

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
другого (магістерського) рівня освіти

на тему:

**«ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ РЕЗОНАНСНИХ ПРОЦЕСІВ У
РАЙОННИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ»**

Виконав: студент VI курсу
групи Ен-61 спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

_____ Клименко А. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник: _____ Левонюк В. Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент: _____ Коробка С. В.
(Прізвище та ініціали)

ДУБЛЯНИ 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) рівень

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Левонюк В. Р.

(вч. звання, прізвище, ініціали)

“ _____ ” _____ 202__ року

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Клименку Андрію Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження високачастотних резонансних процесів у районних електричних мережах»

(назва теми)

Керівник роботи к.т.н., доцент Левонюк В. Р.

(наук.ступінь, вч. звання, прізвище, ініціали)

затверджені наказом Львівського НУП № 616/к - с від 12.09.2024 р.

2. Строк подання студентом роботи 6.12.2024 р.

3. Вихідні дані

технічна документація, науково-технічна і довідкова література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Вступ

1. Основи принципу ВЧ резонансу

2. Моделювання моделей схем заміщення і розрахунок їх параметрів

3. Побудова та дослідження моделі системи

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Ефективність прийнятих рішень

Висновки

Перелік джерел посиланн

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Графічним матеріалом подається у вигляді презентації.

6. Консультанти розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		Завдання Видав	Завдання Прийняв	
4	<i>Городецький І. М., к.т.н., доцент</i>			

7. Дата видачі завдання: 12.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	<i>Обґрунтування актуальності теми, формулювання мети і завдань дослідження</i>	<i>12.09.2024 – 30.09.2024</i>	
2	<i>Теоретичне дослідження роботи мережі і розрахунок їх параметрів</i>	<i>1.10.2024 – 11.10.2024</i>	
3	<i>Побудова математичної моделі лінії електропередачі та аналіз резонансних процесів</i>	<i>14.10.2024 – 25.10.2024</i>	
4	<i>Розробка заходів із покращання параметрів струмів та напруг</i>	<i>28.10.2024 – 8.11.2024</i>	
5	<i>Розробка питань з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>11.11.2024 – 22.11.2024</i>	
6	<i>Завершення оформлення ілюстративної частини роботи</i>	<i>25.11.2024 – 29.11.2024</i>	
7	<i>Завершення роботи в цілому</i>	<i>2.12.2024 – 6.12.2024</i>	

Студент _____ *Клименко А. В.*
 (підпис)

Керівник роботи _____ *Левонюк В. Р.*
 (підпис)

УДК 621.123:1

Клименко А. В. «Дослідження високочастотних резонансних процесів у районних електричних мережах». Кваліфікаційна робота. Дубляни. Львівський національний університет природокористування, 2024 р. 69 с. 46 рисунків, 1 таблиця, 20 джерел.

Досліджено, що таке резонанс і теоретичні положення про нього. Складено математичні формулювання дослідження високо частотного резонансу в різних лініях і схемах включення, в ізолюючій частині на трансформаторах і інших елементах з неоднорідною ємністю і індуктивністю. Визначені, можливі види резонансів і методи боротьби з ними. Були дослідженні системи ліній і види споживачів. Був сформульований математичний розрахунок математичних моделей схем заміщення на основі реальних ліній електромережі від 500 до 10 кВ. Був проведений екскурс по підстанціях і досліджено їх роботу, конструкцію включення, а також їх методи транспортування і розподілення навантаження. Проаналізовано, можливі най економічні моделі включення, а також включення фільтрів з вибором їх найкращого варіанту. Були визначені фільтри для регулювання електричних параметрів. Були розраховані необхідні параметри фільтрів і представлено результати їх роботи. Розглянуті заходи безпечної експлуатації електричних мереж і можливих небезпек при роботі з ними. Було розраховано ціну компенсаційних елементів і вибрано самий економічно вигідний, а також найпростіший варіант для нашої моделі. Розраховано можливі втрати при ВЧ резонансі.

ПІДСТАНЦІЯ, РЕЗОНАНСНА ЧАСТОТА, НЕСИНУСОЇДАЛЬНІСТЬ НАПРУГИ, АНАЛІЗ, ЗАХОДИ, ГАРМОНІКА.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ОСНОВИ ПРИНЦИПУ ВЧ РЕЗОНАНСУ	9
1.1 Високочастотні резонанси.....	9
1.2. Математичні обрахунки реактивних опорів в мережі і фізичні процеси, які там відбуваються.....	12
1.3. Види резонансів.....	17
1.4. Небезпеки ВЧ резонансу.....	21
2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ.....	23
2.1. Схеми заміщення елементів електричних мереж.....	23
2.1.1 Лінії електропередачі.....	23
2.1.2 Трансформатори.....	27
2.1.3. Навантаження.....	31
2.2. Огляд структурно-математичних моделей елементів електричних мереж.....	33
2.2.1 Структурно-математична модель еквівалентної електроенергетичної системи.....	33
2.2.2 Структурно-математична модель лінії електропередачі.....	35
2.2.3 Структурно-математична модель трансформатора.....	38
2.2.4 Структурно математична модель компенсаційної батареї....	39
3 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ.....	41
3.1 Розробка структурно-математичної моделі досліджуваної мережі...	41
3.1.1 Принципова схема фрагмента мережі.....	41
3.1.2 Структурно-математична модель досліджуваної мережі.....	41
3.2 Аналіз процесів у досліджуваній мережі.....	46
3.3 Розробка заходів.....	51
3.4 Результати симуляцій з фільтром.....	53
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	55
4.1 Аналіз виробничих небезпек у електроенергетиці.....	55

4.2. Характеристика процесів формування травмонебезпечних.....	57
ситуацій.....	
4.3. Небезпека у надзвичайних ситуаціях.....	59
5.ЕКОНОМІЧНАЧАСТИНА.....	61
5.1. Елементна ціна струмообмежувальних реакторів.....	61
5.2. Елементна ціна компенсаційних батарей.....	63
5.3. Сумарна ціна і втрати без використання компенсаційних елементів	65
ВИСНОВКИ.....	66
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	67

ВСТУП

На сьогоднішній день, ми маємо великі енергетичні проблеми, так як через бойові дії і знищення енергетичної інфраструктури і знищенням і пошкодженням підстанцій, ліній електропередачі, електростанцій із подальшим її ремонтом на всій мережі почали ставатися частіші випадки ВЧ резонансу, що може бути результатом не вчасного перебудови енергетичних ліній або переключення. Також, можна сказати, що через це явище найчастіше страждає, сьогоднішня електромережа, особливо це відчутно з ростом попиту на електроенергію і ростом технологій, так як збільшилася кількість пасивних елементів, які споживають реактивну потужність.

Тому, зростає питання вирішення цього питання, так як ВЧ резонанс, може спричинити: коротке замикання, так як може сильно збільшувати амплітуду струму; перебої з радіозв'язком і утворення великих шумів при передачі інформації, даних, мобільного чи інтернетівського зв'язку; не контрольоване споживання електричними приймачами із можливим перевантаженням чи на оборот з різким спадом напруги – особливо це відчутно великим виробничим підприємствам, де асинхронні або синхронні двигуни, які будуть працювати з малими обертами або взагалі не запусяться, також це відноситься до холодильників і котелень, які можуть мати втрати в потужності. Споживачі теж будуть мати проблеми, так як при таких перепадах або на оборот скачках, буде зменшуватися ефективність і час придатності електроприладів для прикладу обчислювальна техніка як: ноутбуки, ПК, телефони при зарядці, будуть не регульовано заживлюватися і доведеться міняти батарею.

В електромережах даний резонанс може приводити до великих втрат енергії, так як вона перетворюється в електростатичне чи магнітне поле, що в свою чергу, може привести до економічних втрат. Також в мережі, він може привести до сильного нагріву ліній і можливого пошкодження ізоляції або спричинити пробої на силових пристроїв, заміну, яких буде коштувати не малу ціну, що залежить від типу пробою або довжини лінії, яка була пошкоджена.

Сьогодні, є багато досліджень і математичних моделей, які використовують для усунення цього явища. Для його усунення першу чергу необхідно знати як його розрахувати і будувати принципіальні схеми, які будуть заміщати реальну і яку можна буде математично краще розраховувати, зазвичай дані схеми включають в себе як вже було згадано раніше фільтри, які можуть бути різними в залежності від потреб і на сьогодні найбільше використовують для цього автотрансформатори. Зазвичай рівень технологій виготовлення даних фільтрів залежить від технологічних потужностей країни.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження високочастотних резонансних процесів в районній електромережі та розробка заходів із покращання параметрів напруг та струмів мережі.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі **завдання**:

- розкрити теоретичні положення виникнення високочастотних резонансів в електричних мережах та заходів боротьби із ними;
- вивчити питання моделювання високочастотних резонансних процесів в електричних мережах;
- розробити структурно-математичну модель досліджуваного фрагмента електричної мережі та здійснити комп'ютерні експерименти;
- розробити заходи із покращання параметрів струмів і напруг у досліджуваному фрагменті електричної мережі;
- розкрити питання охорони праці та захисту населення у надзвичайних ситуаціях;
- здійснити техніко-економічне обґрунтування прийнятих рішень.

Об'єктом кваліфікаційної роботи фрагмент електричної районної електричної мережі високого класу напруги.

Предметом кваліфікаційної роботи резонансні процеси в районній електричній мережі.

Методи дослідження: методи математичного моделювання; методи графічного представлення; методи аналізу; методи економічного розрахунку.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ВИСОКОЧАСТОТНИХ РЕЗОНАНСІВ

1.1 Високочастотні резонанси

Резонанс – це процес при якому, системи або тіло зазнає коливань з різким збільшенням амплітуди через різке збільшення частоти системи. Зазвичай, щоб добитися максимального значення амплітуди, необхідно, щоб власна частота коливань збігалась з резонансною, одною з умов також має бути, низький опір

$$A_{\text{рез}} = \frac{f_0}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}} \quad (1.1)$$

Враховуючи, що на нашу систему діють сили опору і квазіпружні сили, то нам також доводиться враховувати затухання, то можна сформулювати таке динамічне рівняння:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx - r \frac{dx}{dt} \quad (1.3)$$

А тепер врахуємо примусову силу, яка діє на нашу систему, то рівняння можна подати в такому вигляді:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx - r \frac{dx}{dt} + F_0 \sin \omega t \quad (1.4)$$

Тепер врахуємо масу нашої системи чи тіла поділимо її на нашу формулу, то ми отримаємо:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = f_0 \sin \omega t \quad (1.5)$$

Це рівняння може бути рівне сумі однорідному рівнянню або частково неоднорідного рівняння, де перше шукається вже по рівнянню затухаючих коливань (1.3), яке за певний проміжок часу буде рівне нулю, тому шукатимемо його у такому вигляді:

$$x = A \sin(\omega t + \alpha) \quad (1.6)$$

α – зсув по фазі, який показу зміщення часу, затухаючих коливань відносно, примусова за рахунок опору, тому виходячи з вищого рівняння треба знайти амплітуду і зсув фази через параметри вимушеного коливання:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = A\omega^2 \cos(\omega t + \alpha) \quad (1.7)$$

Розгорнемо синус і косинус одного і другого рівняння і згрупувавши їх ми отримаємо:

$$[A(\omega_0^2 - \omega_1^2) \cos \alpha - 2\beta A\omega_1 \sin \alpha] \sin \omega_1 t + [A(\omega_0^2 - \omega_1^2) \sin \alpha + 2\beta A\omega_1 \cos \alpha] \cos \omega_1 t = f_0 \sin \omega_1 t \quad (1.8)$$

З цього рівняння виділити два, щоб по правій і лівій частині вони були рівні, де:

$$A(\omega_0^2 - \omega_1^2) \cos \alpha - 2\beta A\omega_1 \sin \alpha = f_0 \quad (1.9)$$

$$A(\omega_0^2 - \omega_1^2) \sin \alpha + 2\beta A\omega_1 \cos \alpha = 0 \quad (1.10)$$

Підведемо ці рівняння два рівняння до квадрату і додамо їх:

$$A^2(\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 + 4\beta^2 A^2 \omega_1^2 = f_0^2 \quad (1.11)$$

де,

$$A = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 + 4\beta^2 \omega_1^2}} \quad (1.12)$$

з другого рівняння знаходимо:

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{2\beta \omega_1}{\omega_0^2 - \omega_1^2} \quad (1.13)$$

А тепер, при певній частоті частоти вимушених коливань $\omega_{\text{рез}}$ відбувається різке збільшення амплітуди до максимуму.

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} \quad (1.14)$$

Якщо підставити це рівняння в (1.12), то отримаємо рівняння (1.1), то з отриманих виразів ми отримуємо, що опір середовища дуже малий і резонансна частота збігається з власною[3].

Тепер розглянувши, що таке резонанс в механіці, тепер ми зможемо визначити, як він буде працювати в електростатиці. В електриці є два види опорів: активний і реактивний, звідси нас цікавить реактивна частина. Реактивний опір – це індуктивний чи ємнісний опір, який не споживає енергію, а лише перетворює її в магнітне чи електростатичне поле. Індуктивність – це

стала, яка показує кількісну величину, самоіндукції і в фізиці (L), залежить від магнітного потоку, який обернений до струму.

$$L = \Phi/I; \quad (1.15)$$

Звідси саму індуктивність можна визначити за такою формулою:

$$L = \frac{\mu_0 \mu n^2 S}{l} \quad (1.16)$$

Звідси можна визначити, що індуктивність визначається з матеріалу провідника і поперечного перерізу котушки, а також від кількості витків котушки.

Ємність — це своїй суті константна величина, яка характеризує електростатичне поле і вона залежить, яка характеризує величну заряду до різниці потенціалів між тілами, яка визначається:

$$C = q/U; \quad (1.17)$$

На ємність також впливає розміри і форма, а також від роду матеріалу, так як це залежить від взаємодії між двома протилежними зарядами під дією електричного поля.

Для прикладу циліндричний конденсатор:

$$C = (2\pi\epsilon_d l) / \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (1.18)$$

Як індуктивність, так і ємність, зустрічаються змінному електричному колі, де самоіндукція буде виражатися формулою:

$$e_L = \omega L I_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1.19)$$

Як видно з формули напруга випереджає струм по фазі на 90° , де звідси можна виділити, що її реактивний опір буде рівний:

$$X_L = \omega L \quad (1.20)$$

Якщо взяти ємність, то в змінному колі позитивний напрямок струму через конденсатор на співвідношення з позитивним напрямком напруги. Із опору видно, що струм випереджає напругу по фазі на 90° , тому на векторній діаграмі, вектор струму I_m випереджає напругу U_m на 90° . Тож з виходячи з формули перезарядки і розрядки конденсатора:

$$I = \omega C U_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (1.21)$$

з даної формули, можна визначити реактивний опір ємності:

$$X_C = 1/\omega C \quad (1.22)$$

А тепер розглянемо ситуацію з ємністю і тут можна, розглянути варіант з повітряною лінією на 35 кВ, де ми маємо лінію між двома стовбцями між якими 60 м а відстань між проводами 3 м і цей прогін з'єднаний між собою ізоляторами. Ізолятори на лінії, з'єднуються спеціальною клемою, і закручуються в ізолятор.[2] Даний ізолятор буде змінювати ємність контакту, яка буде залежати від його геометричних розмірів і матеріалу виготовлення. Для паралельних проводів, ця формула буде записуватися так:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{d}{r}\right)} \quad (1.23)$$

d – відстань між центрами проводів; r – радіус жили проводу;

Тут треба виділити, що резонанс по напрузі, залежить від реактивних опорів, а від активного менше.

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \quad (1.24)$$

ω_0 – резонансна частота;

При цьому $I = E/R$ навантаження при резонансі рівно навантаженню при ємності.

$$U_L = U_C = \omega_0 L I = \left(\frac{\omega_0 L}{R}\right) E \quad (1.25)$$

$\omega_0 L/R = (L/C/R)^{1/2} = Q$; – Добротність резонансу контуру;

Ця добротність показує на скільки напруга на індуктивності(ємності) переважає над напругою на вході схеми в резонансному режимі.

1.2 Математичні обрахунки реактивних опорів в мережі і фізичні процеси, які там відбуваються

В любій ділянці електромережі, кабельних ліній або тих чи інших шин, може виникати резонанс, як вже було згадано в першому розділі через реактивні

складові: індуктивність і ємність.[1] Реактивні елементи відповідно на кожному контурі протікання струму чи заряду, будуть створювати додаткове магнітне і електростатичне поле – характеристики, яких залежать від діелектричних властивостей провідника, його оточення, різниці потенціалів між провідником і землею, відстанню між фазними проводами. В результаті ми отримуємо, накладання фазного і вхідного, що приведе до зсуву по фазі, що буде так само і з напругою і як результат, ми отримаємо зміну ЄРС навантаження на різних частинах контуру.

Якщо в нас є контур по якому тече струм:

$$I = I_m \sin \omega t \quad (1.26)$$

Відповідно за законом самоіндукції в нашому контурі буде появлятися ЄРС:

$$e_L = \omega L I_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1.27)$$

Рисунок 1.1 показує, як будуть відрізнятися амплітудні значення електричних значень.

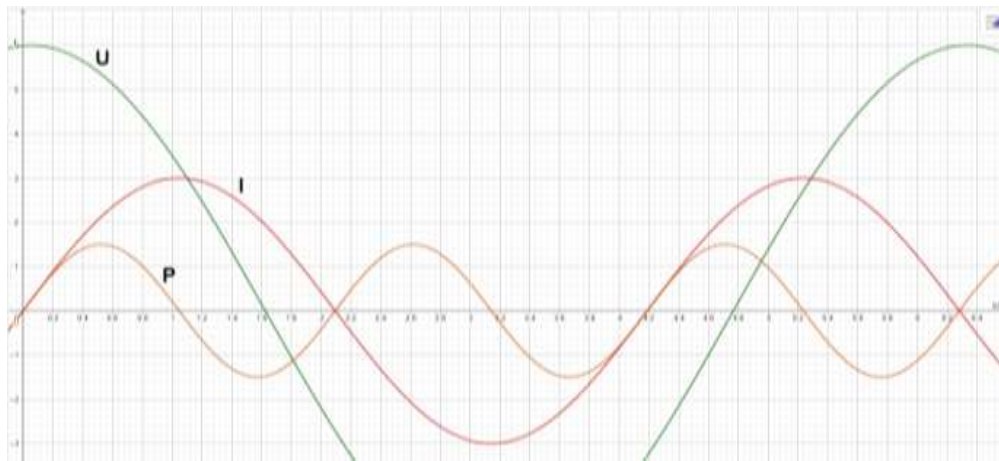


Рисунок 1.1 – Графік моментальних значень I, U, P

Якщо взяти різницю потенціалів на початку і кінця контуру, то можна побачити, що вона співпадає з позитивним напрямком струму.

