори типу  $ДМРУ - 55 - 0,0033$ ). Кожна фаза збірних шин 220кВ ведеться проводом  $АСО - 400$  з висотою підвісу до 11,0 м, провисанням не більше 1,8 м з віддальми між горизонтально розташованими фазами – 4,0 м.

Розрахункова трифазна схема для дослідження ФРП на збірних шинах розподільної злагоди 220кВ ПС – 220кВ "Калуш" представлена рисунку 2.8, а результати дослідження виникнення ФРП на рисунках 2.9, та 2.10.

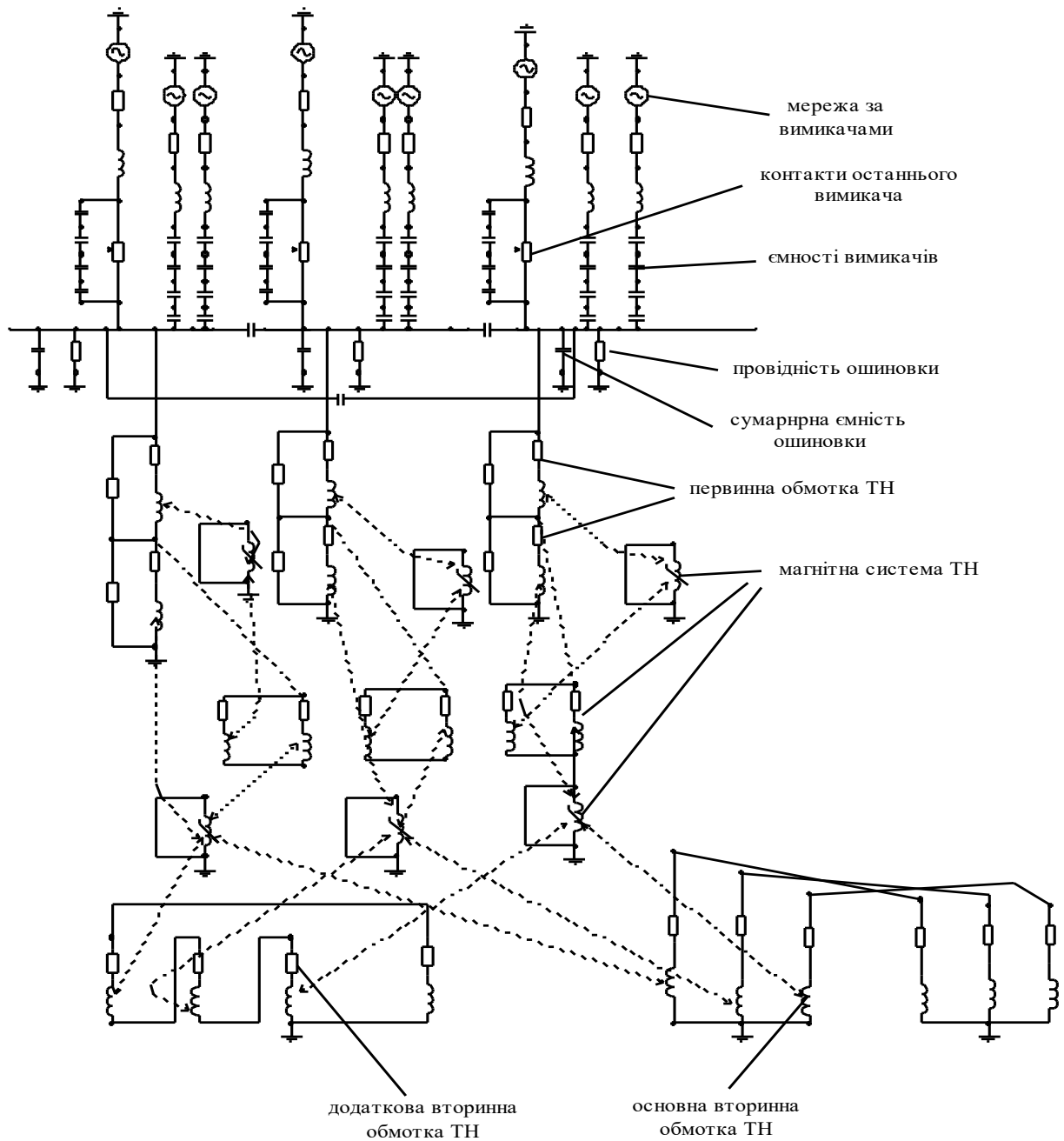


Рисунок 2.8 – Розрахункова схема для дослідження  $\Phi РП$  на збірних шинах розподільної злагоди 220кВ ПС – 220кВ "Калуш".

Отримані результати симуляційних досліджень щодо виникнення  $\Phi РП$  при врахуванні описаних вище умов показали, що вимкнення системи шин 220кВ призвело до виникнення  $\Phi РП$  на ТП (частота 50 Гц) що може призвести до пошкодження обмоток ТН при відновленні нормальної схеми

живлення. Значення напруги на збірних шинах є вищими за експлуатаційні значення напруги вставок запуску обладнання АПВ шин, що призводить до розвитку довготривалого ФРП із-за не спрацювання захистів .

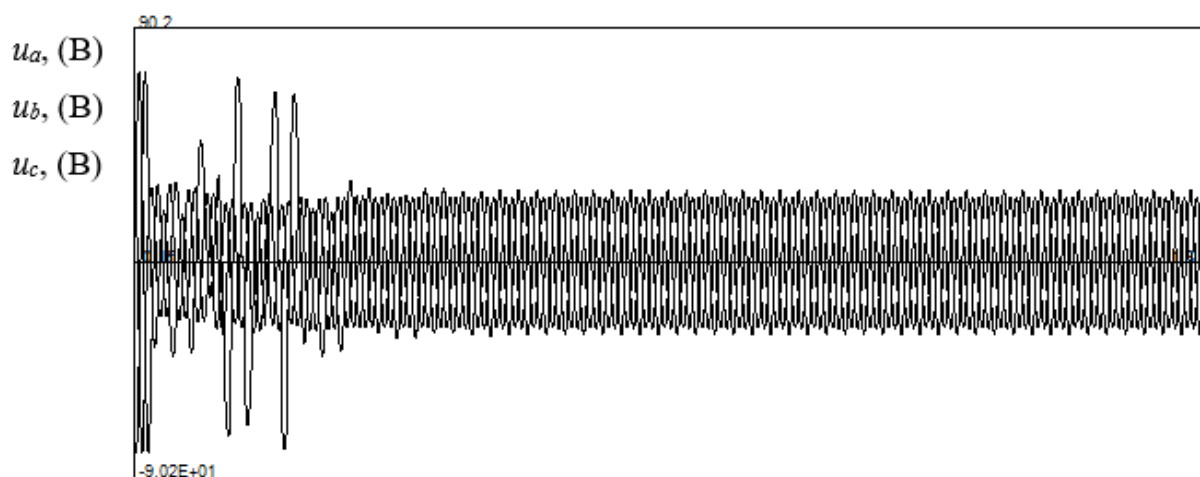


Рисунок 2.9 – Відсутність ФРП на розподільній зладоді 220кВ  
ПС – 220кВ "Калуш". (Осцилограма).

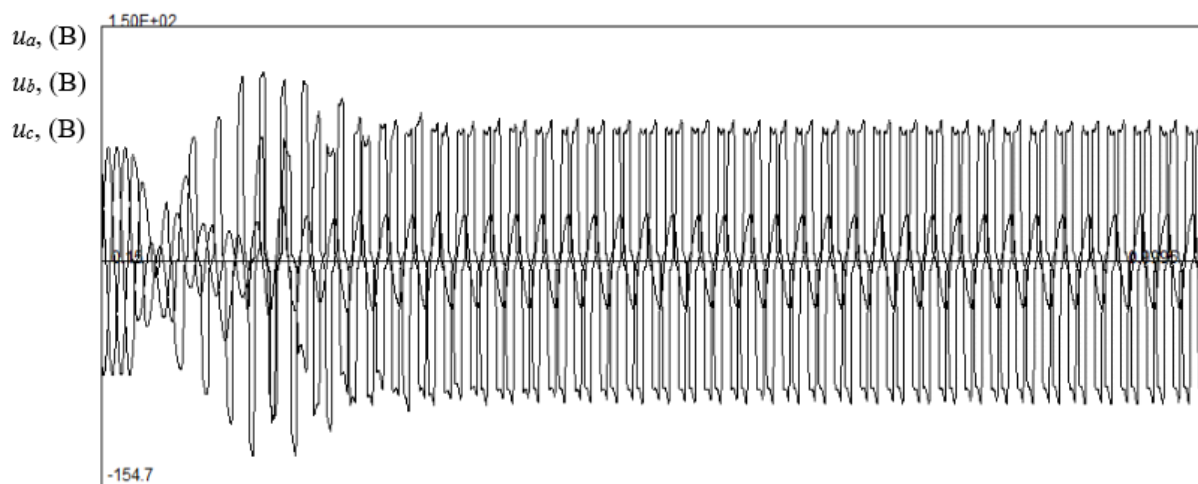


Рисунок 2.10 – Розвиток ФРП на розподільній зладоді 220кВ  
ПС – 220кВ "Калуш". (Осцилограма).

### 2.3 Висновки до другого розділу

Побудовано структурні моделі, які охоплюють визначальні елементи трансформатора напруги та електричної мережі для симуляційних досліджень розвитку та проходження ферорезонансних процесів.

На основі схеми електричних мереж «лінія – трансформатор напруги» побудована розрахункова схема, яка відтворює послідовно-паралельний резонансний контур.

Для здійснення дослідження ферорезонансного процесу побудована розрахункова схема ферорезонансного контуру з двокаскадним ТН.

Отримані результати симуляційних досліджень показали, що вимкнення системи шин  $220\text{кВ}$  призводить до виникнення ферорезонансних процесів, що може призвести до пошкодження обмоток трансформатора напруги при відновленні нормальної схеми електропостачання.

## 3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 3.1 Аналіз заходів запобігання виникнення ФРП

#### Збільшення ємності шин.

Одним з найбільш прийнятних методів недопущення явища ФРП є збільшення ємності шин, наприклад: під'єднання до шин конденсаторів зв'язку [12, 22]. Велика ємність на шинах змінює характер ФРП.

Аналіз процесів у контурі дозволив встановити, що:

- за мінімального значення  $C_{III}$  струм через  $C_B$  практично рівний струму на первинній обмотці ТН (рис. 2.1). Це створює умови для виникнення та проходження ФРП.

- коли  $X_{C_{III}}$  зрівнюється з  $X_L$  ТН, то при резонансних коливаннях відбувається співрозмірний розподіл струмів між  $X_{C_{III}}$  та опором обмотки ВН ТН, що створює умову розвитку ФРП;

- за максимального значення  $C_{III}$  величина індуктивного опору  $X_{C_{III}}$  – мінімальна, практично весь струм протікає через  $C_B$  та  $C_{III}$ , величина напруги на ТН – мінімальна, що не сприяє початку розвитку ФРП.

Отже, якщо суттєво збільшити ємності шин по відношенню до ємностей на «землю» ФРП затухає. Величина індуктивного опору на ТН залежить від прикладеної напруги. Тому, тільки при перехідних процесах буде мати місце розвиток ФРП. Збільшуючи ємність шин ми обмежуємо перенапруги.

Описаний метод – простий й ефективний, але має недолік щодо придушення ФРП: при модернізації чи зміні перемикань, співвідношення між ємностями шин та діляників напруги вимикачів змінюється. Враховуючи нелінійний характер індуктивності ТН сумарної ємності може бути недостатньо, тоді ФРП не зникає, а зазнає змін, що призводить до

пошкодження *ТП*. Тому, для забезпечення недопущення виникнення *ФРП* необхідно постійно мати велику ємність шин. Після спрацювання захистів на коротке замикання (*КЗ*) в системі шин залишається напруга, величина якої становить:

$$U = U_{\phi} \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2}, \quad (3.1)$$

де  $U_{\phi}$  – фазна напруга джерела живлення.

$C_1$  – сумарна ємність дільників вимикачів;

$C_2$  – сумарна ємність системи шин відносно «землі».

Як видно з (3.1), зростання  $C_2$  зменшує залишкову напругу, яку варто враховувати при встановленні реле контролю «відсутність/присутність» напруги на шинах для забезпечення коректної роботи пристрою *АПВ*.

Аналіз джерел показує, що при різних параметрах розподільних мереж, залишкова напруга перебуває в межах  $0,4U_{\phi}$ . Якщо допустити варіант виникнення великих значень ємностей на «землю», що визве субгармонійний *ФРП* та враховуючи вартість конденсаторів зв'язку – метод варто застосовувати в останню чергу [23].

### **Увімкнення резисторів у обмотки *ТН*.**

Для запобігання виникнення *ФРП* деякими авторами пропонується метод включення активних опорів як послідовну або паралельну ланку по відношенню до обмоток *ТП* [3, 5, 24, 25, 26].

Розрахунки показали, що позитивний ефект зриву *ФРП* може забезпечити величина додаткового опору приблизно  $100 \text{ кОм}$  при послідовному увімкненні та  $600 \text{ кОм}$  – при паралельному увімкненні щодо обмотки *ВН ТН*. Зрозуміло, що використання резисторів такої потужності вносить недопустиму похибку в роботу *ТН*, призводить до додаткових втрат, а це – виключає можливість застосування методу.



### 3.2 Пристрої для зриву ФРП

**Пристрій гасіння ферорезонансних процесів трансформаторів напруги (ГФТН).**

Пристрій *ГФТН* (рисунок 3.1) використовує метод введення активного опору в обмотку *НН ТН* [27]. При дослідження було встановлено, що опори навантаження  $2,5 \text{ Ом}$  є оптимальним рішенням для виключення можливості виникнення *ФРП*. Навіть з величиною опору  $1,5 \text{ Ом}$  *ФРП* за фазами не було зафіксовано, хоча на нейтралі у обмотках *ВН ТН* спостерігались невеликі струми як результат затухаючого коливного процесу від зниження напруги в системі шин із  $U = 0,4U_{ном}$ .

