

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“ ____ ” _____2025р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“Підвищення надійності функціонування
трансформаторів напруги в електричних мережах з
ізолюваною нейтраллю”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-24М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»

_____Василенко Я.В.
« ____ » _____2025р.

Керівник роботи

к.т.н., доцент

_____Андрій КОТИШ

« ____ » _____2025р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет Будівництва транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Плешков П.Г.

«_____» _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА
ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ
ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Василенка Ярослава Володимировича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Підвищення надійності функціонування

трансформаторів напруги в електричних мережах з ізольованою нейтраллю

Improving the reliability of voltage transformers in electrical networks with isolated neutral

2. Керівник роботи (проекту)

Котвиш Андрій Іванович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту)

Вступ; 1. Шляхи підвищення надійності роботи трансформаторів напруги в розподільвальних мережах; 2. Дослідження та оцінка факторів, що впливають на пошкодження трансформаторів напруги; 3. Моделювання процесів в розподільвальних мережах із трансформаторами напруги; 4. Охорона праці; Висновки; Перелік посилань.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Іван САВЕЛЕНКО</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ</i>	<i>08.10.25</i>	
<i>2</i>	<i>Шляхи підвищення надійності роботи трансформаторів напруги в розподільвальних мережах</i>	<i>16.10.25.</i>	
<i>3</i>	<i>Дослідження та оцінка факторів, що впливають на пошкодження трансформаторів напруги</i>	<i>30.10.25.</i>	
<i>4</i>	<i>Моделювання процесів у трансформаторах напруги при їх включенні та відключенні від мережі</i>	<i>15.11.25</i>	
<i>5</i>	<i>Охорона праці</i>	<i>26.11.25.</i>	
<i>6</i>	<i>Висновки</i>	<i>01.12.25</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2025 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2025 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 84 с.; 28 рис.; 10 табл.; 26 джерел.

Василенко Я.В. Підвищення надійності функціонування трансформаторів напруги в електричних мережах з ізольованою нейтраллю. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». Центральноукраїнський національний технічний університет. Кропивницький, 2025 р.

Метою роботи є підвищення надійності роботи трансформаторів напруги в електричних мережах з ізольованою нейтраллю шляхом аналізу умов їх експлуатації, виявлення основних причин пошкоджень та розроблення технічних рішень для запобігання виникненню аварійних режимів.

У роботі розглянуто питання підвищення надійності функціонування трансформаторів напруги в електричних мережах з ізольованою нейтраллю. Проаналізовано основні причини пошкоджень трансформаторів напруги, зокрема вплив ферорезонансних процесів і дугових однофазних замикань на землю. Запропоновано технічні заходи та конструктивні рішення, спрямовані на запобігання виникненню небезпечних режимів роботи та продовження терміну служби трансформаторів напруги.

Ключові слова: трансформатор напруги, замикання на землю, ферорезонанс, нейтраль мережі, кратність перенапруги

SUMMARY

Vasylenko Y.V. Improving the reliability of voltage transformers in electrical networks with isolated neutral. 141 "Electric power, electrical engineering and electromechanics" EPP, "Electrical power consumption systems". Central Ukrainian National Technical University. Kropyvnytskyi, 2025.

The aim of the work is to increase the reliability of voltage transformers in electrical networks with an isolated neutral by analyzing their operating conditions,

identifying the main causes of damage and developing technical solutions to prevent the occurrence of emergency modes.

The work considers the issue of increasing the reliability of voltage transformers in electrical networks with an isolated neutral. The main causes of voltage transformer damage are analyzed, in particular the impact of ferroresonance processes and arc single-phase ground faults. Technical measures and design solutions are proposed to prevent the occurrence of dangerous operating modes and extend the service life of voltage transformers.

Keywords: voltage transformer, ground fault, ferroresonance, network neutral, overvoltage ratio

Зміст

Вступ.....	7
Розділ 1. Шляхи підвищення надійності роботи трансформаторів напруги в розподільовальних мережах.....	9
1.1. Загальні характеристики трансформатора напруги як елемента мережі.....	9
1.2. Принцип дії і основні типи трансформаторів напруги.....	12
1.3. Умови роботи трансформаторів напругив розподільних мережах 6 (10) -35кВ.....	15
1.4. Заходи щодо запобіганню і зриву ферорезонансних процесів і захисту трансформаторів напруги.....	20
Розділ 2. Дослідження та оцінка факторів, що впливають на пошкодження трансформаторів напруги.....	33
2.1. Статистичний аналіз причин пошкодження трансформаторів напруги.....	33
2.2. Фактори, які мають вплив на пошкоджуваність трансформаторів напруги.....	37
2.3. Розрахункова схема розподільної електричної мережі із трансформаторами напруги.....	39
Розділ 3. Моделювання процесів в розподільовальних мережах із трансформаторами напруги.....	49
3.1. Моделювання процесів у трансформаторах напруги при їх включенні та відключенні від мережі.....	49
3.2. Моделювання процесів у трансформаторах напруги із врахуванням ємностей обмоток.....	61
3.3. Дослідження процесів, що виникають в ТН в розподільних мережах з ізольованою нейтраллю в умовах однофазного замикання на землю.....	65
3.4. Пристрій ПЗФ-5 – ефективний засіб захисту трансформаторів напруги.....	70
Розділ 4. Охорона праці	75
4.1. Заходи по усуненню шуму трансформатора.....	75
4.2. Розрахунок контуру заземлюючого пристрою.....	76
Висновки.....	80
Перелік посилань.....	81

ВСТУП

Електричні мережі є необхідною проміжною ланкою у системі джерело енергії - споживач. Вони забезпечують передачу електроенергії від джерел до споживачів та її розподіл. Основне призначення електричних систем (ЕС) полягає у забезпеченні надійного електропостачання споживачів енергосистеми електроенергією належної якості. Воно має здійснюватися за дотримання вимог до техніко-економічних показників мережі, тобто. при економічно виправданих і по можливості мінімальних витратах.

Напруга в ЕС істотно впливає на техніко-економічні показники мереж та підключених до них споживачів. Так, наприклад, при підвищенні напруги знижуються втрати потужності та електроенергії, тобто. знижуються експлуатаційні витрати, зменшуються необхідні передачі одиниці потужності перерізу проводів і витрати металу на споруду повітряних ліній (ПЛ), зростають граничні потужності, що передаються по ПЛ, полегшується майбутній розвиток ЕС, але збільшуються капітальні вкладення на її спорудження. ЕС менших номінальних напруг вимагають, навпаки, менших капітальних витрат, але призводять до великих експлуатаційних витрат через зростання втрат потужності та електроенергії і, крім того, мають меншу пропускну здатність.

Проблема надійності електричної мережі полягає в тому, що загальна надійність функціонування мережі безпосередньо залежить від технічного стану, якості проектування, режимів роботи та взаємодії її окремих елементів — ліній електропередачі, трансформаторів, комутаційної, вимірювальної й захисної апаратури. Вихід з ладу навіть одного з цих компонентів може спричинити порушення нормального режиму роботи, виникнення аварійних ситуацій або тривалих перерв в електропостачанні.

Підвищенню надійності роботи електричних мереж було присвячено безліч робіт видатних вчених, науковців, практиків [1, 2] тощо.

Отже, основна проблема полягає у забезпеченні комплексної надійності всіх елементів електричної мережі, їх узгодженій роботі, своєчасному виявленні та запобіганні відмов, що потребує впровадження сучасних систем діагностики, моніторингу стану та технічного обслуговування.

Одними з найбільш пошкоджуваних елементів енергетичних систем та електричних мереж з ізольованою нейтраллю є трансформатори напруги ТН, які використовуються в схемах контролю ізоляції, релейного захисту та обліку електроенергії. Особливістю цих мереж є те, що практично всі лінії електропередач – повітряні, проходять через лісо-посадки, а підстанції працюють без чергового персоналу.

Тому метою роботи безперечно було дослідження та розробка необхідних заходів по підвищенню надійності функціонування ТН в розподільних мережах з ізольованою нейтраллю.

РОЗДІЛ 1

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЮВАЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

1.1. Загальні характеристики трансформатора напруги як елемента мережі

Сучасні ЕЕС можна умовно розглядати як органічну єдність потужнострумове високовольтного електроенергетичного обладнання, об'єднаного поняттям первинної системи, і безлічі різноманітних вторинних систем. Останні являють собою сукупність технічних засобів, що забезпечують контроль і оперативне управління елементами первинної системи в нормальних і аварійних режимах. Первинна і вторинна системи взаємопов'язані трактом передачі інформації, побудованому на основі ТН і ТС.

Призначення трансформаторів напруги (ТН) полягає у перетворенні напруги первинних електричних систем у такий вихідний сигнал, параметри якого функціонально пов'язані з параметрами вхідного сигналу та можуть бути виміряні з необхідною точністю. При цьому ТН виконують низку функцій, які забезпечують можливість подальшого використання сигналів у вторинних системах, зокрема:

- * нормування рівня сигналу;
- * оперативне (динамічне) перетворення сигналу;
- * зниження потенціалу сигналу відносно землі;
- * узгодження вихідного опору ТН із вхідним опором наступних елементів вторинних систем;
- * зміну характеру сигналу в часі (наприклад, перетворення аналогового сигналу у дискретний);
- * зміну фізичної природи сигналу (наприклад, перетворення електричного сигналу в оптичний та навпаки);

* передачу енергії для забезпечення необхідного рівня потужності вихідного сигналу.

Слід підкреслити, що в конкретному трансформаторі напруги (ТН) реалізуються не всі зазначені функції, а лише певна їх частина. При цьому перша та третя операції є обов'язковими, оскільки без їх виконання використання сигналу у вторинних системах стає неможливим.

Залежно від режиму обробки сигналу, ТН можуть працювати у статичному або динамічному режимі.

- Статичний режим – це режим, коли вихідний сигнал протягом певного часу можна вважати практично незмінним.
- Динамічний режим – це режим, за якого вихідний сигнал змінюється в процесі роботи вторинної системи, і при цьому динамічна похибка має суттєвий вплив на роботу вторинних пристроїв.

Таким чином, вибір статичного чи динамічного режиму визначається швидкістю вторинних пристроїв, з якими взаємодіє ТН.

Перетворення періодичних (синусоїдальних чи несинусоїдальних) напруг відносять до динамічних, якщо вторинні системи реагують на миттєві значення напруги. Якщо ж вони орієнтуються на середні чи діючі значення сигналу – процес розглядають як статичний.

Оскільки у складі ТН зазвичай присутні індуктивні та ємнісні елементи, їх доцільно розглядати саме як динамічні системи. Додатковим критерієм віднесення перетворювачів до статичних чи динамічних є характер зміни вхідного сигналу, що визначається режимом роботи електричної системи (ЕС).

При дослідженнях ЕС доцільно розрізняти три режими: нормальний перехідний, післяаварійний усталений і перехідний. Тому при дослідженні ТН слід відповідно розрізняти їх нормальний усталений (стаціонарний), аварійний усталений і перехідний (динамічний) режими.

Очевидно, що нормальні та аварійні сталі режими роботи ЕЕС змінного струму визначають статичний режим роботи ТН крім тих випадків, коли

вторинні пристрої реагують на миттєві значення струму або напруги.

Основною особливістю роботи ТН в динамічних режимах є несподівані зміни режиму первинних систем - КЗ, включення або відключення окремих пристроїв, за яких в ЕЕС виникають перехідні процеси. У кожному з них принципово мають місце такі процеси: найбільш швидко протікають хвильові; електромагнітні, обумовлені динамічними властивості електричних ланцюгів; повільно протікають електромеханічні, обумовлюються Ліван зміною положень і швидкостей обертання роторів генераторів, компенсаторів і двигунів.

В даний час, переважна більшість вторинних систем ЕЕС не реагують на хвильові процеси внаслідок малого часу їх перебігу в порівнянні з часом роботи вимірювальних органів вторинних систем. Тому ТН, застосовувані в ЕЕС, не призначаються для перетворення напруги при таких процесах. Повільно протікають в порівнянні з часом роботи вторинних систем електромеханічні перехідні процеси найчастіше також не визначають режим ТН, як динамічний. Навіть помітні, з точки зору функціонування вторинних систем, зміни вихідних сигналів не завжди дозволяють віднести перетворення до динамічних. Наявність періодичних напруг з повільно змінюється внаслідок електромеханічних перехідних процесів амплітудою, хоча і може призводити до динамічних режимам роботи порівняно повільно діючих вторинних пристроїв, але не дозволяє розглядати роботу ТН в динамічних режимах. Тому будемо виходити з того, що динамічні перетворення напруги на практиці мають місце головним чином у результаті впливу електромагнітних перехідних процесів. Це обумовлено тим, що час існування цих процесів близько до часу роботи вторинних систем і значення динамічних похибок ТН при цих процесах незначні.

Слід зазначити, що при раптовій зміні режиму первинної системи (КЗ в ЕС, відключення КЗ), ТН може працювати в динамічному режимі. При цьому динамічний режим визначається електромагнітним перехідним процесом як в самому ТН, так і в ЕС. Причиною роботи ТН в динамічному режимі може

бути також зміна режиму роботи вторинної системи, наприклад комутація навантаження.

1.2. Принцип дії і основні типи трансформаторів напруги

ТН по конструктивному виконанню принципово не відрізняються від силових понижуючих трансформаторів (Рис.1.1, а) [3].

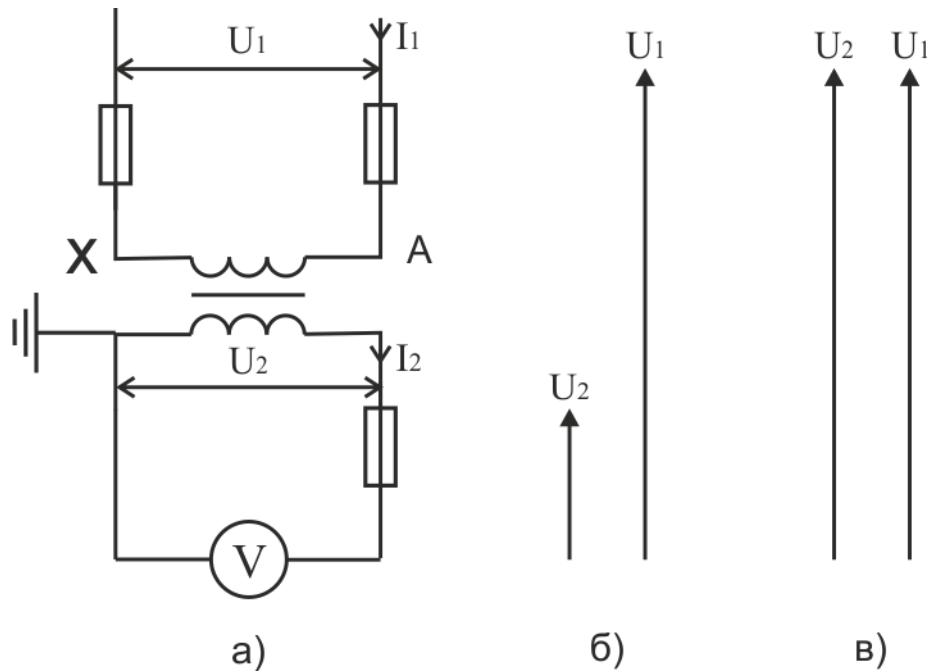


Рис.1.1. Схема (а) і векторні діаграми ТН при $K_{ном} > 1$ (б) і $K_{ном} = 1$ (в)

При використанні ідеального ТН збігаються по фазі його первинна і вторинна напруги (Рис. 10.1, б), і ставлення їх абсолютних значень одно $K_{ном}$. При коефіцієнті трансформації $K_{ном} = 1$ напруга $U_2 = U_1$ (рис. 2.1, в).

У загальному вигляді ТН можуть виконуватися у вигляді пристроїв індукційного (трансформаторного) або ємнісного типу. У розподільних ЕС поширення отримали ТН трансформаторного типу.

Первинна обмотка ТН включається в ланцюг високої напруги паралельно, вона ізолюється від вторинної обмотки відповідно до класу напруги електроустановки. Для безпеки обслуговування один висновок вторинної обмотки обов'язково заземлюється.

Таким чином, ТН ізолює вимірювальні прилади і реле від ланцюга високої напруги і робить безпечним їх обслуговування. Зазвичай за номінальну вторинну напругу прийнято напруга 100 або $\sqrt{100}/3\text{В}$. Це дозволяє для вимірювання будь-якої високої напруги застосовувати одні й ті ж стандартні вимірювальні прилади, реле захисту, прилади автоматики та сигналізації. ТН класифікують за такими ознаками:

- по напрузі;
- по числу обмоток (двох або трьохобмоточні);
- по числу фаз (одне або трифазні);
- за способом охолодження (сухі та масляні). ТН характеризуються

наступними параметрами:

- первинним напругою $U_{1ном}$;
- вторинною напругою $U_{2ном}$;
- номінальним коефіцієнтом трансформації, рівним відношенню або чисел витків первинної $W_{1ном}$ і вторинної обмоток $W_{2ном}$, Або первинних і

вторинних номінальних напруг ($K_{ном} = \frac{W_{1ном}}{W_{2ном}} = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}}$);

- номінальним навантаженням $S_{2ном}$ (навантаженням, при якій похибки ТН не виходять за межі, встановлені для даного класу точності);
- похибкою ТН, обумовленої втратами потужності в його магнітопроводі і обмотках.

Залежно від рівня напруги розрізняють ТН низької напруги (номінальну напругу до 1000 В) і високого (понад 1000 В). Необхідність такого поділу ТН обумовлена залежністю параметрів і режимів трансформатора від прикладеної напруги.

Тому ТН, як об'єкт дослідження, можна розділити на наступні групи :

- з лінійними характеристиками;
- з несуттєво нелінійними характеристиками;
- з істотно нелінійними характеристиками.

До першого класу відносяться ТН, всі параметри яких можна без помітної похибки приймати лінійними. До другого - ТН з нелінійними параметрами такого роду, що їх характеристики можна лінеаризувати в досить широкому діапазоні без втрати їх суттєвих особливостей. Це може виражатися в за-предметної, але допустимої похибки розрахунків. До третього - ТН з параметрами, характеристики яких не можуть бути лінеаризовані в необхідному діапазоні без втрат їх істотних властивостей. Це може виражатися, наприклад, в неприйнятній похибці методів розрахунку при лінеаризації характеристик ТН. Слід відмітити, що один і той же ТН в залежності від режиму роботи і характеру розв'язуваної задачі можна віднести до двох і навіть трьох різних класам.

Стан ТН оцінюють за величиною індукції, пов'язаної з напруженням співвідношенням:

$$\vec{B} = \mu_a \cdot \vec{H} \quad (1.1)$$

де μ_a - Тензор магнітної проникності;

\vec{B} - Вектор магнітної індукції;

\vec{H} - вектор напруженості магнітного поля.

Слід зазначити, що магнітні середовища, які застосовуються як концентра-торів поля, знижують рівень похибок, але призводять до появи нових за своїм характером джерел погрішностей. При постійних токах ними є нелінійна залежність індукції від напруженості поля, анізотропні властивості магнітного речовини.

Якщо говорити про структуру ТН, виконаних на основі трансформаторного ефекту (електромагнітні ТН), то їх можна розділити на елементарні ТН, перед-складові собою найпростіші двох- і багатообмоточні трансформатори з одним магнітопроводом, і каскадні ТН, що представляють послідовне з'єднання елементарних ТН в одній конструкції.

Типи і основні технічні характеристики ТН, що виготовляються в теперішній час, наведені у Додатку А. Починаючи з 1998 р замість ТН типу

НТМИ розпочато випуск ТН типу НАМИ (А - антирезонансні).

На відміну від ТН типу НТМИ і ЗНОЛ, ТН типу НАМИ, згідно [4], завдяки антирезонансним властивостям повинні мати підвищену надійність і більша стійкість до переміжним дуговим ОЗЗ. Для забезпечення стійкості даного типу ТН не потрібно використання будь-яких додаткових заходів. ТН призначений для роботи в ЕС з ізольованою нейтраллю чи заземленою через дугогасний реактор.

Останнім часом все більш широке застосування знаходить нове покоління литих ТН типів НОЕЛ-6 і НОЕЛ-10 та НАЛІ.

1.3. Умови роботи трансформаторів напругив розподільних мережах 6 (10) -35кВ

Передача і розподіл електричної енергії здійснюється ЕС напругою 110-6 кВ. Кожному номінальній напрузі відповідає свій клас ізоляції, який повинен забезпечити працездатність обладнання при будь-яких можливих перенапруженнях. Слід розрізняти два види перенапруг: зовнішня (атмосферні) і внутрішні (основні з яких - комутаційні).

Атмосферні перенапруги найчастіше є наслідком прямого попадання блискавки в дроти ПЛ або в будь електроенергетичне обладнання.

Внутрішні підвищення напруг виникають при нормальних оперативних процесах включень і відключень трансформаторів і ПЛ або при аваріях - КЗ і ОЗЗ, обриви проводів, порушеннях симетрії ємностей щодо землі, різних резонансних процесах.

Заземлення нейтралі (ЕС з глухозаземленою, ефективно заземленою і компенсованою нейтраллю) виключає можливість появи тривалих перенапруг з відносно високою амплітудою. Однак перенапруги появляються і порівняно часто мають місце в ЕС з ізольованою нейтраллю.

Найбільш небезпечні форми внутрішніх перенапруг в ЕС з ізольованою нейтраллю виникають при перехідних процесах під час дугових і перемежованих ОЗЗ. Такі ОЗЗ знижують до нуля потенціал заземленої фази і

практично не спотворюють симетрію міжфазних напруг. А це дозволяє при перегляді пошкодженнях продовжувати експлуатацію ЕС в режимі ОЗЗ протягом достатньо тривалого періоду часу. При цьому потенціали непошкоджених фаз збільшуються в сталому режимі до рівня лінійних напруг, а потенціал нейтралі набуває величину фазної напруги. Перехід від нормального стану ЕС до режиму заземлення одного з фазних проводів супроводжується перехідними процесами у вигляді затухаючих коливань струму. Частота цих коливань визначається величинами індуктивностей і ємностей розглянутої системи. Залежно від параметрів ЕС та імовірнісних характеристик (наприклад, моменту виникнення ОЗЗ, різних початкових умов і т.д.) ці коливання струму можуть носити ультра- або субгармонійні характер, можуть бути модульованими або мати постійну складову.

Якщо ОЗЗ утворює металеву (Не дугову) ланцюг для струму, що проходить через місце замикання, то перехідний процес швидко згасає. При цьому амплітуда напруг на непошкоджених фазах збільшуються незначно понад установлених значень лінійних напруг щодо землі. Такі перенапруги в силу своєї короткочасності і відносно невеликої амплітуди не представляють небезпеки для ізоляції.