Тоді можна буде визначити, що між початком а і кінцем b напруженість буде у відношенні до ЄРС індуктивності:

$$u_{ab} = u = -e_L \quad (1.28)$$

Тоді

$$u = U_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (1.29)$$

Звідки можна буде вивести:

$$U_m = \omega L I_m \quad (1.30)$$

По цій формулі можна побачити закон Ома для індуктивного елемента, який графічно поданий на рисунку 1.2, а це значить, що ωL є індуктивним опором, який позначають, як X_L :

$$X_L = \omega L \quad (1.31)$$

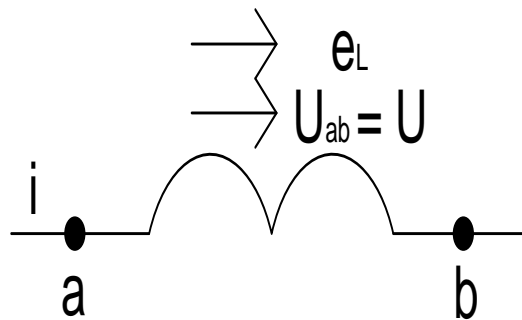


Рисунок 1.2 – еквівалентна схема зміщення індуктивності

Для знаходження ємнісного опору необхідно враховувати, що опір на ньому буде мінятися при умові зміни напруги в контурі, так як заряд на провіднику буде рівний добутку різниці потенціалів і ємності, схематично можна подати, як на рисунку 1.3. Тому при змінній напрузі за синусоїдальним законом:

$$u = U_m \sin \omega t \quad (1.32)$$

Тоді буде мінятися і заряд, який буде теж мінятися за синусоїдальним законом, тоді струм на виході буде мінятися за формулою:

$$i = \frac{dq}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t = \omega C U_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (1.33)$$

Позитивний напрямок струму, співпадає з позитивним напрямком напруги, струм випереджає напругу по фазі на 90° , тоді амплітуда струму I_m , рівний амплітуді напрузі U_m , яка розділяється ємнісний опір:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (1.34)$$

Тоді за законом Ома, можна визначити:

$$I_m = \omega C U_m = \frac{U_m}{1/(\omega C)} = \frac{U_m}{X_c} \quad (1.35)$$

Звідси ми визначили індуктивність, яка протидіє струму і пропорційна частоті, а напруга на індуктивності випереджає струм по фазі на 90° , тоді комплекс ЕРС буде в проти-фазі з комплексом напруги (U).

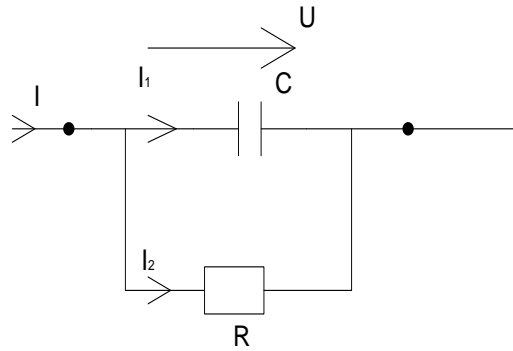


Рисунок 1.3 – еквівалентна схема зміщення ємності

А тепер визначимо математичну формулу для реальної електромережі. Введемо формули з яких відомо, що показує залежність струму і напруги від активних і реактивних опорів на певній ділянці контуру dl:

$$-\frac{\partial u}{\partial l} = ir_0 + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \quad (1.36)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial l} = ug_0 + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1.37)$$

Де, r_0 , g_0 , L_0 , C_0 – відповідно активні і реактивні опори;

А тепер до нашого контуру підключаємо джерело живлення синусоїдального контуру з кутовою частотою ($U = e^{j\omega t}$), то рівняння можна подати як:

$$\begin{aligned} -\frac{dU^{\&}}{dl} &= \underline{Z}_0 I^{\&}, \\ -\frac{dI^{\&}}{dl} &= \underline{Y}_0 U^{\&} \end{aligned} \quad (1.38)$$

де $\underline{Z}_0 = r_0 + j\omega L_0$, $\underline{Y}_0 = g_0 + j\omega C_0$ – комплексні опори і провідності, одиниці довжини лінії.

То якщо, взяти два однотипні лінійні рівняння другого порядку, то можна визначити зміну напруги на всій ділянці контуру і з цих двох рівнянь (1.37):

$$\begin{aligned}\frac{d^2 \mathcal{U}}{dl^2} &= -Z_0 Y_0 \mathcal{U} \\ \frac{d^2 \mathcal{I}}{dl^2} &= -Z_0 Y_0 \mathcal{I}\end{aligned}\quad (1.39)$$

Звідси ми можемо виділити комплексні опори, які підставивши ми знайдемо рівняння для знаходження реактивних опорів, так як ці рівняння показують напругу на всій ділянці контуру, то можна і знайти реактивні опори на цих ділянках і про диференціювавши їх отримати значення реактивних опорів на всій ділянці dl .

$$\begin{aligned}Z_0 Y_0 &= -\frac{d^2 \mathcal{U}}{dl^2 \mathcal{U}} \\ Z_0 Y_0 &= -\frac{d^2 \mathcal{I}}{dl^2 \mathcal{I}}\end{aligned}\quad (1.40)$$

Якщо розглядати процеси, які відбуваються в реактивних елементах, то можна виділити такі: зміщення фази між напругою і струмом; передача енергії між полем і джерелом; створення компенсації реактивної потужності; вплив на струм і напругу в мережі; перетворення електричної енергії; підвищення втрат мережі

Розглянемо варіант перетворення електричної енергії між полем і джерелом для цього візьмемо два контури, які знаходяться в не феромагнітному середовищі. Індуктивність першого L_1 , а другого L_2 , тоді взаємо-індуктивність між ними N . Якщо почергово спочатку підключати навантаження на кожний контур і одночасно спочатку, тримати другий розімкнутим, а потім подавати на нього струм, то можна виділити, що енергія при рості струму на першому контурі і при цьому буде розімкнутий, то збережена першим контуром енергія буде рівна:

$$\int_0^{i_1} i_1 d(L_2 i_1) = \frac{L_2 i_1^2}{2} \quad (1.41)$$

При підключенні струму на другому контурі i_2 , то накопичуватись енергія з двох контурів, тоді це можна подати як:

$$\int_0^{i_2} i_2 d\psi_2 = L_2 \int_0^{i_2} i_2 di_2 = \frac{L_2 i_2^2}{2} \quad (1.42)$$

Ріст I_2 називають зміною потокозчеплення першого контуру ψ_1 , що можна подати як:

$$\int_0^{i_2} i_2 N_{21} di_2 = N_{21} i_1 i_2 \quad (1.43)$$

Тоді сумарна магнітна енергія двох магнітозв'язаних контурів в першому випадку буде:

$$W_M = \frac{L_1 i_1^2}{2} + \frac{L_2 i_2^2}{2} + N_{21} i_1 i_2 \quad (1.44)$$

Так само буде і в аналогічному випадку при оберненому процесі:

$$W_M = \frac{L_1 i_1^2}{2} + \frac{L_2 i_2^2}{2} + N_{12} i_1 i_2 \quad (1.45)$$

Отже звідси ми можемо визначити, що магнітна енергія буде однаковою:

$$M_{12} = M_{21} = M \quad (1.46)$$

а отже можна визначити, що:

$$W_M = \frac{L_1 i_1^2}{2} + \frac{L_2 i_2^2}{2} \pm N i_1 i_2 \quad (1.47)$$

Де плюс показує спів ставне включення контурів, а мінус зустрічний контур. Тоді звідси можна зробити такі висновки, що коли в мережі є велика індуктивність, то він буде створювати велику негативну реактивну потужність, яка приведе відставання струму від напруги, що збільшує втрати мережі.

1.3 Види резонансів

В деяких системах, таких як чотирьох-полюсник, який представляє з себе, по суті лінію передачі, можна визначити два види резонансних режимів: резонанс напруг; резонанс струмів.

Слід почати з резонансу струмів, який утворюється через дві паралельні вітки, які мають різні реактивні опори. Візьмемо схему, де перша вітка має активний опір R_1 і індуктивність ωL , а також друга вітка з R_2 , і зі своєю ємністю $\frac{1}{\omega C}$. Струм I_1 відстає від напруги $U = U_{ab}$. Тоді:

$$I_1 = \mathcal{U}Y_1 = U(g_1 - jb_1) \quad (1.48)$$

Тоді для другого струму I_2 , випередження можна записати так:

$$I_2 = \mathcal{U}Y_2 = U(g_2 - jb_2) \quad (1.49)$$

Тоді:

$$\mathcal{I} = \mathcal{I}_1 + \mathcal{I}_2 = \mathcal{U}(g_1 + g_2) - j\mathcal{U}(b_1 + b_2) \quad (1.50)$$

Враховуючи, що струм і напруга співпадають по фазі, то сума реактивних провідностей віток буде рівна:

$$b_1 = \frac{\omega L}{R_1^2 + \omega^2 L^2} \quad i \quad b_2 = \frac{1}{R_2^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} \quad (1.51)$$

То при резонансі струму:

$$\frac{\omega L}{R_1^2 + \omega^2 L^2} = \frac{1}{R_2^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} \quad (1.52)$$

Векторна діаграма для резонансного режиму для умови $R_2 = 0$, що резонанс наступить при:

$$\frac{\omega L}{R_1^2 + \omega^2 L^2} = \omega C \quad (1.53)$$

Або при умові:

$$\omega^2 LC \approx 1 \quad (1.54)$$

З формули можна визначити, що якщо ми маємо реле, де всередині є котушка, яка змінює індуктивність на цій ділянці, що створює не нерівномірне магнітне поле, що виливається не рівну амплітуд напруги і струму, це може вплинути на різке збільшення струму в контурі.

Тут необхідно зазначити, щоб добитися резонансу нам необхідно міняти активні і пасивні значення опорів, якщо в нас буде ідеальна умова, коли R_1, R_2 , будуть рівні нулю, то вхідний опір буде рівний нескінченності. Також треба зазначити, що при зміні L і C , ми будемо отримувати оманливі значення резонансу або краще кажучи додаткові два значення резонансу. Тоді ми виділимо таку формулу:

$$\omega = \omega_0 \sqrt{\frac{\frac{L}{C} - R_1^2}{\frac{L}{C} - R_2^2}} \quad (1.55)$$

ω_0 – резонансна частота в контурі без втрат при $R_1 = R_2 = 0$;

оскільки кутова частота дійсно позитивна, то виконується умова:

$$\frac{L}{C} > R_1^2 > \frac{L}{C} > R_2^2 \quad (1.56)$$

а при умові:

$$\frac{L}{C} < R_1^2 < \frac{L}{C} < R_2^2 \quad (1.57)$$

Резонанс може виникати при будь-якій умові. Тепер розглянемо режим резонансу напруг. Якщо розглянути коло з індуктивністю і ємністю, де нам треба враховувати другий закон Кірхгофа:

$$IR + U_C = \xi_0 \sin \omega t - L \frac{dI}{dt} \quad (1.58)$$

То можна звести до одної змінної:

$$U_C = \frac{q}{C}; \frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{C} \frac{dq}{dt} = \frac{1}{C} I \quad (1.59)$$

Якщо взяти і про диференціювати рівняння (1.59) за часом, виключити з нього напругу і упорядкувати за рангом, то:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} I = \xi_0 \omega \cos \omega t \quad (1.60)$$

Струм в колі можна подати в синусоїдальній формі:

$$I = I_0 \sin(\omega t - \alpha) \quad (1.61)$$

Де з рівнянь (1.59), при ототожненні до (1.61) і знайшовши першу і другу похідну розв'язку, підставивши значення струму і відповідних похідних та звівши подібні отримаємо:

$$IR \cos(\omega t - \alpha) - I_0 \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \sin(\omega t - \alpha) = \xi_0 \cos \omega t$$

або

$$(1.62)$$

$$I_0 R \cos(\omega t - \alpha) - I_0 \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \cos(\omega t - \alpha + \frac{\pi}{2}) = \xi_0 \cos \omega t$$

Цю рівність можна подати, як векторної суми амплітуд напруг на довільній ділянці кола вісі O_x ,

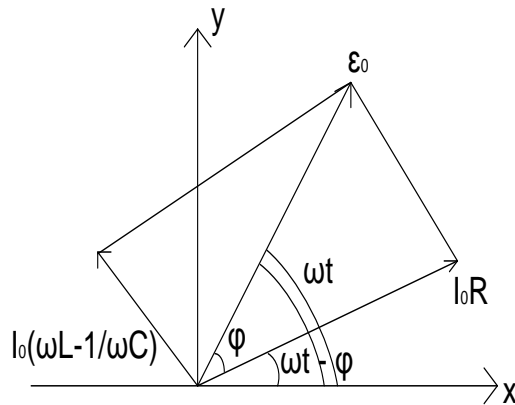


Рисунок 1.4 – Векторна діаграма амплітуд напруг

З рисунку 1.4 можна визначити: I_0R – амплітудне значення напруг на резисторі; $I_0\omega L$ – амплітудне значення напруг на котушці; ωL – індуктивний опір; $I_0 \frac{1}{\omega C}$ – амплітудне значення напруг на конденсаторі;

$$I_0 = \frac{\xi_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad (1.63)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (1.64)$$

$$\cos \alpha = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad (1.65)$$

А тепер введемо умову, коли індуктивний опір рівний ємнісному:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (1.66)$$

Тоді $I_0\omega L = \frac{I_0}{\omega C}$, тобто «спад напруги на кінцях котушок індуктивності, дорівнює спаду напруг на обкладках конденсатора». То напруги знаходяться в проти-фазах і взаємозрівноважуються – це і є резонанс напруг. Для цього можна вивести циклічну частоту, при якій настає резонанс.

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.67)$$

То період можна визначити як:

$$T = 2\pi\sqrt{LC} - \text{формула Томсона};$$

Також необхідно запам'ятати, такі характеристики резонансу: повний опір кола мінімальний і рівний активному; амплітуда струму має найбільше значення; амплітуда напруги на активному опорі рівна амплітуді прикладеної; напруга і струм перебувають в однакових фазах;

1.4 Небезпеки ВЧ резонансів

Резонанс є дуже небезпечним для життя і також для електромереж і відповідно споживачів. При резонансі може відбуватися різкий зріст напруги і струму, що може вплинути на електрообладнання, тому в багатьох для фільтрації використовують ККУ, який компенсує реактивної потужності. Якщо ми будемо брати, якусь мережу нам необхідно буде врахувати всі вище по-пунктах наведені теоретичні відомості і правильно розрахувати затрати і опори на всіх ділянках кола.

Тепер візьмемо один приклад, де в нас є для прикладу виробництво по збірці холодильників. Наша підприємство має заживлятися до лінії на 110 кВ, які будуть іти РЩ. В самому РЩ в нас, будуть використані рубильники для регулювання вхідного струму з $U_H = 500 \text{ В}$, де з них іде на трансформатори струму, де відбувається перетворення струму в магнітне поле, де за формулою (1 розділ), якщо наш трансформатор має площу $S = 0.022 \text{ м}^2$, довжина $l = 4 \text{ см}$; коефіцієнт потужності (0.8), де є дві мідні обмотки: одна на 100 витків інша на 1000, то зміна по індуктивності буде на 0.01, що за формулою буде міняти і реактивний опір в схемі (), що в свою чергу приведе до відставання струму від напруги по частоті і як результат, утворення чи підсилення нових частот, що приведе до різкого збільшення навантаження і як результат перегрів і пошкодження компонентів реле. Таке може статися при неправильному підключенні трансформатора струму або неправильно підібрані характеристики Т-0,66.

Таблиця 1.1 – зсуву по фазі для електричних параметрів

Частота, ν (Гц)	50	100	150	200	250	300	350	400
Фазовий зсув ($с^\circ$)	-90	-60	-30	0	30	60	90	90

Тому тут можна виділити такі небезпеки для нашої системи:

1. Це нагрів компонентів, через зміну опору, що приведе за законом Джоуля до зростання температури в мережі, і виводу з ладу компонентів, особливо це буде чутливо для напівпровідникових (діоди, транзистори, що виводи із ладу датчики для прикладу);
2. Спотворення сигналу і невірне значення на виході, може зменшити чутливість і придатність пристрою;
3. Пошкодження ізоляції через коротке замикання чи сильний імпульсний розряд;
4. Електромагнітні перешкоди, що веде до погіршення для прикладу зв'язку радіосистемах або телекомунікація, буде створювати шум і спотворювати сигнал;
5. Пошкодження елементів електричного кола, які не розраховані на такі навантаження;

Тепер вернемося до мого прикладу, де ми розраховували для трансформатора струму реактивний індуктивний опір, слід далі враховувати, що на контактах з електричними елементами буде мінятися ємнісний опір, також необхідно правильно розраховувати параметри і втрати мережі в РЩ, так як це вплине на саму провідність і відповідно на резонансну частоту. Після, того як ми подали вже розподілене навантаження на наші електроприлади, то на зворотній зв'язок ми будемо отримувати, так звану реактивну потужність, яка не виконує корисної роботи і утворюється за рахунок добротності, яка показує на скільки напруга на індуктивності перевищує напругу на вході схеми в резонансному режимі.

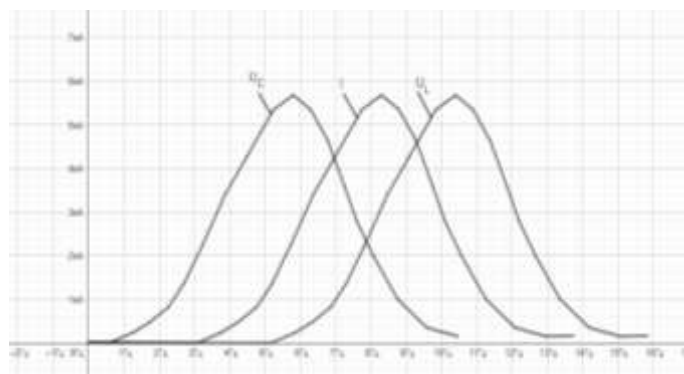


Рисунок 1.5 – Зсув значень струму при резонансі за рахунок реактивних частин контуру

Як ми бачимо з рисунку 1.5 резонанс струм починає рости при меншій частоті, якщо в нас є різке збільшення ємності, а при індуктивності частота має бути більша.