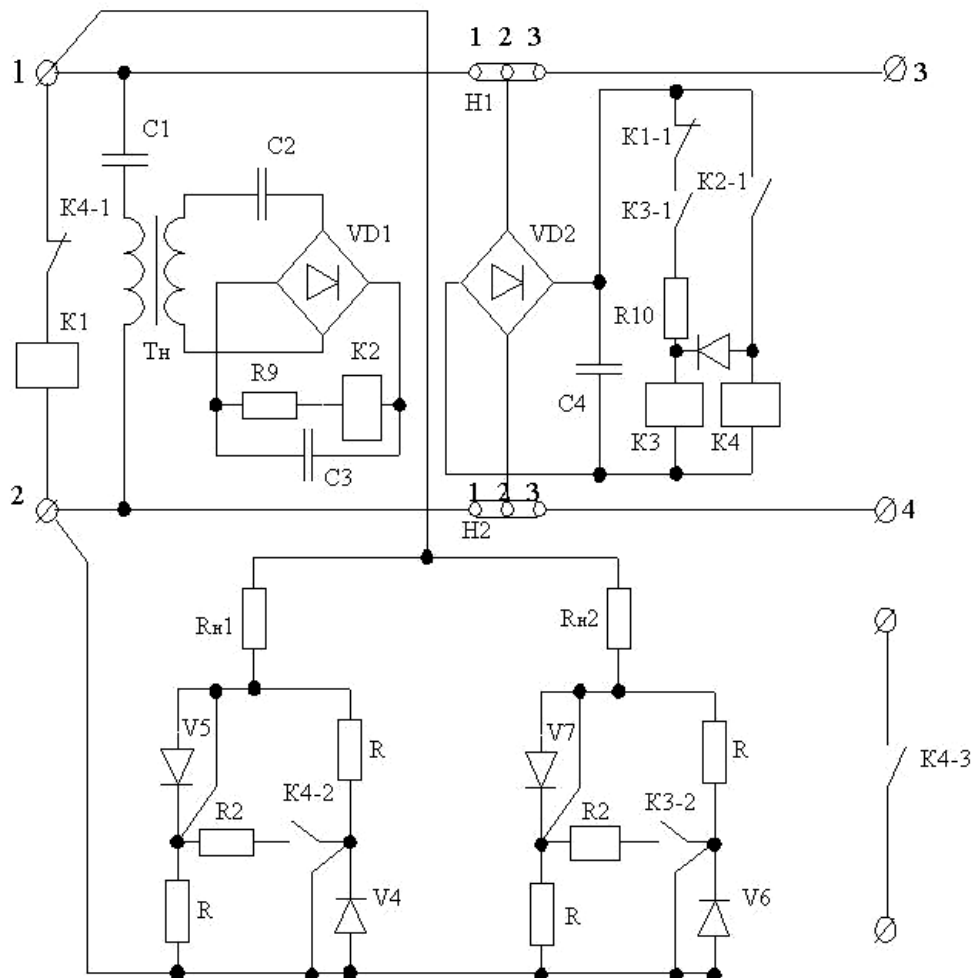


Рисунок 3.1 – Принципова схема однофазного *ГФТН*.

Встановлення опорів  $1,0 \text{ Ом}$  та  $0,5 \text{ Ом}$  показали можливість їх увімкнення одночасно із від'єднанням системи шин від напруги. Враховуючи зниження напруги в системі шин, за струмом в колах обмоток *НН ТП* варто встановлювати опори величиною  $1,5 \text{ Ом}$  без часового обмеження [27].

Для обмеження діючого *ФРП* при вимкненій системі шин, значення опорів в колах основних обмоток *НН* повинні бути менші  $1,0 \text{ Ом}$ . Такі опори є «форсувальними» та приєднуються в пристроях *ГФТН* паралельно до активних опорів  $7,5 \text{ Ом}$ .

За наявності в колі напруги пристрою *ГФТН* складової третьої гармоніки, гасіння *ФРП* здійснюється ступінчасто:

1-а ступінь – паралельно до основної обмотки *НН ТП* під'єднують два опори  $1,0 \text{ Ом}$  та  $0,16 \text{ Ом}$ ;

2-а ступінь – при згасанні *ФРП*, напруга знижується й опір  $0,16 \text{ Ом}$  від'єднується.

Опір  $1,0 \text{ Ом}$  запобігає повторному виникненню *ФРП* і ввімкнений на великий проміжок часу. Відзначається ефективність роботи описаного пристрою [25, 26].

### **Подавлювач ферорезонансних процесів (ПФП).**

Пристрій *ПФП* чутливий до появи *ФРП* та призначений для захисту *ТН* від *ФРП* в мережах із заземленою нейтраллю (рис 3.2). [22, 24].

Для підвищення чутливості пристрою, давач аварійного режиму – трансформатор, виведення обмотки *ВН* якого з'єднані послідовно з обмоткою *ВН ТН* та «землею»; обмотка *НН* трансформатора через тиристор під'єднана до блоку управління.

Ввімкнення активного опору в обмотку *НН ТН* зриває *ФРП*, але аналіз свідчить про необхідність моделювання означеного пристрою в різних режимах експлуатації.

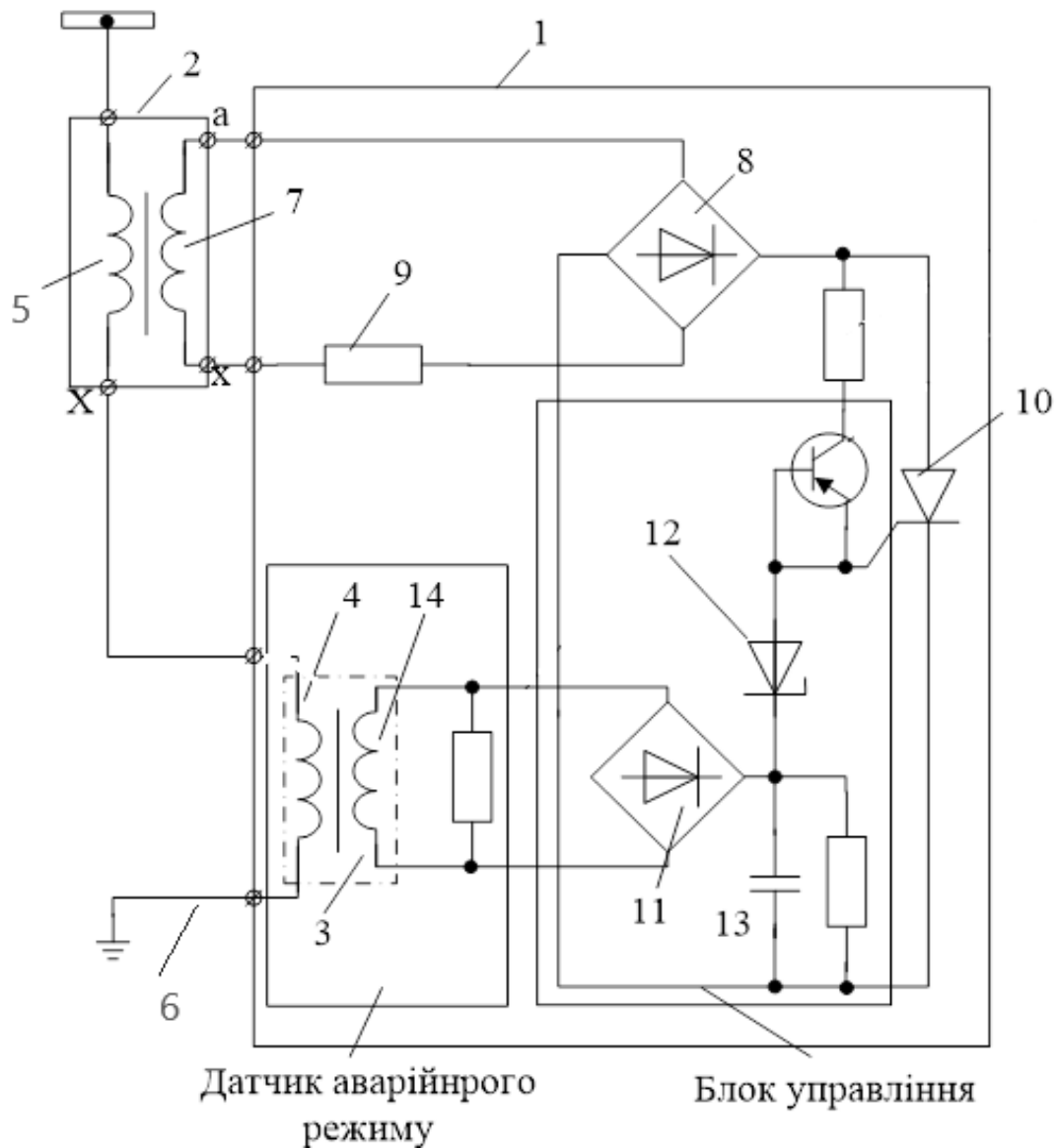


Рисунок 3.2 – Принципова схема пристрою ППЛ:

1 - пристрій; 2 - трансформатор напруги; 3 - трансформатор; 4 - первинна обмотка трансформатора; 5 - первинна обмотка ТН; 6 - земля;  
 7 - вторинна обмотка ТН; 8 - виведення силового випрямляючого мосту;  
 9 - баластний резистор; 10 - силовий тиристор; 11 - випрямляч; 12 - пороговий елемент; 13 - конденсатор згладжування; 14 - вторинна обмотка трансформатора.

### **Пристрій з використанням зустрічної електрорушійної сили (ПЗЕ).**

Ефективним способом придушення ФРП, що виникають у ТН є шляхом під'єднання до обмоток НН ТН зустрічно направленої напруги

обмоток *НН* трансформаторів зв'язку, що є складовим елементом зриву *ФРП* електрорушійною силою (*ЕРС*). Пристрій призначений для придушення *ФРП*, які виникають у *ТН* на підстанціях напругою  $110 \div 500$  кВ.

Пристрій виявлення та придушення ферорезонансу (*ПВП ФРП*), згідно з [23], за виникнення *ФРП* подає на вторинну обмотку *ТН* напругу в протифазі до первинної напруги *ТН*, яка становить 40–50 % величини порядку номінальної фазної напруги *НН* *ТН* (рисунок 3.3).

Ця напруга подається на вторинні обмотки *ТН* через 0,03 с після виявлення *ФРП* та знімається лише після відновлення напруги на шинах, до яких приєднаний *ТН*. *ПВП ФРП* – найпрогресивніший пристрій виявлення та придушення *ФРП*, але в відкритих джерелах не описано дослідження підтвердження ефективності методу. не пропонує повної інформації по роботі та ефективності пристрою. Необхідно провести дослідити роботу пристрою та здійснити побудову симуляційних осцилограм з аналізом режимів роботи.

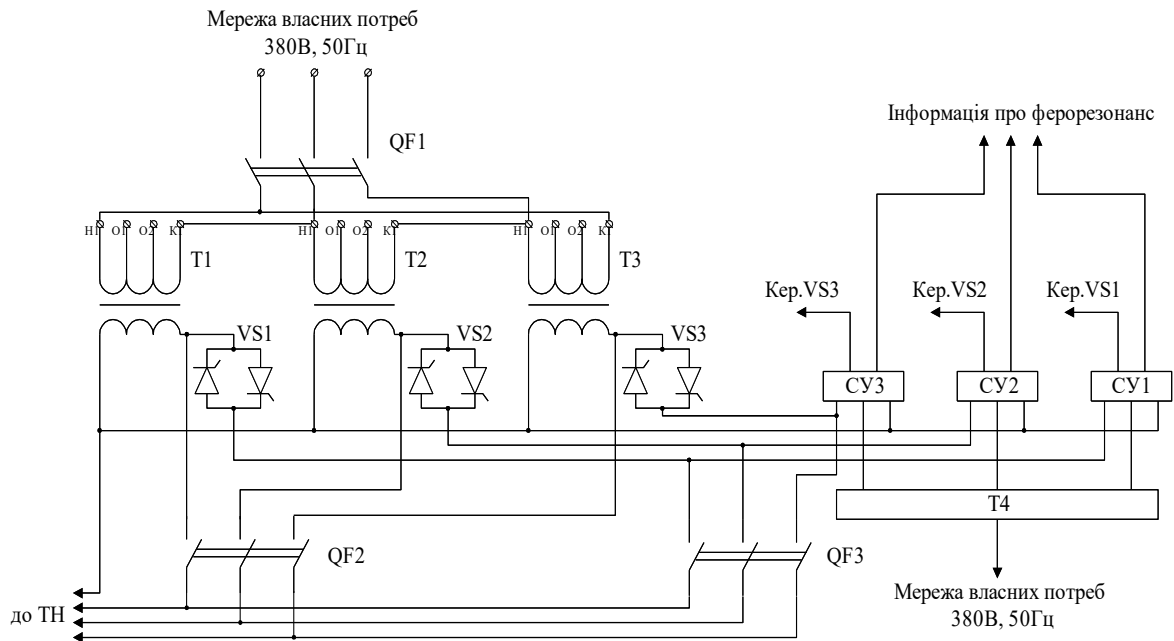


Рисунок 3.3 – Функціональна схема *ПВП ФРП*.

### 3.3 Дослідження ефективності методів придушення ФРП

На основі побудови симуляційних осцилограм можливо дослідити ефективність проаналізованих методів недопущення або погашення розвитку ФРП. Дослідження проводимо на основі послідовно-паралельного контуру задаючись встановленням різних режимів розвитку ФРП та аналізом відгуку системи на збурення за параметрами: зміна струм в обмотці  $BH$   $TH$ ; зміна прикладеної напруги в обмотці  $BH$   $TH$ ; зміна струму на вимикачі.

Зміна параметрів будь-якого з елементів згідно послідовно-паралельного контуру (рис. 2.1) впливає на процес резонансу та може сприяти його розвитку, або запобігати появі ФРП.

Основні елементи ферорезонансного контуру з  $TH$ , які визначають режими: нелінійна індуктивність  $TH - L_{TH}$ , змінюється при зміні схеми та режиму роботи  $TH$  (отримується із залежності  $\psi = f(i)$ ); ємність дільника напруги вимикача –  $C_{\epsilon}$ , залежить від типу та кількості вимикачів приєднаних до шин та змінює струм, змінюючи результуючий опір контуру; ємність шин та приєданого обладнання –  $C_{ш}$ , залежить від типу й довжини шин, змінює результуючий опір резонансного контуру (ФРК).

