

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРНІГІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

**Методичні вказівки до лабораторних робіт
для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня "спеціаліст" та "магістр"
за спеціальністю "Електричні системи і мережі"**

Забезпечення якості електроенергії. Методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня "спеціаліст" та "магістр" за спеціальністю "Електричні системи і мережі" / Укл.: Безручко В.М. – Чернігів: ЧНТУ, 2014. – 51 с.

Укладач: Безручко Вячеслав Михайлович,
старший викладач кафедри електричних систем і мереж,
кандидат технічних наук

Відповідальний за випуск: Скоробогатова Валентина Іванівна,
завідувач кафедри електричних систем і мереж,
доктор технічних наук, професор

Рецензент: Буйний Роман Олександрович,
доцент кафедри електричних систем і мереж,
кандидат технічних наук, доцент

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ЩОДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ.....	5
ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ.....	6
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 Ознайомлення з можливостями аналізаторів якості електроенергії.....	7
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 Основні джерела виникнення вищих гармонік.....	10
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 Резонансні явища при компенсації реактивної потужності в системах електропостачання з нелінійними електроприймачами.....	18
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 Розподіл вищих гармонік у провідниках системи електропостачання та обмотках силових трансформаторів.....	23
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 Фільтрація вищих гармонік струму в системах електропостачання.....	30
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 Зниження вищих гармонік струму за рахунок використання фазозсувних трансформаторів.....	38
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7 Зниження несиметрії напруг за рахунок використання симетруючих пристроїв.....	43
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	51

ВСТУП

Ці методичні вказівки складено для проведення циклу лабораторних робіт з дисципліни "Забезпечення якості електроенергії" для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня "спеціаліст" та "магістр" за спеціальністю "Електричні системи і мережі"

Лабораторні роботи проводяться в лабораторії "Систем електропостачання" кафедри електричних систем та мереж. Вони дають змогу студентам, що вивчають дану дисципліну, провести натурні експерименти та досліді з метою практичного підтвердження окремих теоретичних положень даної навчальної дисципліни, набути практичних навичок роботи з лабораторним устаткуванням, обладнанням, вимірювальною апаратурою та методиками експериментальних досліджень.

Під час занять студенти отримують навички проведення вимірювань, навчаються аналізувати та оцінювати результати дослідів, вчать оформлювати звіти виконаних робіт в рамках діючих стандартів, що вкрай необхідно для підготовки майбутнього спеціаліста.

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ЩОДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Перед початком занять в електротехнічній лабораторії викладач повинен провести вступну бесіду зі студентами, пояснити їм значення лабораторних робіт, познайомити з апаратурою, що застосовується у ній, та дати ряд методичних вказівок до виконання лабораторних робіт. На цьому ж занятті викладач повинен ознайомити студентів зі специфічними умовам роботи в даній лабораторії, правилами внутрішнього розпорядку, організацією робочого часу, приділивши особливу увагу питанням техніки безпеки при роботі з електричними колами, машинами та апаратами. На закінчення необхідно ознайомити студентів із планом проведення лабораторних робіт на поточний семестр і рекомендувати їм необхідну літературу.

Студенти, відповідно наявному в них плану виконання лабораторних занять, зобов'язані завчасно, готуватися до майбутнього заняття в лабораторії. Підготовка полягає у вивченні відповідних розділів теоретичного курсу по лекційних записах і навчальній літературі, у вивченні опису роботи та схеми експериментальної установки по даним методичним вказівкам, а також у акуратній підготовці таблиць спостережень, у які під час зайняття студент повинен записувати всі дані, отримані при проведенні досліду.

Схема установки та таблиці спостережень заносяться завчасно в спеціальний бланк для виконання лабораторної роботи.

Перед виконанням лабораторної роботи викладач перевіряє знання кожного студента з матеріалу роботи для з'ясування ступеня підготовленості студентів до проведення робіт і роз'яснення окремих незрозумілих для них нюансів. Студенти, що з'явилися на заняття невідготовленими, до виконання робіт не допускаються та під час зайняття вивчають положення методичних вказівок та відповідних розділів лекційного курсу.

Під час виконання роботи результати вимірів заносяться студентами в заздалегідь заготовлені таблиці спостережень і пред'являються для перевірки керівникові занять до розбирання схеми. Якщо результати спостережень будуть розцінені викладачем як незадовільні, то дослід необхідно повторити.

Отримані дані частково обробляються студентами на лабораторному занятті, а остаточно – вдома. За результатами лабораторної роботи складається звіт про виконану роботу у відповідній формі.

Звіт представляється кожним студентом викладачеві до наступного лабораторного заняття, без чого він не допускається до виконання чергового завдання.