Однак в ЕС 10 (6) кВ ОЗЗ носять, як правило, не металевий, а дугового характер. Нестійкість дуги при проходженні струму через нульове значення може приводити до обриву струму дуги і її повторне запалювання при підвищенні напруги. Тривалість зазначеного процесу не обмежується часткою на півперіоду як у випадку з металевими ОЗЗ. Він розтягується на весь проміжок часу існування переміжних замикань, тобто до моменту відключення персоналом пошкодженої ПЛ або до моменту самоусунення причин, що викликали ОЗЗ.

Слід зазначити, що розглянутий вид перенапруги поширюються на всю електричну з'єднану мережу, а не на окремі її частини. Тому, перенапруги проявляються в слабких місцях в ізоляції, часто визивають масові пошкодження відповідного обладнання.

Одним із найбільш пошкоджуваних елементів ЕС 6-10 кВ являються ТН. Пов'язано це з цілим рядом причин, основні з яких являються наступні:

- * обмотки трансформаторів напруги (ТН) мають значну індуктивність, що особливо помітно при накладенні одного перехідного процесу на інший;

- * індуктивний опір обмоток ТН може досягати таких значень, за яких виникає резонанс з ємністю електричної системи (ЕС), підключеної до тих самих секцій шин підстанції (ПС), що й ТН;

- * ТН є єдиним елементом ЕС з ізолюваною нейтраллю, який має електричний зв'язок із землею через опори, значно менші за активні опори витоку;

- * нелінійні характеристики ТН зумовлюють появу коливань, що впливають на розвиток перехідних процесів.

Найчастіше пошкодження трансформаторів напруги виникають внаслідок перенапруг у мережах 6–35 кВ. У системах з ізолюваною нейтраллю можливі такі типи перенапруг:

- * перенапруги при відключенні електричних кіл з індуктивними елементами за умови зрізу струму, що протікав через них;

- * перенапруги під час відключення чи ввімкнення ємнісних елементів та "холостих" повітряних ліній;

- * резонансні перенапруги, викликані появою гармонік під час несиметричних замикань;

- * послідовний та паралельний ферорезонансний процес (ФРП).

Важливою характеристикою електричних систем (ЕС) з трансформаторами напруги (ТН) є ймовірність виникнення у них ферорезонансних процесів (ФРП). Це зумовлено наявністю в системі нелінійних індуктивних елементів (силових трансформаторів, ТН, трансформаторів власних потреб тощо) з одного боку, та індуктивностей і ємностей повітряних ліній (ВЛ) — з іншого.

Розрахункова схема заміщення мережі наведена на рис. 1.2. У ній живильний трансформатор представлений джерелом ЕРС E , фазною індуктивністю розсіювання L_i та активним опором R_i . Сама мережа змодельована у вигляді зосереджених фазної ємності C_{ϕ} і міжфазної ємності $C_{\text{мф}}$, а також активного опору $R_{\text{п}}$, який відображає активні провідності лінії відносно землі.

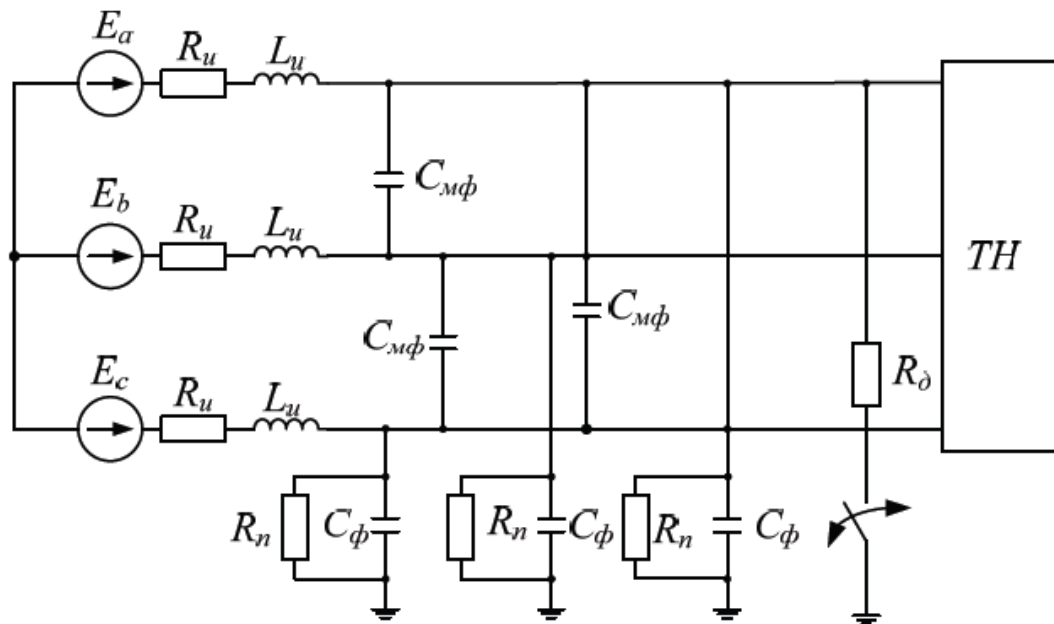


Рис. 1.2. Розрахункова схема мережі в режимі ОЗЗ

Як приклад, на рис. 1.3 подані розрахункові залежності струму в обмотці високої напруги трансформатора під час ферорезонансного процесу, що виник після відключення однофазного замикання на землю (ОЗЗ). У цьому режимі величина струму перевищує допустимий рівень термічної стійкості обмотки, який становить 0,3 А. Тривале перебування системи в такому стані неминуче спричиняє перегрів і подальше термічне пошкодження обмотки високої напруги.

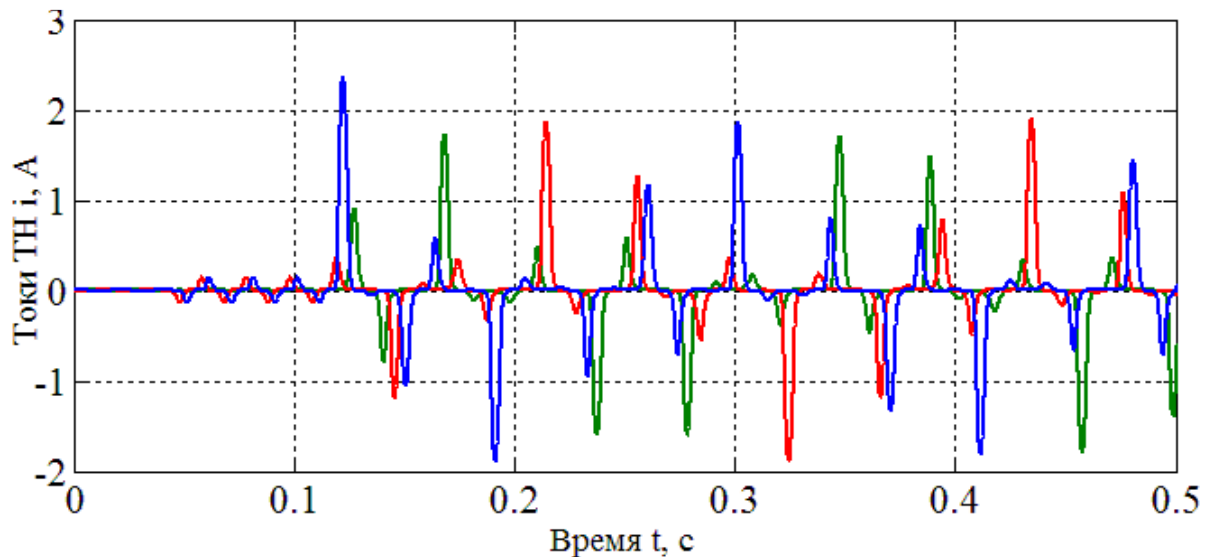


Рис. 1.3. Розрахункові криві струмів у обмотці ВН при ферорезонансному процесі, який виник в результаті відключення ОЗЗ. $C_f = 0,5 \text{ мкФ}$

У цих умовах, при спрацьовуванні розрядників, зіткненні гілками дерев або грозозахисних тросів з проводами, або комутаційних переключень ліній в елементах ЕС можлива поява струмів і напруг великої величини на основний, вищих чи нижчих гармонік. Причому, характер протікання процесів, їх тривалість, а також максимальне значення напруг і струмів в елементах ЕС залежить від різних факторів: схеми і ступеня розгалуженості ЕС, режиму її нейтралі, характеру пошкодження або комутації і т.д.

При порушенні симетрії фазних ємностей ЕС щодо землі в ряді випадків можливий резонанс індуктивностей обмоток ТН і ємностей ЕС на робочій частоті. Цей процес супроводжується так званим «перекиданням» фази трансформатора, тобто таким станом схеми, коли напруга на трансформатора, складаючись з чинним напругою, зумовлює підвищену напругу на ємності ЕС.

Ці процеси найчастіше відбуваються в ЕС з ізолюваною нейтраллю і супроводжуючих, як правило, субгармонічних коливаннями фазних напруг. Поява ФРП можливо і при інших режимах нейтралі ЕС.

Також не можна не відзначити той факт, що пошкоджуваність ТНКІ пропорційна кількості попередніх пошкоджень і ремонтів [5].

У таблиці 1.1 наведена відповідна залежність потоку відмови ТН від кількості ремонтів. Збільшення пошкоджуваності ТН пояснюється тим, що вольтамперная характеристика (ВАХ) ТН, минулого ремонт, йде нижче характеристики трансформатора до ремонту.

Відповідно, чим більша кількість ремонтів пройшов ТН, тим нижче його ВАХ. Таким чином, помітне насичення сердечника і пошкодження ТН може відбуватися навіть при лінійній напрузі.

Таблиця 1.1. Залежність пошкоджуваності ТНКІ від кількості попередніх пошкоджень і відновлювальних ремонтів

Кількість пошкоджень	Не було	1 ремонт	2 ремонта	3 ремонта	4 ремонта	5 ремонтів
Параметр потоку відмов 1/рік	0,0483	0,2381	0,5263	0,7143	2,7907	4,4444

Таким чином можна констатувати, що не тільки ФРП є причиною пошкодження ТН. Так в [5] зазначається, що пошкоджуваність ТН напряму пов'язана з режимом заземлення нейтралі, а також по причині перезбудження ТН. А в роботі [6, 7] визначено навіть за яких конкретних умов можливий ферорезонанс.

1.4. Заходи щодо запобіганню і зриву ферорезонансних процесів і захисту трансформаторів напруги

В даний час, в ЕС 6 (10) кВ для вимірювання напруги, вирішення завдань обліку електроенергії та контролю ізоляції найчастіше використовуються ТН типу НТМИ (рис. 1.4).

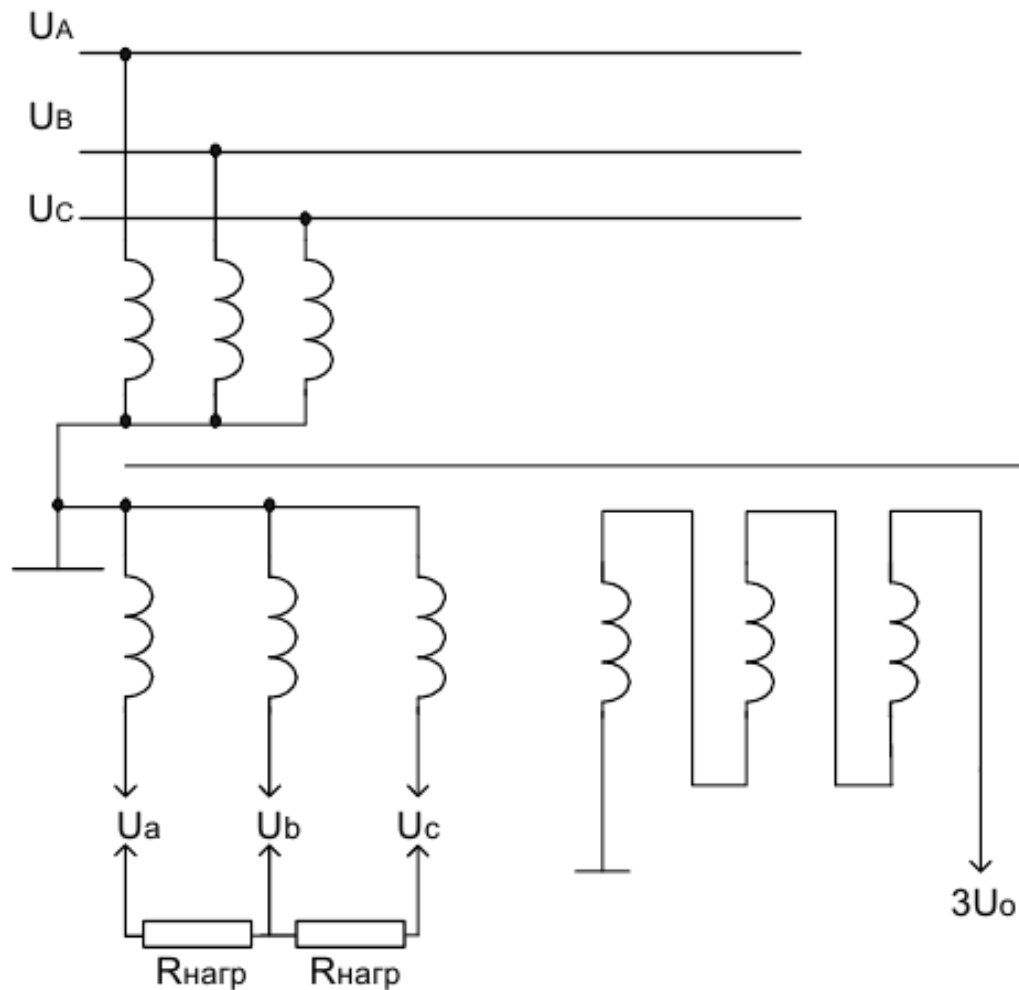


Рис. 1.4 Схема підєднання ТН типу НТМИ до ЕС 6 (10) кВ

Існуючі конструкції ТН даного типу не розраховані на тривале існування в ЕС ферорезонансним коливань і дугових ОЗЗ.

Пошкодження ТН виникають, як правило, або при тривалих дугових ОЗЗ, або при тривалих субгармонічних ФРП. В обох випадках процеси супроводжуються надструм в обмотках ВН ТН, які значно перевищують допустимі значення. В результаті, в обмотках ВН ТН виникають межвітковіє КЗ, які приводять в подальшому до їх повного вигорання.

Оскільки в електричних системах (ЕС) з ізолюваною нейтраллю найбільш поширеним видом пошкоджень є однофазні замикання на землю (ОЗЗ), близько 60% з яких складають дугові, то ймовірність виникнення стійких ферорезонансних процесів (ФРП), небезпечних для трансформаторів

напруги (ТН), є досить високою. З цієї причини для підвищення надійності роботи ТН застосовуються спеціальні заходи, спрямовані на запобігання та ліквідацію ФРП, а також на захист ТН.

Відповідно до чинних нормативних документів [20], рекомендуються такі способи захисту ТН:

- * підключення активного резистора в коло обмотки «розімкнутого трикутника» ТН;

- * заміна ТН типу НТМИ-6 (10) кВ на антирезонансний трансформатор напруги типу НАМИ-6 (10) кВ;

- * установка спеціалізованих дугогасильних трансформаторів малої потужності, що зменшують струмове навантаження на обмотки ТН під час дугових ОЗЗ.

Однак, і дані заходи не дозволяють повністю забезпечити ТН від пошкоджень, що викликаються причинами, розглянутими в підрозділі 1.3. Розглянемо деякі з них більш докладно.

Включення в нейтралі силових трансформаторів дугогасних катушок.

В якості одного з основних способів захисту ЕС 6-10 кВ від внутрішніх перенапруг прийнята компенсація ємнісних струмів замикання наземлю [8]. Компенсація ємнісних струмів замикання наземлю дозволяє успішно вирішувати не тільки завдання гасіння дуги при нестійких ОЗЗ, але й істотно знизити струм в місці пошкодження, обмежити вірогідність переходу ОЗЗ у дво- або трифазне КЗ, чим суттєво підвищується надійність електропостачання розподільних ЕС. При цьому дугогасний реактор сприяє гасінню електричної дуги не тільки через зниження струму в місці ОЗЗ, але й завдяки істотному зниженню швидкості відновлення напруги після погашення дуги [9]. Уповільнення процесу відновлення напруги на пошкодженій фазі робить менш імовірним повторне запалювання електричної дуги.

Для забезпечення відповідного рівня надійності і безпеки при струмах замикання наземлю перевищують 30 А в ЕС з номінальною напругою 6 кВ і 20 А - в ЕС з номінальною напругою 10 кВ [10, 11] регламентується компенсація ємностних струмів замикання наземлю за допомогою ДГК.

Однак, у сільських ЕС, в яких найчастіше і пошкоджуються ТН, величини ємнісних ТЗЗ найчастіше не досягають зазначених значень і установка ДГК еко-номічно недоцільна. Таким чином, розглянутий захід можна приймати не у всіх ЕС.

Резистивне заземлення нейтралі електричної мережі.

В даний час в науковій літературі широко обговорюється тема, що стосується необхідності заземлення нейтралей ЕС через резистор [12, 13]. Однак на сьогоднішній день відсутня методика визначення його прийнятної величини. Різні автори пропонують різні варіанти величин опорів цих резисторів, які в загальному випадку можливо об'єднати поняттями високоомне або низькоомне заземлення нейтралі.

В одних випадках в якості заходів по обмеженню ферорезонансним коливань при дугових ОЗЗ зі струмами ($2 \div 5$ А) розглядається можливість обмеження струмів, що виникають в нейтралі ТН до безпечного рівня шляхом заземлення нейтралі через високоомний резистор $R_N = 1030$ кОм. Це опір рекомендується включати в нейтраль трансформатора. Для вибору параметрів резистора рекомендується орієнтуватися на значення:

$$R_N = (2 \div 3) \frac{U_\phi}{I_2^{(l)}} \quad (1.2)$$

де $I_2^{(l)}$ - ємнісний струм ОЗЗ.

В інших випадках пропонується використовувати включення в нейтраль ЕС високоомного резистора, оптимальне значення опору якого необхідно підбирати залежно від ємності ЕС:

$$R_N = \frac{2}{\omega \cdot C} \quad (1.3)$$

У ряді джерел [13, 14] пропонується високоомне заземлення нейтралі через резистор, опір якого приблизно дорівнює ємнісного сосупротиву ЕС (включення в нейтраль резистора, обраного з указаної умови, практично не призводить до зміни коефіцієнта ОЗЗ, який остається приблизно рівним 1,73). Опір резистора, обраного за вказаній умові, забезпечує в місці пошкодження рівність активної складової струму і ємнісний. Враховуючи, що ємнісний струм замикання на землю визначається виразом:

$$I_C = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U_\phi \quad (1.4)$$

а струм через резистор:

$$I_{R_N} = \frac{U_\phi}{R_N} \quad (1.5)$$

то, за умови:

$$I_C = I_{R_N} \quad (1.6)$$

тоді:

$$R_N = \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C} \approx \frac{1}{900 \cdot C} \quad (1.7)$$

де C - величина ємності фази ЕС щодо землі.

При зазначеній умові високоомний резистор, що включається в нейтраль спеціального додаткового трансформатора потужністю, не меншою, ніж забезпечує стік заряду нульової послідовності за проміжок часу, рівний половині періоду промислової частоти ($t = 0,01$ сек).

$$I_{R_N} = \frac{U_\phi}{R_N} \quad (1.8)$$

Вираз для постійної часу розряду ємності фази ЕС на землю має вигляд:

$$\tau = R_N \cdot 3 \cdot C \quad (1.9)$$

Тому, при зниженні ємності ЕС (зменшенні сумарної довжини ПЛ, підключених до секції шин), зазначена постійна часу буде зменшуватися і, отже, розряд заряду нульової послідовності буде проходити швидше. Крім того, використання високоомного заземлення нейтралі, згідно призводить до обмеження перенапруг, які виникають при перемежуючій дузі ОЗЗ, до рівня $(2,2 \div 2,4) U\phi$, Що зменшує ймовірність переходу ОЗЗ в міжфазне КЗ і виникнення ФРП, які й призводять до пошкоджень ТН.

В [15] проаналізовано використання низькоомного заземлення нейтралі, що дозволяє збільшити ТЗЗ до $(3,5 \div 4) I_C$. Таке заземлення використовується в ЕС власних потреб електростанцій. Величину таких опорів рекомендується вибирати в межах від 100 до 500 Ом залежно від величин струму замикання та термічної стійкості встановленого обладнання.

Режими заземлення нейтралі через опір, в більшості випадків не допускають тривалої роботи ЕС з ОЗЗ, тому що через резистор протікають значні струми. Тому, захист на відключення повинен працювати без витримки часу або з мінімальною витримкою часу.

В [16] обґрунтовується небажаність постійного включення високоомного опору в нейтралі і пропонується використання динамічного режиму нейтралі, який змінюється в залежності від конкретної ситуації. Наприклад, для організації оптимального зміщення нейтралі і зниження перенапруг при виникненні ОЗЗ рекомендується використання режиму нейтралі, заземленої через активний опір, а при відсутності ОЗЗ - відновлення нормального режиму. Можливо навіть забезпечити управління режимом нейтралі ЕС 6 (10) кВ за допомогою високовольтного тиристорного комутатора. У розглянутому пристрої для обмеження дугових перенапруг включення опору в нейтраль відбувається в паузах між перемежованому дуговими ОЗЗ. Величина цього опору повинна забезпечувати селективність роботи релейного захисту та визначається виходячи з таких умов. При

аперіодичному розряді залишкового заряду:

$$R_N \geq \frac{2}{3} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.10)$$

а, за умови, коли $3\tau \leq t$:

$$R_N \leq \frac{L}{t} + \frac{t}{9 \cdot C} \quad (1.11)$$

де L - Індуктивність силового трансформатора, нейтраль якого заземлюється через опір R_N

t - Час розряду ємності EC на землю.

Заземлення нейтралі через резистор має ряд недоліків. Крім того, через те, що опір резистора порівняно з ємнісним опором фаз щодо землі, ФРП не виключається повністю, а стає затухаючими.

Включення резистора в ланцюзі вторинної додаткової обмотки вимірювального трансформатора напруги, з'єднаної в «розімкнутий трикутник»

Найбільш поширеним способом захисту ТН від пошкоджень при появі ФРП вважається включення резистора в ланцюг його вторинної додаткової обмотки, з'єднаної в «розімкнутий трикутник» (рис. 1.5). Захисна дія резистора полягає в забезпеченні умов для затухання енергії вільних коливань складових нульової послідовності. Тому опір резистора повинен бути невеликим. Але як показує практика опір резистора 25 Ом бажаного ефекту не дає. Це пов'язано з тим, що великий опір зазначеного резистора не завжди забезпечує погашення ФРП. Тому, даний спосіб захисту лише незначно звужує частотну область, при якій можливе виникнення стійкості ФРП. При цьому знижується і клас точності ТН.

Найбільш ефективно використання даного виду захисту при ФРП індуктивності ТН з ємністю "холостих" шин, при включенні на них силових трансформаторів, коли ФРП виникає з частотами 50 Гц і вище. Однак, даний

спосіб неефективний при ФРП, що виникають в результаті переміжних дугових ОЗЗ і субгармонічних коливань [17].