– за мінімального значення  $C_{\epsilon}$  при розмиканні контактів вимикача вся напруга заведена на  $C_{\epsilon}$ , відповідно, струм через  $C_{\epsilon}$  практично дорівнює

нулю, опір ємнісних дільників:  $\left( X_{C_{\epsilon}} = \frac{1}{\omega \cdot C_{\epsilon}} \right)$ . За такими умовами ФРП не

виникає (рисунок 3.4, відрізок  $a - б$ );

– за максимального значення  $C_{\epsilon}$  при розмиканні контактів вимикача вся напруга заведена на обмотку  $BH$   $TH$ , опір на  $C_{\epsilon}$ , через дільники вимикача протікають струми близькі до номінальних струмів  $TH$ . ФРП не виникає (рисунок 3.5, відрізок  $a - б$ );

– за рівності реактивних опорів та індуктивності  $TH$  при розмиканні

контактів вимикача відбувається рівномірне розподілення напруги між  $C_6$  та обмоткою  $BH TH$ . Виникнення  $\Phi P I I$  внаслідок зменшення опору контуру (рисунок 3.6, відрізок  $a - б$ );

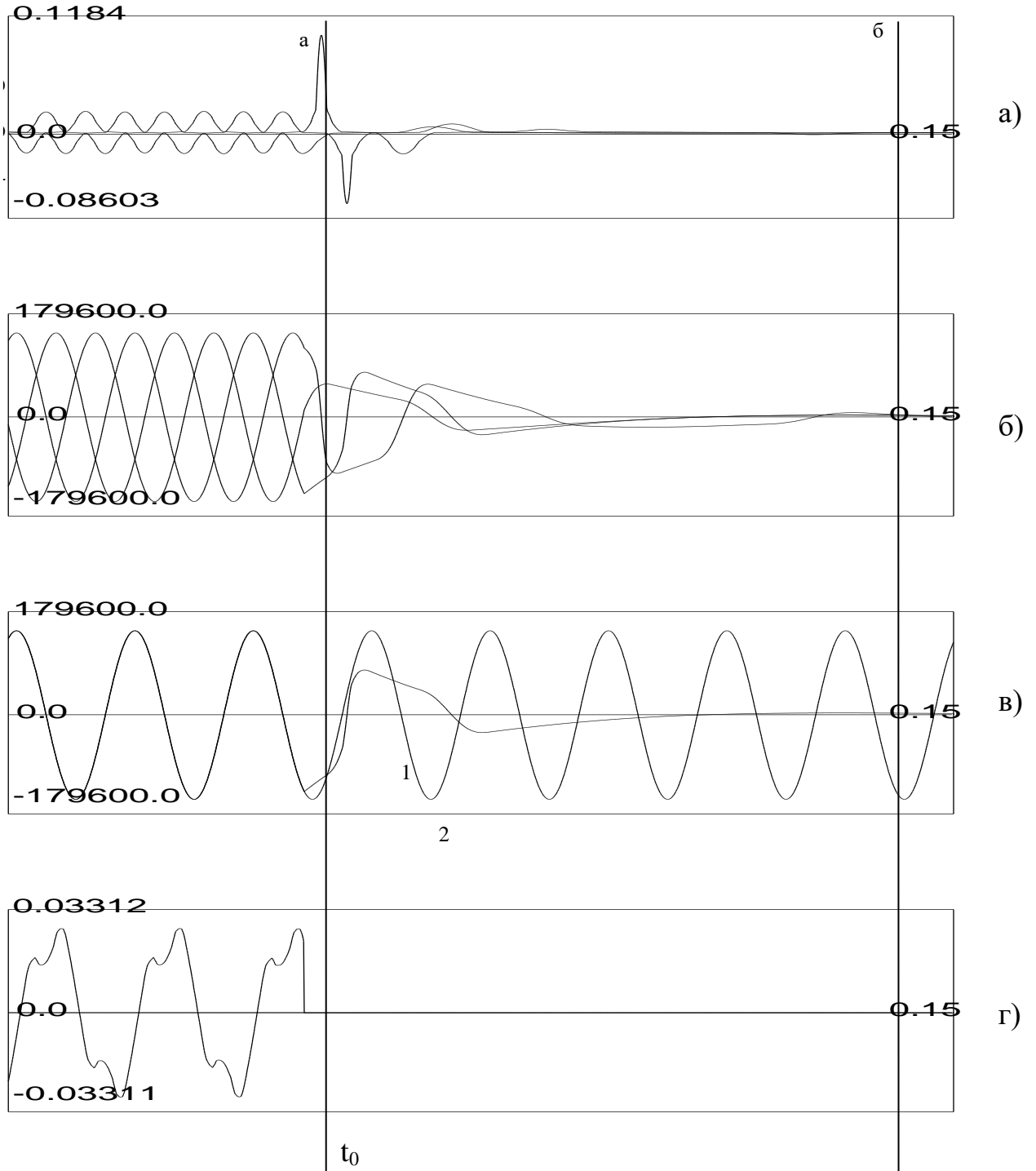


Рисунок 3.4 – Характер  $\Phi P I I$  за мінімального  $C_6$ :

а) струм на обмотці  $BH TH$ ; б) напруга, прикладена до  $BH TH$ ;  
в) напруга, перед (1), та за (2)  $C_B$ ; г) струм через вимикач;  $t_0$  – час збурення.

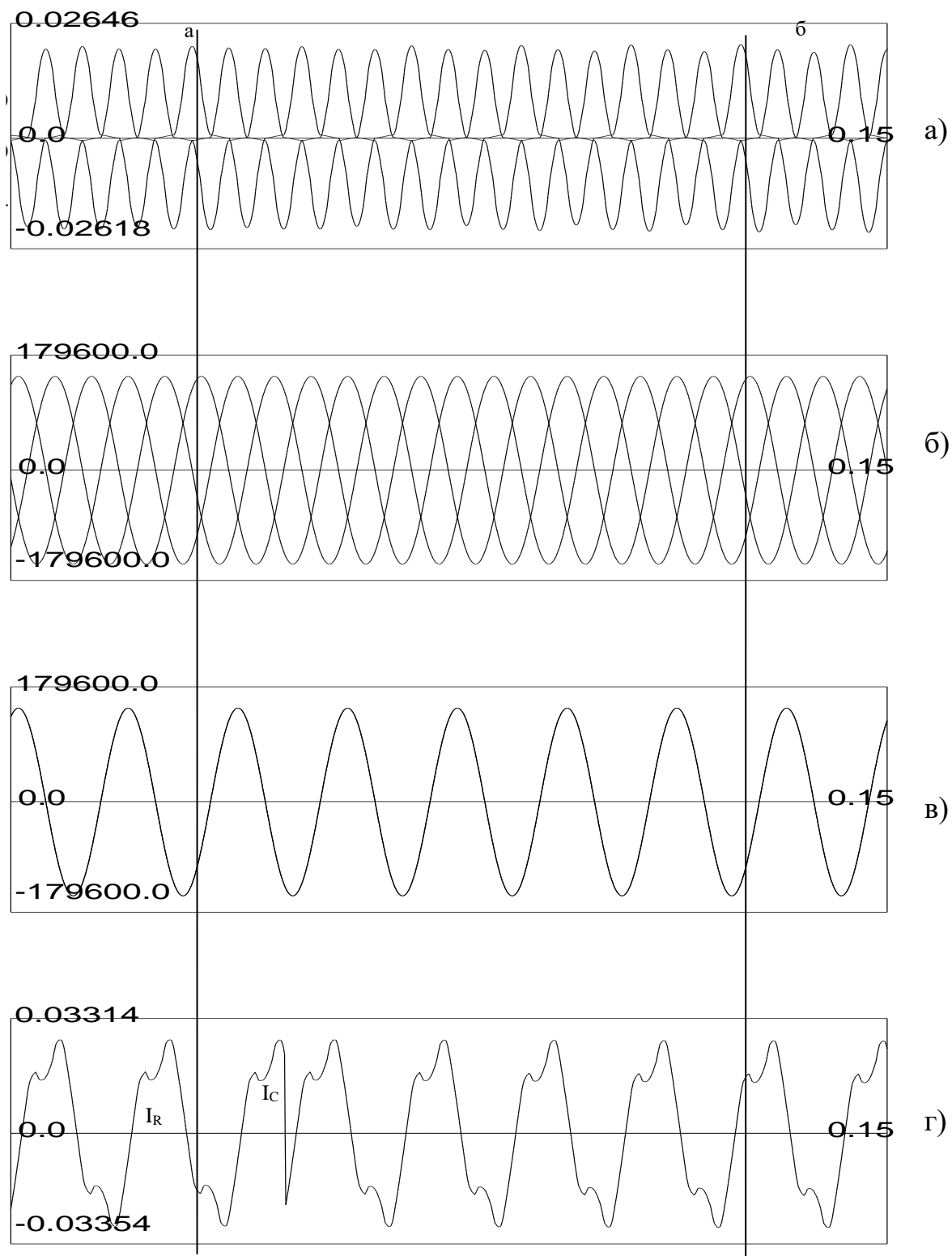


Рисунок 3.5 – Характер ФРП за максимального  $C_6$ :

- а) струм на обмотці  $BH TH$ ; б) напруга, прикладена до  $BH TH$ ;  
 в) напруга, перед (1), та за (2)  $C_B$ ; г) струм через вимикач.

– за мінімального значення  $C_{ш}$ , результуючий опір мінімальний ( $X_{C_{ш}} = \max$ ), напруга на струм через  $C_6$  рівна струму в обмотці  $BH TH$ .

Виникнення  $\Phi PII$  (рисунок 3.7, відрізок  $a - б$ );

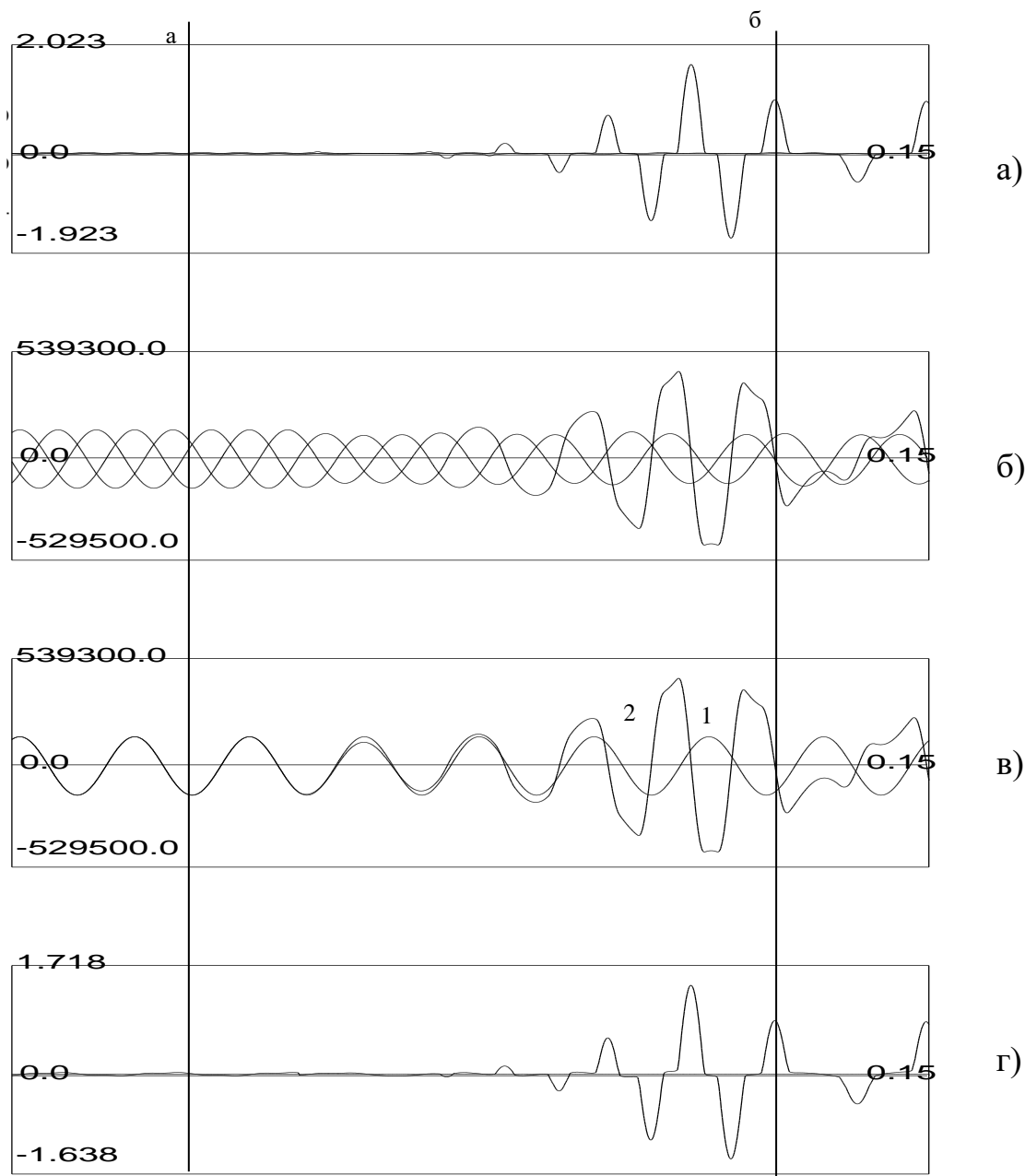


Рисунок 3.6 – Характер  $\Phi PII$  при  $X_6$  співпадає з  $X_L$ :

- а) струм на обмотці  $BH TH$ ; б) напруга, прикладена до  $BH TH$ ;  
в) напруга, перед (1), та за (2)  $C_6$ ; г) струм через вимикач.



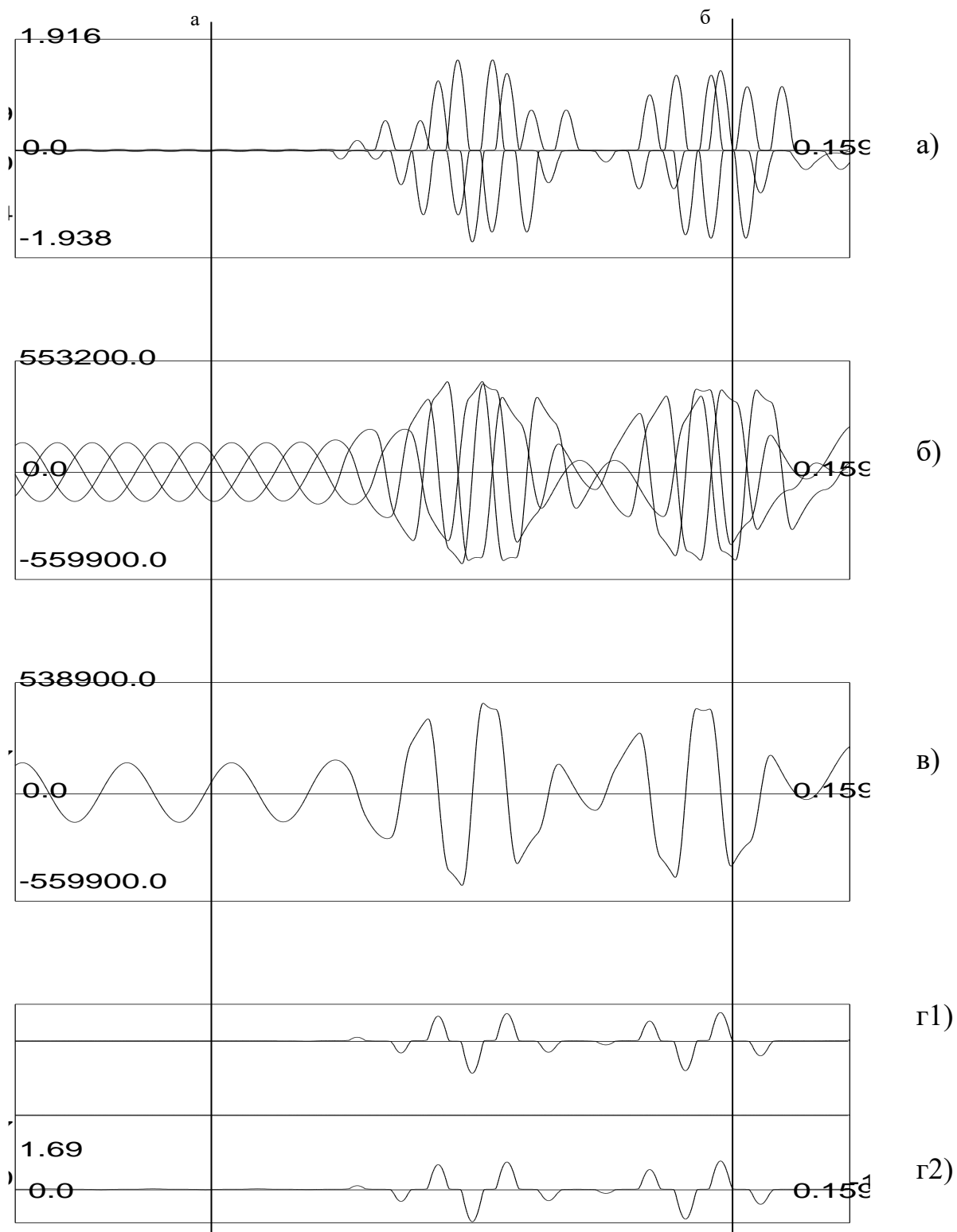


Рисунок 3.7 – Характер ФРП за мінімального  $C_{ш}$ :

а) струм на обмотці  $BH TH$ ; б) напруга, прикладена до  $BH TH$ ;

в) напруга прикладена до шин; г1) струм через вимикач;

г 2) струм через ємність шин.