При здачі звіту викладач опитує студента по матеріалу виконаної роботи, після чого робота зараховується як захищена.

Студенти, що виконали всі передбачені графіком лабораторні роботи та вчасно здали звіти по них, одержують атестаційну оцінку.

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Звіт повинен мати наступні частини: титульний аркуш, зміст, лабораторні роботи, перелік використаної літератури або перелік посилань.

Оформлена лабораторна робота повинна мати наступні частини: назва лабораторної роботи, мета роботи, хід роботи, обробка результатів та висновки.

У підрозділі «хід роботи» має бути:

- порядок виконання роботи;
- таблиці спостережень та результати випробувань.

У підрозділі «обробка результатів» мають бути розрахунки окремих електричних величин, остаточні результати випробувань, згруповані у таблиці та відображені графіками.

Висновок формується на основі отриманих експериментальних даних та рекомендацій до лабораторної роботи.

При складанні звіту студенти повинні застосовувати у формулах і схемах умовні технічні позначення, рекомендовані державними стандартами [3,2,7] та оформлювати звіт у відповідності до ДСТУ 3008-95.

Усі лабораторні роботи оформлюються студентами індивідуально. *При виявленні скопійованих звітів, лабораторні роботи таких студентів вважаються невиконаними та підлягають виконанню з початку.*

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 ОЗНАЙОМЛЕННЯ З МОЖЛИВОСТЯМИ АНАЛІЗАТОРІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Мета роботи: отримати базові навички використання аналізатора якості електричної енергії для вимірювання показників якості електричної енергії.

1.1 Рекомендації для якісної підготовки студента до виконання роботи

1. Ознайомитися зі схемою лабораторної установки, паспортом на аналізатор якості електроенергії AFLEX 6300 і теоретичними відомостями про показники якості електричної енергії. При цьому рекомендується використовувати літературу, яка зазначена наприкінці методичних вказівок, [5, стор. 10-22] або одним з [3,2,7].

2. При підготовці особливу увагу звернути на послідовність дій при налаштуванні приладу та на дії, що виконуються при вимірюванні показників якості приладом AFLEX 6300. Для цього рекомендується знайти у паспорті на прилад та підкреслити дії по кожному пункту роботи.

3. Знати якими стандартами нормуються показники якості електричної енергії у точці загального приєднання та у точці розділення власності.

1.2 Хід роботи

1. Перед виконанням роботи слід ознайомитись з інструкцією по експлуатації аналізатора якості електроенергії AFLEX 6300.

2. Отримати у викладача аналізатор якості електричної енергії AFLEX 6300. Перевести його в режим налаштування та впевнитись, що прилад налаштовано наступним чином:

- коефіцієнт трансформації значень напруги дорівнює одиниці ($V_T = 1$);
- робоча частота дорівнює 50 Гц ($HZ = 50Hz$);
- кількість вимірів на періоді, яка використовується для розрахунку коефіцієнта форми сигналу, дорівнює 256 (WAVEFORM CONFIGURATION).

3. Виміряти коефіцієнт трансформації трансформатора струму, який виконано за рахунок намотування провідника на датчик струму.

Перевести прилад AFLEX 6300 в режим моніторингу показників якості напруги та струму.

На стенді зібрати схему, що наведена на рисунку 1.1.

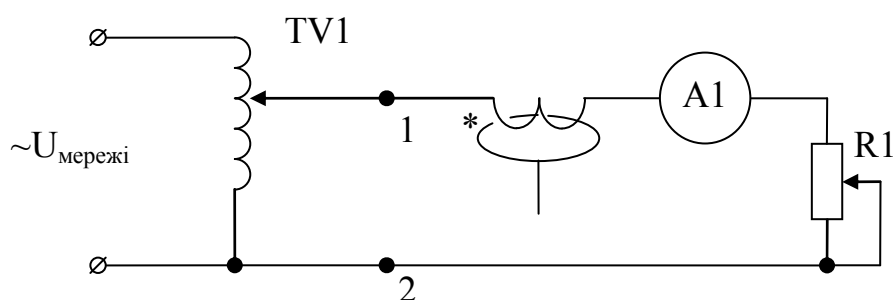


Рисунок 1.1 – Схема для визначення коефіцієнта трансформації трансформатора струму датчика аналізатора якості електроенергії

Підключити щупи напруги аналізатора якості до вузлів 1 (червоний) та 2 (чорний), а датчик струму згідно схеми (* – червоний щуп).

Ввімкнути стенд, встановити ЛАТР-ом напругу 230 В. Змінюючи опір резистора R1 таким чином, щоб діюче значення струму у гільці змінювався від 0,1 до 1 А, зафіксувати 5-6 показань струму аналізатора якості електроенергії. Результати занести до таблиці.