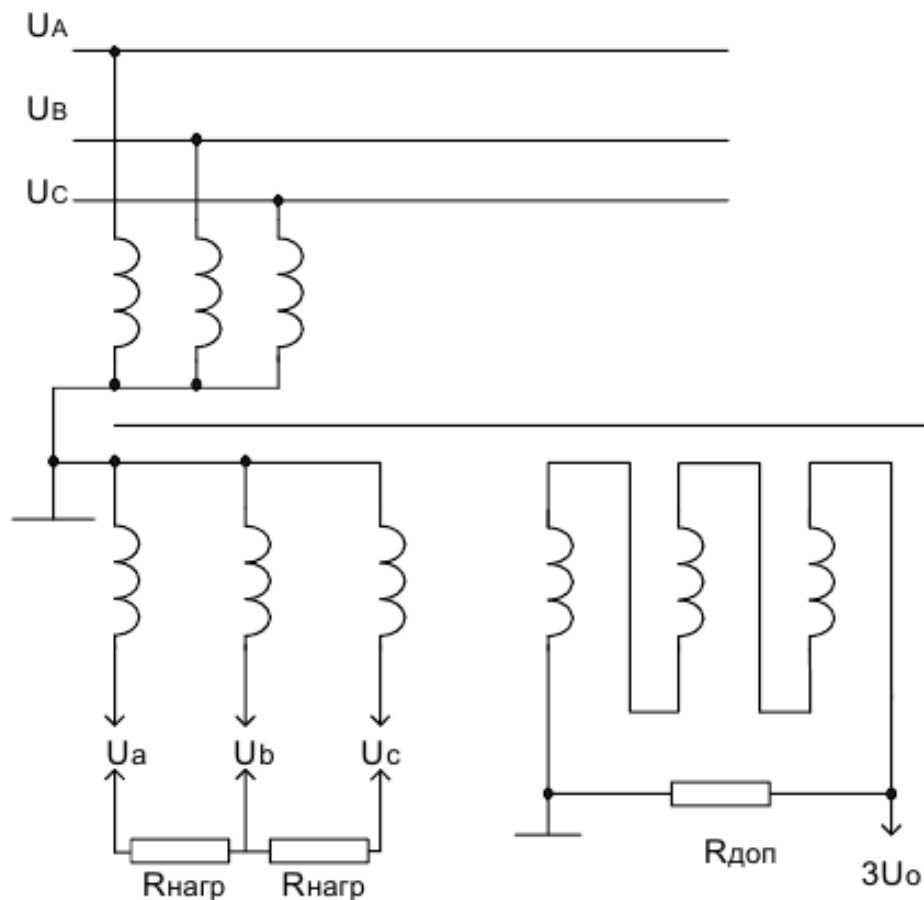


Рис. 1.5. Схема ТН типу НТМИ з резистором, включеним в ланцюг вторинної додаткової обмотки, з'єднаної в «розімкнутий трикутник»

Включення резистора в ланцюг основної вторинної обмотки трансформатора напруги.

В [18] запропоновано пристрій для захисту ТН з гасним опором, підключеним до основної вторинної обмотці через випрямляч, зібраний за схемою Ларіонова (рис. 1.6).

Підключення резистором до основної вторинної обмотці ТН більш ефективно (за рахунок більшого коефіцієнта трансформації), однак, тільки незначно знижує ймовірність пошкодження ТН, що пов'язано з

обмеженнями, що накладаються на величину опору даного резистора. Зниження величини опору даного резистора нижче певного значення неприпустимо, тому при навантаженні вторинної обмотки ТН, що перевищує 40 ВА в цьому випадку буде неможливим забезпечення необхідного класу точності.

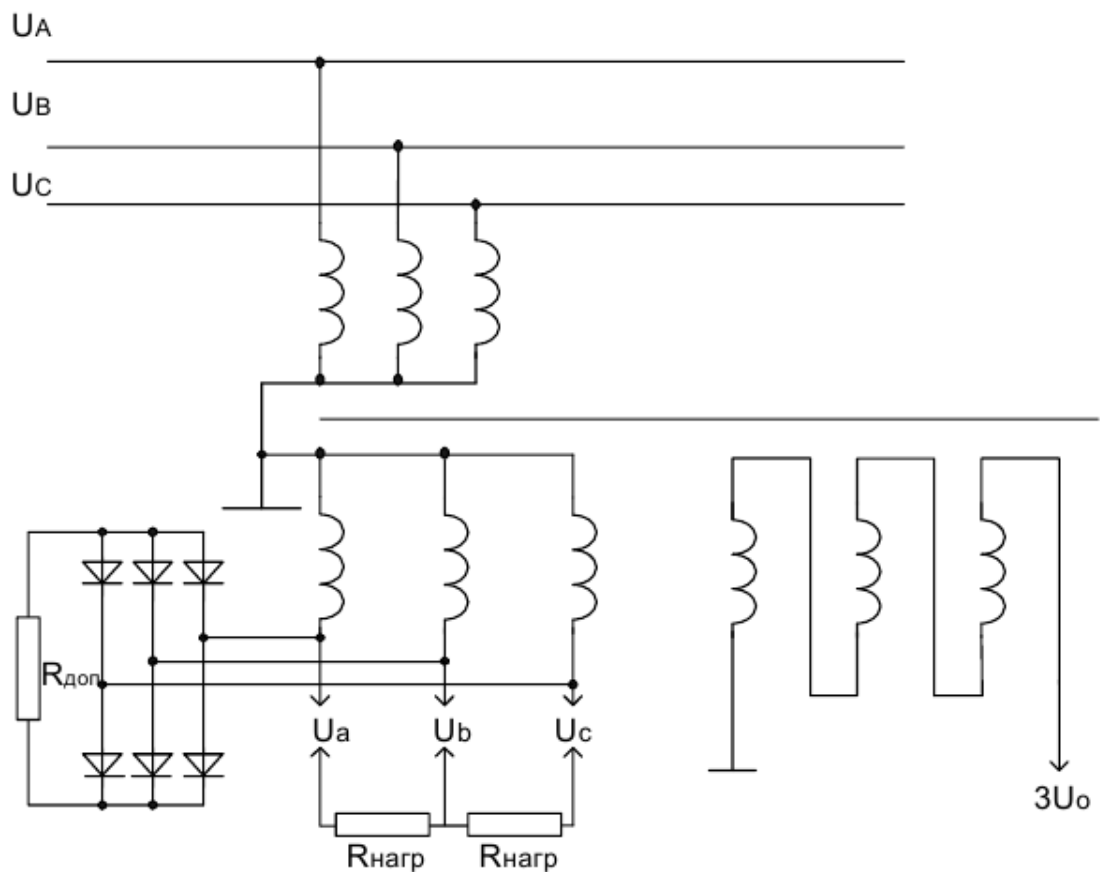


Рис. 1.6. Схема ТН типу НТМИ з резистором, включеним в ланцюг основної вторинної обмотки

Короткочасне підключення низкоомного опору до вторинних обмоток трансформатора напруги.

Методи захисту ТН, розглянуті вище засновані на поєднанні до вторинних обмоток ТН згасаючих резисторів, через які може бути розряджена енергія автоколивальних процесу між індуктивністю ТН і ємністю ЕС. Враховуючи необхідність мінімізації тривалості процесу

погашення енергії коливального процесу (при великій його тривалості надструми, протікають по обмотках ВН ТН, можуть призвести до їх термічним пошкодженень), опори затухаючих резисторів повинні бути мінімальними. Однак, постійне підключення резисторів з невеликими опором до основних вторинних обмоток ТН також небажано і неприпустимо виходячи з навантажувальних здатностей самого ТН.

Ефективність захисної дії резистора можливо підвищити шляхом зменшення його опором, це відбувається при короткочасному включенні такого резистора в момент виникнення ФРП на час його існування. Його оптимальний опір має становити величину порядку 5 Ом. При цьому, короткочасне шунтування обмотки ТН, з'єднаної в «розімкнутий трикутник», резистором з опором 5 Ом відбувається при появі на виводах цієї обмотки напруги з частотою, рівною половині промислової (у випадку, якщо амплітуда гармонік з частотою, рівною 25 Гц, перевищує рівень $0,3 \cdot U_{ном}$). Схема такого пристрою наведена на рис. 1.7.

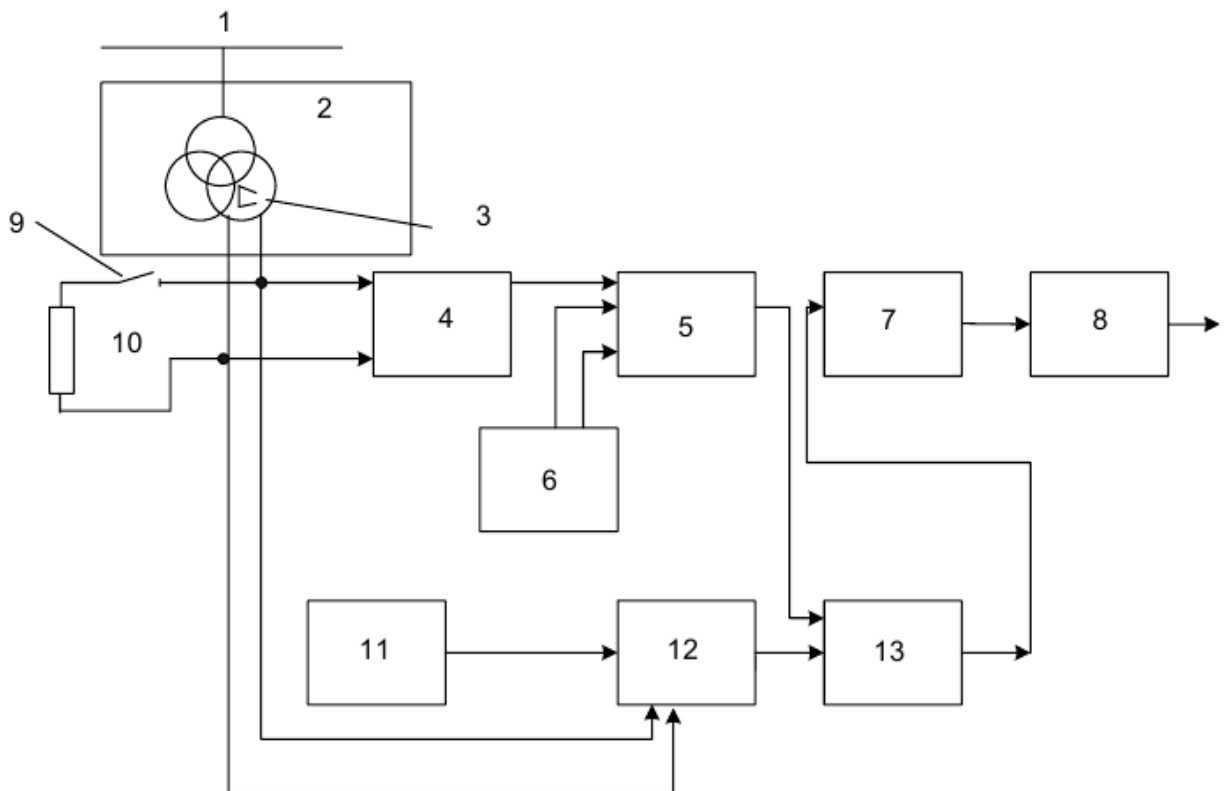


Рис. 1.7. Схема захисту ТН від ФРП, що передбачає короткочасне включення резистора в обмотку «розімкнутий трикутник»

- 1 - шини 6 (10) кВ ПС, до яких підключений ТН; 2 - ТН;
- 3 - додаткова вторинна обмотка ТН, з'єднана в «розімкнутий трикутник»;
- 4 - перетворювач частота - напруга;
- 5 - блок порівняння напруг;
- 6 - формувач уставок напруг;
- 7 - реле часу;
- 8 - виконавчий елемент;
- 9 - нормально розімкнутий контакт виконавчого елемента;
- 10 - резистор;
- 11 - формувач уставок напруг;
- 12 - блок порівняння напруг;
- 13 - блок логічного множення.

Принцип його дії полягає в наступному. Захист з витримкою часу спрацьовує при одночасному виконанні двох умов:

- частота напруги на зажимах додаткової вторинної обмотки ТН досягає області спрацьовування (в якості частот спрацьовування обґрунтовані частоти, близькі до 25 Гц);
- рівень напруги на тих же зажимах перевищує уставку спрацьовування.

При цьому додаткова вторинна обмотка ТН, з'єднана в «розімкнутий трикутник», короткочасно шунтуються активним опором. Робота захисту блокується при наявності «глухого» металевого ОЗЗ і від перешкод, нанапружень небалансів та ін., Що виникають за відсутності ФРП. Витримка часу спрацьовування захисту необхідна для виключення помилкових спрацьовувань при появі короткочасних спотворень живильної напруги або короткочасного затухаючого ФРП.

Однак самі автори зазначеної розробки визнають, що існують такі області зміни параметрів коливальної системи, при яких стійкий ФРП за будь-яких параметрах запропонованого пристрою захисту погасити неможливе можна.

Заземлення нейтралі трансформаторів напруги через опір

Для запобігання розвитку резонансних явищ необхідно, щоб вільна складова перехідного струму, що виникла після обриву зв'язку фази з землею в контурі індуктивність ТН - ємність ЕС, мала або аперіодичний характер, або періодичний, але з амплітудою, затухаючої до моменту наступного максимуму [18].

Для виконання першої умови необхідно, щоб захисний опір в нейтралі ТН був не менше критичного. Виконання другої умови може бути досягнуто при опорах, значно менших критичного. Схема підключення захисного опору в нейтраль ТН показана на рис. 1.8.

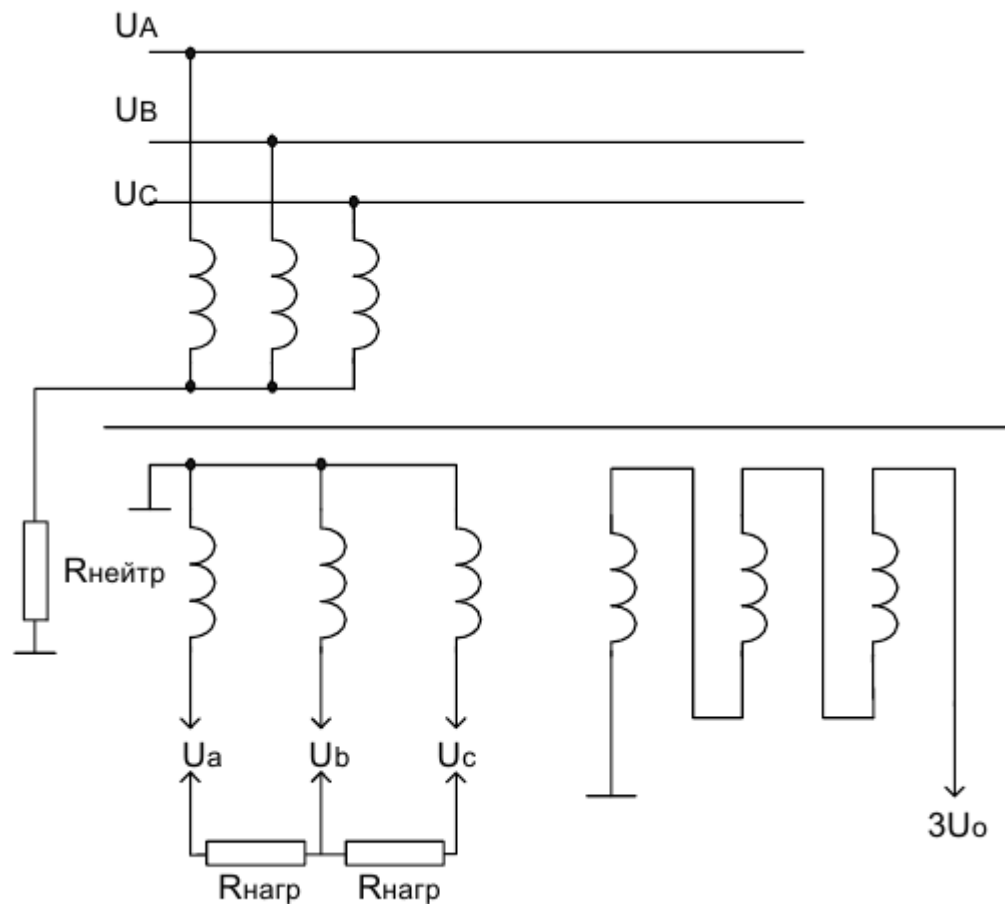


Рис. 1.8. Захист ТН типу НТМИ за допомогою резистора, включеного в нейтраль

В [13] доводиться оптимальна величина опору такого резистора (3 кОм), який необхідно включати в нейтраль ТН типу НТМИ. Однак практика показує, що постійно включений в ланцюзі нейтралі резистор спотворює потенціал нейтралі через несиметрію ізоляції фаз і вносить суттєві похибки в показання приладів контролю ізоляції. Як спосіб виняток, негативного впливу цього резистора пропонується його шунтування в нормальному режимі роботи ЕС з автоматичним дешунтуванням в аварійних режимах.

Таким чином ні один із наведених способів та засобів запобігання пошкодження ТН (з усіма їх перевагами та недоліками) не є універсальним захистом.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПОШКОДЖЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ

2.1. Статистичний аналіз причин пошкодження трансформаторів напруги

Основним із факторів, що впливає на ушкоджуваність ТН, є конструкція того чи іншого типу ТН встановленого на п/ст. Як зазначено в [18], в ЕС 6-10 кВ України абсолютну більшість становлять ТН типу НТМІ-6(10) кВ. В ЕС АТ «Харківобленерго» в даний момент часу знаходяться в експлуатації ТН наступних типів: НТМІ-6 (10) кВ (71%), НАМІ-6 (10) кВ (14%), НОМ-6 (10) кВ (15%). Загальна кількість пошкоджених ТН кожного з цих типів, наведена в табл. 2.1, дозволяє зробити висновок про те, що найбільше схильні до пошкоджень ТН типу НТМІ-6(10) кВ. Їх ушкоджуваність приблизно на порядок вище, ніж двох інших типів.

Табл. 2.1. Статистика пошкоджуваності ТН в розподільних мережах АТ «Харківобленерго»

Тип ТН	Загальна кількість ТН, шт.	Всього ТН відповідного типу, пошкоджених за період 2018–2020 гг., шт.	У % від загальної кількості
НТМІ-6(10) кВ	256	147	57,5
НОМ-6(10) кВ	54	5	9,3
НАМІ-6(10) кВ	52	2	3,7
Всього:	362	154	42,7

Іншим фактором, що впливає на ушкоджуваність ТН, є величина емнісного струму ОЗЗ секції шин (СШ), до якої він підключений. Результати досліджень даного фактора для пошкоджених ТН-35 кВ наведено у табл. 2.2, а для ТН-6(10) кВ – у табл. 2.3.

Табл. 2.2. Кількість пошкоджених ТН-35 кВ в залежності від струму ОЗЗ

Загальна кількість ТН-35 кВ в ЕС 35 кВ, в якій ушкодився ТН-35 кВ	Значення ємнісного струму ОЗЗ, А							Всього
	0	До 1,5 А	Від 1,5 до 3 А	Від 3 до 4,5 А	Від 4,5 до 6 А	Від 6 до 7,5 А	Більше 7,5 А	
1	2		1					3
2		1	2	1		1	1	6
3			9	2	3		2	16
4				2	1	1		4
Більше 4							1	1
Всього	2	1	12	5	4	2	4	30

Табл. 2.3. Кількість пошкоджених ТН-6-10 кВ в залежності від струму ОЗЗ

Кількість пошкоджених ТН	Значення ємнісного струму ОЗЗ, А						
	До 0,5 А	Від 0,5 до 1,0 А	Від 1,0 до 1,5 А	Від 1,5 до 2,0 А	Від 2,0 до 2,5 А	Від 2,5 до 3,0 А	Більше 3,0 А
За період 2018-2020 гг., шт.	27	47	36	15	10	11	5
У % від загальної кількості	17	30	23	10	7	7	3

Відповідно до [19], область можливого виникнення стійкого ферорезонансного процесу відповідає еквівалентної ємності ЕС 6-10 кВ, підключеної до СШ з ТН, що викликає струм ОЗЗ 0,5-2,5 А. Такий автопараметричний резонанс найбільш вірогідний в повітряних ЕС 6-10 кВ. Саме на цей діапазон відповідає основна частка пошкоджень ТН в ЕС АТ «Харківобленерго» (до 94%).

Таким чином, можна зробити висновок про те, що найбільша кількість пошкоджених ТН-35 кВ припадає на ЕС 35 кВ з ємнісним струмом ОЗЗ, що знаходиться в межах від 1,5 до 3 А, ТН-6(10) кВ типу НТМІ - на ЕС 6(10) кВ

зі струмом 1,5 А, а ТН-10 кВ типу НАМІ - на ЕС 6(10) кВ з ємнісним струмом ОЗЗ, що не перевищує 0,5 А.

Наступним фактором, що впливає на ушкоджувальність ТН, є величина навантаження його вторинних обмоток. Як відомо, перенапруги найбільш небезпечні при ненавантажених трансформаторах [20]. Відповідно до висновків [20], зрив ферорезонансу найважче здійснюється за умов, коли вторинні обмотки ТН не навантажені. Даний висновок в ЕС АТ «Харковобленерго» підтверджується більш високою ушкоджувальністю тих ТН, у яких навантаження вторинних обмоток нижче номінальної в кілька разів (табл. 2.4).

Табл. 2.4. Залежність кількості пошкоджених ТН в залежності від навантаження вторинних обмоток

Рік пошкодження ТН	Діапазон навантаження вторинних обмоток ТН, ВА				
	До 25	25 - 50	50–75	75–100	Вище 100
Кількість ТН відповідного діапазону, що ушкоджені у 2018 р., шт.	16	10	8	2	1
Кількість ТН відповідного діапазону, що ушкоджені у 2019 р., шт.	29	16	12	8	4
Кількість ТН відповідного діапазону, що ушкоджені у 2020 р., шт.	24	15	6	3	1
Кількість ТН відповідного діапазону, що ушкоджені за період 2018-20 р., шт.	68	39	27	13	6
Всього ТН, у данному діапазоні, шт.	109	94	82	38	39
У % від загальної кількості	62,4	41,5	32,9	34,2	15,4

Дослідження показують, що якби навантаження ТН була б у 2-3 рази більше номінального, ТН не могли б піддаватися ферорезонансним явищам і, відповідно, не пошкоджувалися б при них.

У [20] обґрунтовано положення про те, що введенням додаткового активного опору у вторинну обмотку ТН можна погасити ферорезонансний процес у тому випадку, якщо струм ОЗЗ у контрольованих ЕС 6-10 кВ не

перевищують 2 А; а при струмі, меншим за 0,5 А, ферорезонансний процес погашається і без додаткових опорів.