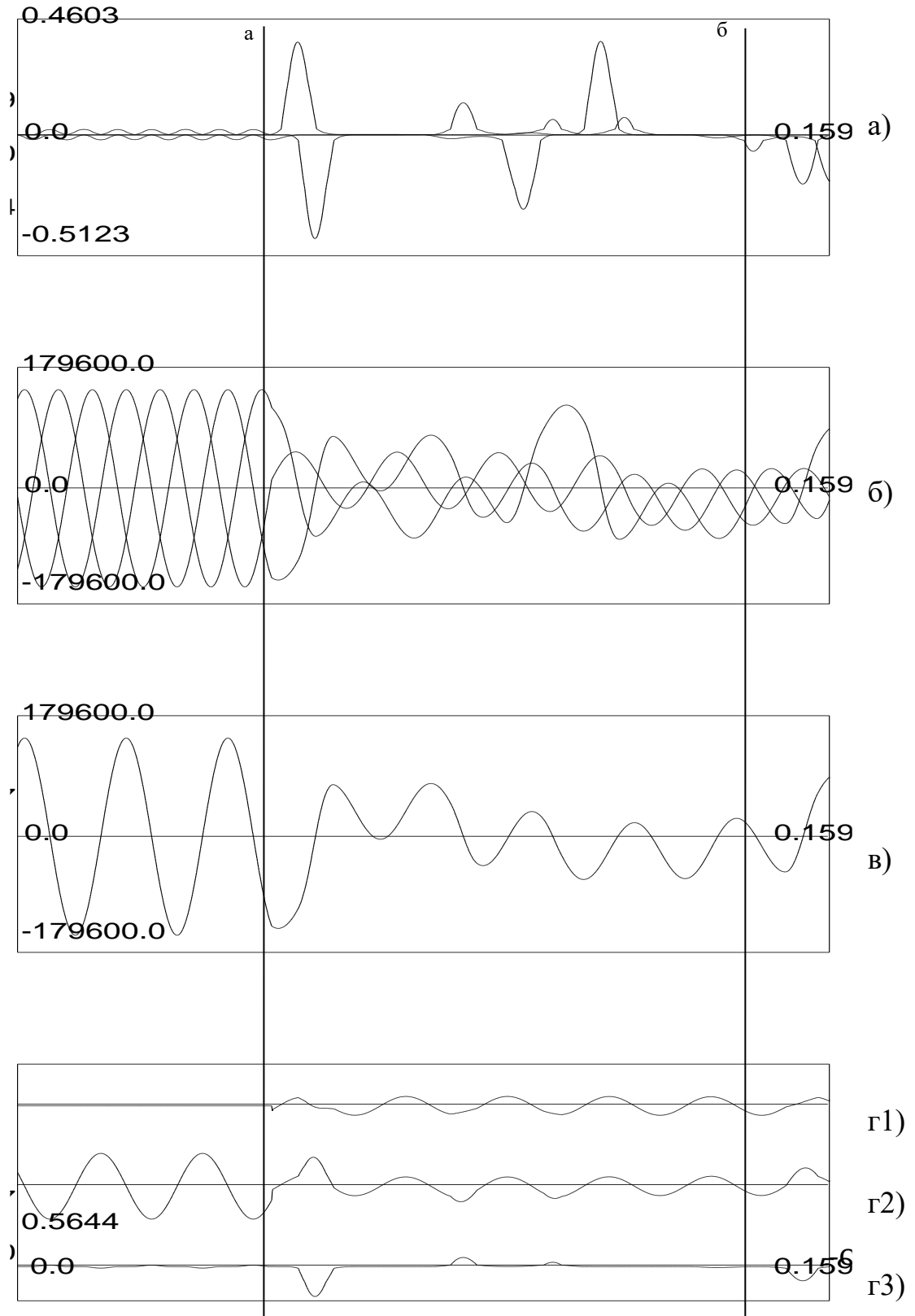


Рисунок 3.8 – Характер  $\Phi PII$  за максимального  $C_{ш}$ :

- а) струм на обмотці  $BH TH$ ; б) напруга, прикладена до  $BH TH$ ;  
 в) напруга, прикладена до шин; г1) струм через вимикач; г2) струм  
 через ємність шин; г3) струм у обмотці  $BH TH$ .

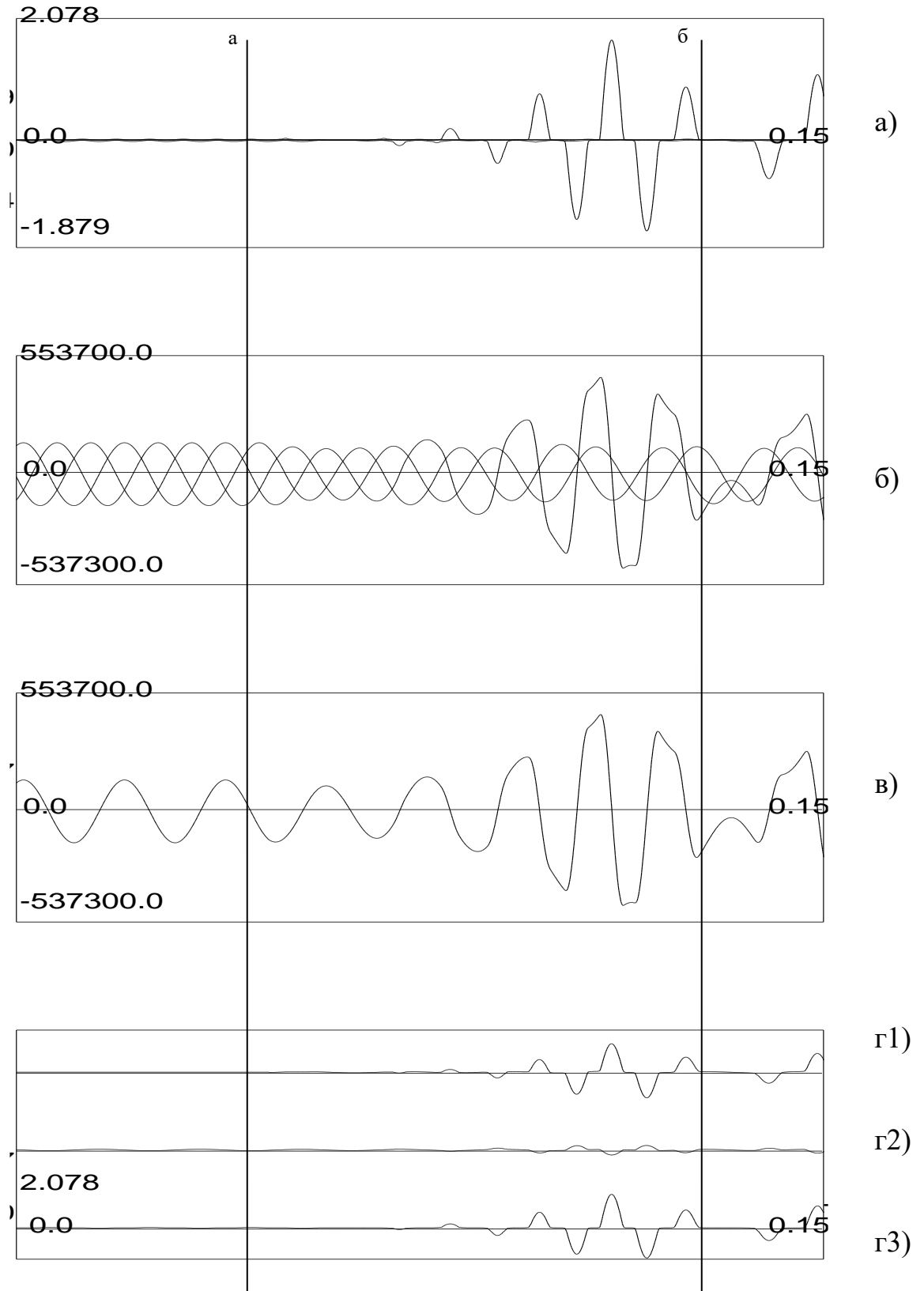


Рисунок 3.9 – Характер ФВП при  $X_{C_w}$  співпадає з  $X_{LTH}$ :

- а) струм на обмотці  $BH TH$ ; б) напруга, прикладена до  $BH TH$ ;  
 в) напруга, прикладена до шин; г1) струм через вимикач; г2) струм

через ємність шин; г3) струм у обмотці *ВН ТН*.

– за максимального значення  $C_{ш}$ , результуючий опір максимальний ( $X_{C_{ш}} = \min$ ), напруга на *ТН* мінімальна, внаслідок протікання струму через  $C_e$  та  $C_{ш}$ . рівний струму в обмотці *ВН ТН*. *ФРП* не виникає (рисунок 3.8, відрізок *a – б*);

– за умови рівності реактивних опорів  $X_{C_{ш}}$  та  $X_{L_{ТН}}$  відбувається розподіл струмів між  $X_{C_{ш}}$  та опором *ВН ТН*. Розвивається *ФРП* (рисунок 3.9, відрізок *a – б*).

### **Придушення ФРП з використанням зустрічної ЕРС (ПЗЕ).**

Увімкнення зустрічно направленої *ЕРС* еквівалентне введенні не великого опору в обмотку *ВН ТН*, що призводить до додаткового навантаження *ТН* та виходу його з режиму *ФРП*. Пристрій *ПЗЕ* за виникнення *ФРП* задає на обмотці *ВН ТН* напругу, яка діє в протилежному напрямку до заданої напруги та становить 40 ÷ 50 % номінальної фазної напруги *НН ТН* та подається на обмотки *ВН ТН* через 0.03с після розвитку *ФРП*. Після появи напруги на шинах приєднання *ТН* в межах 40 ÷ 50 В *ПЗЕ* відмикається від ланки навантаження.

Дослідження показують (рисунок 3.10, 3.11), що оптимальним діапазоном для гасіння *ФРП* є напруга 60 ÷ 80 В. При введенні *ПЗЕ* на нижчу напругу, придушення *ФРП*, а при напругах вище 90 В, на обмотці *ВН ТН* індуються великі струми.

Крім цього, дослідженнями встановлено, що на *ТН* лише за часу увімкнення *ПЗЕ* не пізніше 0,05 с після вимкнення останнього вимикача відбувається гасіння *ФРП*. Слід відмітити, що первинне зниження напруги пристроєм *ПЗЕ* відбувається при вимкненні ненавантажених шин. Якщо шини навантажені, діючі комутаційні перенапруги можуть спровокувати

виникнення  $\Phi_{PI}$  насиченням магнітопроводу  $TH$ .

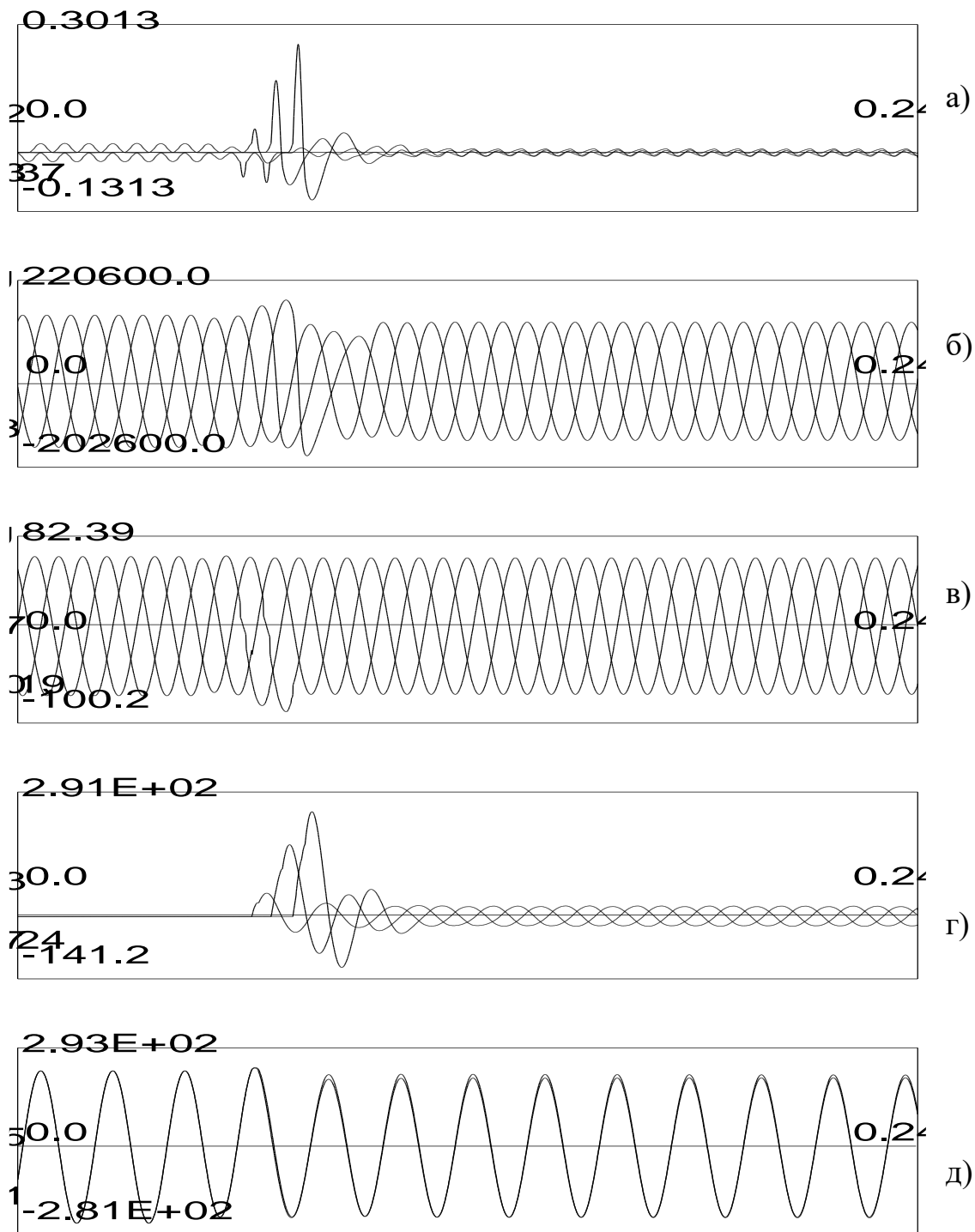


Рисунок 3.10 – Придушення  $\Phi_{PI}$  пристроєм ПЗЕ при поданні напруги 80 В на обмотку  $HH$   $TH$  :

а) струм у первинній обмотці  $TH$  ; б) напруга на шинах; в) напруга, прикладена до обмотки  $HH$   $TH$  ; г) струм у вторинній обмотці; д) еквівалентний струм в магнітопроводах першого та другого каскадів.