2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

2.1 Математичне моделювання елементів електричних мереж

2.1.1 Лінії електропередач. Для електромережі в, якій є хвильові параметри (Z_B, y), або П-схеми заміщення (Z_{II}, Y_{II}) або чотирьохполюсника (A, B, C, D) або для схем взаємопровідності, нам треба визначити основні резонансні константи, такі як індуктивність (L), ємність (C), кутова частота (ω), активні опори системи (R_n), їх можна визначити виходячи з значень напруги між двома точками, з'єднання. Тому тут треба буде визначити переріз даної лінії, довжину провідника і його висоту, а також рід матеріалу виготовлення, так як було згадано в пункті (1.60) це впливає на магнітну проникливість матеріалу, також суттєву роль грає відстань між лініями, що утворює само-індуктивність контуру. Почнемо з активного опору, тут треба зауважити, що активний опір може бути, як активний і омичний, які відрізняються один від одного, через коефіцієнт впливу, матеріалу і електричних величин на певну ділянку контуру (частота, струм, діаметр кабелю). То активний опір можна характеризувати так:

$$\tau_0 = r_0 \sigma_M k_a \quad (2.1)$$

Також для кабельної лінії виділяють таке розуміння, як опір постійному струму при температурі 20 C^0 , який залежить від коефіцієнту $k_{скр}$, що показує подовження кабелю за рахунок скрутки, а також $F_{ал}$ поперечний опір алюмінію. Ще опір кабелю буде мінятися при різних температурах:

$$r_{01T1} = r_{0(20)} [1 + \alpha_T (T_{np} - 20)] \quad (2.2)$$

r_{01T1} – погонний активний опір; T_{np} — температура середовища; α_T – температурний коефіцієнт збільшення опору, який для алюмінію складає 0.004 C^{-1} .

Якщо буде процес проектування лінії також, при певних умовах, буде важливо враховувати: що різницею між омичним і активним опором можна знехтувати; різниця між середнім використанням температури кабелю від 20 C^0 можна також знехтувати.

Тепер будемо враховувати момент з індуктивністю. Якщо ми візьмемо звичайну повітряну лінію, де є відстані між фазами і між цими двома лініями утворюється додатковий ЕРС, через само-індуктивність, яку було згадано (1.60), то щоб мати однакову індуктивність і ЕРС на цих кабелях, нам необхідно розташовувати кабелю по вершинам рівностороннього трикутника або через транспозицію проводів.

$$x_0 = \omega L_0 = \omega \mu_0 [\ln(D_{cp} / R_{np}) + \mu / 4] / (2\pi) \quad (2.3)$$

L_0 – еквівалентна індуктивність фази; D_{cp} – середньо статична відстань між проводами фаз; R_{np} — радіус проводу; Середньо статична відстань між кабелями фаз А, В, С, при їх відповідному розташуванні визначається:

$$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{AB} D_{BC} D_{CA}} \quad (2.4)$$

При розташуванні по вершинам рівностороннього трикутника, ми отримуємо:

$$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{mf} D_{mf} 2D_{mf}} = D_{mf} \sqrt[3]{2} = 1.26 D_{mf} \quad (2.5)$$

Тепер розглянемо варіант з ємністю, коли між проводами виникають струм зміщення, так як діє електростатичне поле, яке переорієнтацією диполів на контурах, що утворює зарядні струми, які залежать від заземлення і ємністю між фазами. При транспозиції, зарядний струм буде визначатися з робочої (2.6) ємності, що виходить з ємності провідності:

$$b_0 = \omega 2\pi \epsilon \epsilon_0 / \ln(D_{cp} / R_{np}) \quad (2.6)$$

Як видно з формули, діелектрична проникливість (ϵ), яка залежить від роду матеріалу, буде впливати на неї для прикладу для міді це значення має $\epsilon = 0.0175$ Ом*мм²/м, а для алюмінію $\epsilon = 0.028$ Ом*мм²/м, то при переході, для прикладу, маємо мережеву лінію алюмінію з ТП на автомати, які йдуть проводами до споживної техніки мідною шиною, тому цей фактор треба враховувати.

Активний опір може втрачатися на корони — це процес, коли поблизу поверхні проводу, починається іонізація повітря, що зробить зміну активного опору на тій чи іншій частині кабелю, якщо ми маємо лінію, де напруга на проміжку є більш суттєвою, для прикладу 220 кВ, то ці трати на корону стають більш суттєвими. Активний опір на

такій ділянці, буде сильно мінятися, що буде приводити до резонансу. Цю проблему можна рішити, якщо враховувати ось такі схеми заміщення, які можна буде вирахувати зі значення зарядної потужності:

$$Q_{C_0} = U_{\text{НОМ}}^2 b_0 \quad (2.7)$$

На кінець, ще треба згадати звичайні кабельні лінії, які йдуть від ТП до споживача, для прикладу землю, чи напряму з ПЛ. Тут зауважити, що повітряні лінії можуть бути, як одножильні, так і легуванням сталі, без верхньої ізоляції. Це їх дуже сильно відрізняє, так якщо взяти кабельну лінію для споживача на 35 кВ, то в ній масляно-паперова, тверда ізоляція або броня зі сталевих пластин, що вже буде міняти реактивні опори і при розрахунку L чи C треба враховувати магнітну проникливість μ і діелектричну ϵ для цих ліній, що може вплинути на електричні параметри і сильно відрізняє її від повітряної лінії, бо при таких умовах можна і сказати, що відчувається на перерізі кабелів, розміри яких треба буде зіставляти з вхідним навантаженням.

А тепер розглянемо приклад з одною повітряною лінією, яка була розщеплена по фазам, де лінії фази складається X однакових кабелів з однаковим перерізом, які розташовані до осі лінії в формі багатокутника. Даний вид ПЛ є економічно і безпечно вигідним через його розбиття на фази, через зменшення нагрівання кабелю, за законом Джоуля-Ленца і через те, що він втрачає менше енергії на крони. З цієї лінії можна визначити такий активний опір розщеплення на фази ($r_{0\phi}$), якщо враховувати, що дані кабелі паралельно включені, то можна подати в такій формі активний опір:

$$r_{0\phi} = \frac{r_{0np}}{X}, \quad (2.8)$$

де r_{0np} – опір одиничного опору;

Тепер якщо розглянути реактивні опори даного контуру, то їх можна буде розрахувати за формулами, які ми розглядали раніше, формули (2.3), для індуктивного опору і (2.6) для ємнісного опору. З цих формул нам необхідно визначити радіус одиничного проводу і відстань між проводами, також враховувати матеріал.

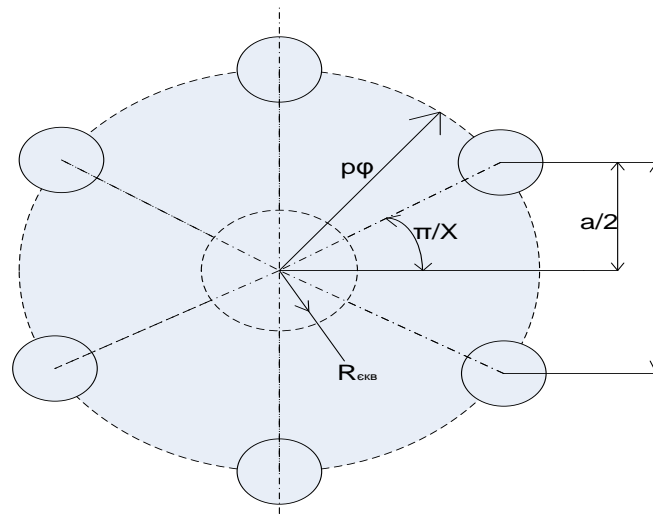


Рисунок 2.1 – Ескіз взаємного розташування проводів розщеплених фаз ПЛ

Перше, радіус проводу можна визначивши за рахунок радіусу розщеплення на фазу R_c :

$$R_c = \sqrt[x]{\frac{D_{np}}{2} \prod_{i=2}^x a_i} \quad (2.9)$$

a_1 – відстань одного фазного проводу від іншого. Якщо привести розташування проводів по багатокутнику, то можна вивести дану формулу до такого вигляду:

$$R_c = \sqrt[x]{\frac{D_{np}}{2} X^{X-1}} = \rho_\phi \sqrt[x]{\frac{D_{np}}{2} \frac{X}{\rho_\phi}} \quad (2.10)$$

ρ_ϕ – радіус кола описаного довкола правильного багатокутника;

$$\rho_\phi = \frac{a}{2 \sin(\frac{\pi}{X})} \quad (2.11)$$

Тоді за розщепленням на фази можна виділити ось такі закономірності, виходячи з нашого ескізу рисунок 2.1:

$$\begin{aligned} N = 2, \rho_\phi &= \frac{a}{2}, R_s = \sqrt{(D_{np} / 2)a} \\ N = 3, \rho_\phi &= a\sqrt{3}, R_s = \sqrt[3]{(D_{np} / 2)a^2} \\ N = 4, \rho_\phi &= a\sqrt{2}, R_s = \sqrt[4]{(D_{np} / 2)a^4 \sqrt{2}} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Отже, ми отримали для нашого контуру ось такі співвідношення між розщепленням фази і еквіпотенціальним радіусом і радіусом, який описує коло

довкола багатокутника, то тепер маючи формули для знаходження реактивних опорів індуктивності і ємності, (2.3) і (2.6), то можна вивести ось такі формули для цього виду контуру з розщепленими фазами:

$$\begin{aligned} x_0 &= 0,1445 \lg(D_{cp} / R_s) + 0,0157 / X \\ b_0 &= 7,58 \cdot 10^{-6} / \lg(D_{cp} / R_s) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Тоді виходячи з формули (2.9) радіус розщеплення фаз залежить від двох параметрів: кроку розщеплення і числа проводів і також необхідно враховувати діаметр проводів, так як він буде особливо впливати на ємнісний опір, так як він буде впливати на загальний заряд на одинцю проміжку, так як ємність рівна частці напруги на заряд.

2.1.2 Трансформатори. Тепер візьмемо трансформатор на якому теж можуть виникати резонансні частоти, які можуть бути збуджені двома обмотками при трансформації напруги.[5] На кожній обмотці є свої активні опори і реактивні опори, де треба буде врахувати, що при взаємоіндукції між обмотками трансформатора, буде втрачатися реактивний опір через розсіювання магнітного поля, що приведе до зміни параметрів намагніченого струму трансформатора (\mathcal{F}_μ), також на цей трансформаторний струм буде діяти активний опір, який буде затрачатися на сталевій частині. Також тут враховується коефіцієнт трансформації, який залежить від числа обмоток на первинній і вторинній:

$$n = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (2.14)$$

Також треба підмітити, що вторинна обмотка трансформатора замикається на коротко, а первинна напруга лише подвоїться. Ця напруга називається напруга короткого замикання. Активна потужність буде повністю витрачатися на нагрів обмоток:

$$\Delta P_K = \left(\frac{S_{T.HOM}}{U_{B.HOM}} \right)^2 r_T \quad (2.15)$$

то активний опір буде рівний:

$$r_T = \frac{\Delta P_K U_{B.HOM}^2}{S_{T.HOM}^2} \quad (2.16)$$

Напруга короткого замикання в трансформаторах залежить від двох параметрів, таких як падіння напруги в активному ($U_{ка}$) і індуктивному ($U_{к}$) опорі, які залежать від струму, який протікає в режимі короткого замикання. На сьогодні падіння напруги на активному опорі є нехтовно малим відносно падіння на індуктивності $r_T \ll x_T$. Якщо знехтувати падінням на активному навантаженні, то можна вивести ось таку формулу:

$$u_{ка} \approx u_{к} = \frac{\sqrt{3}I_{НОМ}x_T}{U_{ВНОМ}} \quad (2.17)$$

де

$$x_T \approx \frac{u_{*к}U_{ВНОМ}^2}{S_{ТНОМ}} \quad (2.18)$$

Провідності g_T і b_T для трансформатора визначається з результатів роботи холостого ходу трансформатора, де при розімкнутій вторинній обмотці до первинної обмотки, трансформатор збільшить своє навантаження. Зі схеми заміщення трансформатора, можна визначити споживну потужність трансформатором в цьому режимі визначається з кола намагніченості:

$$\Delta P_X \approx U_{ВНОМ}^2 g_T, \quad \Delta Q_X \approx U_{ВНОМ}^2 b_T \quad (2.19)$$

де

$$g_T = \frac{\Delta P_X}{U_{ВНОМ}^2}, \quad b_T = \frac{\Delta Q_X}{U_{ВНОМ}^2} \quad (2.20)$$

Тепер візьмемо трьох обмотковий трансформатор, де ми будемо мати середнє значення напруги, яке буде виходити з трьох номінальних значень напруг короткого замикання, кожне з яких буде давати свої значення опорів, які необхідно буде шукати за системою рівнянь. За основу візьмемо топологію зірку з її нижньою і верхньою обмотки. Для цих трансформаторів необхідно враховувати втрати активної потужності ΔP_{ki-j} і також напруги U_{i-j} . «При короткому замиканні на виводі обмотки СН розімкнутої обмотки НН і підключеної до джерела виводів обмотки ВН і СН вимірюється значення $\Delta P_{KB-C} i u_{KB-C}$.

Тоді для першої і другої схеми заміщення можна записати:

$$\begin{aligned} \Delta P_{KB-C} &= \Delta P_{K1} + \Delta P_{K2} \\ u_{KB-C} &= u_{K1} + \Delta u_{K2} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Отже приведені схеми з рисунку 2.3 дають картину втрат по потужності:

$$\begin{cases} \Delta P_{K1} = 0.5(\Delta P_{KB-C} + \Delta P_{KB-H} - \Delta P_{KC-H}) \\ \Delta P_{K2} = 0.5(\Delta P_{KB-C} + \Delta P_{KC-H} - \Delta P_{KB-H}) \\ \Delta P_{K3} = 0.5(\Delta P_{KB-H} + \Delta P_{KC-H} - \Delta P_{KB-C}) \end{cases} \quad (2.22)$$

Тоді можна буде провести таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} r_1 = \frac{\Delta P_{K1} U_{BHOM}^2}{S_{T.HOM}^2} \\ r_2 = \frac{\Delta P_{K2} U_{BHOM}^2}{S_{T.HOM}^2} \\ r_3 = \frac{\Delta P_{K3} U_{BHOM}^2}{S_{T.HOM}^2} \end{cases} \quad (2.23)$$

Також приволячи з формули (2.22) для напруги u , можна вивести значення для індуктивного опору:[14]

$$\begin{cases} x_1 = \frac{\Delta u_{*K1} U_{BHOM}^2}{S_{T.HOM}^2} \\ x_2 = \frac{\Delta u_{*K2} U_{BHOM}^2}{S_{T.HOM}^2} \\ x_3 = \frac{\Delta u_{*K3} U_{BHOM}^2}{S_{T.HOM}^2} \end{cases} \quad (2.24)$$

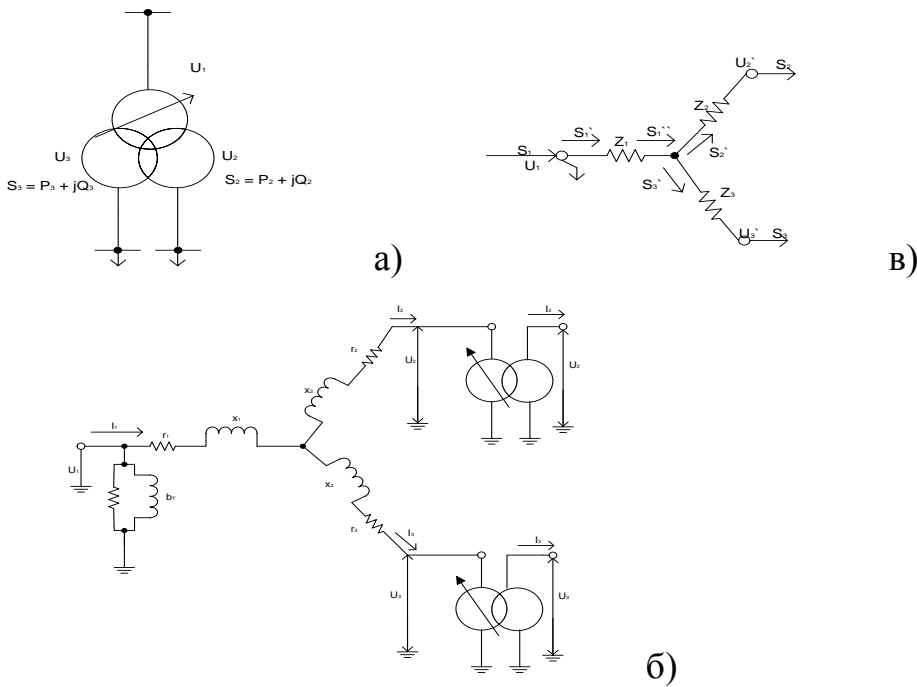


Рисунок 2.3 – трьох обмотковий трансформатор (а) принципальна схема (б) повна (в) спрощена

Тепер розглянемо ще один приклад, уже автотрансформаторними підстанціями, які є основним живленням для районів з великою кількістю пунктів споживачів. Дана підстанція складається з декількох автотрансформаторів і трьох обмоткових трансформаторів, де важливою величиною, яку слід враховувати номінальну потужність обмотки низького навантаження. Слід враховувати, що для ПС великого навантаження від 330-1150 кВ встановлюють декілька АТ з потужністю фази 133-667 МВ*А.[13]

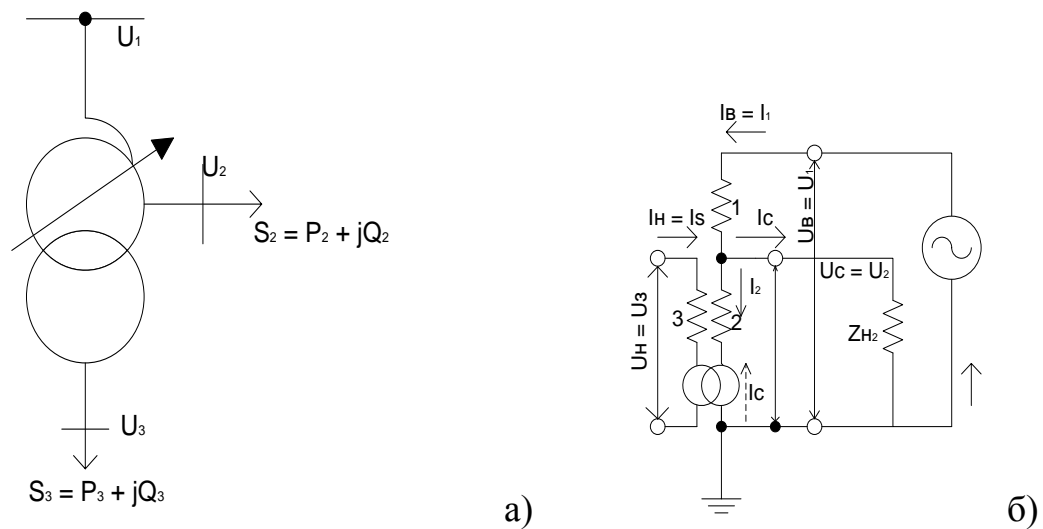


Рисунок 2.4 – Зображення автотрансформатора з РПН принципальної схеми мережі а) схема з'єднань обмоток б)

Даний тип трансформатора має три обмотки, де обмотку з низькою напругою з'єднують з іншими обмотками тільки магнітним зв'язком, а якщо ввести дві інші обмотки паралельного з'єднання, які можна буде з'єднати між собою шиною і їх з'єднання буде виконуватися через магнітне поле, рисунку 2.4 був продемонстрований варіант з двома обмотками рисунку 2.4 а) і методи його з'єднання рисунку 2.4 б). Даний вид трансформатора може передавати номінальну потужність через себе:

$$S_{АТНОМ} = \sqrt{3} I_{ВНОМ} U_{ВНОМ} \quad (2.25)$$

Сама типова потужність обраховується так:

$$S_{ТИП} = \sqrt{3} I_{ВНОМ} U_{ВНОМ} \left[1 - \frac{U_{СНОМ}}{U_{ВНОМ}} \right] = S_{АТНОМ} \alpha \quad (2.26)$$

2.1.3 Навантаження. Навантаження в системі можна подавати, як споживання активної і реактивної потужності мережею за певний проміжок часу, що може залежати від електричних приймачів і їх режимів і характеристик роботи.[4] Тут треба виділити, що деякі пристрої можуть споживати набагато більше за рахунок трансформації або можуть бути великі втрати в реактивній потужності, коли для прикладу в нас довга лінія або велика кількість приймачів. Коли ми маємо всі можливі потужності на весь проміжок часу, ми будемо відповідну лому криву, яку називають графіки навантаження, де можна буде виділити ось такі основні значення для цих графіків: найбільш ($P_{Нб}$), що показує найбільше споживання потужності за добу і найменше значення потужності ($P_{Нм}$) за добу.