Тому, як висновок, можна відзначити, що з зазначеної причини нижче ушкоджуваність ТН в ЕС 6-10 кВ зі струмом ОЗЗ до 0,5 А, а при навантаженні вторинних обмоток ТН понад 100 ВА в ЕС зі струмом ОЗЗ до 1 А ТН взагалі не ушкоджувалися.

Досвід експлуатації ТН в ЕС АТ «Харківобленерго» підтверджує висновок, зазначений у [18], про те, що значна частина ТН-6(10) кВ, що відпрацювали свій ресурс, пошкоджуються навіть при невеликих збільшеннях напруги в ЕС або струмів через їх обмотки. Залежності післяремонтного терміну служби ТН від кількості ремонтів кожного з них (ТН-6(10) кВ, пошкоджені в ЕС, піддаються ремонту та відновленню в майстернях), наведені в табл. 2.5.

Табл. 2.5. Залежність післяремонтного терміну роботи ТН від кількості їх ремонтів

Кількість ремонтів ТН	К-сть ТН в умовній групі	Термін роботи після останнього ремонту				Термін роботи після ремонту
		Більше 10 років	Від 1 до 10 років	Від 1 доби до 1 року	Менше доби	
0	7 шт.	7 шт.	0	0	0	20,7 років
1	13 шт.	3 шт.	6 шт.	4 шт.	0	4,2 роки
2	12 шт.	0	8 шт.	4 шт.	0	1,9 роки
3	11 шт.	0	4 шт.	7 шт.	0	1,4 роки
4	3 шт.	0	0	3 шт.	0	4,3 місяці
5	3 шт.	0	0	2 шт.	1 шт.	2,7 місяці

Також має значення рік виготовлення трансформатора напруги, але такі дані привести зараз дуже складно або вони є доволі застарілими (табл. 2.6).

Табл. 2.6. Залежність пошкоджуваності ТН від року їх виготовлення

	Рік випуску ТН						
	До 1970р	1970-74р.	1975-79р.	1980-84р.	1985-89р.	1990-94р.	Після 1995 р
Для ТН, пошкоджених у 2001 р., %	-	15,4	15,4	19,2	38,5	7,7	3,8
Для ТН, пошкоджених у 2002 р., %	2,1	6,4	21,3	27,6	42,6	-	-

Досвід показує, що на ушкоджуваність ТН-6(10) кВ впливає також режим електропостачання підстанції з боку ВН. Оскільки тупикові п/ст є найбільш несприятливими з погляду перенапруг [21], то й пошкоджених ТН на них виявилось приблизно на 30% більше, ніж на транзитних.

На ушкоджуваність ТН опосередковано впливає наявність чергового персоналу на п/ст, де встановлені ТН. Вплив даного фактора пов'язаний з тим, що за наявності чергового персоналу швидше виявляється та усувається режим ОЗЗ в ЕС з ізолюваною нейтраллю.

2.2. Фактори, які мають вплив на пошкоджуваність трансформаторів напруги

Оцінку ролі кожного з факторів, що впливають на ушкоджуваність ТН, згідно з рекомендаціями [22], проведемо шляхом аналізу одного з основних показників надійності – параметра потоку відмов ω .

Його величину визначимо для груп ТН, що мають різне навантаження вторинних обмоток (ω_z), різний термін служби (ω_t), що пройшли різну кількість пошкоджень і відновлень перед останнім виходом з ладу (ω_p), а також встановлених на п/ст з різними рівнями ємнісних струмів ОЗЗ (ω_e): за формулою:

$$\omega_i = \frac{m_i}{n_i \cdot T}, \quad (2.1)$$

де n_i – кількість ТН у групі, яка враховується до виборки, що вимірює величину фактору пошкоджуваності ТН;

T – час спостережень;

m_i – число пошкоджень ТН у групі з n_i за вказаний проміжок часу T .

Формалізацію результатів наведемо у відносних одиницях:

$$F_i^* = \frac{F_i}{F_{max}}, \quad (2.2)$$

де F_i^* - відносна величина фактора, що впливає на ушкоджуваність ТН;

F_i - абсолютна величина даного фактора;

F_{max} - максимальна величина фактора за результатами статистичних спостережень.

Результати розрахунків для ТН-6(10) кВ наведено в табл. 2.7, а для ТН-35 кВ - табл. 2.8.

Оцінка показників надійності, проведена методом дисперсійного аналізу показує, що фактором, що найбільше впливає на ушкоджуваність ТН, є величина ємнісного струму ОЗЗ на СШ п/ст, де сталося пошкодження ТН.

Умовою резонансу для лінеаризованих характеристик ТН згідно [23] є вираз:

$$\omega_0 \cdot L_{ТН} = \frac{1}{\omega_0 \cdot C_c}, \quad (2.3)$$

Табл. 2.7. Залежність параметра потоку відмов (ω_i) від факторів (i), що впливають на ушкоджуваність ТН-6(10) кВ

Параметр потоку відмов	Діапазони зміни факторів ушкодження ТН (F_i^*)					
	0	0 – 0,2	0,2 – 0,4	0,4 – 0,6	0,6 – 0,8	0,8 - 1
ω_z , 1/рік	-	0,2452	0,1894	0,1521	0,1228	0,1339
ω_t , 1/рік	-	0,0015	0,1718	0,2375	0,3833	0,1674
ω_p , 1/рік	0,0473	0,2382	0,5264	0,7143	2,7906	4,4445
ω_e , 1/рік	-	0,1147	0,3481	0,3132	0,0164	0,0171

Табл. 2.8. Залежність параметра потоку відмов (ω_i) від факторів (i), що впливають на ушкоджуваність ТН-35 кВ

Параметр потоку відмов	Діапазони зміни факторів ушкодження ТН (F_i^*)					
	0	0 – 0,2	0,2 – 0,4	0,4 – 0,6	0,6 – 0,8	0,8 - 1
ω_z , 1/рік	-	0,0241	0,0185	0,0148	0,0121	0,0132
ω_t , 1/рік	-	0,0002	0,0226	0,0312	0,0501	0,0220
ω_e , 1/рік	-	0,0225	0,0681	0,0613	0,0031	0,0035

Як висновок необхідно відзначити, що найбільша ушкоджуваність ТН має місце за певної сумарної довжини ПЛ, що відходять від СШ п/ст. У ТН-6(10) кВ, що пройшли більшу кількість відновлювальних ремонтів (при яких здійснюється перемотування обмоток, що вийшли з ладу, а магнітна система залишається колишньою), відбувається зміна нелінійної індуктивності ТН, що призводить до досягнення резонансу [24].

2.3. Розрахункова схема розподільної електричної мережі із трансформаторами напруги

Для розрахунку як стаціонарних так і перехідних процесів ЕС було розроблено комплексну математичну модель ЕС, на шинах 35, 10, 6 кВ п/ст якої експлуатуються ТН. Ця модель враховує основні фактори, які найбільшою мірою впливають на виникнення, розвиток та протікання ферорезонансних процесів.

Принципова схема ЕС, що досліджувалась, показана на рис. 2.1, відповідає типовій схемі ПС 110(150)/35/10 кВ з триобмотувальним трансформатором (Т1), який живиться від системи 110(150) кВ. До секцій збірних шин 35, (10) кВ п/ст приєднана ЕС, що включає понижуючі двообмотувальні трансформатори 35/10(6) кВ (Т2, Т3), лінії електропередачі та ТН 35, 10 (6) кВ.

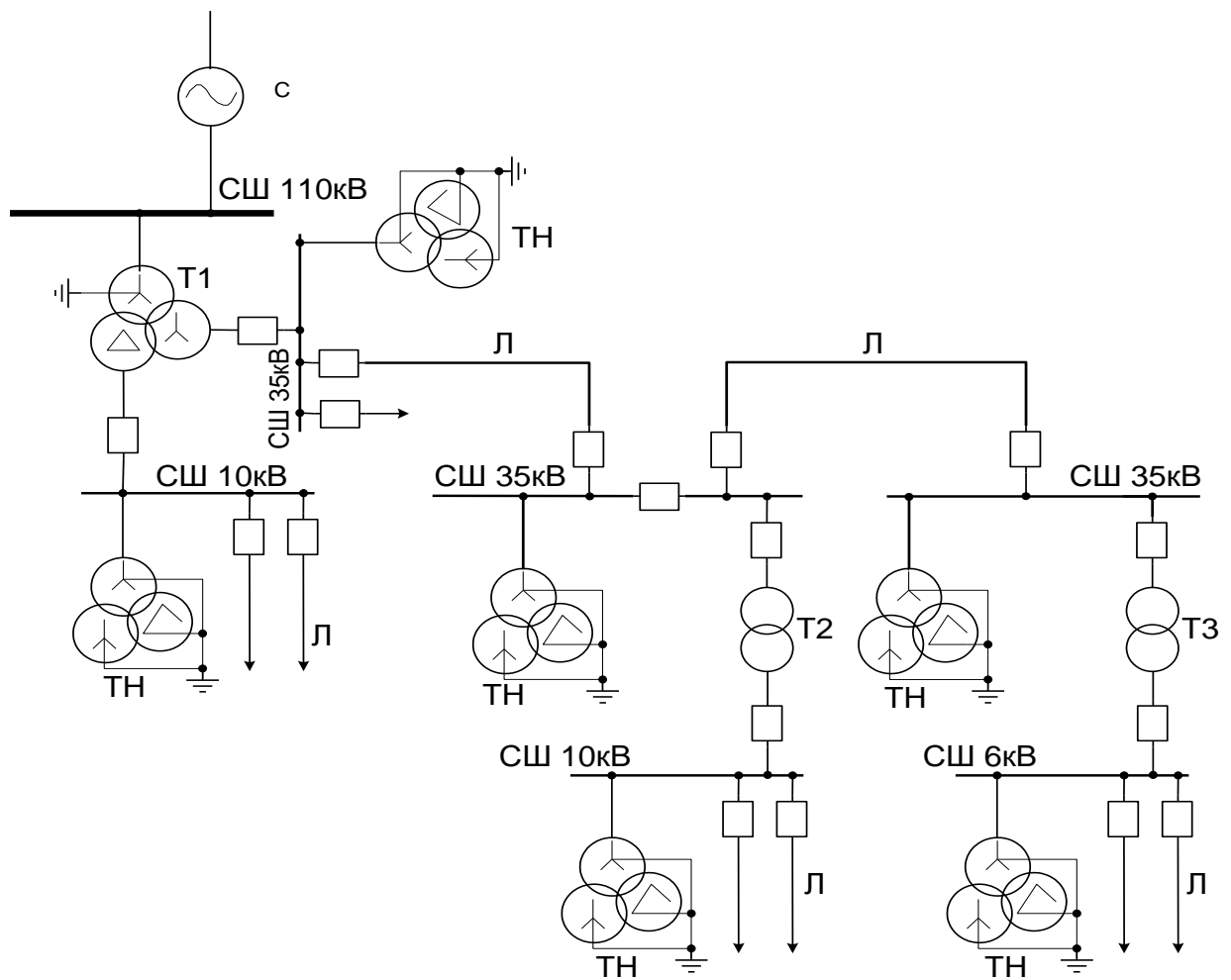


Рис. 2.1. Принципова схема досліджуваної ЕС

У розрахунковій схемі (рис. 2.2) для аналізу стаціонарних й перехідних процесів в електромагнітних системах ЕС їх елементи відображаються взаємопов'язаними електричними та магнітними ланцюгами. Перші описуються диференціальними і кінцевими рівняннями, другі - кінцевими, які диференціюванням перетворюються на диференціальні.

Математичні моделі для аналізу електромагнітних перехідних процесів формувалися на підставі законів Ома та Кірхгофа, контурних та вузлових координат.

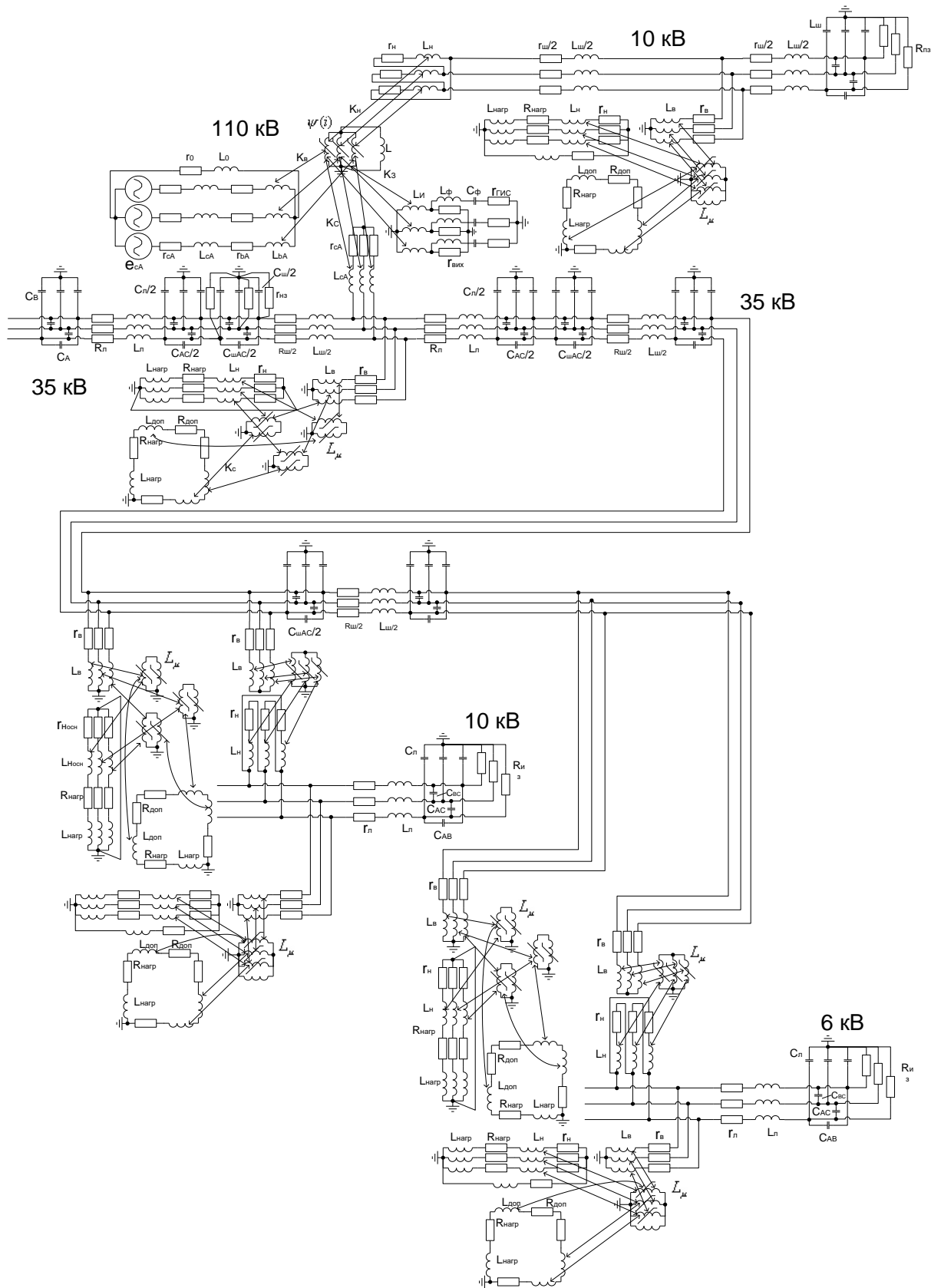


Рис. 2.2. Розрахункова схема досліджуваної ЕС

Розрахункова схема та математична модель системи була сформована з урахуванням наступних припущень.

1. Міжфазні ємності та ємності фаз щодо землі, а також активні та реактивні опори ПЛ та шин прийняті зосередженими.

2. У математичній моделі не враховувалися струми навантаження ліній.

3. Залишкова намагніченість силових та вимірювальних трансформаторів приймалася рівною нулю.

4. Математична модель ЕС включає комплекс математичних моделей ЕС кожного з аналізованих рівнів. Останні у свою чергу складаються з математичних моделей окремих електротехнічних елементів. Зазначені елементи забезпечують можливість узгодженого використання у загальній математичній моделі об'єкта.

5. У розрахункових схемах взаємопов'язаних електричних і магнітних ланцюгів останні еквівалентувалися гілками, в яких умовно поточосцеплення відповідають струму, наведений магнітний опір - індуктивності, а коефіцієнт трансформації між електричними і магнітними гілками - взаємоіндуктивності.

6. Математична модель в цілому, як і математичні моделі окремих елементів забезпечують можливість дослідження процесів як на короткочасних, так і на тривалих часових інтервалах, при різних збуреннях, за наявності або відсутності управління і т.д.

7. Математична модель сформована на основі відомих рівнянь стану, які описують процеси в ЕС при використанні оптимального методу інтегрування зазначених рівнянь.

На основі цього нижче наведемо розрахункові схеми окремих елементів електричної мережі, які так би мовити приймають участь у загальному процесі.