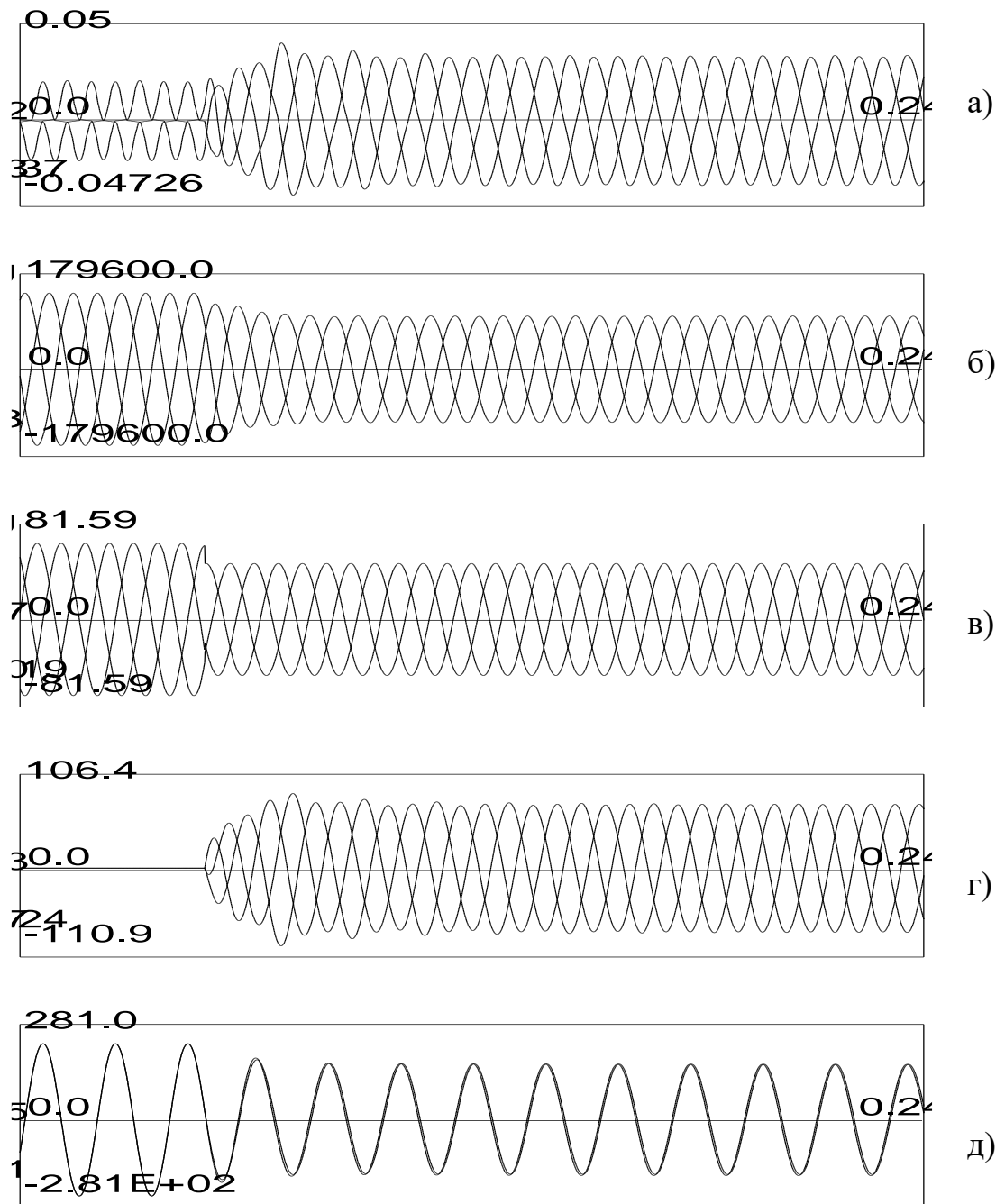


Рисунок 3.11 – Неєфективне придушення  $\Phi P I$  пристроєм  $P Z E$  при поданні на обмотку  $H H T H$  напруги  $50 B$ :

а) струм у первинній обмотці  $T H$ ; б) напруга на шинах; в) напруга, прикладена до обмотки  $H H T H$ ; г) струм у вторинній обмотці; д) еквівалентний струм в магнітопроводах першого та другого каскадів.

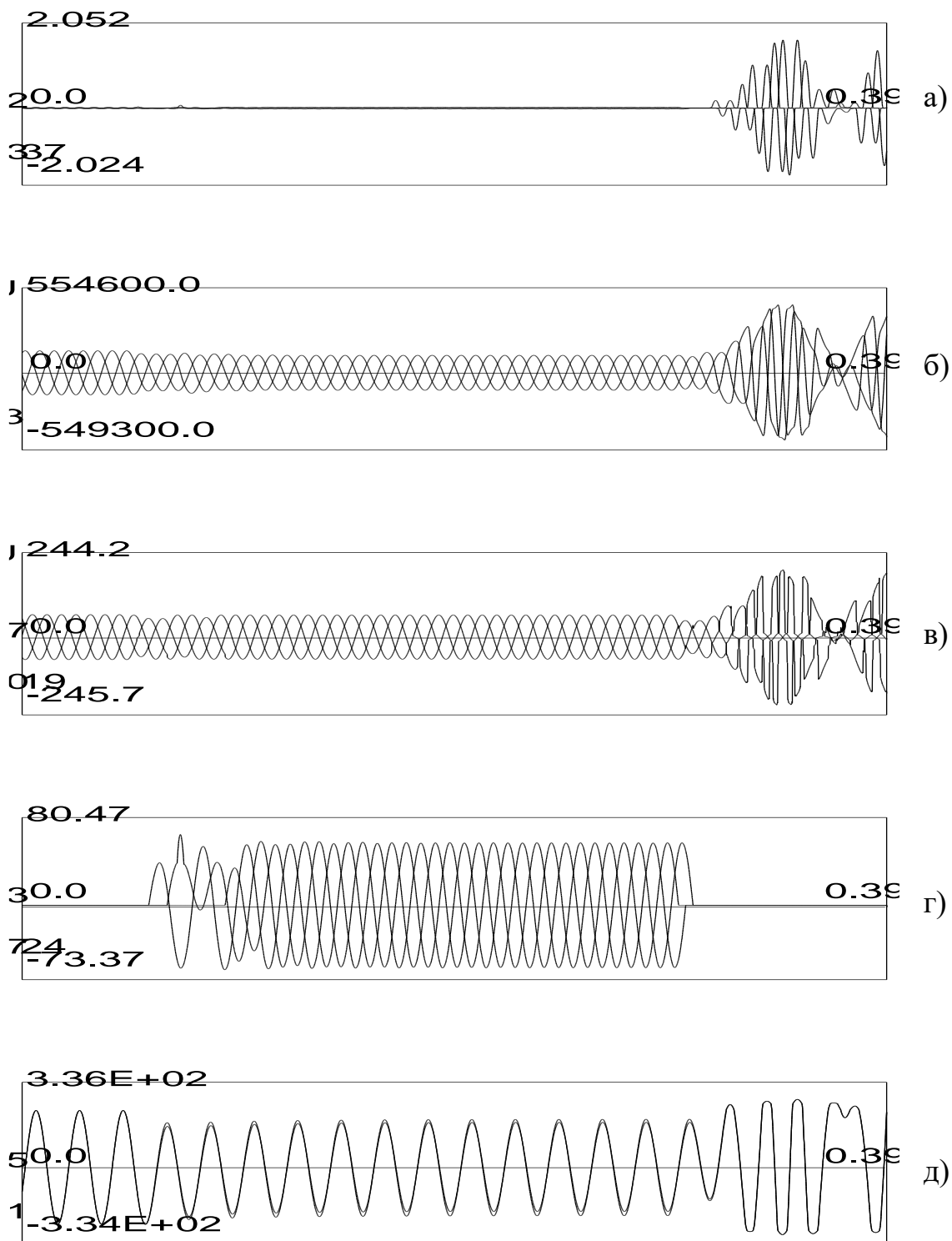


Рисунок 3.12 – Розвиток ФВП за відмови ПЗЕ :

а) струм у первинній обмотці ТН ; б) напруга на шинах; в) напруга, прикладена до обмотки НН ТН ; г) струм у вторинній обмотці; д) еквівалентний струм в магнітопроводах першого та другого каскадів.

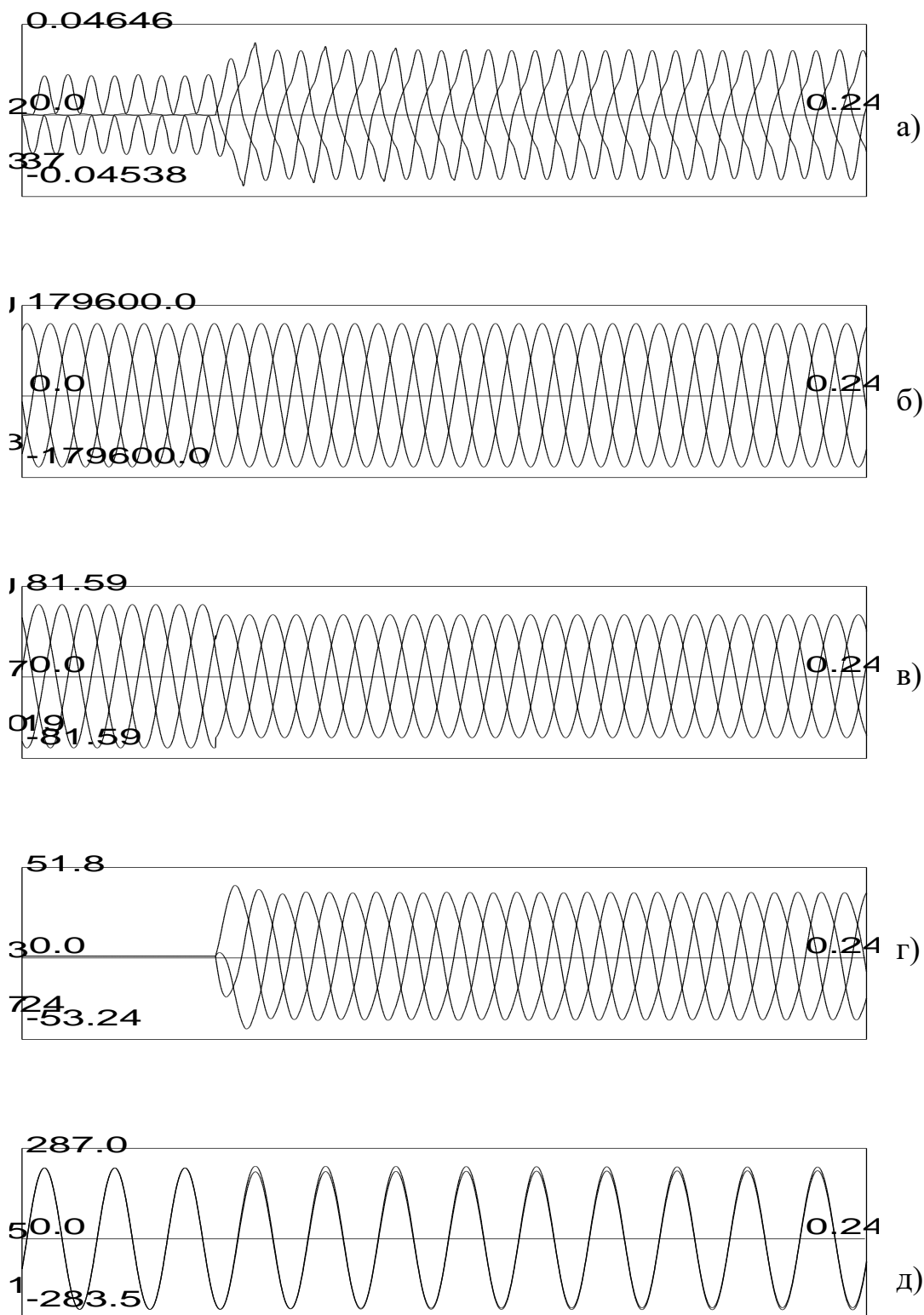


Рисунок 3.13 – Помилкове спрацювання ПЗЕ :

а) струм у первинній обмотці  $TH$  ; б) напруга на шинах; в) напруга, прикладена до обмотки  $HH TH$  ; г) струм у вторинній обмотці; д) еквівалентний струм в магнітопроводах першого та другого каскадів.



Зрозуміло, що при ввімкненому ПЗЕ на вторинній обмотці ТН присутня напруга, яка відмінна від напруги на шинах, що призводить до спрацювання захисту. Крім цього, симуляційні дослідження показали, що відмова ПЗЕ навіть при гасінні однофазного ФРП створює розвиток трифазного ФРП (рисунок 3.12), А помилкове спрацювання ПЗЕ, призводить до хибного відгуку системи з ТН через невідповідності значень напруги на шинах (рисунок 3.13). Напруга основної обмотки НН ТН знижена до  $0,4 \cdot U_{ном}$ , а струм в обмотці зростає в рази у порівнянні з номінальними струмами роботи ТН. За таких умов, помилкова робота ПЗЕ призведе до некоректної дії пристроїв РЗ і автоматики.

### **Пристрій гасіння ферорезонансних процесів трансформаторів напруги (ГФТН).**

Як було зазначено, для обмеження діючого ФРП при вимкненій системі шин, значення опорів в колах основних обмоток НН повинні бути менші  $1,0 \text{ Ом}$ . Результати дослідження на основі комп'ютерного моделювання моделі трансформатора напруги типу НКФ – 220 показали, що шунтуванні основної обмотки НН ТН опором  $0,4 \text{ Ом}$  (паралельно  $0,16 \text{ Ом}$  та  $1,0 \text{ Ом}$ ) відбувається гасіння ФРП. При цьому струм в основній обмотці НН ТН становить  $205 \text{ А}$ , а прикладена на ній напруга знижується до  $0,4 \cdot U_{ном}$ . Але, відімкнення опору  $0,16 \text{ Ом}$  приводить до повторного розвитку ФРП, тобто одиничним опором не можливо забезпечити значення кривої намагнічування ТН нижче «колiна насичення», до того ж, значення стійкого максимального струму у вторинній обмотці становить  $85 \text{ А}$  при діючому значенні, яке становить  $71 \text{ А}$ .