Ще одними параметрами графіків можна вважати: середньодобове навантаження (P_{cp}), коефіцієнт нерівномірності графіка ($\alpha_{доб}$), густина графіка ($\beta_{доб}$). Звідси можна визначити, що середньодобове навантаження (P_{cp}) рівне:[13]

$$P_{cp} = \frac{\mathcal{E}_{доб}}{24} \quad (2.27)$$

коефіцієнт нерівномірності графіка ($\alpha_{доб}$):

$$\alpha_{доб} = \frac{P_{Нм}}{P_{Нб}} \quad (2.28)$$

густина графіка ($\beta_{доб}$):

$$\beta_{доб} = \frac{P_{cp}}{P_{Нб}} \quad (2.29)$$

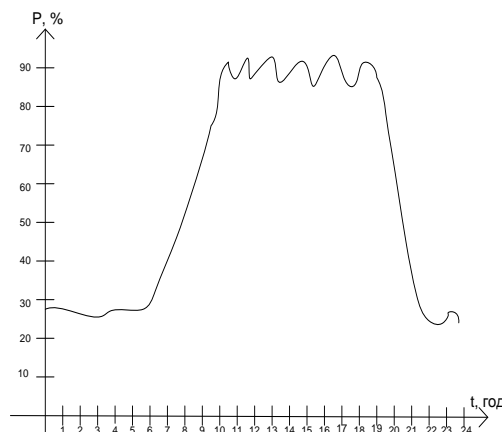


Рисунок 2.5 – Графік навантаження для заводу з виробництва приладів

На рисунку 2.5, відображена робота заводу по виробництву приладів, де в день іде пік роботи з перепадами на одну зміну, а вечором навантаження зазвичай спричиняє освітлювальне і охоронне обладнання.

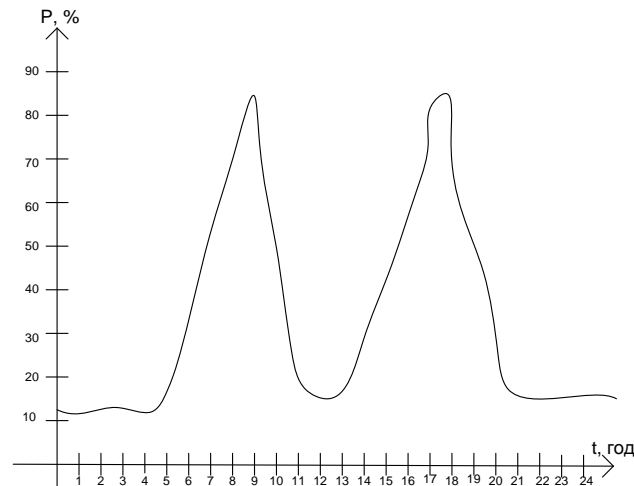


Рисунок 2.6 – Графік навантаження для школи

З вище представлених графіків 2.5 і 2.6, можна побачити, зміну навантаження від одного періоду до іншого, якщо ми маємо якесь виробництво, то нам необхідно залучити для цього асинхронні двигуни, його будова наведена в рисунку 2.7, де споживання відбувається за рахунок трьохфазної системи з трьома включеними катушками і якщо враховувати, що загальна реактивна потужність буде залежати від суми всіх фаз загрузок:

$$P = P_1 + P_2 + P_3; \quad (2.30)$$

І якщо врахувати, що під час зміни магнітного поля, в нас обертається ротор, де кожна фазу можна подати як струм за синусоїдальним законом:

$$I = I_m \sin \omega t \quad (2.31)$$

Звідси, ми можемо визначити, що магнітне поле буде зміщене на 120° , -120° , 0° , тому магнітне поле буде чутливо залежати від вхідного навантаження, крім цього в нас буде різко рости реактивне навантаження і падіння напруги через великий струм і відповідно під таку систему необхідне підключення і запуск через трансформатор, а так як пуск через трансформатор створює на собі велику кількість індуктивності, через перетворення на обмотках у нас може виникнути ВЧ резонанс, а це приведе за собою зміну пускового струму, що

може навіть зупинити роботу двигуна. Також сильне навантаження, може привести до великого коливання напруги в мережі, так як робота цього двигуна буде вимагати зміну індуктивних параметрів і збільшенню реактивної потужності, тому бажана включати ККУ для таких підприємств і також добре врахувати параметри для розподільчого електричного обладнання.

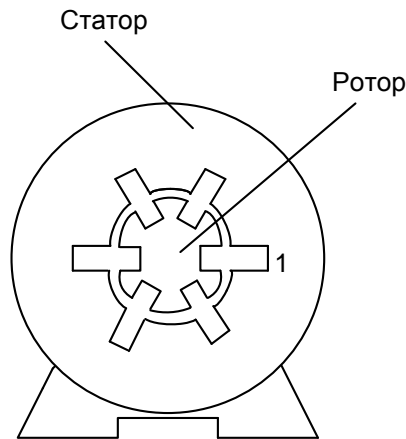


Рисунок 2.7 – Ескіз асинхронного двигуна

Також, можна згадати за електричні прилади, які перетворюють електричну енергію в теплову, по типу термопари, яка працює за законом Пельтьє, де електричний струм проходить через з'єднання двох різних матеріалів (наприклад, два різні метали), то на їхніх контактах (з'єднаннях) виникає виділення або поглинання тепла, що залежить від напрямку струму. Якщо струм йде в одну сторону, одне з'єднання охолоджується, а інше — нагрівається:

$$Q = \Pi * I * t; \quad (2.32)$$

2.2 Огляд структурно-математичних моделей елементів електричних мереж

2.2.1 Структурно-математична модель еквівалентної електроенергетичної системи. В електричних схемах для мереж або проектів об'єктів, де були еквівалентні елементи, які відображали той чи інший електричний компонентів, які мали різні параметри і функціональні елементи. Для сполучення цих елементів використовуються електричні лінії, які можуть бути представлені еквівалентною

схемою з'єднання компонентів індуктивності, ємності, опору, який може бути поданим, як резистор. Для забезпечення живлення, використовують батареї або еквівалентне представлення генераторної станції або просто генератора, які представлені на рисунку 2.7.

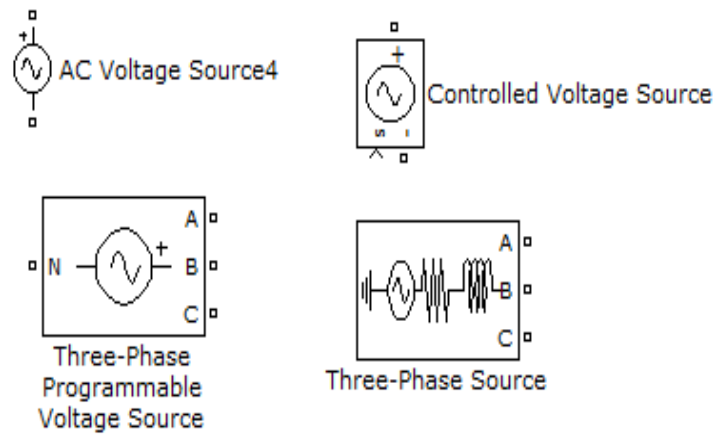


Рисунок 2.7 – Еквівалентне представлення елементів живлення

Або еквівалентне представлення трансформаторів, які можуть бути подані одним еквівалентним елементом або групою з'єднаних між собою елементів, що стосується автотрансформаторів або великих РТП. В даних еквівалентних схемах, зазвичай є декілька елементів трансформаторів, котушок, резисторів, як еквівалентне представлення опору лінії, ємнісних частин або вимикачів. Для перевірки роботи даних елементів є різні програмні середовища з можливістю симуляції і перевірки роботи даних схем і елементів – одним із таких середовищ є Matlab, де є можливість програмувати і збирати схеми за допомогою Matlab для прикладу ось схематичне зображення RLC- лінії на рисунку 2.8.

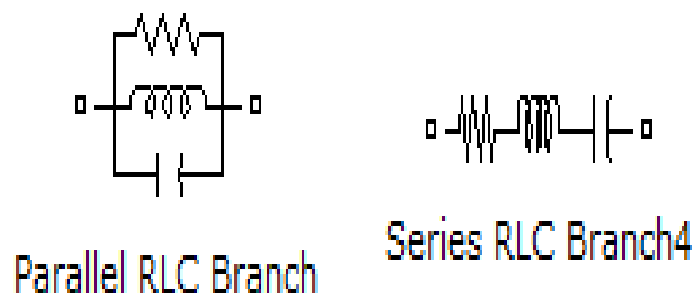


Рисунок 2.8 – Схематичне зображення RLC- лінії

Енергетичну систему, можна уявити у вигляді сотень компонентів, які з'єднані між собою і створюють еквівалентну схему заміщення електричної мережі, де її можна буде модулювати і будувати математичні рівняння для обрахунку затрат і визначення характеристик для електричних компонентів. Дані математичні-структурні моделі необхідні для заміни оригінала і вивчення його роботи і контролювати його роботу, також це безпека для прикладу в області досліджень. Математичні моделі представляють з себе формалізовані описи об'єкта або системи за допомогою якоїсь абстрактної мови, наприклад, у вигляді набору математичних співвідношень або алгоритмічної схеми.

2.2.2 Структурно-математична модель лінії електропередачі. Лінії електропередачі в електромережі для кращого обрахунку її електричних значень на кінці і початку вводять, електричні елементи, які відповідають її реальних представлень. Лінія зазвичай представляється елементами опорів, її еквівалентну схему ви можете знайти на рисунку 2.9, яких можна еквівалентно подавати у вигляді резистора, зазвичай береться лінія опір на 1 км, елемент котушки, який заміняє індуктивність кабелю, і також можна враховувати напругу на частині контуру, також можна згадати за конденсатори, які тут заміняють ємнісну частину кабелю.

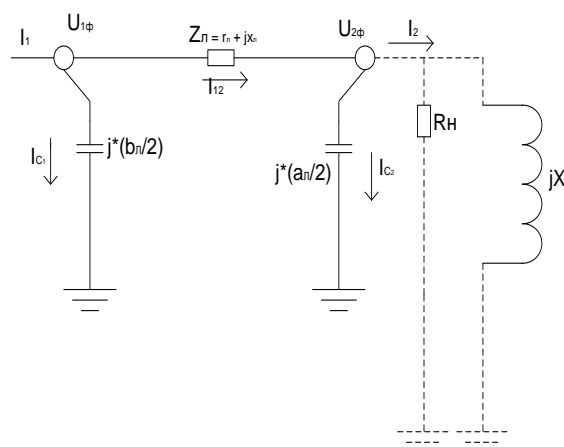


Рисунок 2.9 – Еквівалентна схема лінії електропередачі

Тепер ми розглянемо одну з моделей лінії електропередачі. В математичних моделях ліній є три види: це її π версія, де ми маємо стандартні характеристики для одної лінії і трьохфазна версія, де ми маємо розщеплення на

три фази, а також гібрид цих двох. Якщо взяти перший варіант, то тут враховувати, що повітряна лінія має певний опір на 1 км, також реактивні опори ємності і індуктивності.

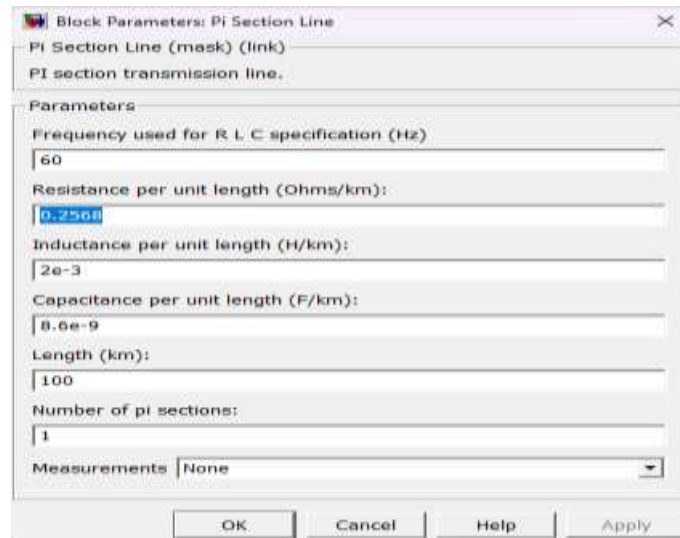


Рисунок 2.10 – Вікно параметрів π лінії

Дана лінія є стандартною лінією заміщення, яку можна налаштувати за допомогою параметрів на рисунку 2.10. А на рисунку 2.11 є її еквівалентне відображення в програмному середовищі.



Рисунок 2.11 – схематичне представлення лінії з одною фазою

Також схематичними представленням електричної лінії може бути розщеплення на трьохфазні частини як на рисунку 2.12, де ми будемо мати матричне розщеплення електричних параметрів і ввід на кожну фазу будуть свої електричні параметри, що можна буде змодельовати при підключенні через ці лінії до різних споживачів, підстанцій, трансформаторів і будувати між ними математичні формули для розрахунку електричних параметрів, також ці лінії можуть між собою з'єднуються і через них добре будувати фільтри або вимикачі. На рисунку 2.13 показана таблиця параметрів даної лінії.

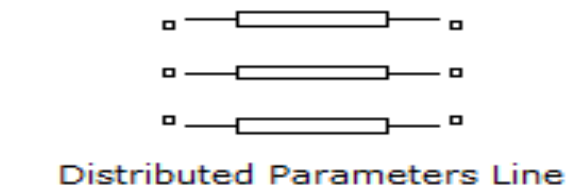


Рисунок 2.12 – Еквівалентна схема для трьохфазної лінії електропередачі

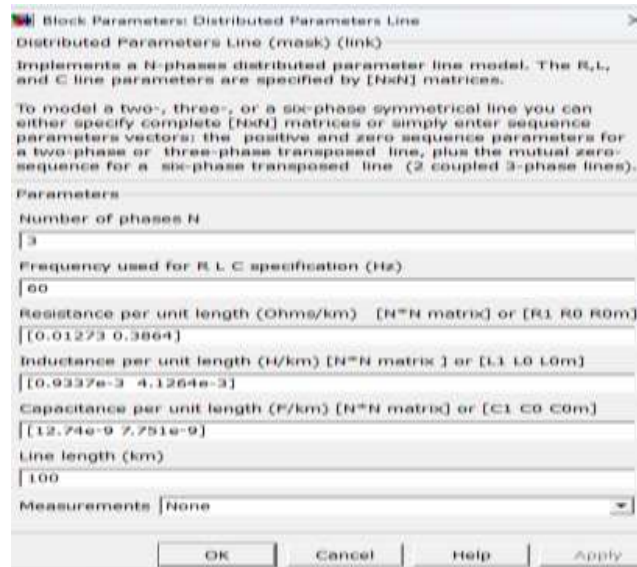


Рисунок 2.13 – Опція параметрів трьохфазної лінії електропередачі

Про можливі залучені математичні обрахунки було вже згадано в розділі (2.1).

Ще одна лінія, яку можна буде згадати – це трьохфазна π лінійна лінія, яка зображена на рисунку 2.14 параметри, якої задані на рисунку 2.15, є тільки активні і реактивні опори, так як дана лінія складається з одної внутрішньої фази, до якої надходить живлення з трьох контактів і виходить через три контакти.

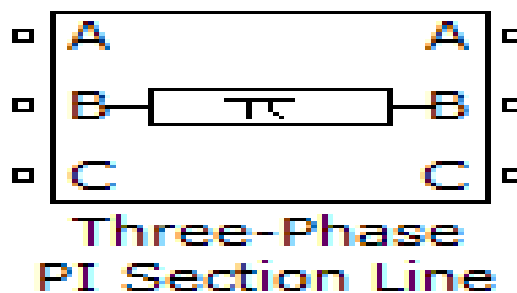


Рисунок 2.14 – Еквівалентна схема трьохфазної π розщепленої лінії

Рисунок 2.15 – Трьохфазної π розщепленої лінії

Як ми бачимо з рисунку 2.15 параметри трьохфазної π розщепленої лінії, необхідно задавати в матриці, яка буде мінятися від типу нашої лінії.

2.2.3 Структурно-математична модель трансформатора. Модель трансформатора найпростіше подавати в якості еквівалентної схеми, яка може також включати в себе деякі елементи для прикладу котушки або умовні резистори, (залежить від виду самого трансформатора). Якщо подивитися на характеристики трансформатора, то можна побачити, що в нього є такі параметри, як індуктивність L_m , і опір R_m , які є значення на первинній обмотці сердечника і для кожної обмотки ці параметри будуть свої, тому слід враховувати кількість обмоток, яких на трансформаторі може бути не мало. У моделі, де використовується трьох-обмотковий трансформаторний блок з первинним котушка підключена до джерела змінної напруги. Кожен з двох вторинних обмоток є своє навантаження, є і сумарна навантаження.