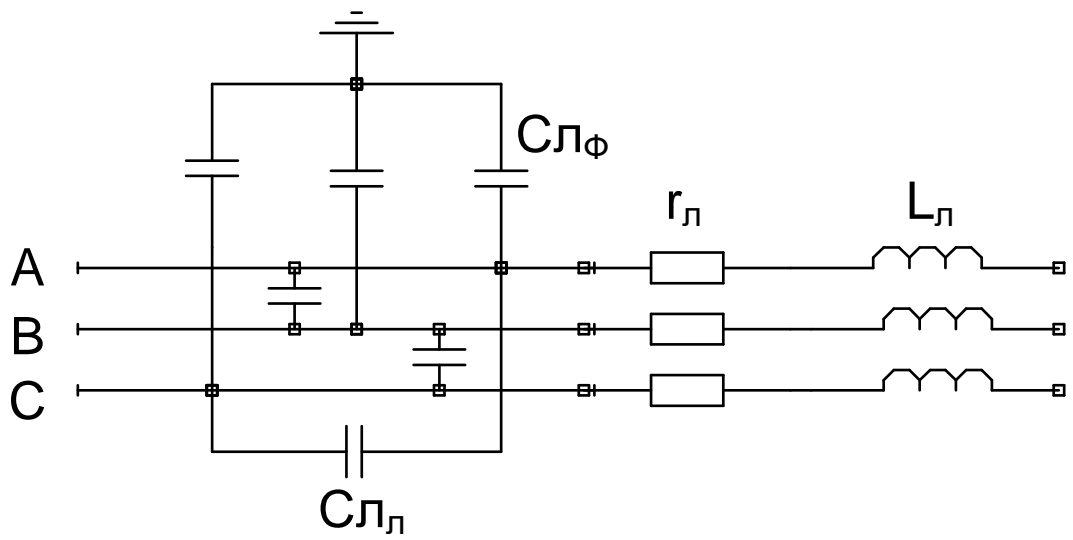


Рис. 2.3. розрахункова схема ПЛ

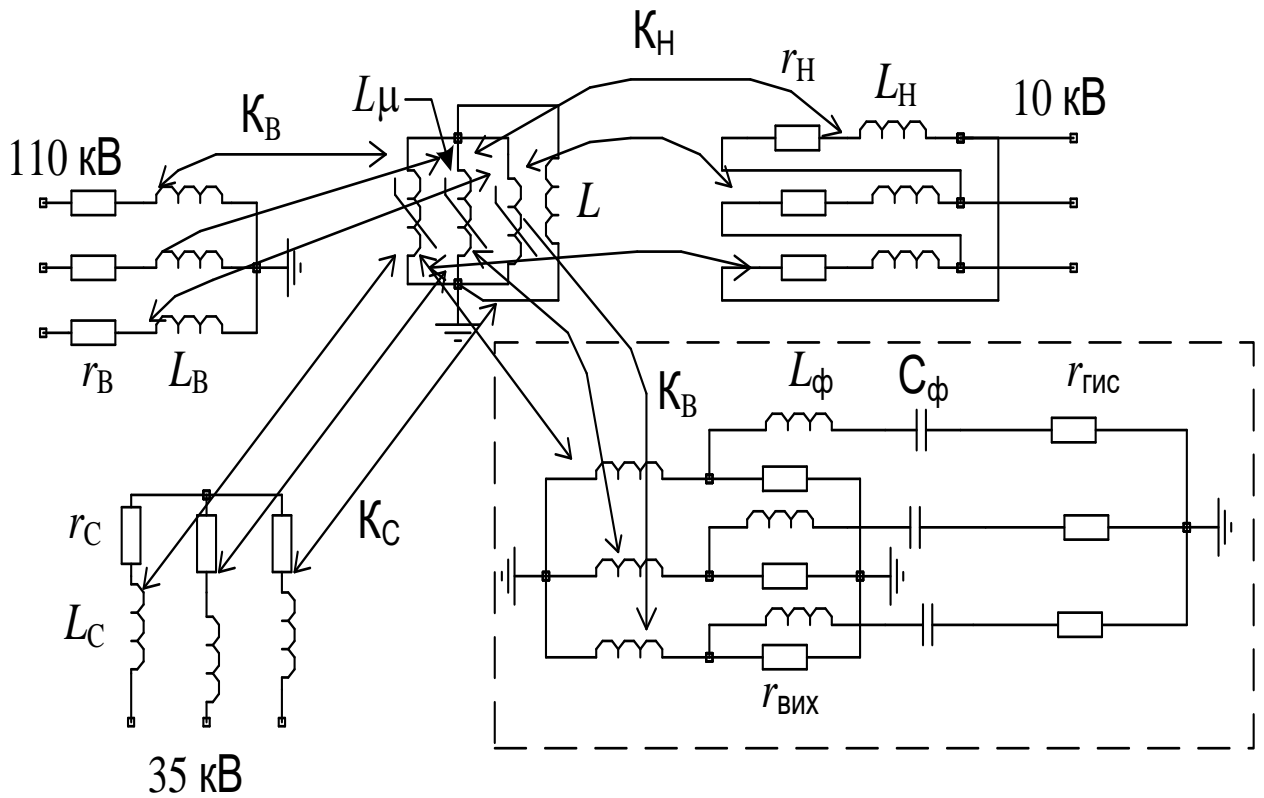


Рис.2.4. Розрахункова схема трьохобмоткового трансформатора

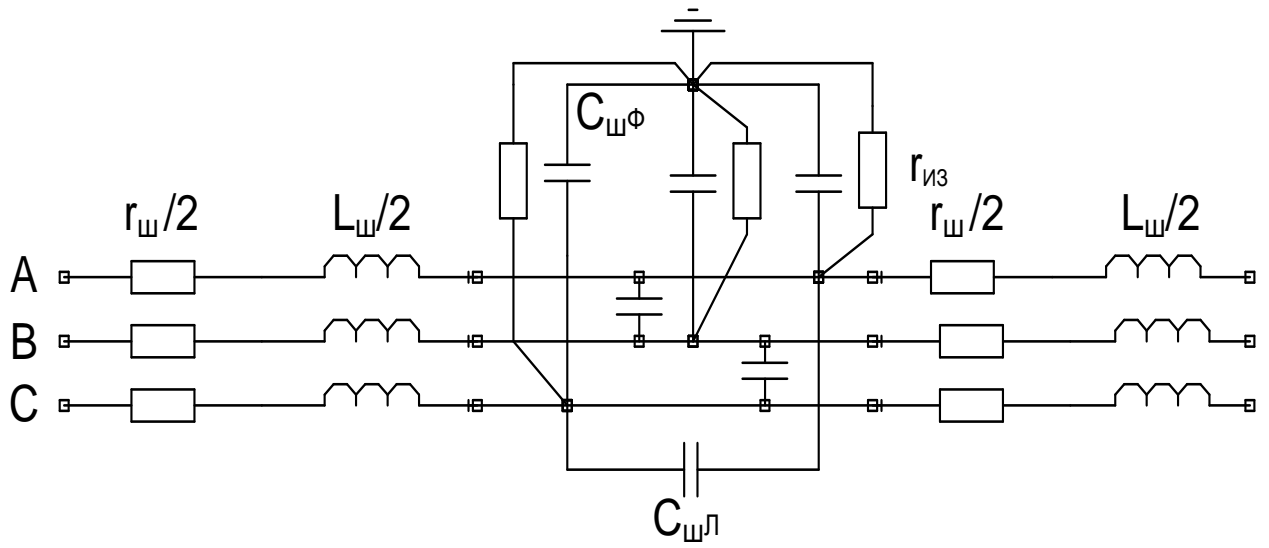


Рис. 2.5. Розрахункова схема секції збірних шин

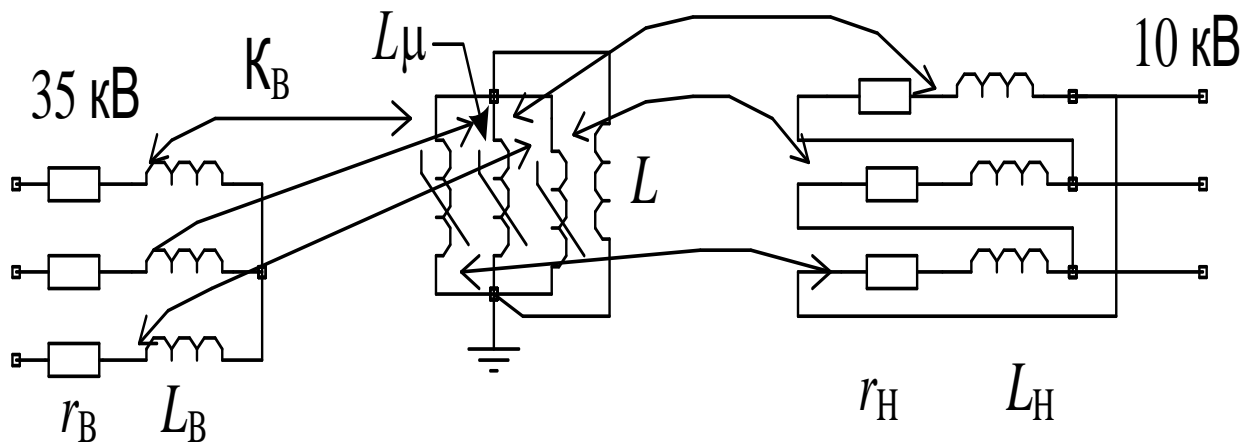


Рис. 2.6. Розрахункова схема двохобмоткового трансформатора

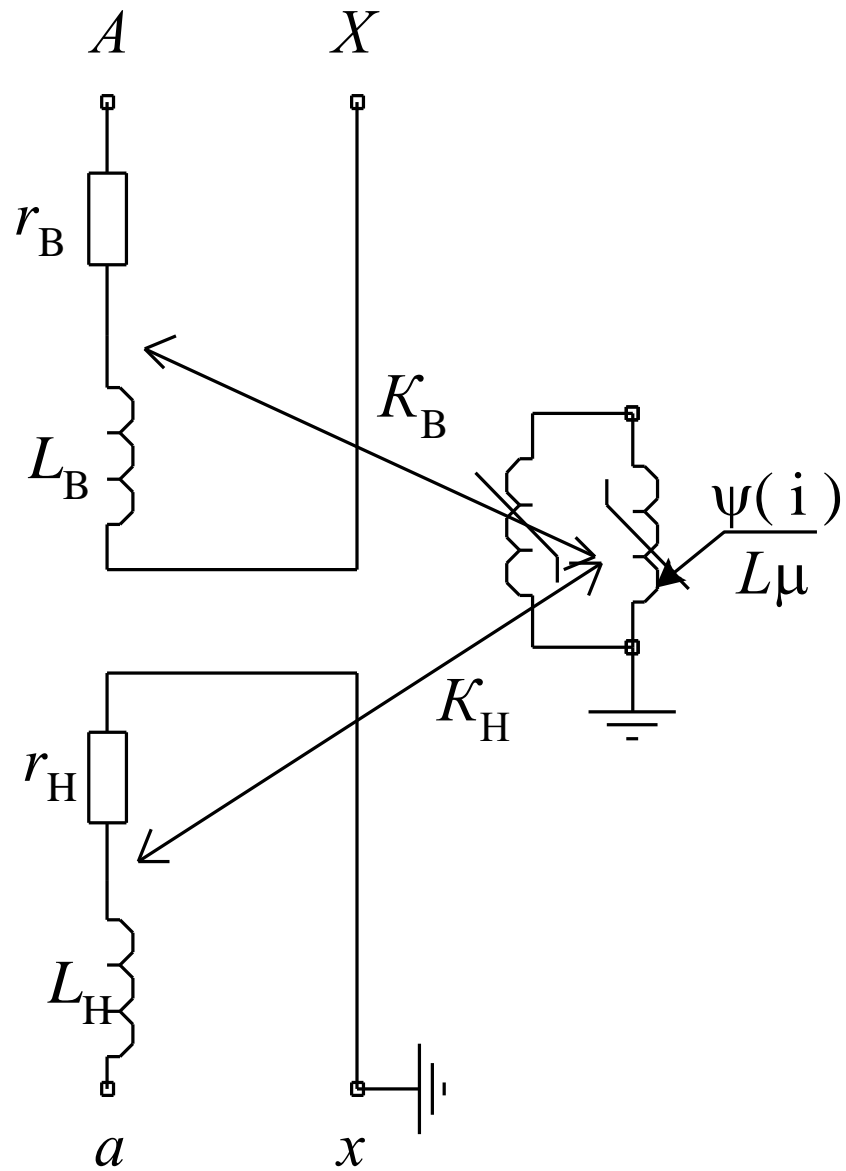


Рис.2.7. Розрахункова схема ТН типу НОМ-6,10,35 кВ

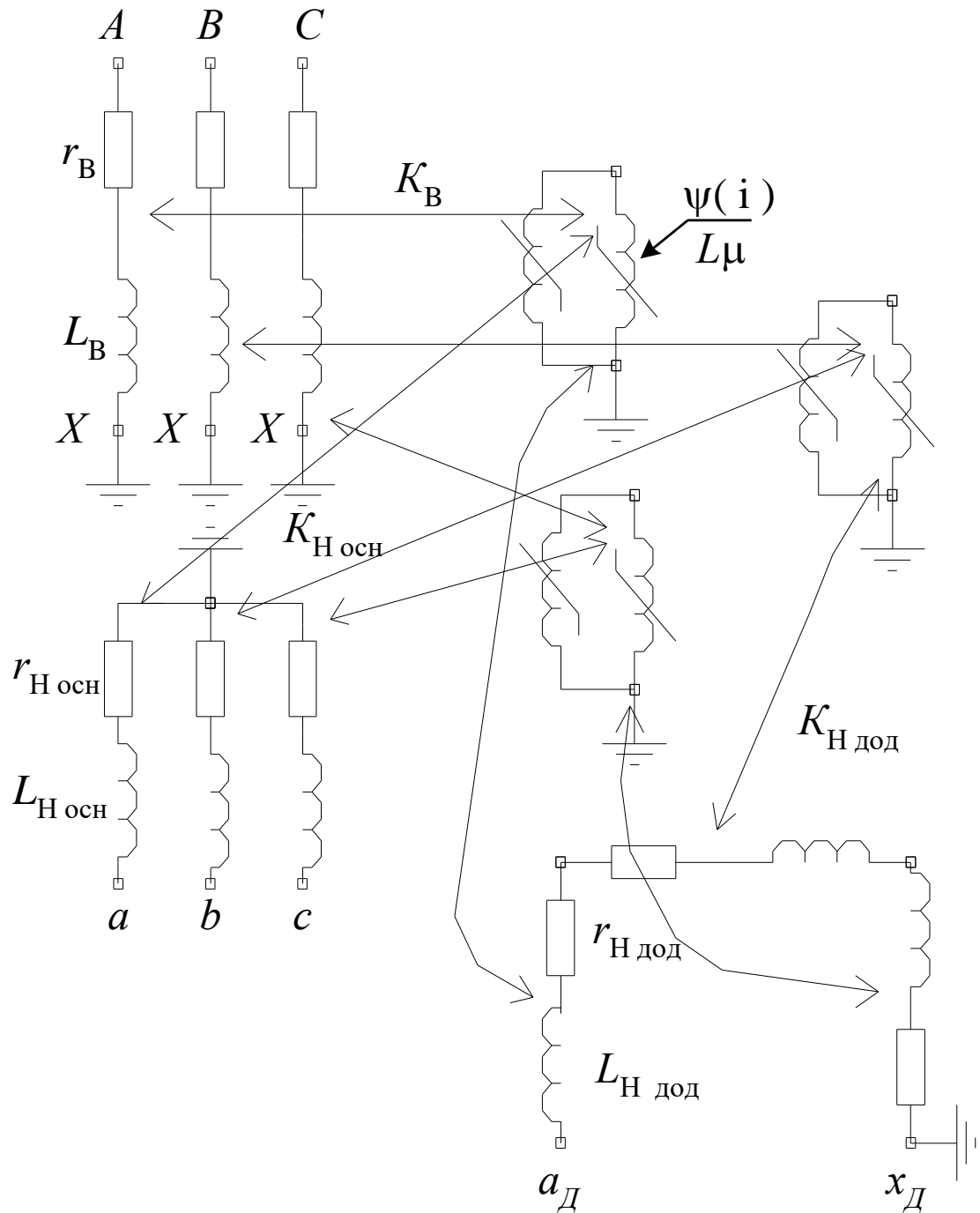


Рис.2.8. Розрахункова схема ТН типів ЗНОМ-35 кВ и НТМІ-6(10) кВ

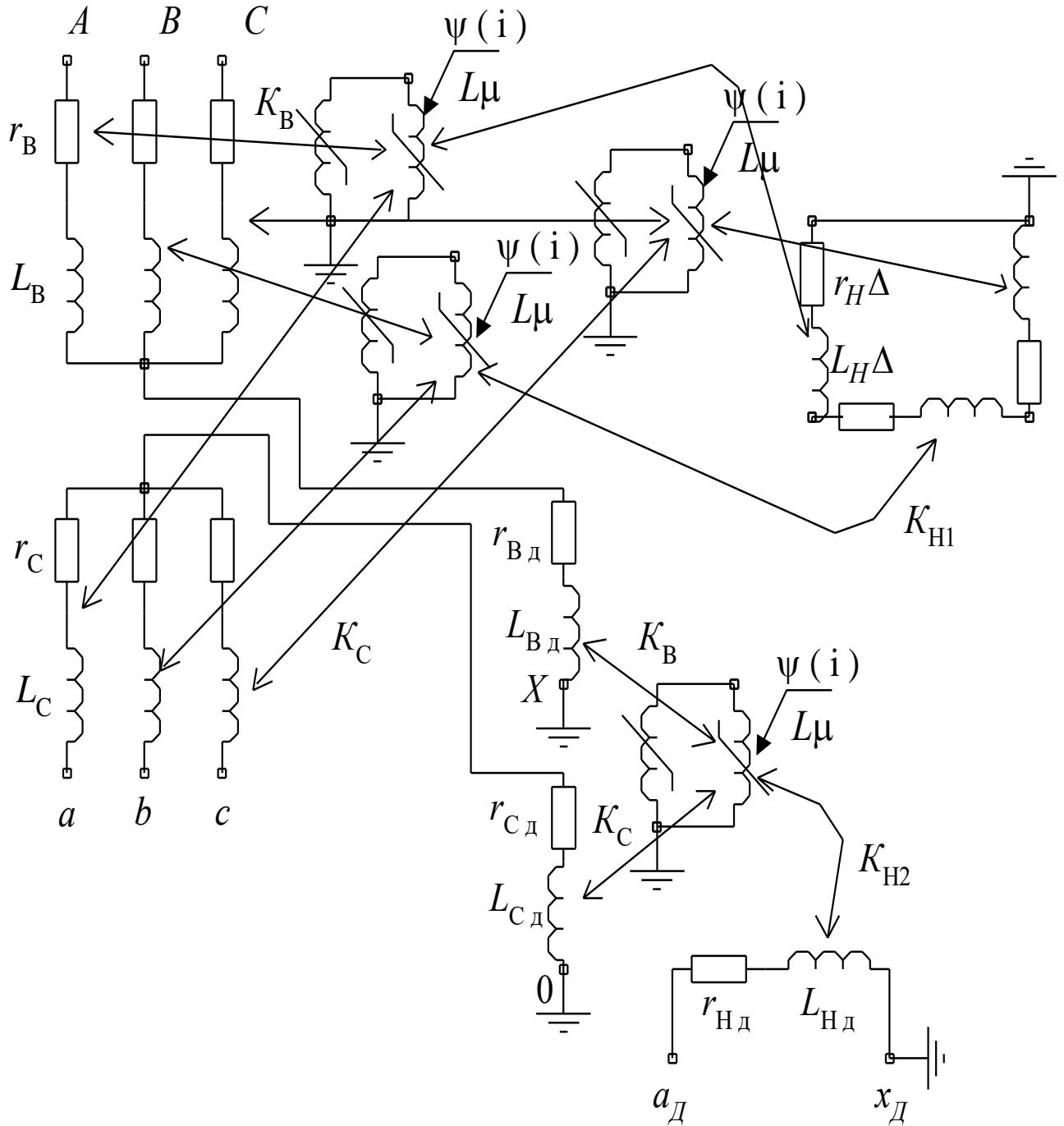


Рис.2.9. Розрахункова схема ТН типу НАМІ

Тут і далі

r_H, L_H – відповідно, активний опір та індуктивність обмотки низької напруги ТН (для ТН типа НОМ);

$r_{H\text{ осн}}, L_{H\text{ осн}}$ – відповідно, активний опір та індуктивність основної обмотки низької напруги ТН (для ТН типів ЗНОМ-35 кВ и НТМІ-6(10) кВ);

$r_{H\text{ доп}}, L_{H\text{ доп}}$ – відповідно, активний опір та індуктивність додаткової обмотки низької напруги ТН (для ТН типів ЗНОМ-35 кВ и НТМІ-6(10) кВ);

L_μ - індуктивність намагнічування.

Якщо окремо говорити про ТН типу НАМІ, то можна сказати, що він складається з двох трансформаторів, один з яких, трифазний, своїми обмотками ($r_B, L_B; r_C, L_C; r_{H\Delta}, L_{H\Delta}$), розташованими на загальному трьох-стрижневому магнітопроводі, з'єднаний в зірку і трикутник, а другий однофазний (додатковий) з обмотками ($r_{Bд}, L_{Bд}; r_{Cд}, L_{Cд}; r_{Hд}, L_{Hд}$) – розташований на окремому магнітопроводі. Первинна та вторинна обмотки додаткового трансформатора включені в нейтраль основних первинних та вторинних обмоток трифазного трансформатора відповідно.

Вторинна обмотка ($r_{H\Delta}, L_{H\Delta}$) ТН типу НАМІ, на відміну від НТМІ, ЗНОМ, з'єднана за схемою замкнутого трикутника, використовується як компенсаційна обмотка, і служить для зменшення опору нульової послідовності ТН в режимах ОЗЗ. Сигналізація про ОЗЗ здійснюється шляхом вимірювання напруги, що дорівнює 100 В на вторинній обмотці додаткового трансформатора ($r_{Hд}, L_{Hд}$).

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В РОЗПОДІЛЮВАЛЬНИХ МЕРЕЖАХ ІЗ ТРАНСФОРМАТОРАМИ НАПРУГИ

Дослідження математичної моделі системи, що містить нелінійні елементи, є складним завданням. Для її вирішення оберемо алгоритм, згідно з яким на першому етапі визначимо характер процесів у спрощеній схемі заміщення об'єкта дослідження.

Потім, поступово ускладнюючи її, включенням реальних додаткових елементів та впливів, визначимо залежність від факторів, що впливають на виникнення ферорезонансних процесів, досліджуємо можливості щодо забезпечення умов прискореного процесу загасання зазначених вище процесів.

3.1. Моделювання процесів у трансформаторах напруги при їх включенні та відключенні від мережі

Дослідимо процеси, які могли б виникнути при комутаціях слабо навантаженого трансформатора, яким і є ТН, під дією постійної напруги, що подається на первинну обмотку.

Вихідна система рівнянь при включенні ТН до постійної напруги (рис.3.1), при апроксимації нелінійності гіперболічним синусом, має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 S \cdot W_1 \cdot \frac{dB_D}{dt} + R_1 \cdot i_1 &= U; \\
 S \cdot W_2 \cdot \frac{dB_D}{dt} + R_2 \cdot i_2 &= 0; \\
 i_1 \cdot W_1 + i_2 \cdot W_2 = H \cdot l = \alpha \cdot l \cdot \operatorname{sh} \beta \cdot B_D &= \frac{\alpha \cdot l}{2} \left(e^{\beta \cdot B_D} - e^{-\beta \cdot B_D} \right)
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

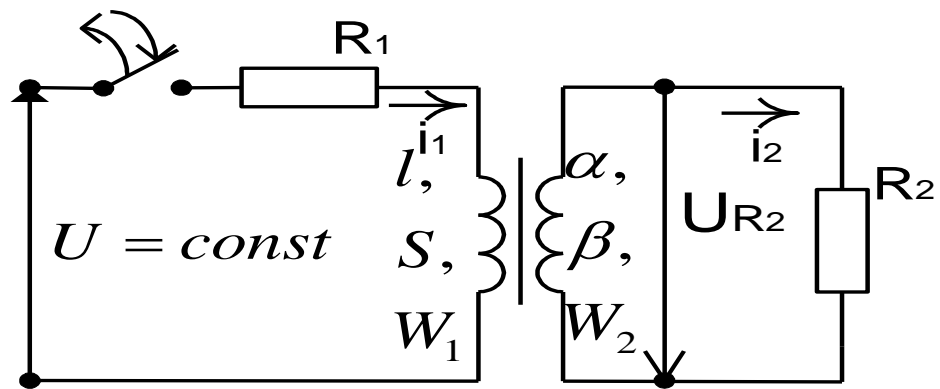


Рис. 3.1. Схема для дослідження перенапруг, що виникають при відключенні ТН від джерела постійної напруги

При наступних початкових умовах:

$$\begin{aligned}
 B(0) &= 0; \\
 \frac{dB}{dt} \Big|_{t \rightarrow \infty} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Можливо отримати наступний вираз

$$\begin{aligned}
 i_1(0) &= \frac{U \cdot W_2^2}{W_1^2 \cdot R_2 \cdot \mu}, \\
 i_2(0) &= -\frac{U \cdot W_2}{W_1 \cdot R_2 \cdot \mu}, \\
 \frac{dB}{dt} \Big|_{t=0} &= \frac{U \cdot \beta}{S \cdot W_1 \cdot \mu} \\
 \mu &= \left[1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{W_2^2}{W_1^2} \right], \\
 i_1(\infty) &= \frac{U}{R_1}, \\
 i_2(\infty) &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

Відношення миттєвих значень струмів дорівнює коефіцієнту трансформації (у момент включення)

$$\frac{i_2(0)}{i_1(0)} = \frac{W_1}{W_2}. \quad (3.4)$$

Вираз (3.4) запишемо у іншій формі

$$i_2(0) = i_1(0) \cdot \frac{W_1}{W_2}. \quad (3.5)$$

З урахуванням виразу (3.5) система рівнянь (3.1) зводиться до диференціального рівняння першого порядку [25].

$$\frac{dy}{dt} + a \cdot (y^2 - 1) = b \cdot y, \quad (3.6)$$

де

$$y = e^{\beta B_D} = e^B;$$

$$a = \frac{R_1 \cdot \alpha \cdot l \cdot \beta}{2 \cdot W_1^2 \cdot S \cdot \left[1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{W_2^2}{W_1^2} \right]};$$

$$b = \frac{U \cdot \beta}{S \cdot W \cdot \left[1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{W_2^2}{W_1^2} \right]}.$$

Так тепер для миттєвих значень струмів первинної й вторинної обмотки можна записати

$$i_1(t) = \frac{U}{R_1} + \frac{S \cdot W_1 \cdot a}{R_1 \cdot \beta} \frac{(y_1 - 1) \cdot (y_2 - 1) \cdot (y_1 - y_2)^2 \cdot e^{a(y_1 - y_2)t}}{\left[(y_2 - 1) \cdot e^{a(y_1 - y_2)t} - (y_1 - 1) \right] \cdot \left[y_1 \cdot (y_2 - 1) \cdot e^{a(y_1 - y_2)t} - y_2 \cdot (y_1 - 1) \right]}; \quad (3.7)$$

$$i_2(t) = \frac{S \cdot W_2}{R_2 \cdot \beta} \frac{a \cdot (y_1 - 1) \cdot (y_2 - 1) \cdot (y_1 - y_2)^2 \cdot e^{a(y_1 - y_2)t}}{\left[(y_2 - 1) \cdot e^{a(y_1 - y_2)t} - (y_1 - 1) \right] \cdot \left[y_1 \cdot (y_2 - 1) \cdot e^{a(y_1 - y_2)t} - y_2 \cdot (y_1 - 1) \right]}. \quad (3.8)$$

Тоді диференціальне рівняння електричного ланцюга при відключенні первинної обмотки трансформатора зі сталевим сердечником від джерела постійної напруги (рис.3.1) набуває вигляду:

$$\frac{dy}{dt} + a \cdot (y^2 - 1) = 0, \quad (3.9)$$

де

$$y = e^{\beta \cdot B_D} = e^B; \quad (3.10)$$

$$a = \frac{R_2 \cdot \alpha \cdot l \cdot \beta}{2 \cdot S \cdot W_2^2}.$$

Розглянемо загальний випадок. Відключення первинної обмотки відбувається в момент часу t_0 , коли перехідний процес, пов'язаний з включенням первинної обмотки, не встиг загаснути.