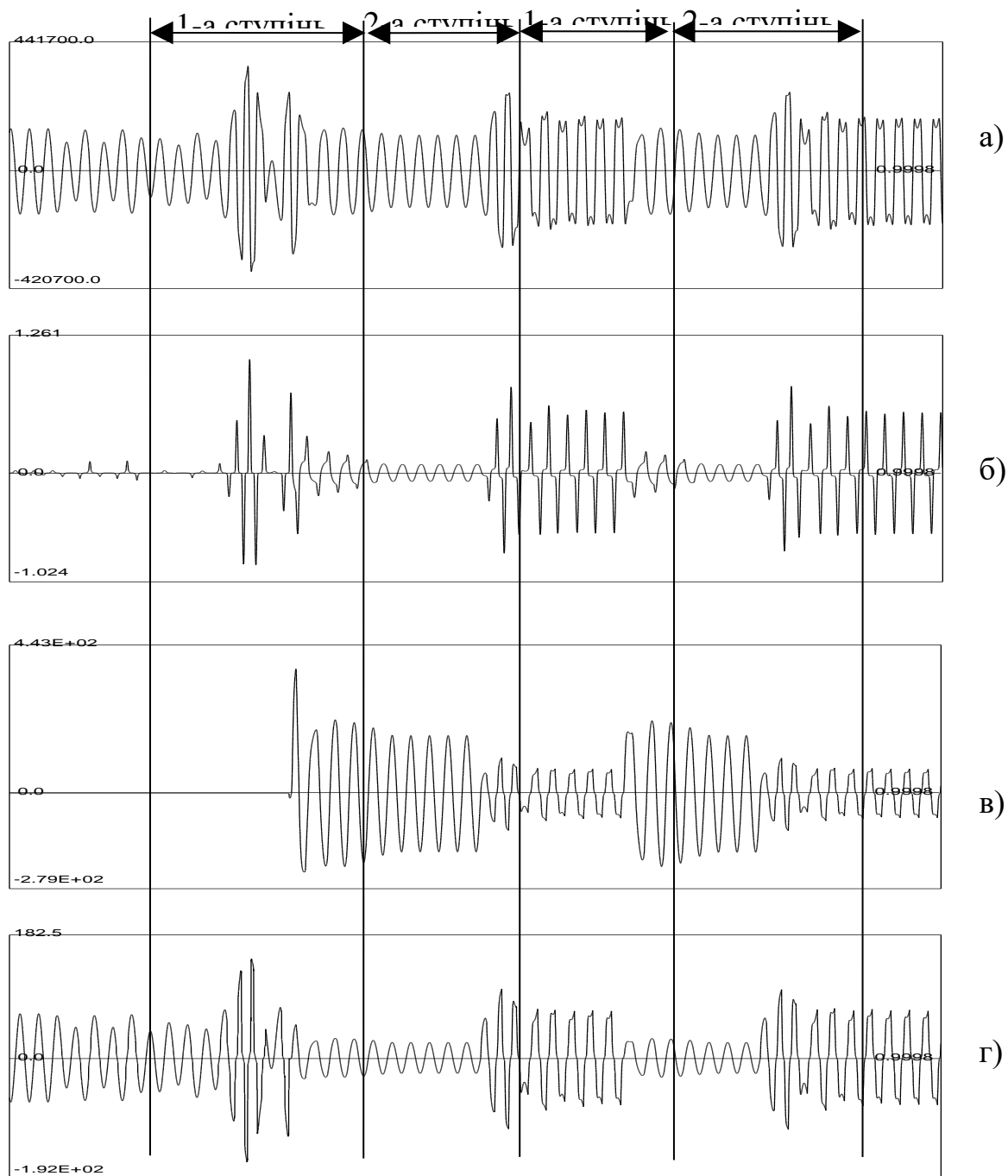


Рисунок 3.14 – Режим гашення  $\Phi P I$  пристроєм  $\Gamma \Phi T H$  при значенні опорів:  $0,13 \text{ Ом}$  (1-а ступінь);  $1,0 \text{ Ом}$  (2-а ступінь):

а) напруга, прикладена до первинної обмотки  $T H$ , б) струм первинної обмотки, в) струм вторинної обмотки, г) напруга вторинної обмотки.

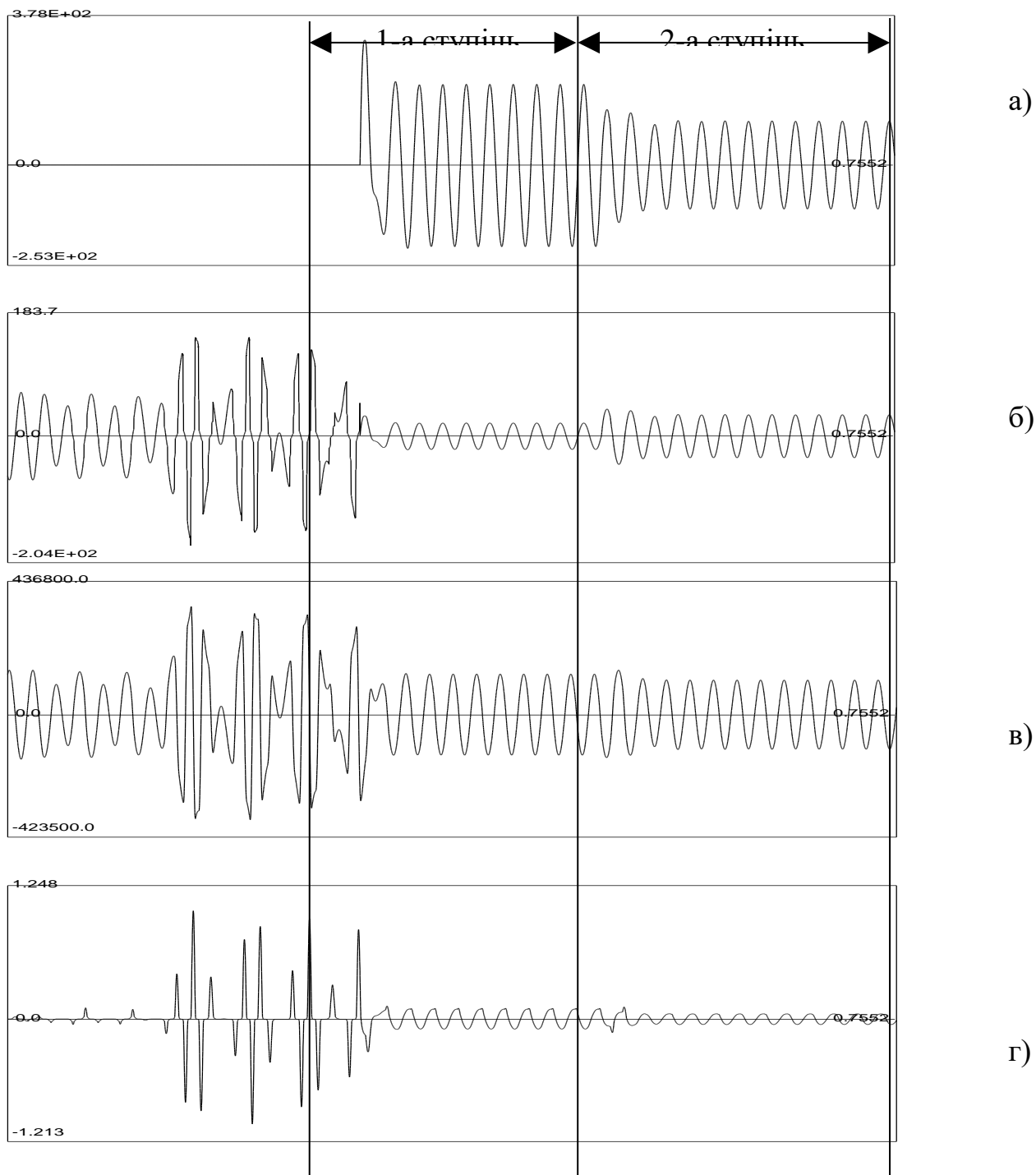


Рисунок 3.15 – Режим гашення ФРП пристроєм ГФТН при значенні опорів:  $0,1 \text{ Ом}$  (1-а ступінь);  $0,3 \text{ Ом}$  (2-а ступінь):

а) напруга, прикладена до первинної обмотки ТН, б) струм первинної обмотки, в) струм вторинної обмотки, г) напруга вторинної обмотки.

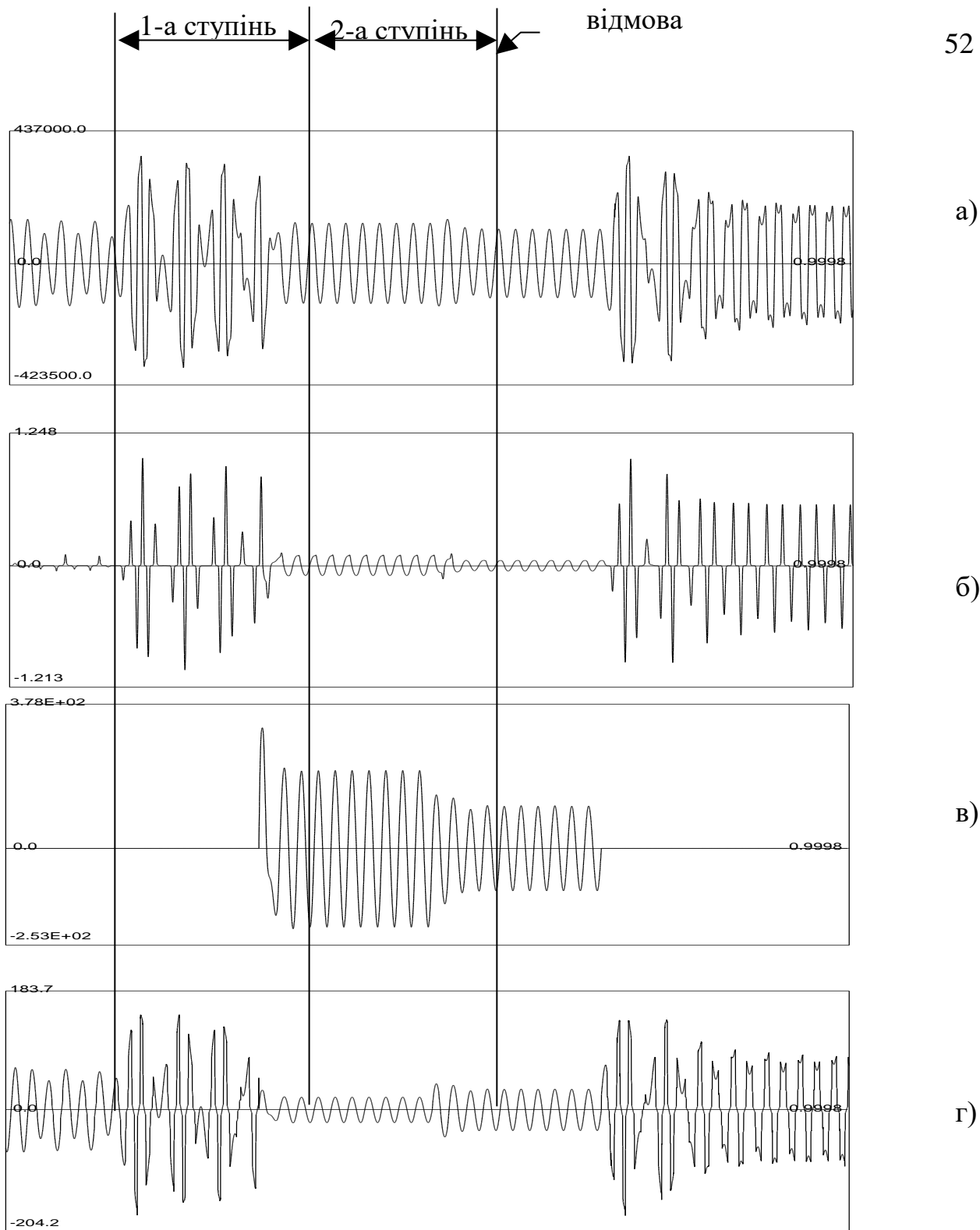


Рисунок 3.16 – Розвиток  $\Phi PП$  при відмові пристрою  $\Gamma\Phi TH$  :

а) напруга, прикладена до первинної обмотки  $TH$  , б) струм первинної обмотки, в) струм вторинної обмотки, г) напруга вторинної обмотки.

Повторний розвиток  $\Phi PП$  призводить до повторного спрацювання

*ГФТН*, але, як показує симуляційні осцилограми, *ФРП* не гаситься, а в основній обмотці *НН ТН* протікають неприпустимо великі струми (рисунок 3.14). Для ефективного придушення *ФРП* та недопущення повторного розвитку необхідно, щоб опір на 1-й ступені відповідав  $0,1 \text{ Ом}$ , а опір на 2-й був не більший  $0,3 \text{ Ом}$ . Зрозуміло, що це неприпустимо при протіканні довготривалих струмів величиною  $130 \text{ А}$  (рисунок 3.15).

При відмові пристрою *ГФТН*, *ФРП* відновлюється (рисунок 3.16), що є недоліком пристрою та не може бути використаний як основне обладнання.

### **Пристрій придушення ферорезонансних процесів (ППФ).**

Аналіз роботи пристрою *ППФ* на основі симуляційних осцилограм показав, що підвищення чутливості та швидкодії позитивно впливає на якість придушення *ФРП*. Після придушення *ФРП*, струм у первинній обмотці *ТН ТН* та первинній обмотці *ППФ* знижується до номінальних значення, що призводить до вимкнення баластного опору та повторного розвитку *ФРП*. Опір резистора, який придушує *ФРП* є малим, що призводить до протікання надвеликих струмів у основній обмотці *НН ТН* (рисунок 3.14).

Як свідчить усе вищенаведене, введення активного опору у вторинну обмотку *ТН* принципово зриває явище *ФРП*, проте цей спосіб не можна вважати достатньо ефективним і надійним, а саме таким, що є придатним до використання на практиці.

### **3.3 Резервний захист**

Результати симуляційних досліджень довели, що існуючі способи та заходи не забезпечують у повному обсязі захист *ТН* від пошкоджень *ФРП*. При пошкодженні *ТН* струми *КЗ* можуть вивести з ладу основний релейний захист *ТН*. Тому для резервування необхідно встановити резервний захист *ТН* на основі мікропроцесорів.

Резервний захист *ТН* [18] працює на відімкнення силових

трансформаторів, які обладнані зі сторони джерела живлення вимикачами.

Захист встановлюється та діє на два гальванічно-роз'єднаних вимикача шляхом подачі на них енергії заряджених конденсаторів  $C_1$  та  $C_2$ .