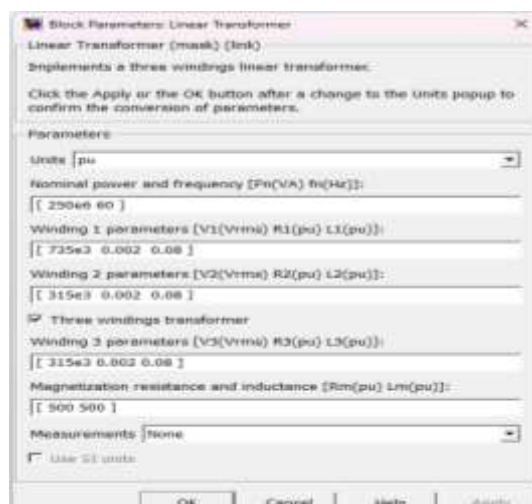


Рисунок 2.16 – Таблиця налаштувань для лінійного трансформатора

Для кожної обмотки можна налаштувати свою індуктивність і опір, також для подібних трансформаторів встановлюють RC-фільтри, також може бути різна кількість включень обмоток, як це показано на рисунку 2.17. Даний трансформатор, може бути розщепленим на більшу кількість котушок, його ще називають мульти-трансформатор.

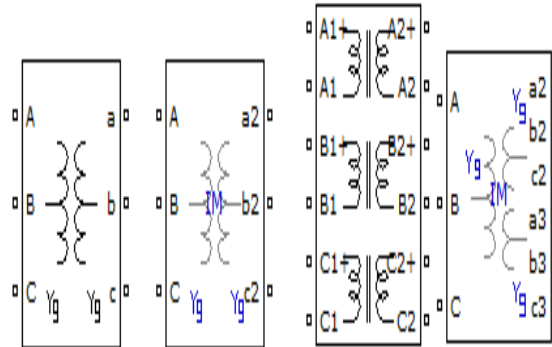


Рисунок 2.17 – Еквівалентні схеми трьохфазних трансформаторів

Також, ще є різновид трьохфазного трансформатора, де можна моделювати трифазний трансформатор, побудований з трьох однофазних блоків. Ми можемо проектувати дані трансформатори для прикладу для підстанцій, коли нам по трьохфазній лінії треба трансформувати напругу і проектувати його включення, підключення до інших мереж або резервного включення, де потім взявши математичні комплексні рівняння по типу для розрахунку потужностей магнітної і холостого ходу для даного типу трансформатора:[12]

$$\begin{aligned} \Delta P_{T\Sigma} &\approx \frac{1}{n_T} \Delta P_K \frac{S_2^2}{S_{T.HOM}^2} + n_T \Delta P_x \\ \Delta Q_{T\Sigma} &\approx \frac{1}{n_T} u_{*k} \frac{S_2^2}{S_{T.HOM}^2} + n_T l_{*x} S_{T.HOM} \end{aligned} \quad (2.33)$$

2.2.4 Структурно математична модель компенсаційної батареї. В програмному середовищі для еквівалентного заміщення компенсуючого живлення для реактивних елементів, використовують додаткові джерела живлення. Це можуть бути великі конденсатори, які будуть під'єднані до генераторів потужності, тому ми розглянемо можливі варіанти під'єднання.[6]

Для прикладу, можна навести компенсатор у вигляді LC-фільтра. Такий тип компенсації доволі простий, так як складається індуктивного реактора і конденсаторної батареї, параметри, які підбиралися згідно потреби в компенсації, яку можна визначити

за формулами (1.34) і (1.31), так як реактивний опір, буде впливати на струм в мережі, а це в свою чергу приведе до перепаду потужності, тому необхідно визначити довжину лінії, визначити її реактивні параметри і виходячи з цього розрахувати реактивні параметри для LC лінії.

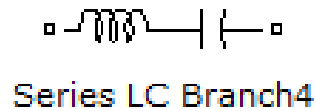


Рисунок 2.18 – Схематичне представлення LC-фільтра

Як ми бачимо на рисунку 2.18 – це дуже проста схема заміщення, яку можна використовувати в великій кількості, єдину, що вона не має керуючого контролю за навантаженням із можливим виходом з ладу при дуже високих скачках струму. Якщо буде потреба в більш складних і більш функціональних схемах компенсації або просто на більш потужні навантаження, можна використати ось такі варіанти: конденсаторні батареї; синхронні компенсатори; статистичні тиристорні компенсатори є найбільш функціональними; активні фільтри; гібридні компенсатори. Для лобих цих схем, при побудові необхідно задавати параметри для модуляції в програмному середовищі, де на рисунку 2.19 показана таблиця параметрів, які треба заповнити, виходячи з розрахунків.

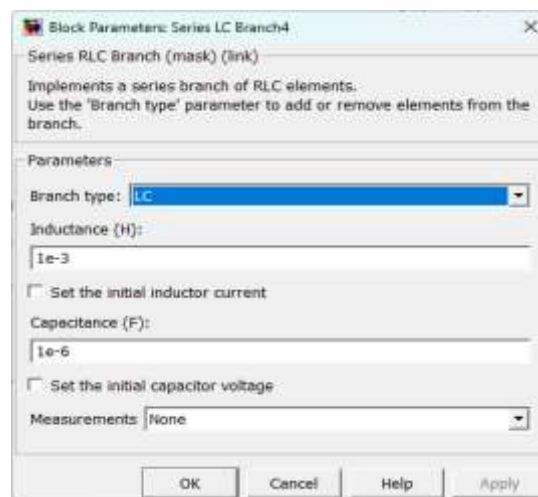


Рисунок 2.19 – Таблиця даних LC-фільтра

Також, необхідно не забувати, що для регулювання реактивної потужності, дана схема заміщення не завжди може підійти, так як при складності установки, необхідно використовувати більш розподільчу систему для прикладу тих, які були перелічені раніше.[7]

3 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ У ФРАГМЕНТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

3.1 Розробка структурно-математичної моделі досліджуваної мережі

3.1.1 Принципова схема фрагмента мережі. Зверху я навів принципіальну схему, де є три еквівалентні системи, які складаються з джерела лінії, яку еквівалентно можна подати LR-частину і джерела живлення, (ємнісну частину ми не будемо враховувати через її мале значення), в дану схему ми включили автотрансформатор для перетворення з 220 в 110 кВ на 3 систему, а на вході ми встановили вимикачі для регулювання вхідної напруги. Дана схема може відображати трьох споживачів або двох споживачів і підстанцію, які споживають і об'єднуються між собою і на цій схемі, будемо визначати електричні параметри, які ми будемо відображати на осцилографі, де буде зміна амплітудного значення за часом, за цим графіком при зміні частоти джерела в нас буде мінятися і амплітуда цих значень, яка буде не рівномірною по часі і при досягненні резонансної частоти відбувається сильне спотворення, тому дану схему будемо доповнювати компенсаційними фільтрами.

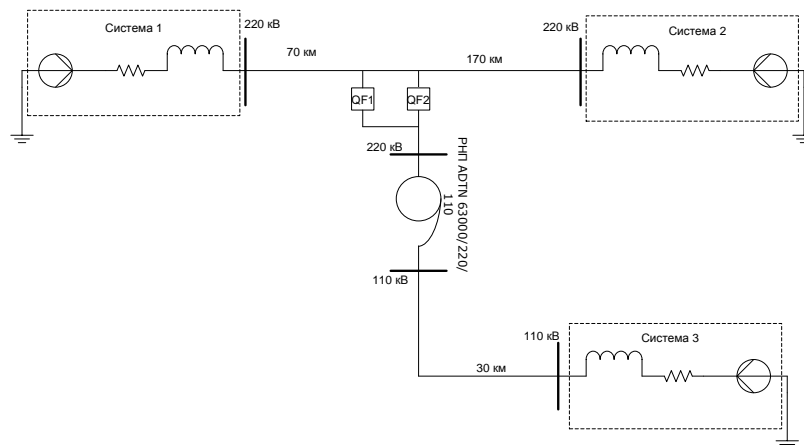


Рисунок 3.1 – Принципова схема досліджуваного фрагмента мережі

Далі необхідно здійснити моделювання вище наведеного фрагмента електричної мережі на рисунку 3.1.

3.1.2 Структурно-математична модель досліджуваної мережі. Тепер для дослідження самого резонансу, візьмемо принципіальну електричну схему,

де ми замінимо споживачів на еквівалентні системи з трьох елементів: EPC , R , L , саму лінію ми еквівалентно представимо у вигляді Ri лінії і використаємо лінійний трансформатор. Тепер складемо з даних елементів принципіальну схему з трьох еквівалентних систем, які складаються з індуктивного, резистивного і джерела живлення, які складаються в послідовному з'єднанні, ці елементи еквівалентно відображують втрати на пасивні і активні опори, а також джерела живлення, яке показує проходження вхідної і вихідної напруги, де вхідний або в деяких випадках буде поданий у вигляді заземлення. Лінії будуть еквівалентно представлені у вигляді π лінії, яка еквівалентно відображає характеристики лінії, будемо враховувати, що перші дві системи є з'єднані лінією на 220 кВ, а третя система через трансформатор буде заживлюватися на 110 кВ від трансформатора і окремо на цю систему буде йти своє навантаження. Схема, з включеними в неї вимірювальними приладами представлено на рисунку 3.2.

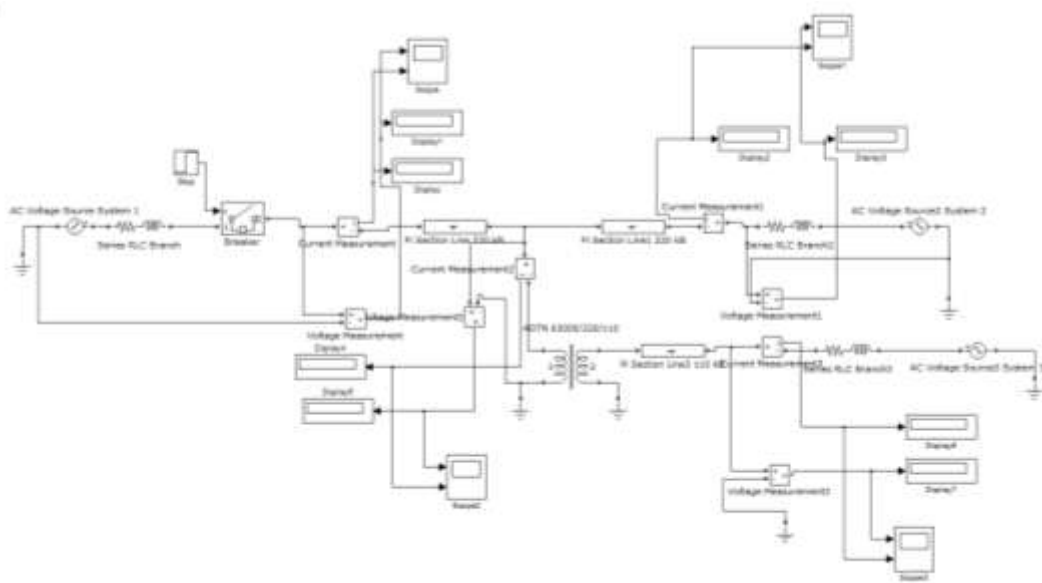


Рисунок 3.2 – Модель в програмному середовищі Matlab

Тепер, для здійснення досліджень необхідно здійснити обчислення параметрів схем заміщення.

3.1.3 Розрахунок та введення параметрів мережі. Омичний ємнісний опір для конденсаторної батареї обчислюємо за формулою:

$$X_c = \frac{1}{\omega C}; \quad (3.1)$$

Звідки:

$$C = \frac{X_c}{\omega} \quad (3.2)$$

Для індуктивності, можна вивести таку формулу:

$$X_L = L * \omega; \quad (3.3)$$

Звідки:

$$L = \frac{X_L}{\omega} \quad (3.4)$$

Для прикладу для лінії ЛЕП 220 кВ розрахувати так:

$$C_{0(220)} = \frac{377}{2 * 3.14 * 50}; \quad L_{0(220)} = \frac{427}{2 * 3.14 * 50};$$

Для розрахунку активного опору ми брали його дані з довідника, виходячи з даного типу кабелю:

$$R_0 = 0,12 \left(\frac{\text{Ом}}{\text{км}} \right)$$

Параметри для цієї лінії будуть наведені на рисунку 3.3.

Для лінії ЛЕП 110 кВ розрахувати так:

$$L_{0(110)} = 0.00136 \text{ Гн / км}$$

$$C_{0(110)} = 8.43 * 10^{-9} \text{ Ф / км}$$

$$R_{0(110)} = 3.314 \text{ Ом / км}$$

Параметри для цієї лінії будуть наведені на рисунку 3.4.

Далі на треба визначити дійсне значення напруги для джерела живлення і далі їх введемо в нашу модель:[11]

$$U_\alpha = \frac{221}{\sqrt{3}} * \sqrt{2} * \sin(\omega t + 0^\circ) = 180.5 * \sin(\omega t + 0^\circ) \text{ кВ};$$

$$R_{c1} = 2.033 \text{ Ом};$$

$$L_{c1} = 0.162 \text{ Гн};$$

Для системи 2:

$$U_{\alpha 2} = 153.5 * \sin(\omega t + 8^\circ) \text{ кВ};$$

$$R_{c2} = 2.44 \text{ Ом};$$

$$L_{c2} = 0.139 \text{ Гн};$$

Для системи 3:

$$U_{\alpha 3} = 90 * \sin(\omega t + 7.5^\circ) \text{ кВ};$$

$$R_{C3} = 1.8 \text{ Ом};$$

$$L_{C3} = 0.101 \text{ Гн};$$

Для трансформатора, необхідно знайти активний і пасивний опір двох обмоток, а також необхідно знайти магнітну складову активного і пасивного опору. Ці параметри необхідно знайти виходячи з магнітної потужності і магнітних затрат на перетворення, ці параметри беруть з довідника:

$$\Delta Q_x = 315 \text{ кВАр.}$$

$$\Delta P_x = 45 \text{ кВт.}$$

Далі ми знаходимо B_{TP} :

$$B_{TP} = \frac{\Delta Q_x}{U_{НОМ}^2 * 10^3}; \quad (3.5)$$

$$B_{TP} = \frac{315000}{220^2 * 10^3}; \quad (3.6)$$

Далі ми знаходимо опір індуктивності:

$$x_t = \frac{1}{B_{TP}} \quad (3.7)$$

$$x_t = \frac{1}{0.0065} \quad (3.8)$$

Тепер ми зможемо знайти магнітну індуктивність:

$$L_M = \frac{x_t}{\omega} \quad (3.9)$$

$$L_M = \frac{153.65}{2 * 3.14 * 50} \quad (3.10)$$

Тепер знайдемо звідси магнітний опір R_m :

$$G_T = \frac{\Delta P_x}{U_{НОМ}^2 * 10^3} \quad (3.11)$$

$$G_T = \frac{45000}{220^2 * 10^3} \quad (3.12)$$

Так ми змогли знайти провідність, звідки ми зможемо знайти опір:

$$R_M = \frac{1}{G_{TP}} \quad (3.13)$$

$$R_M = \frac{1}{0.00093} \quad (3.14)$$

Для індуктивного опору і активного для обмоток, дані були взяті з довідника:

$$\begin{aligned} R_{l1} &= 1.43 \text{ Ом}; & R_{l2} &= 2.9 \text{ Ом}; \\ L_{l1} &= 0.32 \text{ Гн}; & L_{l2} &= 0.613 \text{ Гн}; \\ R_M &= 1.08 \cdot 10^6 \text{ Ом}; & L_M &= 488.55 \text{ Гн}; \end{aligned}$$

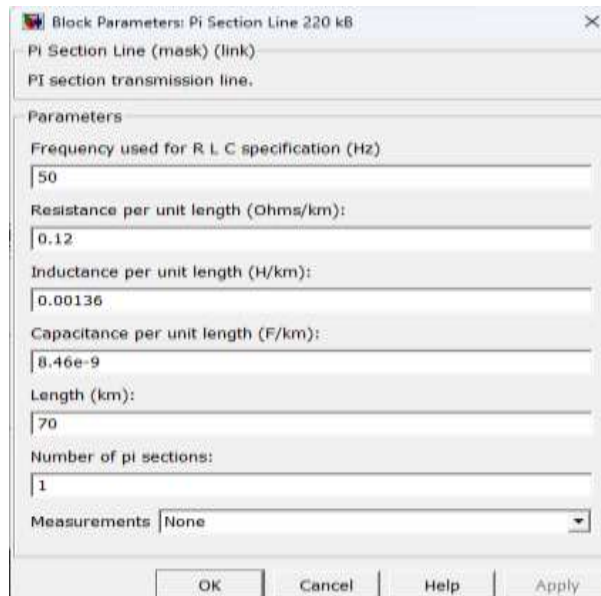


Рисунок 3.3 – Параметри для лінії 220 кВ

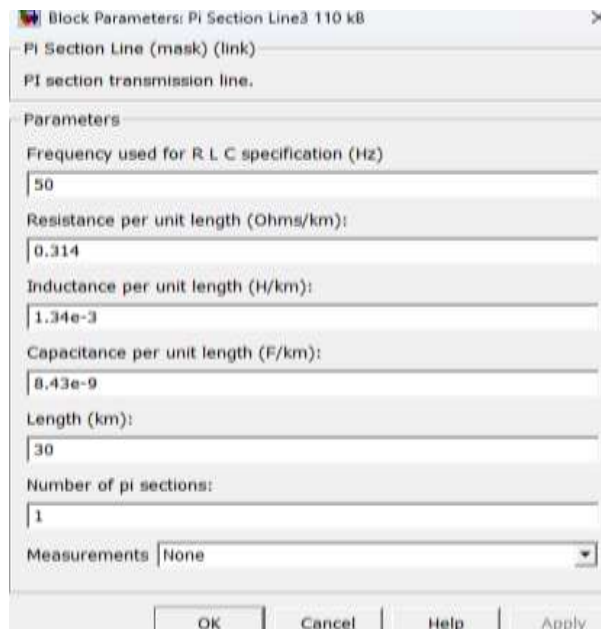


Рисунок 3.4 – Параметри для лінії 110 кВ

Також були знайдені і встановленні характеристики для трансформатора АДТН-63000/220/110, вони показані на рисунку 3.5.