Згідно (3.2) між $i_1(t_0)$, $i_2(t_0)$ та $B(t_0)$ існує зв'язок:

$$i_1(t_0) \cdot W_1 + i_2(t_0) \cdot W_2 = \alpha \cdot l \cdot sh \beta \cdot B_D(t_0) = \alpha \cdot l \cdot sh B(t_0) \quad (3.11)$$

Після відключення первинної обмотки енергія магнітного поля в осерді миттєво змінитися не може. Це пов'язано з тим, що індукція магнітного поля в осерді до моменту відключення ($t = 0^-$) і після відключення ($t = 0^+$) повинна бути однією і тією ж $B(t_0)$. Отже, струм у вторинній обмотці повинен змінитися стрибком (позначимо цей струм $i_2^*(t_0)$). Таким чином, струм у вторинній обмотці ТН після відключення дорівнює:

$$i_2^*(t_0) = \frac{\alpha \cdot l}{W_2} \cdot shB(t_0), \quad (3.12)$$

де $B(t_0)$ визначається як

$$B(t_0) = arsh \frac{i_1(t_0) \cdot W_1 + i_2(t_0) \cdot W_2}{\alpha \cdot l}; \quad (3.13)$$

$$y_0 = e^{B(t_0)}.$$

Отримане вираз (3.13) буде початковою умовою для вирішення рівняння (3.9).

При вирішенні (3.9) з урахуванням (3.13) можливо визначити похідну від індукції магнітного поля в осерді та миттєве значення струму у вторинній обмотці ТН:

$$y = e^B = \frac{(y_0 + 1) \cdot e^{2at} + (y_0 - 1)}{(y_0 + 1) \cdot e^{2at} - (y_0 - 1)}; \quad (3.14)$$

$$\frac{dB}{dt} = - \frac{4 \cdot a \cdot (y_0 + 1) \cdot (y_0 - 1) \cdot e^{2at}}{[(y_0 + 1)^2 \cdot e^{4at} - (y_0 - 1)^2]}; \quad (3.15)$$

$$i_2(t) = \frac{4 \cdot S \cdot W_2}{\beta \cdot R_2} \cdot \frac{a \cdot (y_0 + 1) \cdot (y_0 - 1) \cdot e^{2at}}{\left[(y_0 + 1)^2 \cdot e^{4at} - (y_0 - 1)^2 \right]} \quad (3.16)$$

Згідно (3.16), в момент відключення первинної обмотки і в режимі, що встановився.

$$i_2(0) = i_2^*(t_0) = \frac{\alpha \cdot l}{W_2} \cdot shB(t_0), \quad (3.17)$$

$$i_2(\infty) = 0.$$

А напруга після відключення:

$$u_{R_2}(t) = i_2(t)R_2 = \frac{4 \cdot S \cdot W_2 \cdot a}{\beta} \cdot \frac{(y_0 + 1) \cdot (y_0 - 1) \cdot e^{2at}}{\left[(y_0 + 1)^2 \cdot e^{4at} - (y_0 - 1)^2 \right]} \quad (3.18)$$

В момент відключення

$$u_{R_2}(0) = i_2^*(t_0) \cdot R_2 = \frac{\alpha \cdot l \cdot R_2}{W_2} \cdot shB(t_0). \quad (3.19)$$

Розглянемо найбільш характерний окремий випадок, коли до моменту відключення первинної обмотки ТН перехідний процес, пов'язаний з включенням первинної обмотки закінчився. У цьому випадку індукція магнітного поля в осерді буде максимальною.

Тоді попередні вирази (3.11), (3.12), (3.13), (3.19) можна записати у вигляді:

$$i_1(t_0) \cdot W_1 = \alpha l \operatorname{sh} \beta \cdot B_{\mathcal{D}}(t_0) = \alpha l \operatorname{sh} B(t_0); \quad (3.20)$$

$$i_2^*(t_0) = i_1(t_0) \cdot \frac{W_1}{W_2}; \quad (3.21)$$

$$B(t_0) = \operatorname{arcsch} \frac{i_1(t_0) \cdot W_1}{\alpha \cdot l} = \operatorname{arcsch} \frac{U \cdot W_1}{R_1 \cdot \alpha \cdot l}; \quad (3.22)$$

$$Y_0 = e^{B(t_0)};$$

$$u_{R_2}(0) = i_2^*(t_0) \cdot R_2 = i_1(t_0) \cdot \frac{W_1}{W_2} \cdot R_2 = \frac{U}{R_1} \cdot \frac{W_1}{W_2} \cdot R_2. \quad (3.23)$$

У сталому режимі магнітне поле в сердечнику створюється, в основному, за рахунок магніторухійної сили (ампервітків) первинної обмотки. Магнітне поле в осерді зчеплене з витками вторинної обмотки. Нехай з якихось причин сталося відключення первинної обмотки.

У цьому випадку, струм у первинній обмотці стрибком зміниться від якогось конкретного значення до нуля. Магнітне поле в сердечнику має енергію, яка миттєво змінитися не може. Отже, у вторинній обмотці виникне така магніторухійна сила, яка буде підтримувати незмінність магнітного поля в момент відключення первинної обмотки. Ця магніторухійна сила повинна дорівнювати за величиною магніторухійною силою, що діє в первинній обмотці до її відключення. І, одночасно, ця магніторухійна сила дорівнюватиме добутку числа витків на величину струму в первинній обмотці.

Число витків вторинної обмотки дорівнює числу витків первинної обмотки поділеному на коефіцієнт трансформації. Отже, у вторинному ланцюзі в момент відключення повинен виникнути струм, рівний за величиною струму, що протікає в первинному ланцюзі до відключення помноженого на коефіцієнт трансформації. Цей струм за рахунок великого активного опору навантаження вторинної обмотки ТН створює значну за величиною перенапругу, проте досить швидко зменшується.

Розглянемо перенапруги, які виникають при комутаціях у ТН при дії синусоїдальної напруги у первинній обмотці $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$, рис. 3.2.

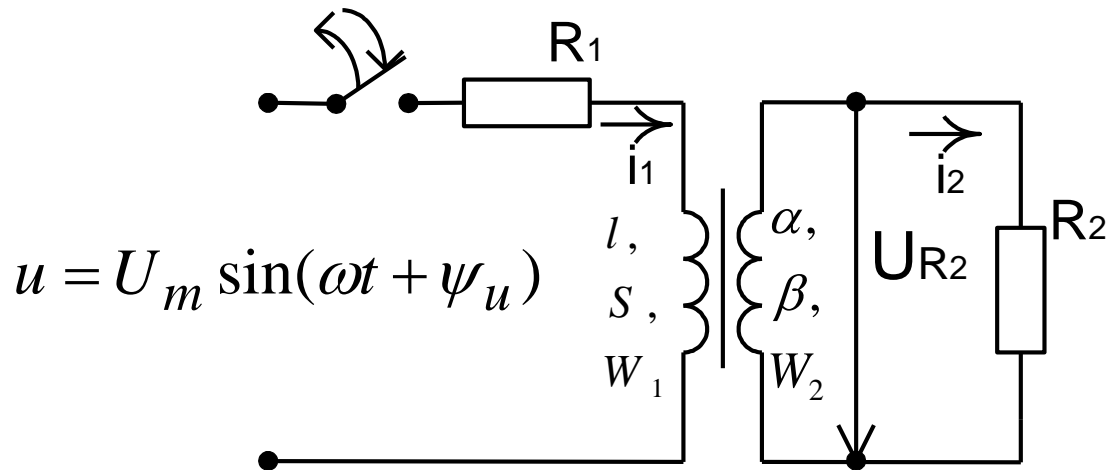


Рис. 3.2. Схема дослідження перенапруг, що у ТН при комутаціях

Вихідна система рівнянь, при апроксимації нелінійності гіперболічним синусом, має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 S \cdot W_1 \cdot \frac{dB_D}{dt} + R_1 \cdot i_1 &= U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_U); \\
 S \cdot W_2 \cdot \frac{dB}{dt} + R_2 \cdot i_2 &= 0; \\
 i_1 \cdot W_1 + i_2 \cdot W_2 &= \alpha \cdot l \cdot \text{sh} \beta \cdot B_D = \frac{\alpha \cdot l}{2} \cdot (e^{\beta B_D} - e^{-\beta B_D}).
 \end{aligned}
 \tag{3.24}$$

Якщо виконується умова $B_D(0) = 0$, то можна записати наступне:

$$\begin{aligned}
i_1(0) &= \frac{U_m \cdot \sin \psi_U}{R_1 \cdot \left[1 + \frac{W_1^2}{W_2^2} \cdot \frac{R_2}{R_1} \right]}; \\
i_2(0) &= \frac{-U_m \cdot \sin \psi_U}{R_2 \cdot \frac{W_1}{W_2} \cdot \left[1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{W_2^2}{W_1^2} \right]}; \\
\frac{dB}{dt} \Big|_{t=0} &= \frac{\beta \cdot U_m \cdot \sin \psi_U}{S \cdot W_1 \cdot \left[1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{W_2^2}{W_1^2} \right]}; \\
i_2(0) &= -i_1(0) \cdot \frac{W_1}{W_2}.
\end{aligned} \tag{3.25}$$

Вихідна система (3.24) зводиться до диференціального рівняння першого порядку виду:

$$\frac{dy}{dt} + a \cdot (y^2 - 1) = b \cdot y \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_U), \tag{3.26}$$

де

$$\begin{aligned}
y &= e^{\beta B_{\Delta}} = e^B; \\
a &= \frac{R_1 \cdot \alpha \cdot l \cdot \beta}{2 \cdot S \cdot W_1^2 \cdot \left[1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{W_2^2}{W_1^2} \right]}; \\
b &= \frac{\beta \cdot U_m}{S \cdot W_1 \cdot \left[1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{W_2^2}{W_1^2} \right]}.
\end{aligned} \tag{3.27}$$

Якщо записати (3.26) у більш зручній формі

$$\frac{dB}{dt} + a \cdot \text{sh}B = b \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_U), \quad (3.28)$$

де

$$a = \frac{R_1 \cdot \alpha \cdot l \cdot \beta}{S \cdot W_1^2 \cdot \left[1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{W_2^2}{W_1^2} \right]};$$

$$b = \frac{\beta \cdot U_m}{S \cdot W_1 \cdot \left[1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{W_2^2}{W_1^2} \right]}. \quad (3.29)$$

Рішення рівняння (3.28) для сталого режиму визначається як гармоніка індукції магнітного поля в осерді

$$B = B_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi). \quad (3.30)$$

А для миттєвих значень струмів сталого режиму можливо записати

$$i_1(t) = \frac{R_2 \cdot \alpha \cdot l \cdot W_1}{R_2 \cdot W_1^2 + R_1 \cdot W_2^2} \cdot \text{sh}[B_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi)] + \frac{U_m \cdot W_2^2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_U)}{R_2 \cdot W_1^2 + R_1 \cdot W_2^2}; \quad (3.31)$$

$$i_2(t) = \frac{R_1 \cdot \alpha \cdot l \cdot W_2}{R_1 \cdot W_2^2 + R_1 \cdot W_1^2} \cdot \text{sh}[B_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi)] + \frac{U_m \cdot W_1 \cdot W_2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_U)}{R_1 \cdot W_2^2 + R_2 \cdot W_1^2}. \quad (3.32)$$

Після відключення первинної обмотки ТН від джерела синусоїдальної напруги, згідно (3.24), рівняння електричного ланцюга для схеми, наведеної на рис.3.2, матиме вигляд:

$$\frac{dy}{dt} + a \cdot (y^2 - 1) = 0, \quad (3.33)$$

де

$$Y = e^{\beta B_{\text{Д}}} = e^B;$$

$$a = \frac{R_2 \cdot \alpha \cdot l \cdot \beta}{2 \cdot S \cdot W_2^2}. \quad (3.34)$$

Для миттєвого значення струму у вторинній обмотці ТН:

$$i_2(t) = \frac{4 \cdot S \cdot W_2 \cdot a \cdot (y_0 + l) \cdot (y_0 - l) \cdot e^{2at}}{\beta \cdot R_2 \cdot [(y_0 + l)^2 \cdot e^{4at} - (y_0 - l)^2]}. \quad (3.35)$$

А для миттєвого значення напруги на опорі R_2

$$u_{R_2}(t) = \frac{4 \cdot S \cdot W_2 \cdot a \cdot (y_0 + l) \cdot (y_0 - l) \cdot e^{2at}}{\beta \cdot [(y_0 + l)^2 \cdot e^{4at} - (y_0 - l)^2]}. \quad (3.36)$$

Нехай відключення первинної обмотки ТН сталося на момент часу t_0 .

У цей момент часу миттєве значення індукції магнітного поля в осерді згідно (3.30) дорівнює:

$$B(t_0) = B_m \cdot \sin(\omega \cdot t_0 + \psi). \quad (3.37)$$

Тоді початкова умова y_0 визначатиметься як

$$y_0 = \exp[B_m \cdot \sin(\omega \cdot t_0 + \psi)]. \quad (3.38)$$

У момент відключення миттєве значення струму у вторинній обмотці ТН і напруга на опорі R_2 згідно (3.35), (3.36), (3.38) дорівнюватимуть

$$i_2(0) = \frac{\alpha \cdot l}{W_2} \cdot sh[B_m \cdot \sin(\omega \cdot t_0 + \psi)];$$

(3.39)

$$u_{R_2}(0) = R_2 \cdot \frac{\alpha \cdot l}{W_2} \cdot sh[B_m \cdot \sin(\omega \cdot t_0 + \psi)].$$

Враховуючи те, що струм і напруга на опорі будуть максимальними, якщо відключення первинної обмотки ТН відбудеться, коли $\omega \cdot t_0 + \psi = \frac{\pi}{2}$,

можна записати:

$$i_{2\max}(0) = \pm \frac{\alpha \cdot l}{W_2} \cdot shB_m;$$

(3.40)

$$u_{R_2}(0) = \pm R_2 \cdot \frac{\alpha \cdot l}{W_2} \cdot shB_m.$$

Аналіз виразів (3.40) показує, що найбільш небезпечним є випадок, коли включення первинної обмотки ТН відбувається в момент часу, при якому перехідна складова індукції магнітного поля в сердечнику змушена компенсувати максимальне значення індукції встановленого режиму, а відключення відбувається через півперіоду після включення. У цьому випадку індукція магнітного поля в сердечнику може досягти приблизно подвоєного амплітудно-го значення режиму, що встановився.

Тому перенапруги виникають тільки при великих величинах опору R_2 (опір ланцюгів обліку).

При включенні ТН на синусоїдальну напругу залежно від моменту включення з'являється ударний струм. Цей ударний струм сам по собі викликає перенапруження в первинній обмотці.

Однак особливо небезпечним є випадок, коли після включення виникає ударний струм, і в момент часу, коли цей ударний струм матиме максимальне значення, відбувається відключення первинної обмотки. У цьому випадку початкові умови для перехідного процесу, що протікає у

вторинній обмотці, особливо несприятливі і можуть призвести до появи надперенапруг.

3.2. Моделювання процесів у трансформаторах напруги із врахуванням ємностей обмоток

Як було зазначено на початку цього розділу, щоб ускладнити модель необхідно спочатку враховувати ємності обмоток ТН.

Відповідно до [21] розподілені ємності індуктивних обмоток ТН у першому наближенні можна подати у вигляді зосереджених вхідних ємностей, що включаються паралельно ідеалізованим індуктивностям обмоток ТН. З урахуванням цього наведемо результати розрахунків, аналогічні наведеним у п. 3.1, для схеми заміщення ТН, що враховує ємність обмоток.

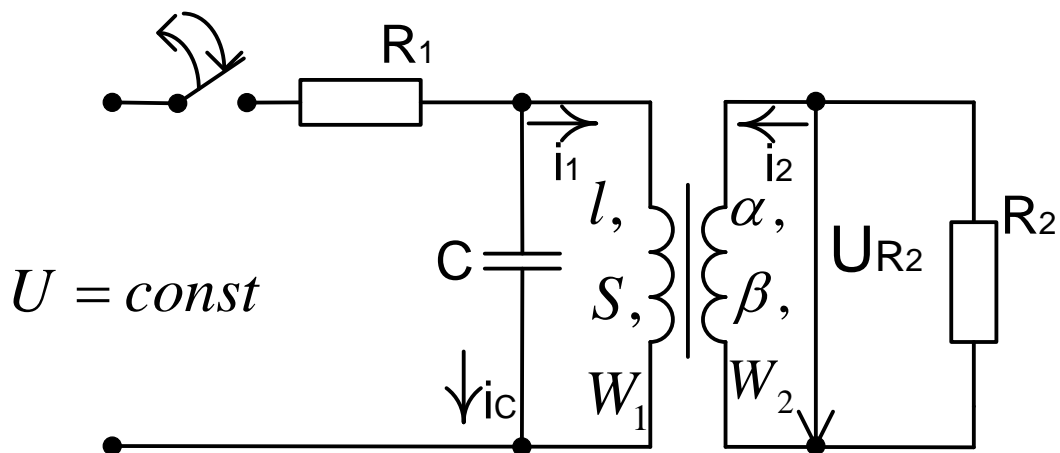


Рис. 3.3. Схема заміщення для дослідження перехідних процесів мережі із ТН (при врахуванні ємності обмоток)

Диференціальне рівняння до відключення ТН від джерела напруги U матиме вигляд (за умови, що опір вторинної обмотки входить до складу опору навантаження):

$$\frac{d^2B}{dt^2} + \frac{1}{C} \cdot \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \cdot \frac{W_2^2}{W_1^2} \right] \cdot \frac{dB}{dt} + \frac{\alpha \cdot l \cdot \beta}{S \cdot W_1^2 \cdot C} \cdot shB = \frac{U \cdot \beta}{R_1 \cdot C \cdot S \cdot W_1}. \quad (3.41)$$

А диференціальне рівняння даної схеми відповідно після відключення ТН від джерела напруги записується наступним чином:

$$\frac{d^2B}{dt^2} + \frac{W_2^2}{W_1^2} \cdot \frac{1}{C \cdot R_2} \cdot \frac{dB}{dt} + \frac{\alpha \cdot l \cdot \beta}{S \cdot W_1^2 \cdot C} \cdot shB = 0. \quad (3.42)$$

Далі, якщо провести дослідження та математичні перетворення аналогічні п. 3.1., то результати представлено у таблиці 3.1. та на рис. 3.4.

Табл. 3.1. Кратність перенапруг при варіюванні опором та ємністю

C, мкФ	K	
	R ₂ =∞, Ом	R ₂ =0, Ом
0,01	16	15,2
0,02	11	10,6
0,04	7,6	7,3
0,06	6	5,8
0,08	5,2	4,9
0,1	4,6	4,3
0,2	3	2,8
0,4	1,9	1,8
0,6	1,4	1,3
0,8	1,15	1,08
1	1	1

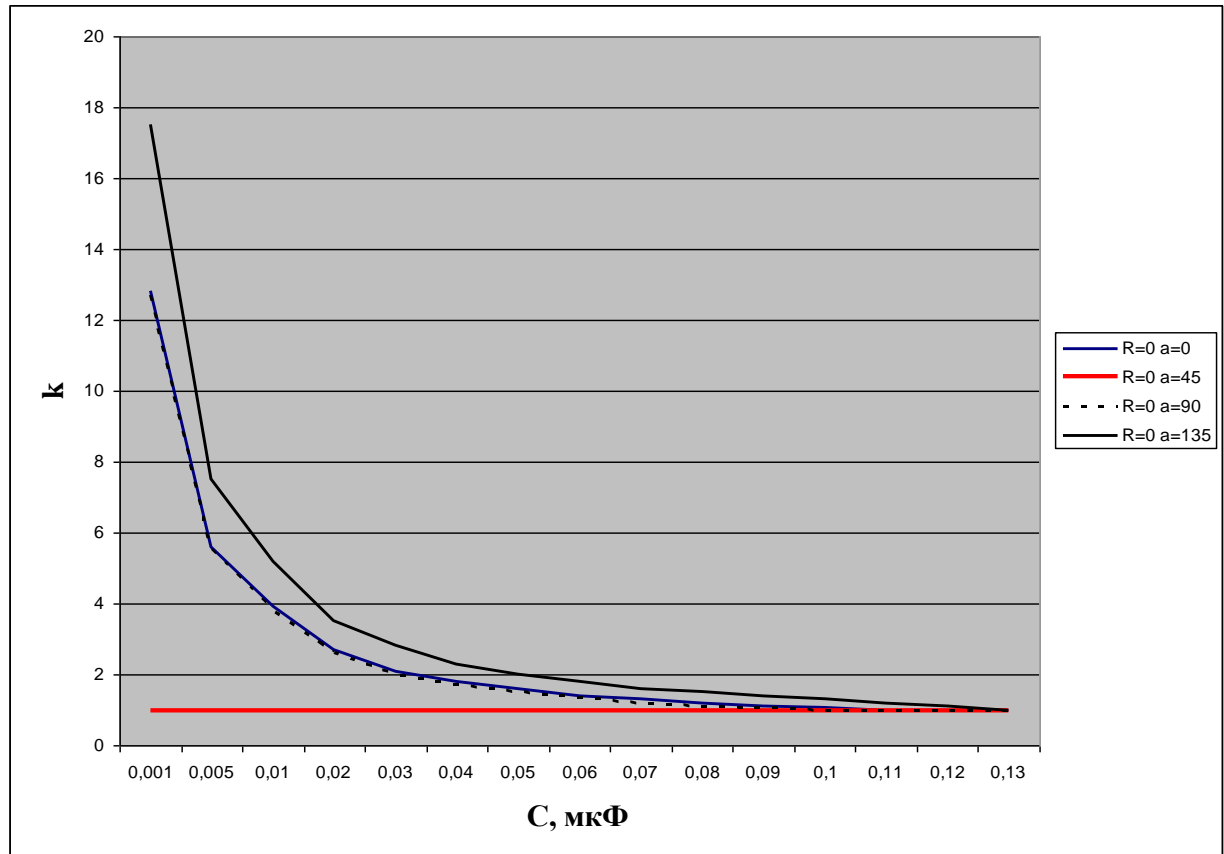


Рис.3.4. Залежність кратності перенапруги k від величини ємності C

На рис.3.5 наведено характерні осцилограми для різних значень ємності. З наведених осцилограм видно, що при малих ємностях кратність перенапруг значна, але перехідний процес протікає на високих частотах і загасає досить швидко. І, навпаки, зі збільшенням ємності тривалість згасання перехідного процесу збільшується, а частота та перенапруги зменшуються.