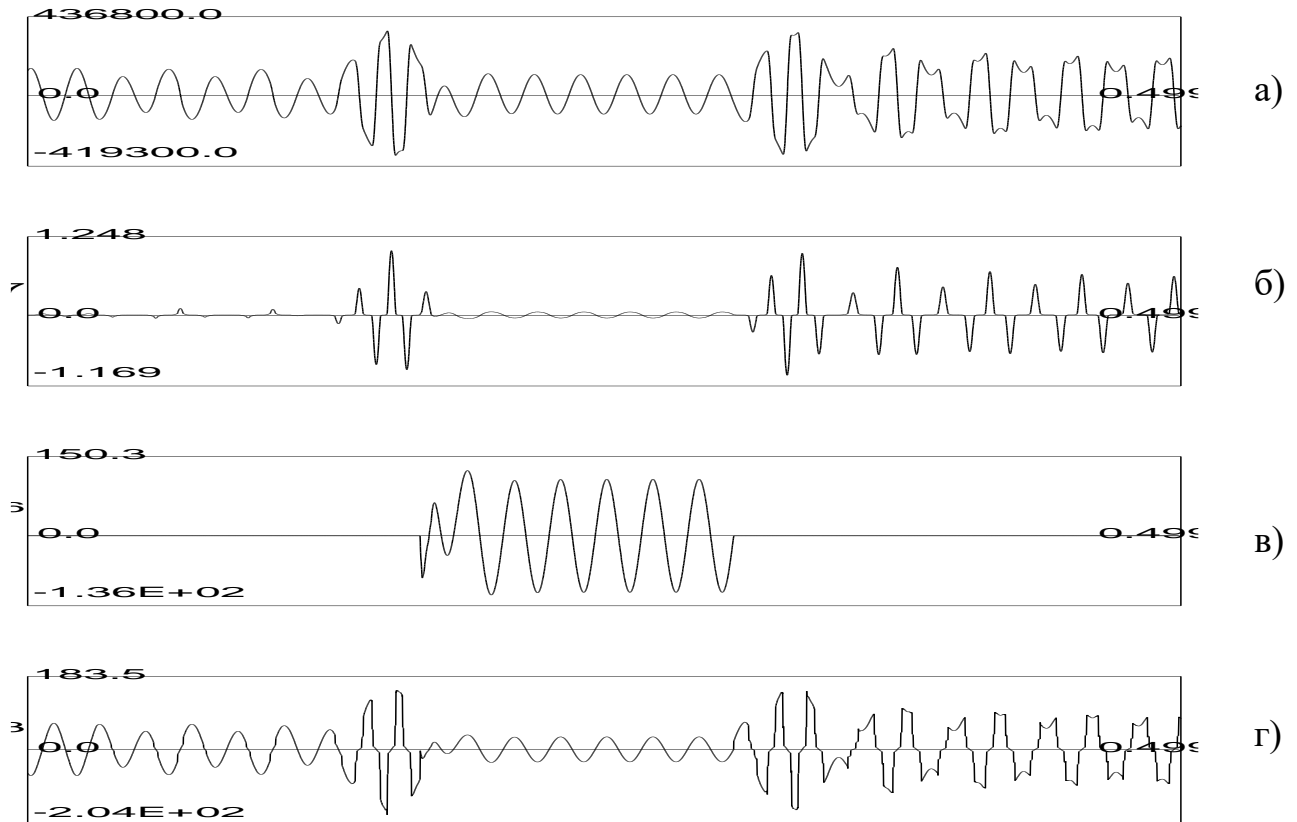


Рисунок 3.17 – Придушення ФРП пристроєм ППФ:

а) напруга, прикладена до первинної обмотки  $TH$ , б) струм первинної обмотки, в) струм вторинної обмотки, г) напруга вторинної обмотки.

Резервний захист (рисунок 3.18) складається з наступних елементів:

- блок максимального струмового захисту ( $МСЗ$ ), незалежна витримка за часом;
- конденсатори накопичення ( $C_1, C_2$ );
- пристрій зарядки/перемикання;
- силові діоди для перемикання вимикачів (по два на вимикач):  $VD_5$ ,

$VD_7, VD_9, VD_{10}$ ;

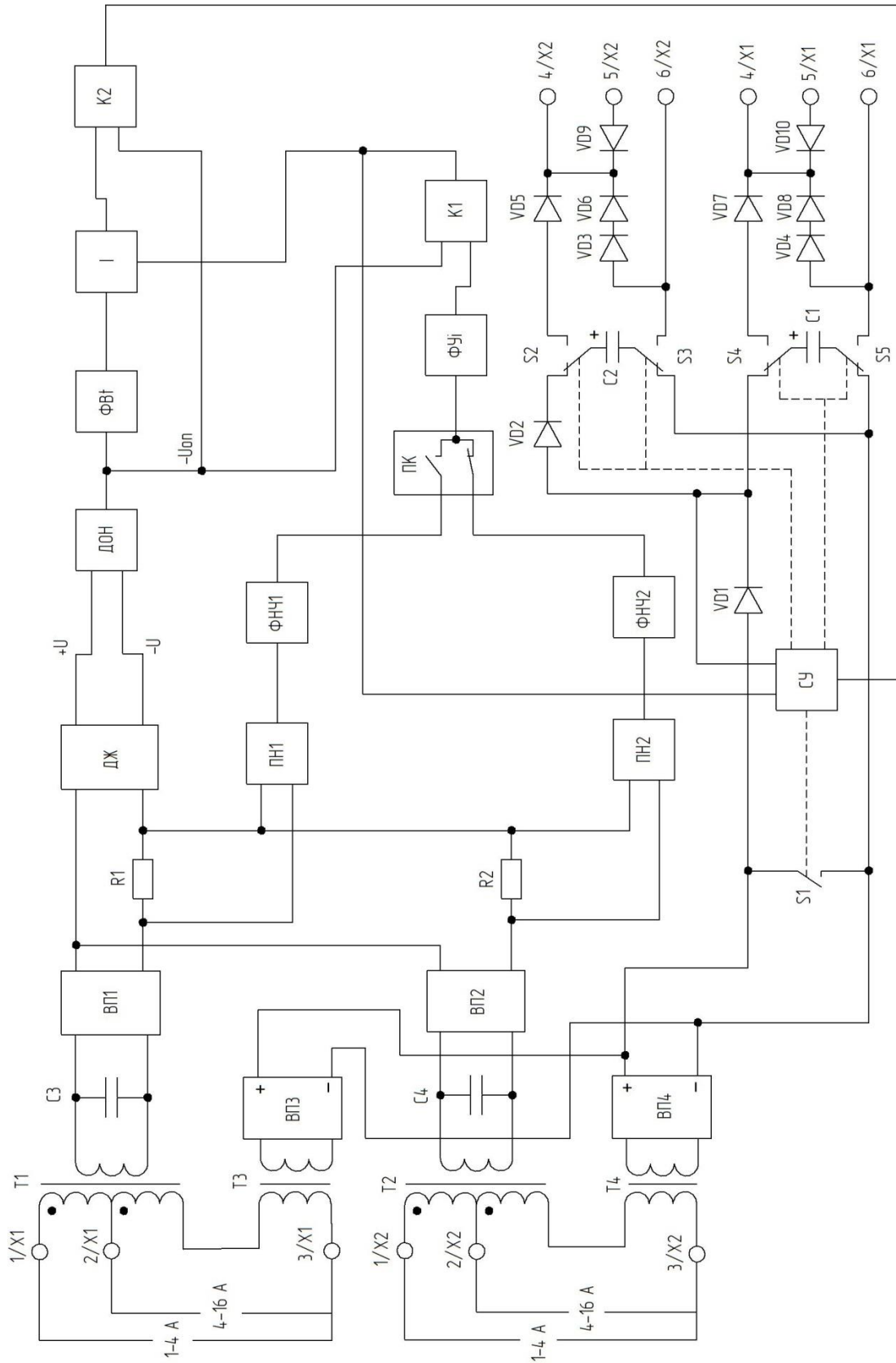


Рисунок 3.18 – Резервний захист.

- чотирьох обмежувальних діодів  $VD_3, VD_4, VD_6, VD_8$ ;
- джерела живлення (*ДЖ*);
- джерела опірної напруги (*ДОН*).

*МСЗ* забезпечує подачу на пристрій зарядки/перемикання конденсаторів  $C_1, C_2$  двох сигналів:

- сигналу перевищення вхідним струмом значення вставки струму (з виходу компаратора);
- сигналу на затримку, що рівний часу перевищення вхідним струмом значення вставки струму (з виходу компаратора  $K_2$ ).

Струм подається на вхід *ВН* первинної обмотки трансформаторів струму  $T1, T2$ . Випрямлячі *ВП1, ВП2* перетворюють змінний струм промислової частоти в випрямлений пульсуючий струм. Резисторами  $R1, R2$  – перетворюється в пульсуючу напругу.

З виходів *ФНЧ1, ФНЧ2* напруги надходять на компаратор *ПК*, який здійснює порівняння вхідних напруг з подачею струму *ФВі* на більшу з них за напругою. Формувач вставок струму *ФВі* подає масштабовану напругу на один з входів компаратора  $K1$ , а на інший вхід надходить опірна напруга з *ДОН*.

Коли значення струму стає рівне струму спрацювання вставки, напруга на виході *ФВі* стає рівна напрузі *ДОН*, при цьому з компаратора  $K1$  подається на вхід схеми керування (*СК*) сигнал для запуску інтегратора  $I$ , на якому відбувається зростання напруги. Компаратор  $K2$  подає на вхід схеми керування сигнал за умови рівності напруги на виході інтегратора  $I$  з опірною напругою *ДОН*.

Конденсатори  $C_1, C_2$  накопичують кількість енергії, яка необхідна для спрацювання виконавчих механізмів, що під'єднані до резервного захисту. Ємність кожного конденсатора – 100 мкФ.

Коли струм резервного захисту вище струму вставки, на конденсаторах



буде підтримуватись напруга  $100-140\text{ В}$ , що підвищує термін роботи.

У випадку виникнення аварії за сигналом з компаратора  $K1$ , конденсатори до заряджаються на напругу  $350\text{ В} \pm 10\%$ .

Пристрій заряд/перемикання конденсаторів  $C_1, C_2$  забезпечує:

- в номінальному режимі – підтримка на конденсаторах напруги  $100-140\text{ В}$ .

- в аварійному режимі, за сигналом з компаратора  $K1$  – до зарядження конденсаторів  $C_1, C_2$  на напругу  $350\text{ В} \pm 10\%$ .

В номінальному режимі схема керування постійно слідкує за напругою на  $C_1, C_2$ . Якщо напруга стає меншою  $100\text{ В}$ ,  $СК$  подає сигнал на розімкнення ключа  $S1$ . Відкриваються діоди  $VD1, VD2$  – конденсатори заряджаються. При зростанні напруги на  $C_1, C_2$  до значення  $100-140\text{ В}$ ,  $СК$  подає сигнал на закриття ключа  $S1$ . Діоди  $VD1, VD2$  закриваються – зарядка  $C_1, C_2$  припиняється.

### 3.4 Висновки до третього розділу

Розглянуті заходи запобіганню на зриву  $\Phi РП$  та проведені симуляційні дослідження, які показали відсутність єдиного методу для досягнення необхідного результату захисту високовольтних трансформаторів напруги на ланках  $110-330\text{ кВ}$ . Натомість, крім використання допоміжного резервного захисту, необхідно застосовувати схемотехнічні рішення для недопущення  $\Phi РП$ :

- на розподільній злагоді  $110-330\text{ кВ}$  вибрати схеми електричних з'єднань в яких неможливе виникнення  $\Phi РП$ ;

- не використовувати ємнісні ділянки напруги на повітряних вимикачах  $110\text{ кВ}$ ;

- коли відсутні засоби гасіння  $\Phi РП$  змінити порядок оперативних

перемикань (відмінних від типових);

– не вимикати приєднання та зняття заборони на дію *АПВ* ( $U_{ФРП} \leq 1.3U_{ном}$ ) при спрацюванні захисту на шинах;

– при можливості використовувати ємнісні *ТН* типу *НДС* замість електромагнітних типу *НКФ*;

Якщо всі прийняті заходи для погашення *ФРП* не можуть бути використані:

– під'єднання конденсаторів зв'язку до системних шин для збільшення ємності;

– вимкнення однієї з ліній електропостачання, яка має швидкодіючий високочастотний захист.

## **4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

### **4.1 Заходи з охорони праці та техніки безпеки на підстанції**

#### **Заходи пожежної безпеки на підстанції [17, 19].**

Всі дані при планових, поточних і капремонтах, як правило, вносяться в експлуатаційну документацію.

Забезпечення пожежної безпеки є складовою виробничої та іншої діяльності посадових осіб і персоналу енергетичних підприємств. Це відображається у трудових договорах (контрактах) та статутах підприємств.

Керівник підстанції визначає обов'язки посадових осіб щодо забезпечення пожежної безпеки, призначає своїм наказом відповідальних за пожежну безпеку окремих будівель, споруд, приміщень, технологічного та інженерного обладнання, а також за утримання й експлуатацію технічних засобів протипожежного захисту.

На кожному енергетичному підприємстві необхідно розробити інструкції про заходи пожежної безпеки та інструкції для усіх пожежонебезпечних приміщень у відповідності з основними вимогами щодо документації з пожежної безпеки .

Інструкції періодично переглядаються на основі аналізу протипожежного стану об'єкта та відповідних наказів не рідше одного разу на 3 роки.

На підприємстві є встановлений відповідний протипожежний режим, яким визначені:

- можливість застосування відкритого вогню, побутових нагрівальних приладів;
- порядок проведення тимчасових пожежонебезпечних робіт (у тому числі зварювальних);
- правила проїзду та стоянки транспортних засобів;

- місця для зберігання і допустима кількість сировини, напівфабрикатів та готової продукції, які можуть одночасно бути у виробничих приміщеннях і на території;

- порядок прибирання горючого пилю й відходів, зберігання промасленого ганчір'я та спецодягу, очищення повітропроводів вентиляційних систем від горючих матеріалів;

- порядок відключення від мережі електрообладнання в разі пожежі;

- порядок огляду й зачинення приміщень після закінчення роботи;

- порядок проходження посадовими особами навчання та перевірки знань з питань пожежної безпеки, а також проведення з працівниками протипожежних інструктажів з призначенням відповідальних осіб за їх проведення;

- порядок організації експлуатації та обслуговування наявних технічних засобів протипожежного захисту (протипожежного водогону, насосних станцій, установок пожежної сигналізації, автоматичного пожежогасіння, димовидалення, вогнегасників тощо);

- порядок проведення планово-попереджувальних ремонтів та оглядів електроустановок, опалювального, вентиляційного, технологічного та іншого інженерного обладнання;

- дії працівників у разі виявлення пожежі;

- порядок збирання складу добровільної пожежної дружини та відповідальних посадових осіб у разі виникнення пожежі, виклику вночі, у вихідні та святкові дні.

Відповідальними за пожежну безпеку окремих цехів, лабораторій, майстерень, складів і інших виробничих і допоміжних споруд підприємства є керівники цих структурних підрозділів або посадові особи, які виконують їхні обов'язки.

Керівники структурних підрозділів підприємства, а також інші посадові особи, відповідальні за пожежну безпеку, зобов'язані:

- забезпечити дотримання протипожежного режиму і виконання в установлені строки заходів, які підвищують пожежну безпеку;
- забезпечити справність і нормальну роботу технологічного обладнання відповідно до технологічних вимог і проектних рішень та негайно вживати заходів до усунення виявлених несправностей, які можуть призвести до пожежі або загорання;
- організувати пожежно–технічне навчання персоналу і вимагати від нього дотримання протипожежного режиму та виконання встановлених вимог пожежної безпеки, особливо щодо технології виробництва;
- забезпечити контроль за виконанням вимог пожежної безпеки при проведенні ремонтних робіт, а також відключення електромережі після закінчення роботи;
- забезпечити утримання в справному стані і постійну готовність до дії всіх засобів виявлення та гасіння пожежі;
- при виявленні пожежі негайно викликати пожежний підрозділ, оповістити керівництво підприємства та організувати гасіння пожежі й евакуацію персоналу (при потребі).