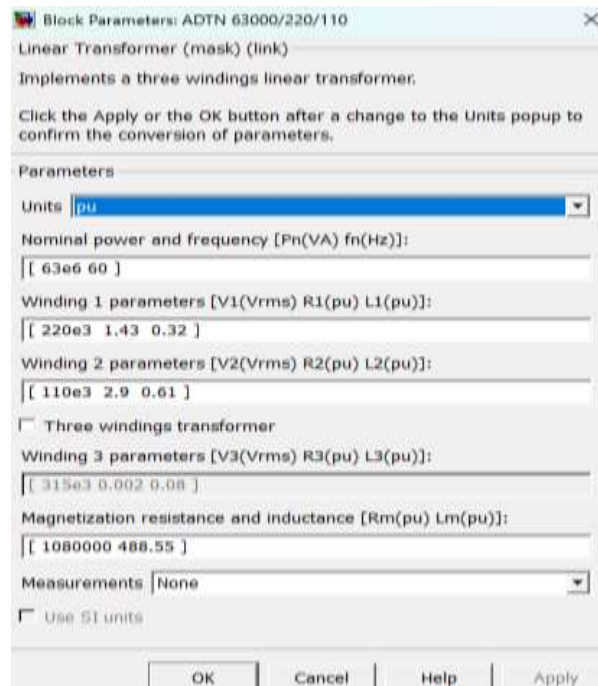


Рисунок 3.5 – Параметри для трансформатора АДТН-63000/220/110

Для виводу інформації про роботу нашої мережі, ми використовуємо дисплеї (displays1...4), які підключені до амперметрів і вольтметрів (current or voltage measurements1...4), які були включені в нашу еквівалентну математичну модель енергетичної мережі. На виходи в системи, були підключені осцилографи (Scopes1...4), які будуть показувати амплітуду, напруг і струму. Параметри для даних елементів, були знайдені за загальними формулами, враховуючи протяжність лінії і тип системи, також врахування типу трансформатора, дані параметри були обраховані за врахування пасивних і активних опорів, формулу розрахунку, яких буде наведено в наступному пункті, або були взяті з довідників для даного типу елемента. При запуску даної моделі була використана роз'єднувач, який був під'єднаний до крокового часового контролера, яким можна регулювати запуск системи і краще аналізувати ВЧ резонанс.

3.2 Аналіз процесів у досліджуваній мережі

На рисунку 3.6 представлено перехідні процеси напруг та струмів на початку лінії (біля системи 1).

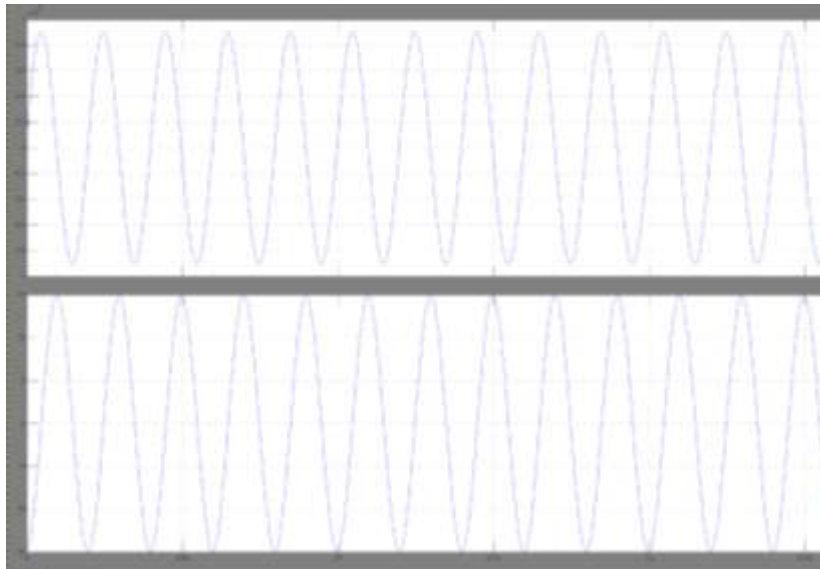


Рисунок 3.6 – Напруга та струм на початку лінії 220 кВ

Як бачимо на рисунку 3.6 амплітуди струму і напруги збігаються по фазі. Тепер подивимося на зміну амплітуди мережі на різних системах, коли в нас збільшиться частота до 65 Гц на Рисунку 3.7 наведена перша система з більшою частотою.

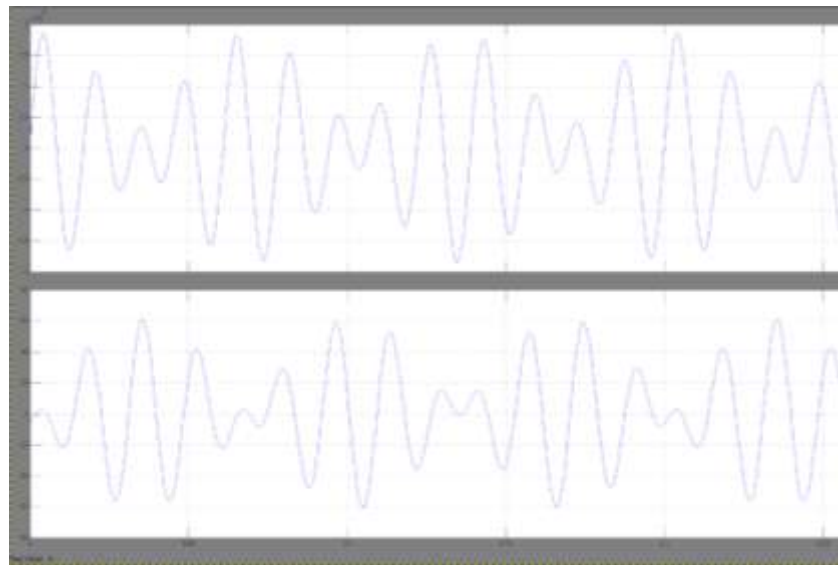


Рисунок 3.7 – Амплітудні значення на початку лінії 220 кВ

Як ми бачимо на Рисунку 3.7, ми маємо нерівні електричні гармоніки, а струм і напруга не збігаються по фазі, якщо подивитися на Рисунок 3.8, то тут ми маємо не змінну амплітуду напруги але будуть спади по струмі, причиною цього може бути трансформатор, який трансформує вхідний струм в рівну амплітуду на виході, яка вирівнюється через вихідні ізолятори.

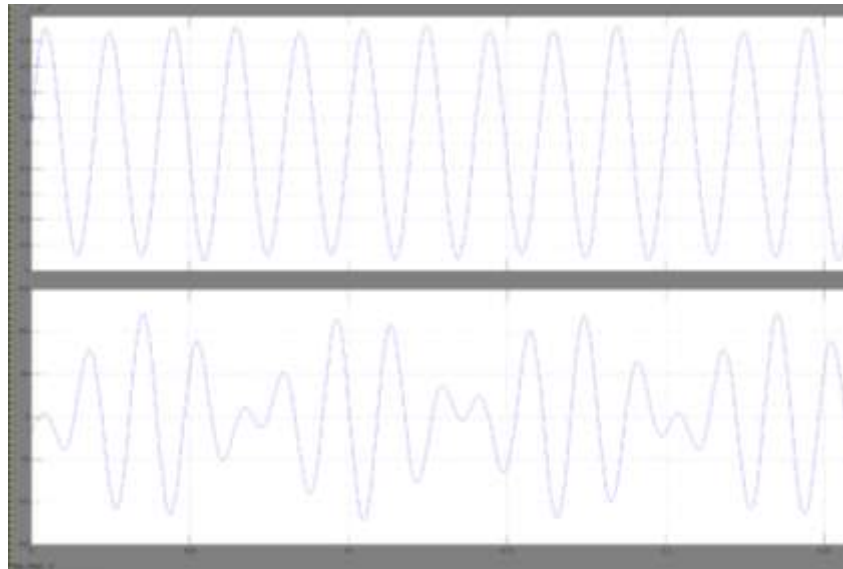


Рисунок 3.8 – Система 3 на кінці лінії 110 кВ

Якщо ми збільшимо частоту на системі 3, то на системі 1 і системі 2 не будуть перепади струму і напруги, що видно з Рисунку 3.9., так як трансформатор з первинної в основну обмотку не пропускає напругу, що не зменшує значення струму.

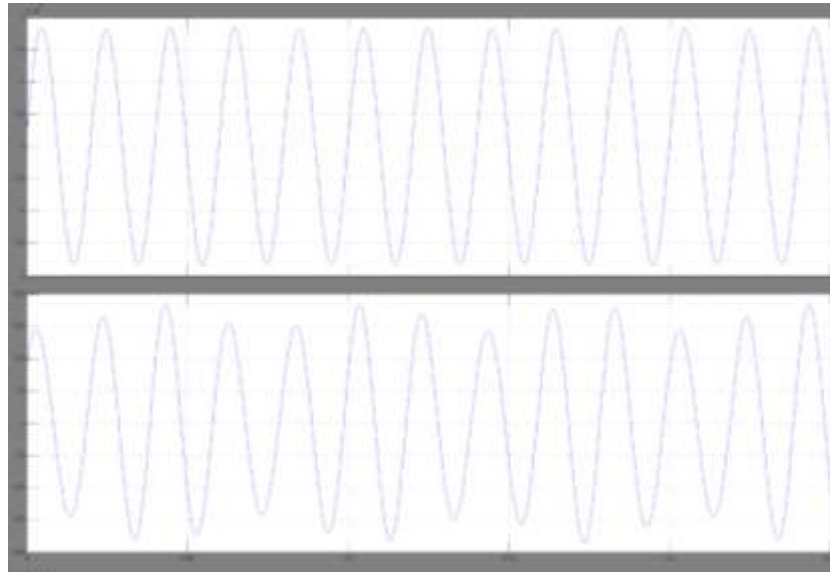


Рисунок 3.9 – Початок і кінець лінії 220 кВ

Так, як трансформатор на зворотній лінії буде пропускати такий самий струм, як і на вході. А на системі 3 будуть падіння струму по амплітуді, які відображені на рисунку 3.10., Отже, ми можемо зробити висновки з цього рисунку 3.10, що в нас ідуть перепади струму але не має перепадів в напрузі через трансформації на виході трансформатора.

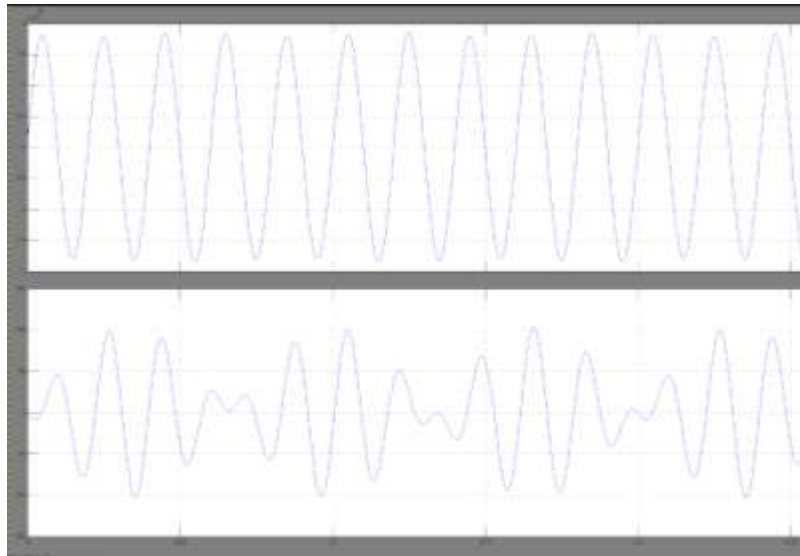


Рисунок 3.10 – На вхід трансформатора і на вхід 3 системи

При зменшенні частоти картина буде аналогічна, тепер розглянемо варіант, коли в нашу модель буде включено система з високою частотою, яка буде утворювати ВЧ в нашій мережі, то в нас будуть сильні викривлення частоти в мережі, тоді ми маємо наглядати ВЧ резонанс в мережі.

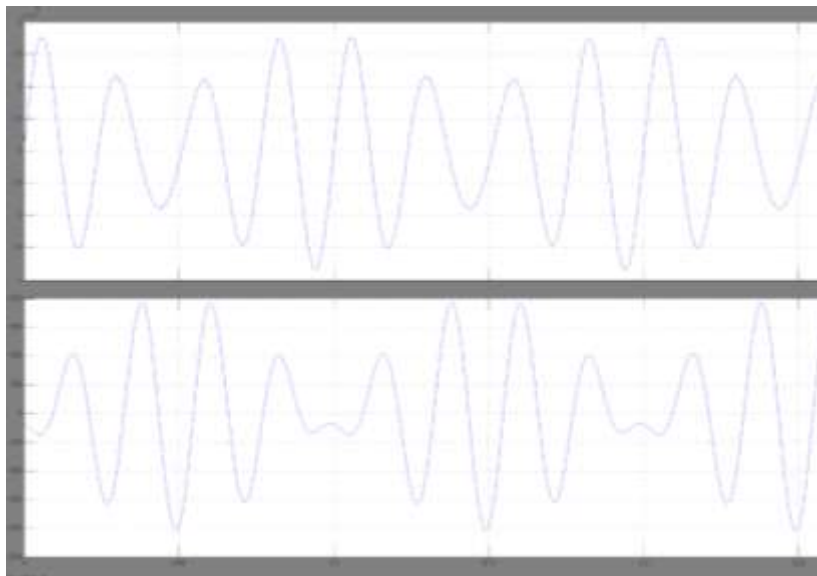


Рисунок 3.11 – На початку лінії 220 кВ перша система

Для системи 1, як ми бачимо з Рисунку 3.11, обійшлося без змін, так як вона як частину навантаження йде на систему 2, а решта трансформується через трансформатор. Також тут можна визначити, що перепади струму збігаються з підвищенням гармонік напруги, так як тут відбувається перетворення струмк в напругу, так як для регульованого поля по всій довжині провідника, а струм буде зменшуватися через ріст магнітного поля, яка збільшується через резонанс.

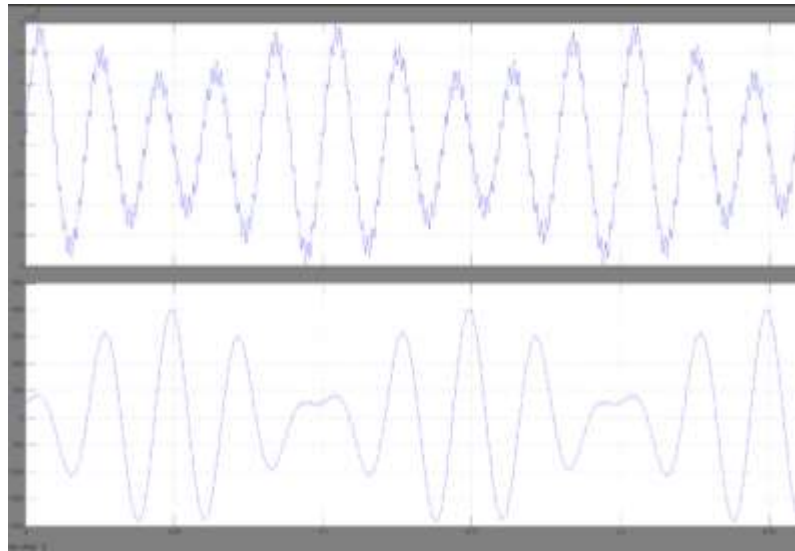


Рисунок 3.12 – На кінці лінії 220 кВ друга система

На Рисунку 3.12, ми бачимо значні шуми по напрузі і часткові по струму, це показує, що чим далі знаходиться наша система від трансформатора на який надходить висока частота, тим менші викривлення електричних параметрів системи. На вхід трансформатора, як ми бачимо з Рисунку 3.13 можна фіксувати сильні викривлення по струмі, а напруга майже не змінна, так як трансформація з 220 кВ в 110 кВ відбувається за рахунок вхідного і вихідного струму.

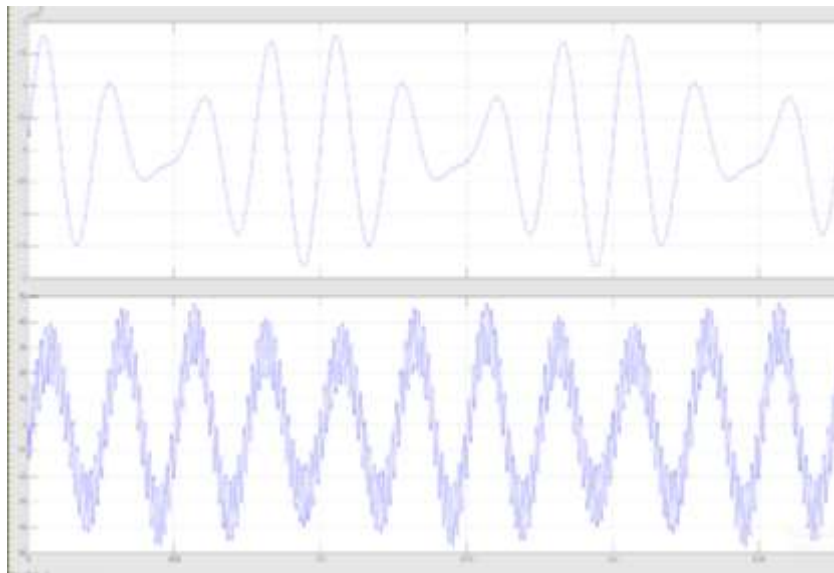


Рисунок 3.13 – На вхід трансформатора з лінії 220 кВ

На Рисунку 3.13 показані дуже великі шуми, які можуть бути спричинені, як вже говорилося раніше, ростом магнітного поля і його не однорідності через велику частоту, що добре видно по струмі.

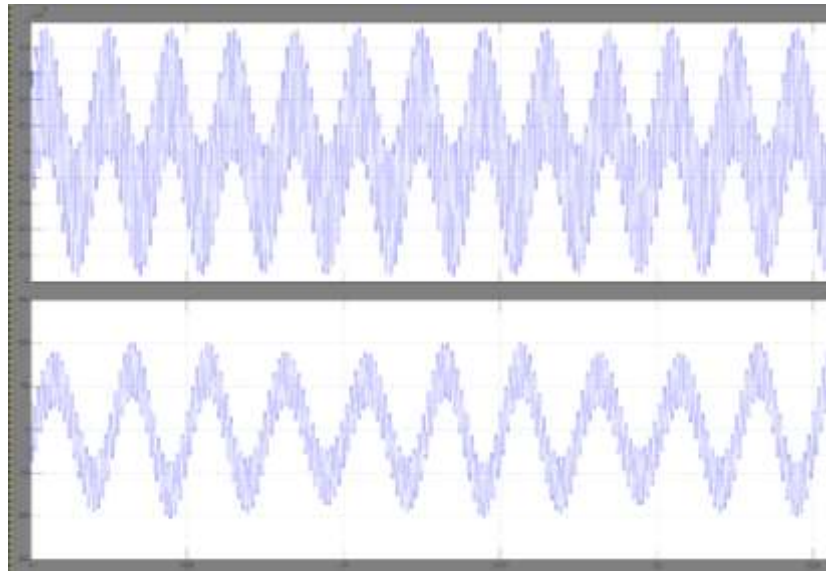


Рисунок 3.14 – На кінці лінії 110 кВ третя система

При цьому на системі 3 з Рисунку 3.14, ми будемо мати сильні гармоніки, які будуть погіршувати роботу нашої системи і мережі для їх усунення, буде необхідно використати компенсаційні елементи, які зможуть покращити роботу і запобігти шкоди від даного ефекту.