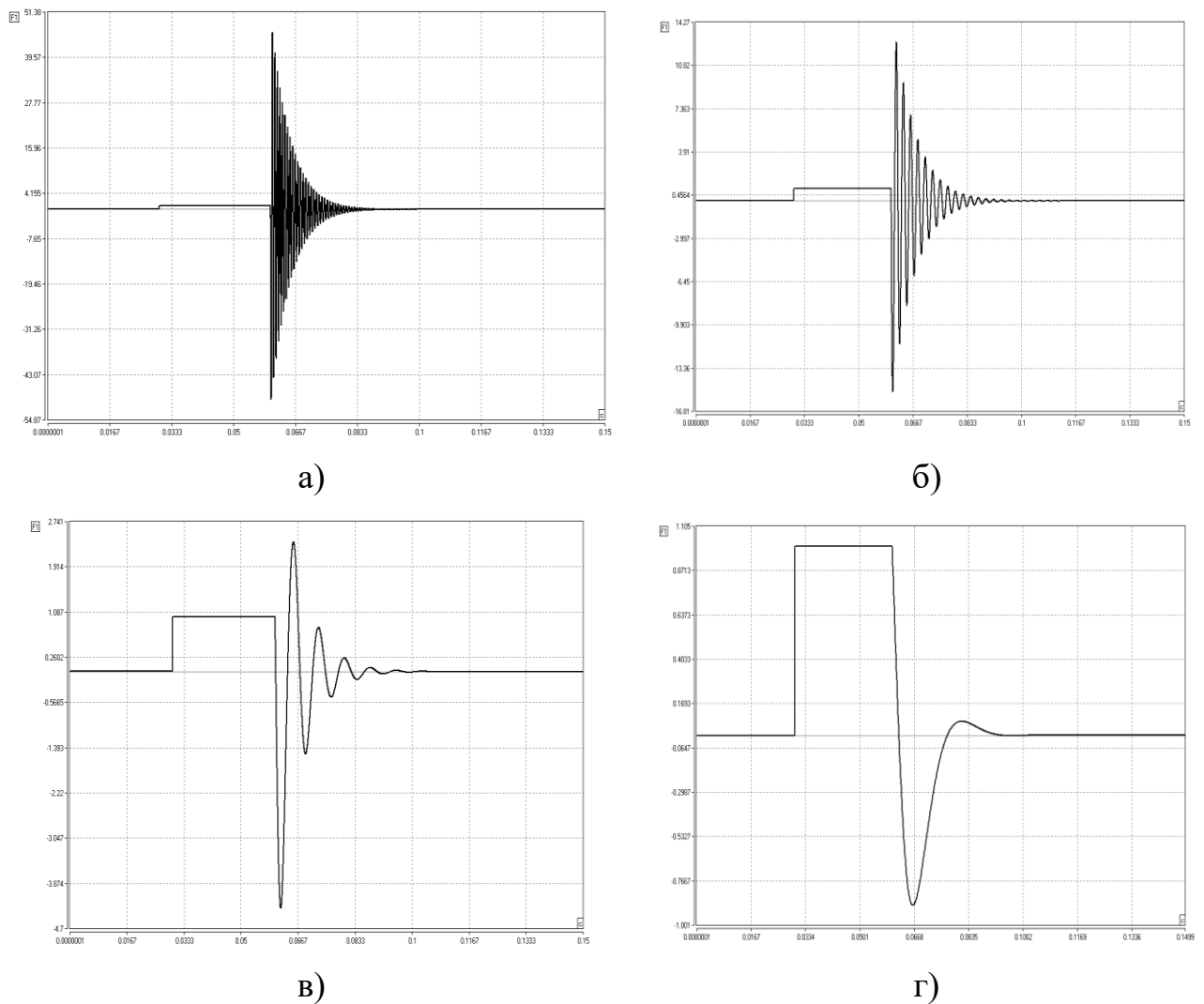


Рис.3.5. Осциллограми зміни кратності перенапруг, що виникають на первинній обмотці ТН при умові її відключення від напруги

а) $C=0,001$ мкФ; б) $C=0,01$ мкФ; в) $C=0,1$ мкФ; г) $C=1$ мкФ

Як висновок можливо відзначити, що максимальні значення перенапруг, u_c , u_{R_2} при відключенні ТН від постійної напруги зменшуються при збільшенні ємності C . Крім того, навіть невеликі, в порівнянні з первинним номінальною синусоїдальною напругою, аперіодичні складові перехідного процесу напруги можуть привести до значних перенапруг при відключеннях ТН.

3.3. Дослідження процесів, що виникають в ТН в розподільних мережах з ізольованою нейтраллю в умовах однофазного замикання на землю

Однією з причин відмови роботи ТН, як було зазначено у попередніх розлілах є однофазні замикання на землю (ОЗЗ). Досліджуємо перехідні процеси, що виникають при ОЗЗ в ЕС 10 кВ, що містить однофазний ТН типу НОМ-10 і трифазний ТН типу НТМІ-10.

На першому етапі розглянемо ЕС 10 кВ, що містить однофазний ТН типу НОМ-10. Для цього випадку розглянемо два найбільш характерні режими роботи ТН:

- режим із розімкнутою вторинною обмоткою;
- режим з активним опором, підключеним до вторинної обмотки.

При припущенні, що найважчий режим однофазного та трифазного ТН аналогічні, для виявленого найважчого режиму використовуємо розрахунки по однофазному ТН.

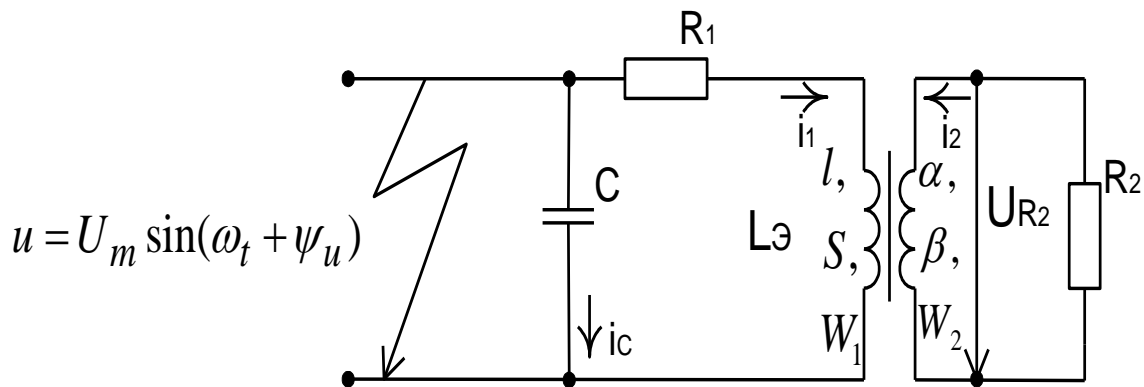


Рис. 3.6. Схема на дослідження перенапруг щодо у однофазних ТН при ОЗЗ

Позначення на схемі:

C - еквівалентна ємність одного дроту ПЛ щодо землі;

R_1 – активний опір первинної обмотки ТН;

R_2 – активний опір вторинної обмотки ТН;

L_0 – еквівалентна індуктивність первинної обмотки ТН.

Використовуючи закони комутації, знайшовши постійні інтегрування та виконавши ряд перетворень, отримаємо вирази для миттєвих значень напруги та струму первинної обмотки ТН після ОЗЗ у мережі [21]:

$$u = u' + u'' = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_u) - 0,5 \cdot U_m \cdot \sin \psi_u \cdot e^{-\delta t} \cdot \cos \omega' \cdot t; \quad (3.43)$$

$$i = i' + i'' = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_u - \varphi) + 0,5 \cdot U_m \cdot \sin \psi_u \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin \omega' \cdot t, \quad (3.44)$$

де u' , i' - , - вимушені складові відповідно напруги та струму;

u'' , i'' , - вільні складові відповідно напруги та струму;

$$\begin{aligned} I_m &= \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}}; \\ \varphi &= \operatorname{arctg} \frac{\omega \cdot L}{R_1}; \\ L &= \frac{S \cdot W_1^2}{\alpha \cdot l \cdot \beta}; \\ \delta &= \frac{R_1}{2 \cdot L}; \\ \omega' &= \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \left(\frac{R_1}{2 \cdot L}\right)^2}. \end{aligned} \quad (3.45)$$

З виразів (3.43 та 3.44) зрозуміло, що у момент ОЗЗ напруга на первинній обмотці ТН знижується до $0,5U_m$. У цьому випадку струм через первинну обмотку ТН приблизно дорівнює нулю, оскільки $\psi_u = \pi/2$, а $\omega \cdot L \gg R_1$, що відповідає законам комутації. Зі збільшенням ємності C (що відповідає збільшенню довжини ПЛ мереж) амплітуда струму вільних

коливань збільшується, кругова частота зменшується. Миттєві значення напруги і струму первинної обмотки ТН не перевищують відповідно:

$$u < 1,5 \cdot U_m;$$

$$i < I_m + 0,5 \cdot U_m \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (3.46)$$

Таким чином, отримані залежності, що визначають характер зміни струмів і напруг при ОЗЗ в ЕС з однофазним ТН, вторинна обмотка якого розімкнута. За отриманими виразами можна визначити рівень можливих перенапружень.

Тепер проведемо аналогічні дослідження процесів в електричній мережі із трифазним трансформатором напруги при однофазному замиканні на землю.

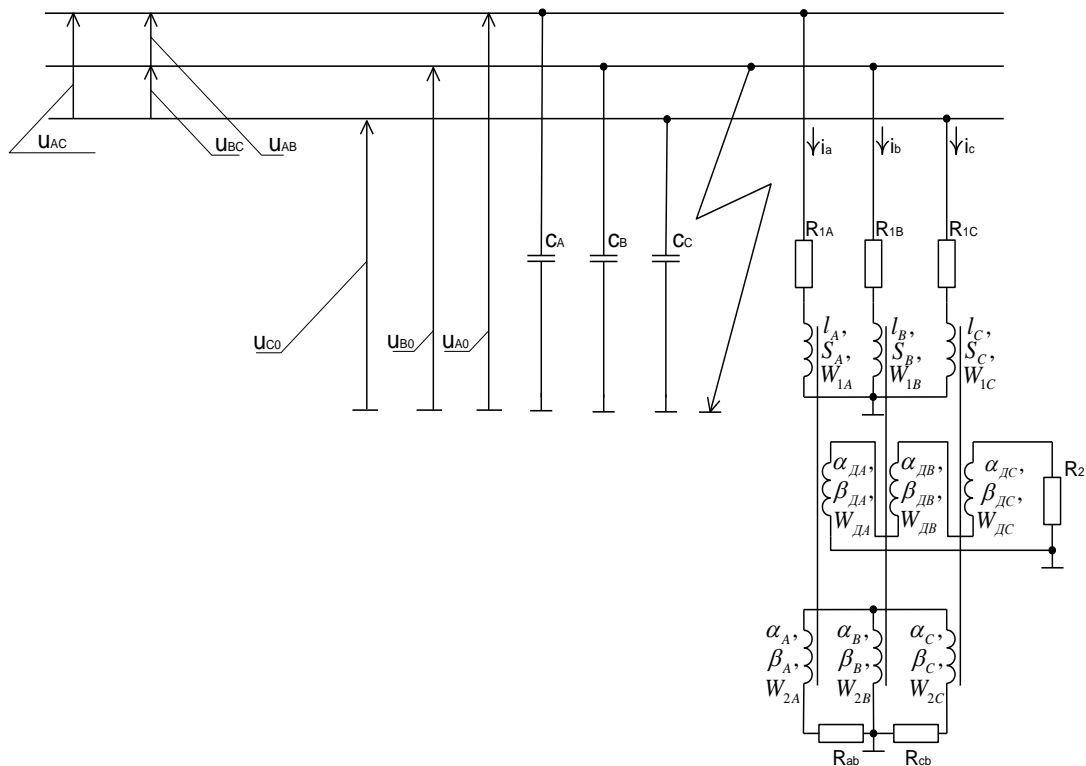


Рис. 3.7. Схема для дослідження перенапруг, що виникають у трьохфазних ТН при ОЗЗ

У нормального режимі на еквівалентних ємностях фаз (проводів) щодо землі будуть наступні фазні напруги:

$$\begin{aligned} u_{A0} &= U_{m\phi} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_U); \\ u_{B0} &= U_{m\phi} \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \psi_U - \frac{2\pi}{3}\right); \\ u_{C0} &= U_{m\phi} \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \psi_U - \frac{4\pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (3.47)$$

Тоді лінійні напруги запишемо у вигляді

$$\begin{aligned} u_{AB} &= U_{m\lambda} \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \psi_U - \frac{5\pi}{6}\right); \\ u_{BC} &= U_{m\lambda} \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \psi_U - \frac{3\pi}{2}\right); \\ u_{CA} &= U_{m\lambda} \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \psi_U - \frac{\pi}{6}\right). \end{aligned} \quad (3.48)$$

Розглянемо випадок. Наприклад сталося ОЗЗ фази В, тоді обмотка фази в НТМІ-10 на високій стороні закорочується і надалі ніяких процесів в цій обмотці не відбувається; Струм від величини в момент ОЗЗ фази зменшується до нуля. Напруги обмоток фаз А і С НТМІ-10 при ОЗЗ фази В збільшуються від фазних до лінійних. Якщо на додаток до прийнятих раніше умов виключити взаємний вплив коливальних контурів, які утворилися на стороні ВН ТН типу НТМІ-10 в результаті ОЗЗ фази, тоді можна записати:

$$\begin{aligned} u_{AB} &= u' + u'' = U_{m\lambda} \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \psi_U - \frac{5\pi}{6}\right) + \\ &+ \left[U_{m\phi} \cdot \sin \psi_U - U_{m\lambda} \cdot \sin\left(\psi_U - \frac{5\pi}{6}\right) \right] \cdot e^{-\delta} \cdot \cos \cdot \omega' \cdot t; \end{aligned} \quad (3.49)$$

$$i_A = i' + i'' = I_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \psi_U + \gamma - \varphi - \frac{5\pi}{6}\right) + \\ + \left[U_{m\phi} \cdot \sin \psi_U - U_{m\lambda} \cdot \sin\left(\psi_U - \frac{5\pi}{6}\right) \right] \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot e^{-\delta} \cdot \sin \omega' \cdot t. \quad (3.50)$$

Величини $I_m, \gamma, \varphi, \delta, \omega'$ – визначаються за (3.45), (3.46), коли вторинна обмотка ТН розімкнута.

Перехідний процес виявлятиметься у найважчій формі при ОЗЗ в останній момент проходження фазного чи лінійного напруги через максимальне значення. Згідно з (3.49), (3.50), при проходженні фазної напруги через максимум, миттєві значення напруги і струму не перевищуватимуть значень:

$$u_{AB} < 4 \cdot U_{m\phi} = 2,308 \cdot U_{m\lambda}; \\ i_A < I_m + 2,5 \cdot U_{m\phi} \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (3.51)$$

При проходженні лінійної напруги через максимум ($\psi_U = \pi/2$) миттєві значення напруги і струму не перевищуватимуть

$$u_{AB} < 4,33 \cdot U_{m\phi} = 2,5 \cdot U_{m\lambda}; \quad (3.52)$$

$$I_A < I_m + 2,598 \cdot U_{m\phi} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (3.53)$$

Таким чином проведений аналіз показав наступне.

1. Чим менший активний опір навантаження (R_2) вторинної обмотки «розімкнений трикутник» НТМІ-10, тим швидше відбувається згасання

вільних складових напруг і струмів, а, отже, менша ймовірність ушкодження первинних обмоток ТН при ОЗЗ.

2. При переміжних ОЗЗ повторне замикання може статися в момент загасання вільної складової напруги і результуюча напруга стане більшою за максимальну лінійну. У цьому випадку початкові умови несприятливіші, ніж при проходженні лінійної напруги через максимум. Аналогічна картина може і при наступних замиканнях, тобто. в цьому випадку відбувається «розгойдування» початкових значень напруг, що в свою чергу призводить до виникнення перенапруг та так званих надструмів.

3.4. Пристрій ПЗФ-5 – ефективний засіб захисту трансформаторів напруги

Як уже зазначалося вище основною перевагою мереж з ізольованою нейтраллю є можливість забезпечувати тривалий час споживачів електроенергією навіть при наявності «землі» в мережі без їх відключення. У той же час одним з основних недоліків є небезпека виникнення (при малих токах замикання на землю рівних $0,5 \div 3,5$ А) ферорезонансним процесів з подальшим пошкодженням електромагнітних трансформаторів напруги (ТН).

Ферорезонансні процеси (ФРП) в таких мережах, як показує досвід експлуатації, виникають під час появи і обриву «землі» в мережі (спрацьовування розрядників, дотик гілками дерев, обрив троса фаз ЛЕП, стікання крапель роси по ізоляторів, особливо забруднених, деяких комутаційних перемикачів, призводять до зміни ємності в мережі і т.д.). У більшості випадків ці ФРП проходять при частотах 17 і 25 Гц і супроводжуються протіканням через первинну обмотку ТН надструмів, які на порядок і більше перевищують допустимі для ТН струми, через що первинні обмотки перегорають протягом декількох хвилин. В експлуатації мають місце випадки, коли спочатку по два-три рази (після заміни) перегорає високовольтний запобіжник 35 кВ, розрахований на номінальний струм спрацювання ≥ 2 А (це при тому, що допустимий струм первинної обмотки

ТН не перевищує 60 мА), при цьому пошкоджується ТН. Таким чином, має місце неодноразові протікання великих струмів через обмотку ТН понад допустимих, які поступово, за рахунок перегріву внутрішніх шарів, призводять до розкладанню ізоляції і пошкодження ТН.

В даний час, якщо судити з публікацій зарубіжних видань, проводиться велика робота по захисту ТН від їх пошкоджень у мережах.

Проте кожен із запропонованих методів має певні недоліки й не забезпечує повного захисту трансформаторів напруги від впливу ферорезонансних процесів. Крім того, вони не дають змоги зафіксувати момент виникнення ФРП у ділянці мережі, де встановлено ТН. З огляду на це, найефективнішим засобом як для придушення, так і для реєстрації часу та тривалості ферорезонансних процесів є пристрій, так би мовити, придушення резонансу типу ПЗФ-5, розроблений на кафедрі електричних мереж Національного університету «Львівська політехніка» (рис. 3.8, 3.9).

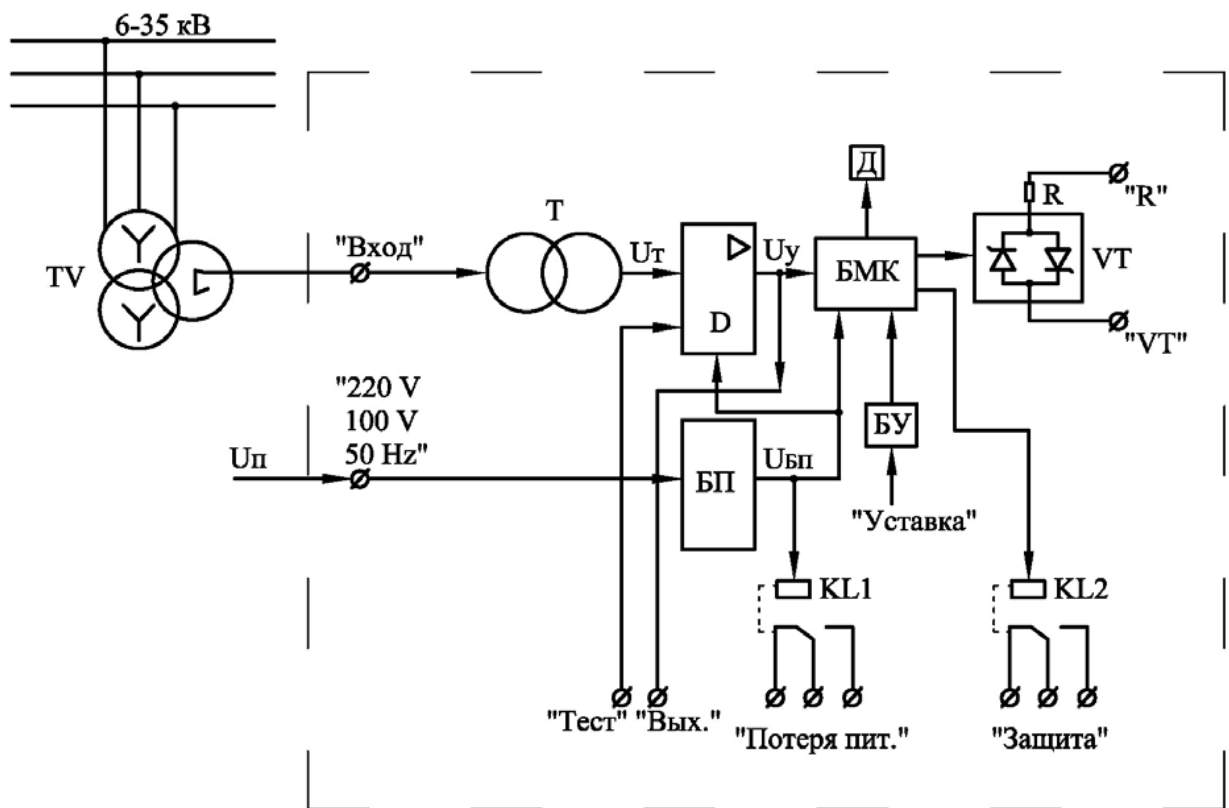


Рис. 3.8 - Структурна схема пристрою ПЗФ-5

TV – трансформатор напруги;
T – понижуючий трансформатор;
D – операційний підсилювач;
БМК – блок мікроконтролера;
VT – оптотиристиори;
R – резистор;
Д – дисплей;
БУ – блок управління;
БП – блок живлення;
KL1, KL2 – сигнальні реле

У пристрої ПЗФ-5 передбачено одноразове його вмикання на певний проміжок часу з подальшим автоматичним переходом у режим готовності до повторного спрацьовування після заданої паузи. У разі тривалого перебігу ферорезонансного процесу забезпечується повторне одноразове спрацьовування пристрою, після чого подається заборона (блокування) імпульсу гасіння до повного усунення ферорезонансу. Після ліквідації процесу пристрій автоматично відновлює свою працездатність.

Це забезпечує термічну стійкість резистора при багаторазових частих пусках пристрої (наприклад при переважаючій дузі, частими замиканнями на землю проводів мережі гілками дерев поривами вітру і т.д.). Пристрій формує архів і відображає на дисплеї 5 останніх режимів ферорезонансу (Спрацьовувань пристрою). У «архіві аварій» пристрою накопичується інформація про дату і час виникали аварійних станів, що дає експлуатації додаткову інформацію про стан мережі в тому чи іншому режимі, а з аналізу «архіву» є можливість вжити заходів щодо підвищення надійності мережі в цілому.