#### **Заходи щодо захисту від ураження електричним струмом [17, 19].**

Трансформаторні підстанції в системі електропостачання перетворюють трифазний змінний струм, що отримується від енергосистем, в трифазний змінний нижчої напруги.

Підстанції підрозділяються на опорні та проміжні залежно від схеми первинного електропостачання.

Опорні підстанції служать для розподілу електроенергії, що поступає від електричної системи; від їх шин відходять лінії електропередачі для живлення інших трансформаторних підстанцій. Опорною вважається підстанція, до шин 110-220 кВ якою приєднується не менше трьох живлячих ліній електропередачі.

Проміжні підстанції можуть бути проміжними або транзитними. Проміжні підключаються до відгалуження від ліній електропередачі, а транзитні – в розтин живлячих високовольтних ліній.

Правила електробезпеки на підстанції визначають два види заходів, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках: організаційні заходи; технічні заходи і засоби захисту.

До організаційних заходів належать:

а) вимоги до електротехнічного персоналу:

– вік персоналу для самостійної роботи повинен бути не менше 18 років;

– персонал повинен бути здоровий, не мати каліцтв, що перешкоджають роботі в електроустановках;

– персонал повинен бути навчений, мати кваліфікаційну групу, що свідчить про рівень знань у галузі правил експлуатації електроустаткування та техніки безпеки при експлуатації;

б) усі роботи в електроустановках виконуються, як правило, за нарядом, і тільки для оперативно–чергового персоналу допускається виконання робіт з усного розпорядження із записом в оперативному журналі.

До технічних заходів належать:

– відключення струмопровідних частин або устаткування, на яких будуть виконуватися ремонтні роботи або роботи з налагодження;

– встановлення попереджувальних, забороняючих плакатів і огорожень місця роботи;

– перевірка відсутності напруги;

– накладення переносних захисних заземлень на відключені струмопровідні частини з усіх боків, звідки може надходити напруга. Більшість нещасних випадків на виробництві виникають через невиконання організаційних заходів.

Захисними засобами в електроустановках називаються прилади, апарати, переносні пристосування й пристрої, що служать для захисту

персоналу, який працює в електроустановках, від ураження електричним струмом, а також від впливу електричної дуги. Вони поділяються на ізолюючі, огорожувальні та допоміжні.

Ізолюючі захисні засоби – це засоби, виготовлені з ізоляційного матеріалу (бакеліт, текстоліт, фарфор, гума, пластмаса та ін.). Вони, у свою чергу, поділяються на основні й додаткові.

Основні захисні засоби – це такі, ізоляція яких надійно витримує робочу напругу електричної установки. За допомогою основних засобів можна торкатися струмопровідних частин, що знаходяться під напругою. До них відносяться: оперативні і вимірювальні штанги; ізолюючі і струмовимірні кліщі; покажчики напруги; спеціальні пристрої для ремонтних робіт (ізолювання майданчика, східці, ланки телескопічних вишок і т. п.). В установках до 1000 В основними захисними засобами є: діелектричні рукавички; інструмент з ізольованими ручками (заводського виготовлення); індикатори.

Додаткові захисні засоби – це такі засоби, що не гарантують надійну ізоляцію від робочої напруги і є додатковим заходом. До них належать:

- в установках вище 1000 В – діелектричні рукавички, діелектричні боти, діелектричні килими; ізолюючі підставки на порцелянових ізоляторах;
- в установках до 1000 В – діелектричні калоші, діелектричні килимки, ізолюючі підставки.

Огорожувальні захисні засоби. До них належать: ширма, бар'єри, щити, сітки; ізолюючі накладки і ковпаки (з ізоляційного матеріалу); переносні захисні заземлення; попереджувальні, забороняючі плакати.

## **4.2 Заходи щодо підвищення стійкості роботи трансформаторної підстанції за умов надзвичайних ситуацій**

Для підвищення стійкості роботи об'єктів заводу передбачається здійснення комплексу інженерно-технічних і організаційних заходів [20].

Під стійкістю роботи об'єкта слід розуміти здатність безперебійно виконувати задані функції за умов впливу надзвичайних ситуацій, пристосованість об'єкта до швидкого відновлення у разі заподіяних ушкоджень. Цей вид стійкості іноді називають технологічною стійкістю об'єкта [20].

Стійкість роботи об'єкта загалом залежить від багатьох чинників, навіть від місця розташування, характеру й важливості виконуваних робіт.

Заходи підвищення стійкості роботи об'єктів складаються з комплексу інженерно-технічних і організаційних заходів [20].

Організаційні заходи – заходи, необхідні для змін або пристосування роботи об'єкта до умов воєнного часу.

До інженерно-технічних заходів відносяться заходи, необхідні для підвищення стійкості інженерно-технічного комплексу об'єкта, його технологічного процесу. Такі заходи, зазвичай, виконуються завчасно за типовими чи індивідуальними проектами та потребують значних коштів. До них можна віднести будівництво захисних споруд, кільцювання енергетичних мереж, тощо [20].

У зв'язку з тим, що об'єкти електромеханічного заводу за своїм призначенням, розмірами, конструктивними та технологічними особливостями відрізняються один від одного, виробити єдині, типові для всіх об'єктів заходи щодо підвищення стійкості роботи неможливо. На кожному об'єкті характер і масштаби інженерно-технічних і організаційних заходів будуть різними, властиві лише даному об'єкту.

Інженерно–технічні заходи вимагають великих матеріальних витрат і часу. Тому, дуже важливо при проектуванні об'єкта враховувати заходи



щодо підвищення стійкості роботи. Захист робочих, службовців, членів сімей і пасажирів у разі виникнення надзвичайних ситуацій мають першочергового значення для стійкості роботи об'єкта [20].

До способів захисту людей відноситься: своєчасне оповіщення про загрозу виникнення надзвичайної ситуації; безпосередня близькість до місця праці та проживання достатньої кількості захисних споруд для укриття; забезпечення чергового персоналу об'єкта (склад працівників, що обслуговують поїзди) індивідуальними укриттями; вчасне й організоване проведення евакуації та розосередження населення; наявність підготовлених формувань МНС; наявність завчасно розроблених графіків робочих змін [20].

Захист інженерно–технічного комплексу об'єкта досягається забезпеченням однакової міцності всіх елементів об'єкта за рахунок підвищення стійкості найслабших елементів; організацією захисту цінного і унікального устаткування шляхом його укриття чи встановлення спеціальних захисних пристосувань; проведенням спеціальних заходів захисту радіотехнічних і електронних пристроїв від проникаючої радіації та електромагнітного імпульсу ядерного вибуху; будівництвом підземних споруд і розміщенням пристроїв об'єкта під землею; розподіл розміщення окремих елементів об'єкта; будівництвом дублюючих споруд і пристроїв об'єкта; створенням резервів потужності основних елементів (пристроїв) і об'єкта загалом [20].

Підвищення стійкості управління та зв'язку на об'єкті досягається шляхом: створення добре захищеного та дубльованого зв'язку, здатного успішно працювати за умов надзвичайних ситуацій; заміни повітряних ліній зв'язку кабельними підземними лініями; визначення чітких функцій підрозділам об'єкту та окремим посадових особам у надзвичайних ситуацій; розробка режимів і графіків виробничої роботи об'єкта у надзвичайних ситуацій, готовність керівного складу об'єкта під час надзвичайних ситуацій; широкого впровадження сучасних, надійних і добре захищених систем управління та зв'язку на період надзвичайних ситуацій [20].

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі розглянуто питання підвищення надійності первинних перетворювачів напруги в схемах обліку електричної енергії.

1. Показано, що основні причини, які викликають пошкодження первинних перетворювачів напруги, пов'язані з ферорезонансними процесами в магнітопроводах, які мають місце у нелінійних колах змінного струму.

2. На основі побудованої моделі «лінія – трансформатор напруги», яка відтворює послідовно-паралельний резонансний контур, проведених симуляційних досліджень встановлено, що вимкнення системи шин  $220\text{кВ}$  призводить до виникнення ферорезонансних процесів та пошкодження обмоток первинних перетворювачів напруги.

3. Проведені дослідження впливу параметрів ферорезонансного контуру показали, що зміна кількості вимикачів може призвести до виникнення та розвитку ферорезонансного процесу.

4. Розглянуті заходи та проведені симуляційні дослідження показали відсутність єдиного методу для досягнення необхідного результату захисту первинних перетворювачів напруги на ланках  $110\text{–}330\text{кВ}$ .

Тому, крім використання описаного в роботі допоміжного резервного захисту, необхідно застосовувати схемотехнічні рішення для недопущення *ФРП*:

- на розподільній злагоді  $110\text{–}330\text{кВ}$  вибрати схеми електричних з'єднань в яких неможливе виникнення *ФРП*;
- не використовувати ємнісні ділянки напруги на повітряних вимикачах  $110\text{кВ}$ ;
- коли відсутні засоби гасіння *ФРП* змінити порядок оперативних перемикачів (відмінних від типових);

– не вимикати приєднання та зняття заборони на дію *АПВ* ( $U_{\Phi PII} \leq 1.3U_{ном}$ ) при спрацюванні захисту на шинах;

– при можливості використовувати ємнісні *ТН* типу *НДС* замість електромагнітних типу *НКФ*;

Якщо всі прийняті заходи для погашення *ФРП* не можуть бути використані:

– під'єднання конденсаторів зв'язку до системних шин для збільшення ємності;

– вимкнення однієї з ліній електропостачання, яка має швидкодіючий високочастотний захист.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Z. Bakhor, A. Yatseiko, R. Ferensovych. Assessment of ferroresonance processes in schemes of 6-35 kV electrical grids on the basis of reliability analysis. *Energy Engineering and Control Systems*, 2020, Vol. 6, No. 2, pp. 137 – 145. <https://doi.org/10.23939/jeeecs2020.02.137>.

2. Журахівський А. В. Ферорезонансні процеси на частоті мережі та діапазони гасильних резисторів для його зриву / А. В. Журахівський, А. Я. Яцейко, Р. Я. Масляк // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Електроенергетичні та електромеханічні системи. - 2015. - № 834. - С. 20-25. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPEEC\\_2015\\_834\\_6/](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPEEC_2015_834_6/).

4. Журахівський А.В. Аналіз методом гармонічного балансу коливних процесів в однофазному контурі з нелінійною індуктивністю / А.В. Журахівський, Ю.А. Кенс, П.В. Батенько, Р.В. Мединський // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: електротехніка і енергетика. Випуск 98), Донецьк – 2005 – С. 74–80.

4. Бесараб О.Б. Аналіз зон стабільності ферорезонансних процесів в розподільних пристроях електричних мереж високої напруги: дис.... канд. техн. наук: спец. 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи / Бесараб Олександр Борисович. – Київ: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 2005. – 130 с.

5. Кузнецов В.Г. Аналіз ферорезонансних процесів в розподільчому пристрої підстанції високої напруги за допомогою методів нелінійної динаміки /В.Г. Кузнецов, І.Ю. Тугай // Технічна електродинаміка. (Тем. вип.: Силова електроніка та енергоефективність). – 2012. – Ч. 3. – С. 33–34.

6. Журахівський А.В. Дослідження ферорезонансних процесів в електромережах з заземленою нейтраллю на основі комп'ютерного моделювання / А.В. Журахівський, Ю.А. Кенс, В.С. Коновал, А.Я. Яцейко //

Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2009. – № 654. – С. 74–81.

7. Ferracci P. Ferroresonance / P. Ferracci // Cahier technique. Schneider Electric. – Paris, 1998. – №. 190. – P. 1–28.

8. 1. Маляр В.С. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: – Львів: Видавництво «Львівська політехніка», 2018. – 416 с.

9. Карпов Ю.О., Каців С.Ш., Кухарчук В.В., Ведміцький Ю.Г. Теоретичні основи електротехніки. усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими та розподіленими параметрами. Підручник. – Херсон: «Олді-Плюс+», 2019. – 326 с.

10. Техніка високих напруг: Курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. Б. Абрамов, В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, О. Р. Проценко – Електронні текстові дані (1 файл: 8,95 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. –345с.

11. Кузнецов В.Г., Тугай І.Ю. Моделювання трансформатора напруги при ферорезонансних процесах. Вісн. нац. ун-ту «Львівська Політехніка». Львів: НУ «Львівська політехніка». 2007. № 596. С. 127–131.

12. Тугай Ю.І. Аналіз умов виникнення ферорезонансних процесів в електричних мережах. Вісн. нац. ун-ту. «Львівська політехніка ». Львів: НУ «Львівська політехніка». 2007. Вип. 596. С. 132–13.

13. Al Zahawi B. A. T. Chaos in ferroresonant wound voltage transformers: effect of core losses and universal circuit behaviour / B. A. T. Al Zahawi, Z. Emin, Y.K. Tong // Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings, vol. 145, pp. 39-43, 1998.

14. Бесараб О.Б. Моделювання ферорезонансного процесу в трансформаторі напруги прямим методом / О.Б. Бесараб, Ю.І. Тугай // Праці ІЕД НАНУ. – 2011. – Вип. 30. – С. 87–90.

15. Грабко В. В., Розводюк М. П., Левицький С. М. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина IV. Трансформатори. / В. В.

Грабко, М. П. Розводюк, С. М. Левицький Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 219 с.

16. Равлик О.М. Цифровий комплекс для аналізу роботи та проектування пристроїв релейного захисту й автоматики. (програма RE) Гречин Т.М., Іваноньків В.С. / О.М. Равлик, Т.М. Гречин, В.С. Іваноньків // Вісник НУ"ЛП", Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 1997 – №340 – 96-101 с.

17. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів [Текст]: [затв. . Наказ М-ва палива та енергетики України 25.07.2006 № 258 ] // М-во палива та енергетики України. – Х.: Індустрія : Енергетичні рішення. – 2012. – 318 с.

18. Пат. 61630А. Україна. Спосіб захисту трансформатора напруги від пошкоджень ферорезонансними процесами в електричних мережах з заземленою нейтраллю // Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Батенько П.В., Іваноньків В.Й. Опубл. 17.11. 2003 р.

19. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр” / Укладачі: Гурик О.Я., Окіпний І.Б. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 20 с. Режим доступу: [https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/35902/1/Method.\\_%20vkazivky\\_%20dlya\\_%20napysannnya\\_%20rozd.\\_%20Bezp.\\_%20zhyttyed.\\_.pdf](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/35902/1/Method._%20vkazivky_%20dlya_%20napysannnya_%20rozd._%20Bezp._%20zhyttyed._.pdf).

20. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека». Навчальний посібник [Електронний ресурс] / В.С. Стручок, – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2022.–150 с. Режим доступу: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39424>.