3.3 Розробка заходів

Тепер візьмемо, які методи можна використати для фільтру і регулювання електричних параметрів систем. Перше, це струмообмежувальні реактори, які треба використати для компенсації реактивної потужності, в першу чергу це стосується індуктивності і її компенсація. Для розрахунку параметрів такого елемента, треба знати, які він має характеристики: номінальна потужність (Q_R , МВар), номінальна напруга (U_R , кВ), індуктивність (L , Гн), струм реактора (I_R , А).[8]

Тут можна визначити індуктивність даного елемента:

$$L = \frac{U_R^2}{2 * \pi * f * Q_R}; \quad (3.15)$$

Номінальна потужність буде $U_R = 110$ кВ, а для такої лінії, ми введемо, що $Q_R = 10$ МВар., тоді можна розрахувати для такого реактора:

$$L = \frac{110^2}{2 * 3.14 * 50 * 10^6} = 0.000039 \text{ Гн}; \quad (3.16)$$

Також ми можемо визначити формулу для знаходження ємності даного фільтра, де:

$$C = \frac{Q_C}{2\pi f U_R^2}; \quad (3.17)$$

Враховуємо, що:

$$C = \frac{10^6}{2 * 3.14 * 50 * 110^2} = 0.263; \quad (3.18)$$

При виборі шунтуючого реактору, необхідно враховувати: сумісність з напругою мережі, відповідно компенсація; мінімальні втрати енергії;

Для кращої компенсації реактивної потужності по ємності, найкраще всього взяти компенсаційні батареї, де можна вибрати: конденсаторні батареї, які добре регулюють втрати енергії в мережах і на великих підприємствах; синхронні компенсатори, якими можна регулювати режими мережі; статичні VAR-компенсатори, яким можна регулювати активну потужність і добре забезпечують стабільність системи або STATCOM. Тут ми виберемо SVC (Static VAR Compensators).[9]

Для нашої схеми ми вибрали тиристорний-роз'єднувальний конденсатор, потужність, якого $Q_{SVC} = \pm 100$ МВар, тоді можна буде знайти ємнісний опір даної батареї:

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C}; \quad (3.19)$$

$$X_C = \frac{(110 * 10^3)^2}{100 * 10^6} = 121 \text{ Ом}; \quad (3.20)$$

Для загальної формули на знаходження опору для конденсатора, можна визначити ємність:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C}; \quad (3.21)$$

$$C = \frac{1}{6.28 * 50 * 121} = 0.0000263 \text{ Ф}; \quad (3.22)$$

Тепер можна розрахувати, індуктивну частину тут опір буде таким самим, як і в ємнісній частині ($X_L = X_C = 121$ Ом), а індуктивність можна знайти так:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}; \quad (3.23)$$

$$L = \frac{121}{6.28 * 50} = 0.385 \text{ Гн}; \quad (3.24)$$

Отримавши, дані результати, ми можемо їх ввести в наші компенсуючі елементи і встановити на нашу модель і отримати нормальні вихідні значення напруги і струму.[10]

3.4 Результати симуляцій з фільтром

Після встановлення компенсуючі елементів на нашій моделі, де на виході систем і на вході трансформатора я отримав ось такі графіки:

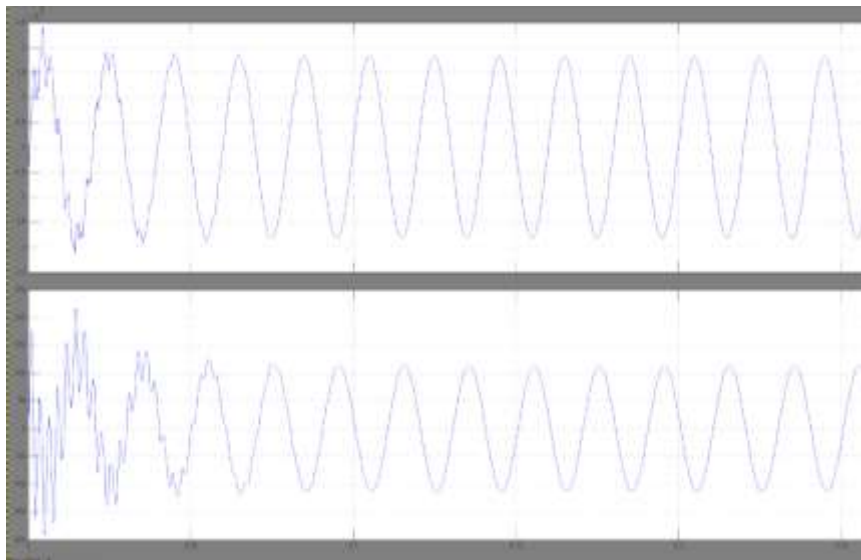


Рисунок 3.15 – На лінії 70 км 220 кВ система 1

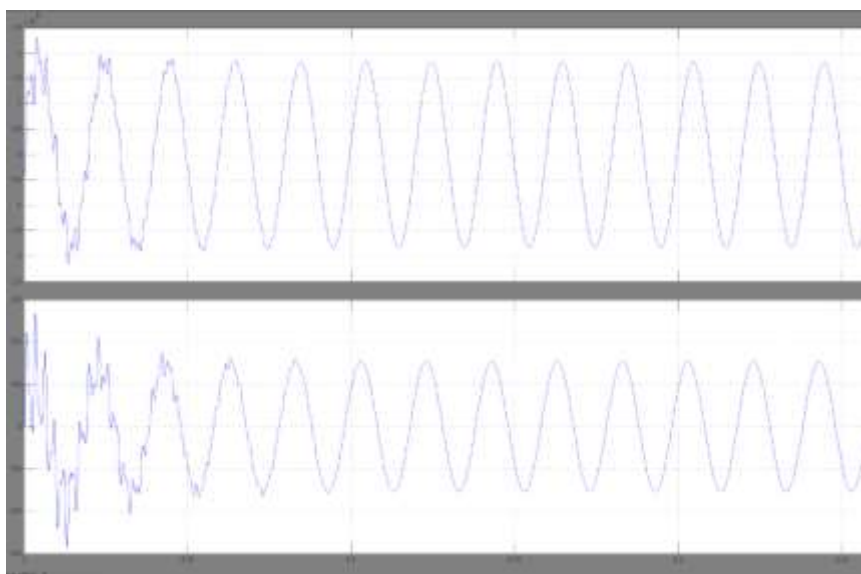


Рисунок 3.16 – Напруга та струм на лінії 170 км 220 кВ (система 2)

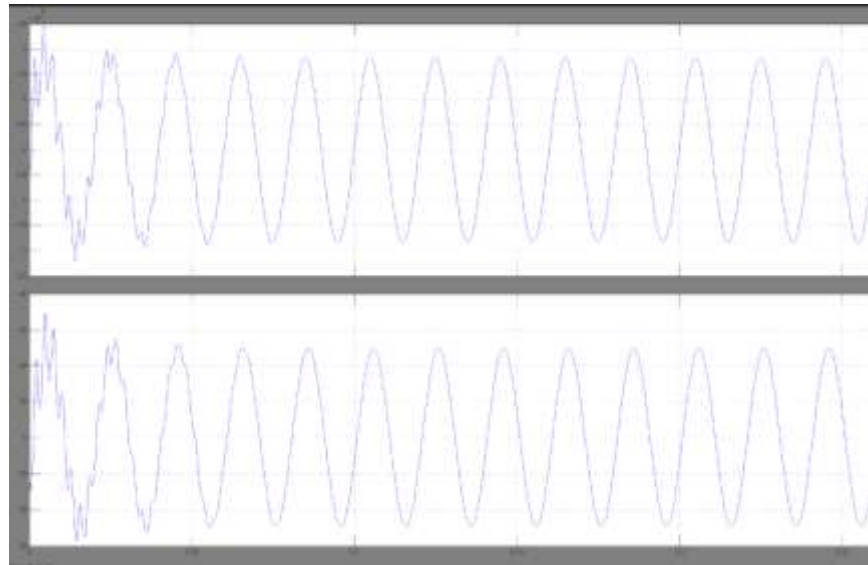


Рисунок 3.17 – На вхід трансформатора з лінії 220 кВ;

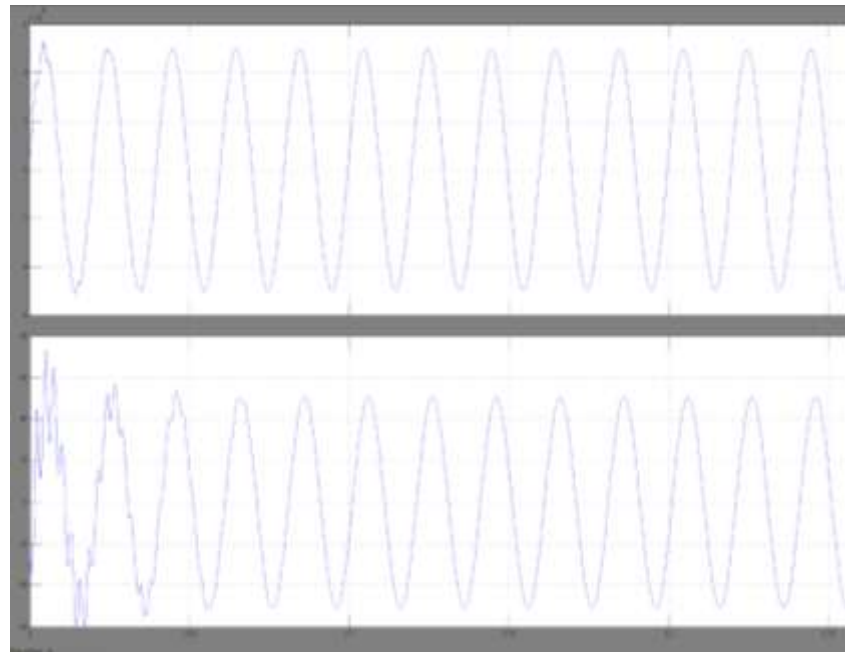


Рисунок 3.18 – Напряга та струм на лінії 30 км 110 кВ (система 3)

З Рисунок 3.15 по Рисунок 3.18 ми бачимо, що струму і напруга почали збігатися по фазі, що говорить про хорошу роботу мережі і друге, те що в нас більше не має сильних скачків електричних параметрів, а також відсутність шумів, що говорить про те, що ми змогли компенсувати реактивну потужність і нормалізувати роботу систем. Шуми на початку схеми – це затримка включення нашої моделі.[15]

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз виробничих небезпек у електроенергетиці

Аналіз стану охорони праці у електроенергетичному підрозділі підприємства виконують з метою виявлення причин і факторів незадовільного стану безпеки виробництва, які найбільше впливають на результати діяльності підприємства й на визначення заходів щодо поліпшення умов та охорони праці. Оцінка рівня стану охорони праці в підрозділах здійснюється відділом охорони праці та спеціалізованими комісіями за результатами періодичного контролю за відповідний період на підставі статистики травматизму, аналізу усунення порушень, виявлених під час попереднього контролю, зазначених у приписах інженерів охорони праці, органів нагляду та ін. Система показників потрібна для того, щоб:[11]

- планувати і прогнозувати стан охорони праці на перспективу у вигляді цільових завдань;
 - об'єктивно оцінювати фактичний стан охорони праці й ефективність функціонування системи управління, а також ступінь вирішення цільових завдань (досягнення мети);
 - порівнювати в оцінюваному періоді діяльність підприємств у галузі охорони праці, які мають різний характер виробництва;
 - використовувати показники як вихідну інформацію для економічного регулювання;
 - вибирати пріоритетні напрями діяльності (оптимальні варіанти), які забезпечували б ефективне функціонування системи за обмежених ресурсів. 43
- Практика свідчить, що для оцінки стану охорони праці можуть застосовуватися як оцінні, так і аналітичні показники. Серед найбільш поширених оцінних показників стану охорони праці слід виділити традиційні коефіцієнти частоти

(Кч.т) та тяжкості травматизму (Кт.т). Крім них, для оцінки стану можуть бути використані й такі оцінні показники:

- чисельність потерпілих у результаті нещасних випадків із втратою працездатності більш ніж на один робочий день (абсолютне число за даними статистики);

- загальна кількість днів втрати працездатності по всіх нещасних випадках з урахуванням перехідних;

- коефіцієнт частоти смертельного травматизму (Кч.с);

- відносні коефіцієнти частоти (Кч.т.в) та тяжкості (Кт.т.в), що обчислюються як відношення Кч.т та Кт.т до базових завдань Кч.т.б і Кт.т.б, тобто $K_{ч.т.в} = K_{ч.т} / K_{ч.т.б}$ (4.1) $K_{т.т.в} = K_{т.т} / K_{т.т.б}$ (4.2) Серед усіх оцінних показників відносні коефіцієнти частоти та тяжкості травматизму найбільше відповідають цільовій стратегії управління, оскільки базові значення показників можуть періодично коригуватися в міру наближення до них чи за їх перевищенням. Тоді робота підприємства (підрозділу) оцінюватиметься як задовільна. Виділяють також аналітичні показники. До них можна віднести:

- загальний показник травматизму;

- чисельність потерпілих у результаті нещасних випадків із втратою працездатності менш ніж на один робочий день (за даними статистики);

- загальні фактичні витрати на відшкодування шкоди потерпілим (за бухгалтерськими даними) або сума страхових внесків з урахуванням прийняття Закону України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від 44 нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності»;

Аналіз може провадитися і за іншими, більш специфічними параметрами та напрямками, характерними для конкретних виробництв, наприклад за кількістю нещасних випадків на облікову одиницю виробленої продукції у натуральному чи грошовому виразі, на 10 млн відпрацьованих годин тощо. Аналогічний підхід може бути й до статистики професійно зумовлених захворювань.[12]

4.2 Характеристика процесів формування травмонебезпечних ситуацій

За умов функціонування систем “людина-машина” з різних причин виникають небезпечні ситуації. Тому великого значення набуває вміння оцінити характер їх можливих наслідків з точки зору розробки ефективних заходів щодо запобігання аварійності та травматизму.

Здійснюючи небезпечні дії, оператор може перебувати в обставинах: мети, часу, місця, причин та способу дії. Випадковий збіг(поєднання) в певний момент часу та небезпечних обставин (НО) створює реальну можливість виникнення нової випадкової події – небезпечної ситуації. За небезпечною ситуацією з певним ступенем ймовірності виникають наслідки – сприятливий наслідок (СН), аварія (А) або травма (Т).

Дії декількох небезпечних чинників на певному робочому місці (ПРМ):

$$\underbrace{\Sigma_{\text{НД}} \rightarrow \Sigma_{\text{НО}} \rightarrow \text{СН} \text{ НС}_T^A}_{\text{Обставини}} \leftarrow \underbrace{\left[\frac{\Sigma_{\text{НВФ}}}{\Sigma_{\text{НУ}}} \right]}_{\text{Умови}}$$

Процес формування та виникнення небезпечної ситуації може починатися з моменту появи на робочому місці однієї або декількох небезпечних умов або дій НУ або НД при появі НВФ. Навіть якщо при появі НВФ з’явилася одна НУ або НД, то можна вважати, що вже з’явилася реальна небезпека, хоча її ймовірність може бути незначною.[16]

Небезпечна ситуація виникає в потоці випадкових статистично залежних або незалежних випадкових подій, причому таким чином, що на початку цього потоку перебуває НУ або НД, або їх поєднання. В цьому випадку можна точно визначити ту початкову подію, з котрої розпочинається потік наступних випадкових подій і закінчується небажаними наслідками. Припинення такого потоку можливе шляхом усунення початкової події, котра і є причиною виникнення всіх подальших подій. Аналіз взаємозв’язків випадкових подій, котрі формують небезпечну ситуацію, дає можливість визначити пріоритет такої випадкової події.

Основні з них можна подати таким чином:

1. НУ – НС – СН, А, Т.
2. НД – НС – СН, А, Т.
3. НУ – НД – НС – СН, А, Т.
4. НД – НУ – НС – СН, А, Т.
5. НУ₁ – НУ₂ – ... НУ_n – НС – СН, А, Т.
6. НД₁ – НД₂ – ... НД_n – НС – СН, А, Т.

Якщо потоки випадкових подій формуються одночасно з формуванням випадкових статистично залежних подій, то вони матимуть розгалужену форму.

У процесі проведення контролю, технічної експертизи детально описують небезпечні умови, можливі небезпечні дії в поєднанні з кожною НУ та конкретні ситуації з можливими наслідками.

Небезпечна ситуація виникає внаслідок декількох залежних випадкових подій (НУ, НУ₂...НД, НД₂) з відомими ймовірностями $P(НУ_1)$, $P(НУ_2)$... $P(НД_1)$, $P(НД_2)$. Ймовірність виникнення небезпечної ситуації можна розрахувати за формулою множення ймовірностей цих подій:

$$P(НС) = P(НУ_1) \cdot P(НУ_2) \cdot P(НД_1) \cdot P(НД_2).$$

Якщо НС створюють дві статистично незалежні події (наприклад, НУ і НД) з ймовірностями $P(НУ)$ та $P(НД)$, то ймовірність НС можна розрахувати за формулою:

$$\begin{aligned} P(НС) &= P[P(НУ_1) + P(НУ_2) + P(НД)] = \\ &= P(НУ_1) + P(НУ_2) + P(НД) - P(НУ_1) \cdot P(НУ_2) - P(НУ_1) \cdot P(НД) - \\ &- P(НУ_2) \cdot P(НД) + P(НУ_1) \cdot P(НУ_2) \cdot P(НД) \end{aligned}$$

У випадку, коли небезпечна ситуація формується з випадкових подій, кількість котрих перевищує 3, то її ймовірність легше розрахувати, розбивши попередньо вхідні події на групи по 2 або по 3 події.

Таким чином, вивчення умов, процесів формування НС, їх моделювання та оцінка шляхом розрахунку ймовірності виникнення дозволяє прогнозувати НС, обгрунтовано розробляти ефективні заходи щодо їх попередження.