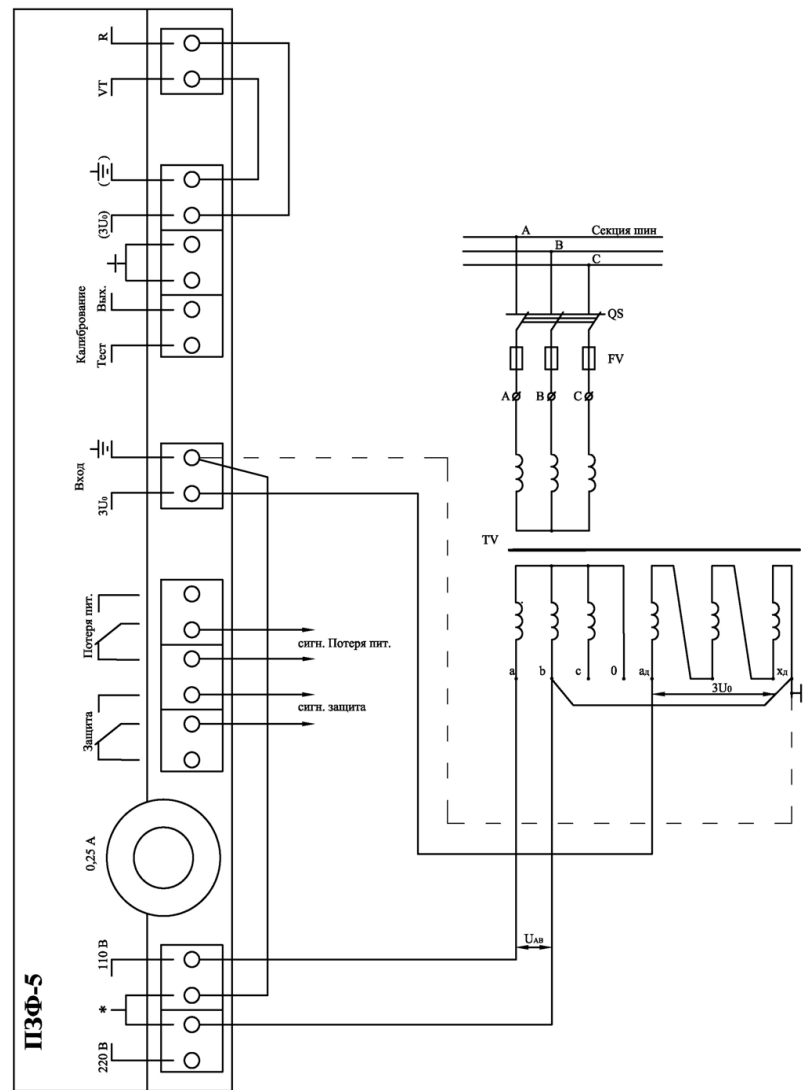


Рис 3.9 - Схема зовнішнього під'єднання ПЗФ-5

В даний час в системах встановлено близько 60 УПР. У мережах, де вони встановлені, інформації про пошкодження ТН і неправильної роботи ПЗФ не надходило.

Пристрій являє собою металеву скриньку розмірами 240x185x80 мм, до якого підводиться живлення від ТН 100 В, 50 Гц і напругою $3U_0$ від «розомкнутого трикутника», за яким й визначається наявність резонансу у мережі. Споживання пристрою складає не більше 10 В·А, встановлюється він як правило на панелі релейного захисту і може працювати у діапазоні температур середовища від -55°C до $+60^{\circ}\text{C}$. УПР ПЗФ-5 має кнопки виклику - введення інформації (з контролем інформації по цифровому

індикатору), перевірки справності (тестування) а також контакти для запуску реле сигналізації - при спрацьовуванні (пуску) захисту або втрати живлення. Вага пристрою ≤ 3 кг (рис. 3.10).

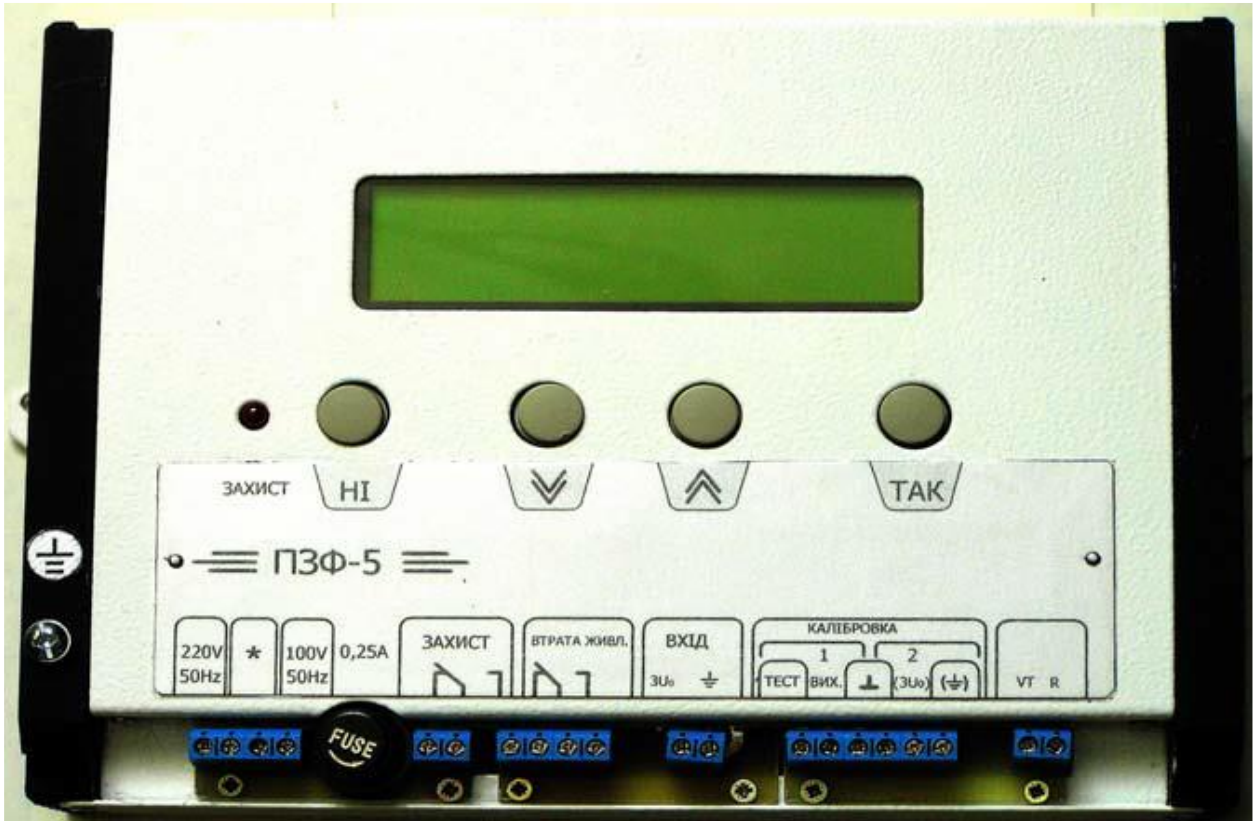


Рис. 3.10 - Передня панель пристрою ПЗФ-5

Звертаємо Вашу увагу, що прилад типу ПЗФ-5 ефективно захищає трансформатор напруги від пошкодження Ферорезонансними процесами. Разом з цим потрібно враховувати, що ПЗФ-5 може зірвати ФРП і захистити ТН від ушкодження тільки в тому випадку, якщо не менше 60% ТН в електрично пов'язаній мережі буде обладнано пристроєм захисту. Найбільш сприятливими умовами для зриву ФРП є обладнання 80 ÷ 90% ТН в електрично пов'язаній мережі такими пристроями. Це пов'язано з тим, що відключення в ремонт одного ТН обладнаним пристроєм ПЗФ призведе до того, що загальний відсоток обладнаних ТН зменшиться і умови для зриву ФРП відповідно погіршаться.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Заходи по усуненню шуму трансформатора

Шум трансформаторів викликається вібрацією активної частини, а також вентиляторами системи охолодження. Істотний вплив на шум трансформатора надають резонансні явища, що виникають в його окремих елементах - охолоджувачах, стінках бака, розширнику, трубопроводах і т.д.

Вібрація активної частини трансформатора обумовлена магнітострикційними і електромагнітними силами в магнітній системі і динамічними силами в обмотках. У трансформаторах переважає магнітострикційна складова вібрації. У магнітних системах реакторів, що мають немагнітні зазори, можуть переважати магнітні сили тяжіння в зазорах.

Зниження шуму трансформаторів пов'язано з вирішенням завдань з області акустики, вібрації, динаміки, механіки, матеріалознавства, електротехніки.

Процес зниження шуму трансформаторів, що знаходяться в експлуатації, слід розділити на ряд етапів:

- Забезпечення мал шумності внутрішніх джерел вібрації і шуму, так далі. Магнітної системи, обмоток і вентиляторів;
- Віброізоляція цих джерел від металоконструкцій бака;
- Усунення резонансів стінок бака (кожуха) і елементів, розташованих на баку;
- Огороджування внутрішніх джерел звуку звукопоглинальними пристроями;
- Установка на вібруючі елементи вібропоглинальних пристроїв;
- Прийняття зовнішніх заходів щодо запобігання поширення звуку трансформаторів у місцях їх експлуатації.

Розробці плану заходів щодо зниження шуму конкретних трансформаторів повинне передувати віброакустичне обстеження приміщення електроустановки, робочих місць і безпосередньо джерел підвищеного шуму.

4.2. Розрахунок контуру заземлюючого пристрою

Наразі вихідні дані:

- струм однофазного короткого замикання на стороні 110 кВ і $I_3 = 2,6870$ кА;
- вважаємо, що ґрунт одношарний, шар чорнозему $h=0,50$ м, тобто питомий опір ґрунту $\rho=50$ Ом·м;
- територія ТП $S_1 = 53 \times 69 = 3677$ м².

За природний заземлювач можна використовувати так звану систему трос – опори 2-х підходячих до підстанції ПЛ напругою 110 кВ на металевих опорах, довжина прольоту $l = 300,0$ м.

Кожна з ліній має сталевий грозозахисний трос ТК – 50 з перерізом $S = 50,0$ мм², опір заземлення кожної опори $r = 10$ Ом, якщо питомий еквівалентний опір землі складає до 100 Ом·м [26].

Також за природний заземлювач можливо використовувати залізобетонну конструкцію фундаменту ЦРП – 10 кВ площею $S_2 = 500,0$ м².

Згідно Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) допустимий опір заземлювача має бути не більше $R_d=0,50$ Ом для електроустановок напругою 110 кВ й струмах замикання на землю більше за 500 А.

Тоді опір природного заземлювача трос-опора ПЛ:

$$R_{e1} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{r \cdot 0,15 \cdot l}{n \cdot S}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{10 \cdot 0,15 \cdot 300}{1 \cdot 50}} = 1,5 \text{ Ом.}$$

А опір фундаментного поля будівлі ЦРП-10 кВ:

$$Re_2 = \frac{0,5 \cdot \rho}{\sqrt{S_2}} = \frac{0,5 \cdot 50}{\sqrt{500}} = 1,12 \text{ Ом.}$$

Загальний опір цієї системи дорівнює:

$$Re = \frac{Re_1 \cdot Re_2}{Re_1 + Re_2} = \frac{1,5 \cdot 1,12}{1,5 + 1,12} = 0,64 \text{ Ом.}$$

По причині того, що $Re > R_d$, необхідно використовувати ще й штучний заземлювач:

$$R_{ш.з} = \frac{Re \cdot R_d}{Re - R_d} = \frac{0,64 \cdot 0,5}{0,64 - 0,5} = 2,286 \text{ Ом.}$$

Тип та розміри контуру визначаємо згідно ПУЕ. Приймаємо до встановлення контурний тип заземлювача: це сітка із горизонтальних смуг перерізом $4 \times 40,0 \text{ мм}^2$, зі змінним кроком горизонтальних елементів які (у відповідності з [26]), розташовані на глибині $h=0,70 \text{ м}$.

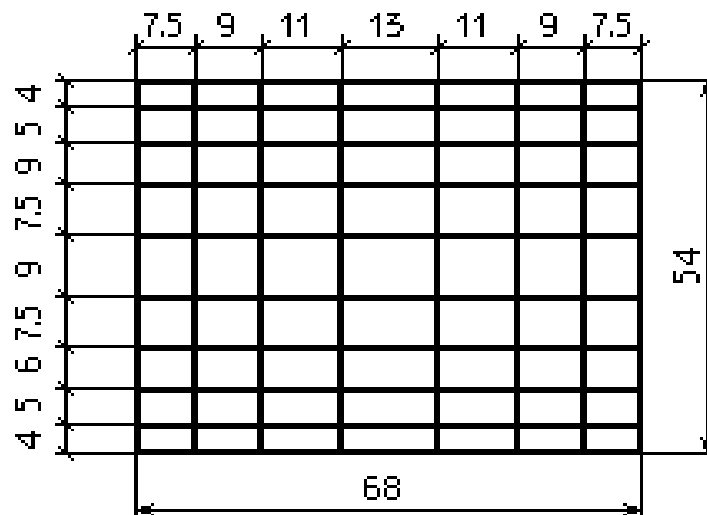


Рис. 4.1 Розташування заземлюючої сітки ГПП

Сумарна довжина горизонтальних смуг нашого заземлювача:

$$L = n_1 \cdot l_1 + n_2 \cdot l_2 = 8 \cdot 54 + 10 \cdot 68 = 1112 \text{ м,}$$

де n_1, n_2 – кількість повздовжніх й поперечних смуг (згідно [26]);

l_1, l_2 – відповідно довжини повздовжніх й поперечних смуг.

Для розрахунку вибираємо метод узагальнених параметрів. Так у даному розрахунку часто-густо використовується відношення ρ_1/ρ_2 при двохшаровому ґрунті, приймаємо відношення в даному випадку $\rho_1/\rho_2=1,0$. Таким чином узагальнений параметр Q згідно [26] буде:

$$Q = \frac{L}{\sqrt{S_1}} = \frac{1112}{\sqrt{3672}} = 18,35$$

Знаходимо значення опору сітки:

$$R_{34} = \frac{\rho_2 B_3}{Q^{\beta_p} \cdot \sqrt{S_1}} = \frac{50 \cdot 0,74}{18,35^{0,16} \cdot \sqrt{3672}} = 0,383 \text{ Ом.}$$

де B_3, β_3 – параметри прийняті згідно [26].

Значення $R_{34}=0,3830$ Ом значно менше $R_{ш.з}=2,2860$ Ом, що задовольняє умові.

У аварійному режимі потенціал заземлюючого пристрою визначеться як:

$$\varphi_3 = I_3 \cdot R_3 = 2,687 \cdot 0,24 = 0,645 \text{ кВ.}$$

Цей потенціал цілком допустимий, бо згідно ПУЕ напруга дотику:

$$U_{\text{дот}} = I_3 \cdot R_3 \cdot \alpha = 2,687 \cdot 0,24 \cdot 0,15 = 0,097 \text{ кВ.}$$

Перевіряємо заземлювач на термічну стійкість:

$$S_{\text{БП}} \geq 0,00012 \cdot I_3 \cdot \sqrt{\rho_2 \cdot t_{\text{П}}}$$

$$97,86 \geq 0,00012 \cdot 2687 \cdot \sqrt{50 \cdot 1,8} = 3,059$$

де $S_{\text{БП}}$ – площа бічної поверхні нашого заземлювача

$$S_{\text{БП}} = L \cdot 2 \cdot (a + b) = 1112 \cdot 2 \cdot (40 + 4) \cdot 0,001 = 97,86 \text{ м}^2;$$

$t_{\text{П}} = 1,80$ с - тривалість проходження струму короткого замикання.

Перевіряємо термічну стійкість смуги $40,0 \times 4,0$ мм²:

мінімальний переріз цієї смуги за умовою термічної стійкості при однофазному к.з. при часі проходження струму $t_{\text{П}} = 1,80$ с

де S - постійна величина, для сталі.

$$S'' = a \cdot b = 4 \cdot 40 = 160 \text{ мм}^2 \quad S'' \geq S'; \quad 160 > 48,7.$$

Таким чином, обрана смуга $40,0 \times 4,0$ мм² задовільняє умовам термічної стійкості. Відповідно цьому штучний заземлювач має бути виконаний із горизонтальних смугових електродів перерізом $40,0 \times 4,0$ мм² загальною (сумарною) довжиною 1112 м, а глибина занурення електродів у землю 0,70 м.

ВИСНОВКИ

1. У кваліфікаційній роботі на основі проведених досліджень вирішено важливе науково-практичне завдання підвищення надійності роботи трансформаторів напруги у складі розподільчих електричних мереж 6(10)-35 кВ за рахунок виявлення причин виникнення ферорезонансних процесів.

2. Узагальнено умови та причини виникнення резонансних процесів в електричних мережах із ізольованою нейтраллю, причини ушкодження трансформаторів напруги 6(10)-35кВ. Показано, що існуючі заходи та засоби щодо підвищення надійності роботи ТН в електричних мережах із ізольованою нейтраллю є недостатньо ефективними, особливо з точки зору захисту їх від пошкодження ферорезонансними процесами.

3. Запропоновано принципову та розрахункову схеми для аналізу перехідних процесів в електромагнітних системах ЕС, їх елементи відображаються взаємопов'язаними електричними та магнітними ланцюгами. Перші описуються диференціальними і кінцевими рівняннями, другі - кінцевими, які диференціюванням перетворюються на диференціальні.

4. Розроблено математичну модель, що дозволяє описувати процеси при комутаціях в ТН і дає можливість розраховувати перенапруги в перехідних процесах та їх тривалість. Знайдені умови, за яких ці перенапруження максимальні. Показано, що визначальним є величина опору навантаження ТН, від якої прямо пропорційно залежить рівень можливих перенапруг.

5. Визначено рівні перенапруг, які можуть виникнути у вторинній обмотці ТН у найважчих умовах їх роботи. Показано, що найбільші перенапруги виникають у тому випадку, якщо відключення первинної обмотки збігається з моментом проходження індукції через максимум.

6. Розглянуто як один із універсальних засобів запобігання пошкодження ТН застосування пристроїв типу ПЗФ-5. Показано принцип їх дії та ефективність роботи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Журахівський А.В. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник /А.В. Журахівський, С.В. Казанський, Ю.П. Матєєнко, О.Р. Пастух.–Київ.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. –456с.
2. Рожков П. П. Конспект лекцій з дисципліни «Надійність електричних мереж» для магістрів денної та заочної форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (освітні програми «Електротехнічні системи електроспоживання» та «Електротехнічні системи електроспоживання (освітньо-наукова)») / П. П. Рожков, С. Е. Рожкова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 85 с.
3. Осташевський М. О. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Мілих. – Харків : ФОП Панов А. М., 2017. – 452 с.
4. Саєнко Ю.Л. Ефективність застосування антирезонансних трансформаторів напруги контролю ізоляції в мережах з ізольованою нейтраллю / Ю.Л. Саєнко, А.С. Попов // Електрифікація транспорту – 2012. – № 4. – С. 38-43.
5. Саєнко Ю.Л. Пошкодження вимірювальних трансформаторів напруги в електромережах з малими струмами замикання на землю / Ю.Л. Саєнко, А.С. Попов // Вісник Харківського нац. техн. ун-ту сільського господарства ім. Петра Василенка. Технічні науки. – Харків: ХНТУСГ. – 2011. – Випуск 116. – С. 106 – 107.
6. Котиш А.І. До питання пошкодження трансформаторів напруги контролю ізоляції в сільських розподільних мережах // Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету/ техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація./-Вип.6.-Кіровоград: КДТУ, 2000.-С.139-141.

7. Котиш А.І., Плешков П.Г. Визначення умов розвитку ферорезонансу в повітряних мережах з трансформаторами напруги типу НАМИ // Електротехніка і Електромеханіка. – 2003, №4 С. 46-47
8. Електричні системи та мережі: навч. посібник / уклад. О. А. Парфенюк – Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2013 –. 184 с
9. Варецький Ю.О., Равлик О.М., Бахор З.М. Особливості моделювання процесів при замиканнях на землю у мережах з ізольованою нейтраллю // Технічна електродинаміка. - 1994. - №2. - С. 61-63.
10. Титенков С.С., Пугачов А.А. Режими заземлення нейтралі в мережах 6–35 кВ і організація релейного захисту від однофазних замикань на землю // Енергоексперт. – 2010. – №2. – С. 36–43.
11. Лебедка С. М. Підвищення ефективності засобів компенсації емнісних струмів в електричних мережах 6–10 кВ [текст]/ С. М. Лебедка // Енергетика та енергетичні системи: Наук.-техн. зб. – 2010. – Вип.85. – С. 316-317.
12. Аналіз ефективності існуючих режимів нейтралі мереж 6–35 кВ в енергетиці / Б.С. Стогній, В.В. Масляник, В.В. Назаров [та ін.] // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 37–41.
13. Методичні рекомендації щодо заземлення нейтралі електричних мереж 6-35 кВ через резистор. Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=77549
14. Романовський В. І. Аналіз замикань на землю в мережах 6 кВ для вибору оптимального способу заземлення нейтралі / В. І. Романовський, С. М. Лебедка // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1. – С. 101-104.
15. Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Мединський Р.В. Трансформатори напруги як датчики інформації про нестационарні процеси електричних мереж з ізольованою нейтраллю // Наукові вісті Нац. техн. університету КПІ. – 2000. - №5. – С. 15-21.

16. Ravlyk A., Gretchyn T. Digital complex for modelling of transient processes in electric circuits // Symp. Proc. "Metody matematycznych elektroenergetyce". Zakopane.-1993.-p.17-20.

17. Котиш А.І. Автоматизовані засоби технічної діагностики та електричного контролю за станом ізоляції в сільських електричних мережах: Автореф. дис... к-та техн. наук: 05.11.13 / НТУ "ХПІ". – Харків, 2001. – 17 С.

18. Журахівський А.В., Назаров В.В., Рудаков В.В., Мельник С.Т., Романишин В.В., Кобрій Б.В. Захист високовольтних трансформаторів напруги від ферорезонансних процесів у електричних мережах // Энергетика и электрификация. – 2000. - №8. – С. 32-37.

19. Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Бахор З.М., Мединський Р.В. Підвищення експлуатаційної надійності трансформаторів напруги в мережах з ізольованою нейтраллю // Энергетика и Электрификация. – 1999. – № 6. – С. 35-39.

20. Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Равлик О.М., Мединський Р.В. Захист трансформаторів напруги від надструмів під час дугових замикань фази на землю в мережі 10 кВ з ізольованою нейтраллю // Энергетика и Электрификация. – 2001. – № 6. – С. 21-26.

21. Ганус О.І. Підвищення надійності роботи трансформаторів напруги в електричних мережах з ізольованою нейтраллю: Автореф. дис... к-та техн. наук: 05.14.02 / НТУ "ХПІ". – Харків, 2008. – 20 С.

22. Статистичний аналіз даних : навчальний посібник / Т. М. Паянок, Т. М. Задорожня. – Ірпінь : Університет державної фіскальної служби України, 2020. – 312 с. – (Серія «На допомогу студенту УДФСУ»; т. 60).

23. Теоретичні основи електротехніки. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими та розподіленими параметрами : підручник / Ю. О. Карпов, С. Ш. Кацев, В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький ; під ред. проф. Ю. О. Карпова – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 377 с.

24. Говоров Ф.П., Ганус А.И., Старков К.А. Надежность трансформаторов напряжения 6-10 кВ и эффективность мероприятий по ее обеспечению // Технічна електродинаміка: зб. наук. пр. Тематичний випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. – 2004. – частина 3. – С. 45-48.

25. П’яних Б.Е., Азнакаєв Е.Г., Вишнівський О.В. Основи теорії нелінійних та параметричних кіл: НАУ, Київ – 2011. – 230 с.

26. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник. – Львів: УАД, 2009.- 336с