4.3 Небезпека у надзвичайних ситуаціях

Під час надзвичайних ситуацій може виникнути велика кількість небезпек здоров'ю людини і самій електромережі і навіть споживачам. В першому підпункті ми вже говорили про типи можливих небезпек, які можуть загрожувати енергетичній системі з їх аналізом і рішенням, тепер ми розглянемо більш детально, які можуть бути небезпеки при тій чи іншій НС.

Перше, що ми розглянемо – це природна надзвичайна ситуація, коли ми маємо для прикладу сейсмічну загрозу, то тут безумовно є всюди небезпека, якщо іде мова про великі міста, від руйнувань міських будівель є загроза і для електричних ліній і приладів, так як така ситуація утворює велику кількість обривів і коротких замикань, що приведе до великої кількості пожежних ситуацій, а для мережі, в залежності від потужності, може загрожувати або повному знищенню району чи навіть області або сильним пошкодженням, такі ситуації можуть привести до катастрофічних проблем для економіки. Це все також стосується і інших явищ: смерчі, повені, оповзні. Тут треба враховувати, що на такі ситуації необхідний інструктаж і план дій при такій ситуації, тому необхідно проводити навчання і інформування працівників, що необхідно робити і як зберегти собі життя в таких ситуаціях і постачати для безпеки працівників, матеріальне забезпечення при надзвичайних ситуаціях.

Ще одними, небезпеками є соціально-політична і тут треба в першу чергу треба згадати за військовий конфлікт, де працівники, інженери і інший обслуговуючий персонал є в великій небезпеці, так як під час військових конфліктів – енергетична інфраструктура є одною з головних цілей ворога і є всі ризики ракетної загрози і обстрілам, що необхідно вводити аптечку і дотримуватися техніки безпеки при повітряній тривозі. Також є небезпека захоплення енергетичної інфраструктури і тут неможливо вгадати, що буде далі, найкращим варіантом має бути евакуація персоналу в безпечне місце. За статистикою на сьогоднішній день, ворог завдав збитків на 10 мільярдів доларів

США і залишили понад 12 мільйонів людей без електроенергії або з обмеженим доступом до неї, а також порушили роботу систем водопостачання й опалення.

Зараз, через не достаток електроенергії страждають: лікарні і люди з захворюваннями, які потребують постійної роботи електрообладнання, яке підтримує їх життя; опалення і насоси для житлових комплексів; мережа магазинів і продовольчі ринки; охоронні системи; падають виробничі потужності; інформаційна і ІТ індустрія, а також робота хмарних середовищ заморожується. Ось для прикладу потужність і радіус дії ракет різних видів і країн:

Ще одною небезпекою, може бути соціальна проблема, де тут можна виділити такі ризики, як не кваліфіковані працівники, напруженість серед соціуму або зловживання. Перше може бути при кадровому голоді або не компетентному відношенню до роботи у відділі кадрів, коли на роботу може прийти людина, яка або не пройшла належне навчання або просто була допущена до роботи в, якій вона не розуміється і через неправильному ходу дій, може зробити аварію, яка може привести до таких наслідків: руйнування обладнання (трансформаторів, турбін, генераторів); вибухи через витік пального, технічні несправності або саботаж; пожежі на об'єктах, що працюють на викопному паливі чи зберігають горючі матеріали; Масштабні перебої в електромережах (блекаути); втрата доступу до життєво необхідних послуг (лікарні, водопостачання, зв'язок). Також, дана ситуація може виникнути навмисне і тут не можливо вгадати причини дії людини.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Елементна ціна струмообмежувальних реакторів

В раніше згаданих розділах, ми вже визначили, що відбувається при збільшенні частоти в мережі до резонансної і для рішення цього питання ми використали два фільтри, тепер обговоримо, яка ціна буде за цей фільтр: його встановлення, закупівля і експлуатація, а також, які будуть затрати без його використання.

Як ми вже згадали раніше, для фільтрування лишніх частот, ми використовували струмообмежувальний реактор на основі шунтувального реактору, який є наведений на рисунку 5.1. Даний реактор, може мати різну ціну, яка залежить від його структури і компанії, яка її виробляє, яка виходячи з ринку і конкуренції, а також доставку, буде виставляти дану ціну, сам такий реактор необхідно замовляти у "Укренерго" або виробників трансформаторного обладнання у нашій країні.



Рисунок 5.1 – Шунтуючий реактор

Показаний реактор має від 1:3 фаз, які розташовані горизонтально з кліматичним використанням (УХЛ), його категорія розміщення 1, 2, 3, 4 $P_{\text{НОМ}} = 20$ кВАр; $U_m = 10$ кВ; розміри (2500:2300:2450); маса $m = 2$ т;

Даний реактор має повітряний сердечник, який підключається до трьохфазної лінії електропередачі або третинної обмотки трансформатора, це робиться для того, щоб зменшити вплив ємнісної складової. Також він може перемикатися без збудження, що краще для споживання реактивної потужності.

Такий реактор коштує від 500000 до 1000000 гривень і це без врахування доставки і встановлення. Зазвичай, такого типу реактору, ставлять на великі підстанції і мережі 330 кВ. Для нашої моделі нам слід розрахувати на варіанти з шунтуючими реакторами, які будуть використовуватись для мереж від 10 кВ до 110 кВ, такі реактори уже будуть коштувати від 10000 до 100000 гривень, тут треба враховувати, що якщо ми хочемо взяти за типом охолодження то масляний буде у двічі дорогим але з більшим часом експлуатації і надійністю. Також треба враховувати, що в більшості такі речі виробляють великі гіганти, як ABB, Siemens, Hitachi Energy на риснку 5.2 показана ціна від цих виробників в залежності від потужності, зазвичай це ЄС країни, де за транспортування будуть великі мита але з врахуванням сьогоденної ситуації, мита на електрообладнання можуть зменшитися, також починає розвиватися власне виробництво, яке буде набагато дешевше за імпордне, тільки є потреба в кваліфікованих кадрах і технологій.[17]

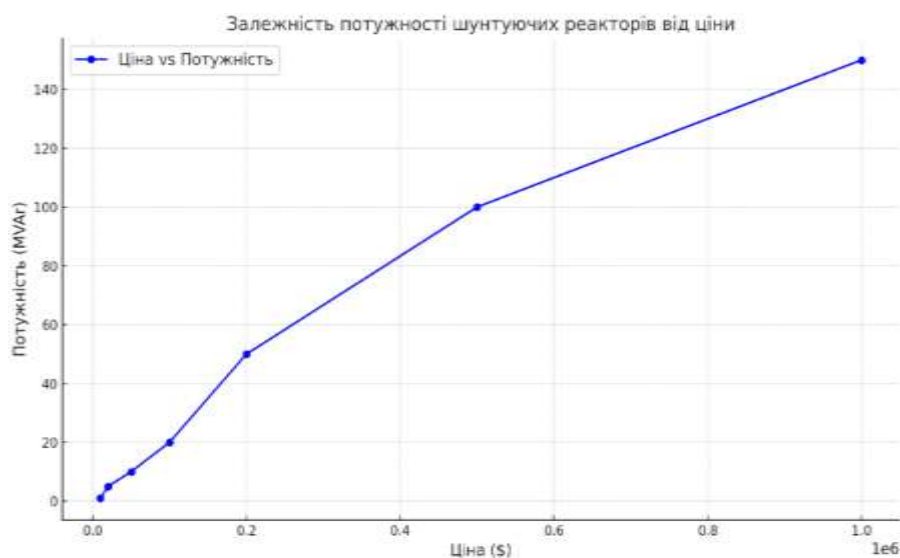


Рисунок 5.2 – залежність потужності шунтуючих реакторів (у MVA) від їхньої ціни (у гривнях)

5.2 Елементна ціна компенсаційних батареї

В нашій мережі, треба рахувати, що будуть втрати на ємності і щоб її компенсувати ми використали компенсаційні батареї, де ми взяли SVC (Static VAR Compensators). Ціна даної батареї для навантаження від 10 до 110 кВ може коливатися в районі від 3000000 до 10000000 гривень при більшому навантаженні мережі, ця цифра може вирости і до 10 мільйонів гривень, якщо ми не рахуємо мало відомі компанії або власне виробництво. Також треба зауважити, що вартість за доставку, буде враховуватися від 10 – 30 % від загальної вартості, що робить дані системи дуже дорогим задоволенням. Щоб не платити за таку дороге обладнання можна вибрати більш дешевший варіант, а менш ефективний для прикладу регульовані автотрансформатори, які простіші в експлуатації і дешевші (на 10 – 110 кВ буде виходити в 50 0000 – 1500000 гривень, а для мереж 220 – 500 кВ, буде коштувати від 2000000 до 5000000 гривень).



Рисунок 5.3 – SVC (Static VAR Compensators);

На сьогодні, з врахуванням кризи найкращим варіантом, буде використання автотрансформаторів. Звичайно SVC системи можна краще регулювати реактивну потужність і забезпечувати надійність роботи системи але на даний момент це дуже вигідне рішення, сьогоднішньої ситуації.[18]

Для прикладу, я наведу ось таке порівняння:

$$X_{SVC} = X_{\text{Основний}} + X_{\text{монтаж}} + X_{\text{доставка}} + X_{\text{обслуговування}} \quad (5.1)$$

X_{SVC} – загальна вартість; $X_{\text{Основний}}$ – основна вартість обладнання; $X_{\text{монтаж}}$ – вартість монтажу;

Перший множник буде залежати від характеристик нашої батареї для прикладу її потужність для лінії 110 кВ буде 50 МВар, що рівно 31500 гривень. Монтаж буде коштувати, такої системи, плюс тут є ще інші параметри, які впливають на ціну, які можна подати, як а – ціна за складність конструкції; b – функціональні можливості і додаткове обладнання; нехай $a = 31000$; $b = 7000$; тоді:

$$X_{\text{основний}} = a * P_{\text{MVar}} + b * U_{\text{kV}}; \quad (5.2)$$

Для інших значень можна подати ось такі формули:

$$X_{\text{монтаж}} = t * k = 21 * 5100 = 107100; \quad (5.3)$$

t – час роботи; k – залежить від ринку праці;

$X_{\text{доставка}}$ буде залежати від відстані і ринкової ціни доставки, для України, буде така ціна: $X_{\text{доставка}} = 15000$;

$X_{\text{обслуговування}}$ буде визначатися від домовленості між компаніями, яка може бути: $X_{\text{обслуговування}} = 14000$;

Тоді:

$$X_{SVC} = 2320000 + 107100 + 15000 + 14000 = 2456100 \quad (5.4)$$

Порівнявши з автотрансформатором потужністю $P_{\text{ВА}} = 65$ кВА; $U_{\text{kV}} = 110$ кВ; також треба врахувати коефіцієнт вартості, який встановлює виробник (k) і додаткові втрати, то можна вивести ось таку формулу:

$$X_{\text{AT}} = k * S_{\text{MVA}} * U_{\text{kV}} + X_{\text{додаткові}} \quad (5.5)$$

Тоді ми отримаємо $X_{\text{AT}} = 10 * 65 * 110 + 20000 = 91500$;

Як показують результати встановлення автотрансформатора дешевше але програє в функціональності і на додачу, SVC необхідно імпортувати, що збільшує затрати на митному контролі.

5.3 Сумарна ціна і втрати без використання компенсаційних елементів

Для високовольтних ліній дане явище може привести до збоїв роботи релейного захисту, перегрів силового обладнання, великі втрати енергії, особливо, якщо це сильно протяжна лінія і можливим перебоєм. Я вже згадував за перегорання трансформатора, що з монтажем може обійтися в 1.5 мільйонів гривень, також треба згадати і про втрати на лініях, де втрати можна оцінювати 1 % потужності, якщо передається 100 МВт за годину, то це 1 МВт в годину, так як ціна 1 МВт рівна 2100, то це 50400 на добу за умовно 5 років, ця ціна окупить фільтр, який міг би придушувати лишні частоти.

Або розглянемо інший випадок, коли ми маємо трансформатор, який іде на споживачів і при нерівномірному росту гармонік, до споживачів може надходити не якісне живлення, що в свою чергу може привести до позовів і юридичним справам з можливими компенсаціями, які будуть залежати від завданої шкоди.

А тепер візьмемо, якийсь приклад економічних втрат країною за 10 років через ВЧ резонанс, так як Україну важко взяти за приклад через бойові дії і секретність реальної ситуації, за приклад була взята Польща на рисунку 5.4 показана дана залежність.

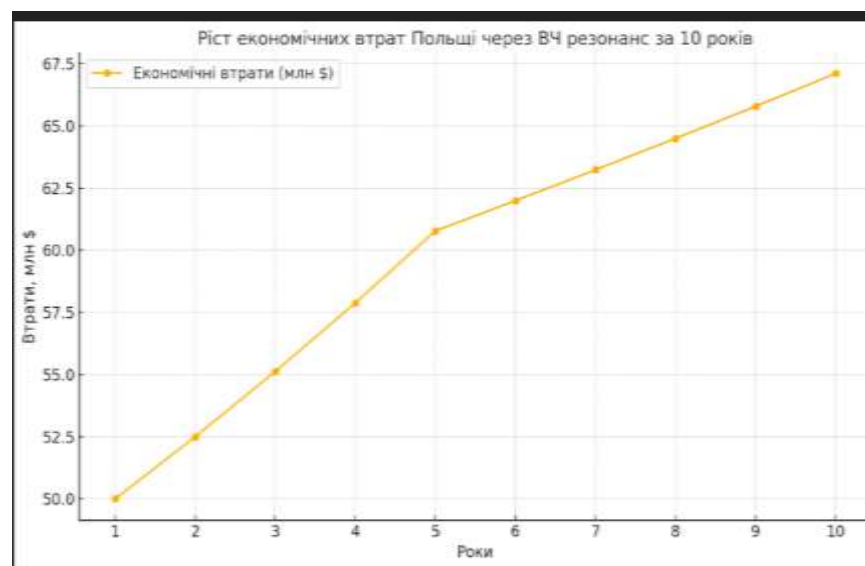


Рисунок 5.4 – Економічні втрати Польщі через ВЧ резонанс через 10 років

ВИСНОВКИ

Під час цієї роботи, ми теоретично дослідили, що таке ВЧ резонанс і як він з'являється, що він збуджується за рахунок реактивної складової нашого кола, які можуть мінятися в залежності від наших провідників і електричних установок. Визначали, які можливі небезпеки можуть появитися при ВЧ резонансі в електричних мережах.

Розраховували електричні параметри для еквівалентних схем заміщення і вивчили їх складову і будову і методи включення джерел живлення, компенсаційних батарей, електричних ліній, трансформаторів, а також RLC і інших реактивних і пасивних замінників чи компенсаторів потужностей, де ми перевіряли їх включення будували схематичні з'єднання а також вивчали їх функціональні можливості.

Розробили математичну модель нашої електромережі в якій ми встановили параметри, які можуть відповідати реальній мережі і запускали через програмну симуляцію нашу модель, де аналізував отримані графіки і змінюючи частоту систем, аналізував зміну гармонік синусоїдного сигналу системи, визначаючи, як міняються амплітуди напруг і струмів. Потім, ввівши в нашу модель резонанс, я перевіряв, як він міняє амплітуду нашої гармоніки і аналізував шуми, які він утворює. Далі, ми ввели фільтри, які повністю нормалізували наші амплітудні значення струму і напруги, водночас проаналізувавши нашу модель, я навчився обраховувати параметри і потрібний вид фільтра для нашої схеми.

Визначено можливі небезпеки в енергетиці і як їм запобігти, а також проаналізував і визначив, як будувати і заподіяти можливим небезпекам при роботі в енергетичних системах.

ВЧ резонанс що року приносить великі втрати споживачам і підприємствам, розраховано оптимальні варіанти і можливі затрати на його встановлення, а також можливі йому замінники, як більш простіший і економічно вигідніший варіант, а також простіший в обслуговуванні.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Шевчук С. П., Мейта О. В. Електричні мережі та системи. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 167 с.
2. Тихонравов С. М., Зінченко О. Є., Карпенко Н. П., Приймак Ю. І., Бондаренко А. В.. Теоретичні основи електротехніки. Практикум. Харків. УкрДУЗТ, 2019. – 151 с.
3. Бушок Г. Ф., Левандовський В. В., Півень Г. Ф.. Фізичні основи механіки електрики і магнетизму. Київ. Вид. – К.: Либідь, 2001. – 448 с.
4. Пачкова С. Г. Електроенергетика та охорона навколишнього середовища. Функціонування енергетики в сучасному світі. Київ. 2013. – 301 с.
5. Омельчук А.О. Електрична частина станцій і підстанцій. Київ. Національний університет біоресурсів і природокористування України. 2017. – 479 с.
6. <https://raschet.info/kompensacija-reaktivnoj-moshhnosti-s-pomoshhju-transformatorno-reaktornogo-ustrojstva/>
7. <https://electrocontrol.com.ua/ua/stati-sxemy-i-spravochnaya-informaciya/dlya-chego-nuzhna-kondensatornaya-ustanovka-kku-ukrm-aku-kompensaciya-reaktivnoj-moshhnosti.html>
8. https://bstudy.net/916573/tehnika/teoreticheskoe_vvedenie
9. Бурбело М. Й., Гадай А. В. Динамічна компенсація реактивної потужності в пускових режимах електроприводів: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2010. 104 с.
10. Жежеленко І. В., Півняк Г. Г., Трофімов Г. Г., Папаїка Ю. А. Реактивна потужність в електричних мережах: монографія. Дніпро: НТУ«ДП», 2020. 72 с.
11. Пістун І. П., Березовецький А. П., Тимочко В. О., Городецький І. М. Охорона праці (гігієна праці та виробнича санітарія): навчальний посібник. Львів: Тріада плюс, 2017. 620 с.
12. Тимочко В. О., Городецький І. М. Березовецький А. П. та ін. Безпека життєдіяльності та охорони праці: практикум Львів : СПОЛОМ, 2022. 376 с.:

13. https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/476849/mod_resource/content/1/%D0%95%D0%9C%20%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%8F%206.1.pdf

14. Jian Sun, Ignacio Vieto, Christoph Buchhagen. High-frequency resonance in HVDC and wind systems: Root causes and solutions. Charuty in England & Wales. The Institution of Engineering and Technology. 2023. 105 с.:

15. Максимчук О. М., Кушвид Л. В., Костик Л. М., кнд. наук, доц., Сисак І. М. Компенсація реактивної потужності системи електропостачання. Тернопіль, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. 2020. 316 с.:

16. Бедрій Я. І. **О**снови безпеки життєдіяльності. subjectum.eu. Львів. 100 с.

17. Мельник Л. Г. Економіка енергетики. Суми: Університетська книга ННІ ФЕМ, 2015. 378 с.

18. Скловська Е.Г., Сердюк Б.Н. Економіка енергетики: ВР НТУУ "КПІ" ім. І. Сікорського: 2023 р. - 492 с.