Таблиця 1.1 – Результати вимірювання коефіцієнта трансформації трансформатора струму датчика аналізатора якості електроенергії

№	Показання амперметра, А	Показання аналізатора якості, А	Коефіцієнт трансформації струму
1	0,1		
2	0,3		
...	...		

Розрахувати коефіцієнт трансформації, як середнє значення за вимірами.

4. Зібрати схему (рисунок 1.2), паралельно з випрямлячем включити ємність $C1=10\mu\text{кФ}$. Змінюючи опір R1 домогтися показань амперметра ~ 1 А. За цих умов зафіксувати показання аналізатора якості електроенергії (коефіцієнти THD_U , THD_I , та значення гармонік струму та напруги з номерами від 2 до 15).

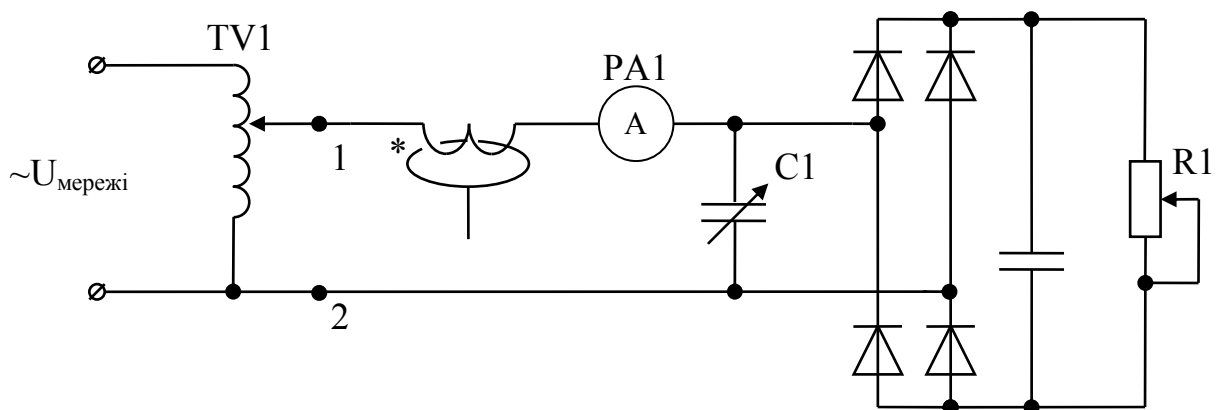


Рисунок 1.2 – Схема для визначення коефіцієнта трансформації трансформатора струму датчика аналізатора якості електроенергії

5. Перевести прилад в режим виміру потужності, переключивши повзунковий перемикач в положення «W».

В цьому режимі виміряти значення:

- активної потужності та коефіцієнту потужності;
- повну потужність та реактивну потужність;
- максимальну потужність;
- споживаєму енергію;
- діюче значення струму

та зафіксувати векторну діаграму струму та напруги.

6. Для вимірювання показників якості електроенергії в трифазній мережі з симетричним навантаженням зібрати схему рисунок 1.3.

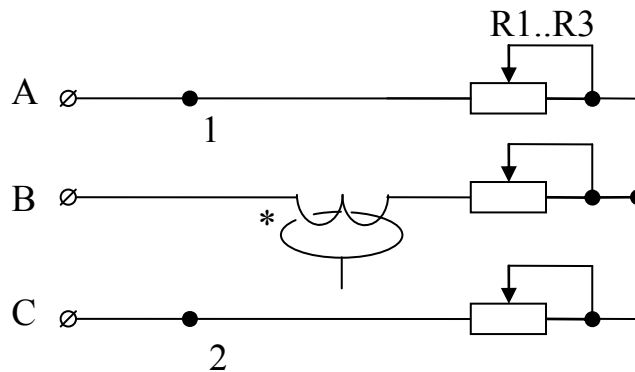


Рисунок 1.3 – Схема для вимірювання показників якості електроенергії в трифазній мережі з симетричним навантаженням

За допомогою опорів R1, R2, R3 встановити діючого значення струму в гілках схеми ~ 1 А.

Перевести прилад в режим вимірювання в трифазній мережі з симетричним навантаженням. Підключити щупи напруги аналізатора якості до вузлів 1 та 2, а датчик струму згідно схеми.

В цьому режимі виміряти значення:

- активної потужності та коефіцієнту потужності;
- повну та реактивну потужності;
- максимальну потужність;
- енергію, що споживається;
- діючого значення струму

та зафіксувати векторну діаграму струму та напруги.

7. Налаштувати прилад для планової реєстрації даних. Налаштування виконати таким чином, щоб виконав 5 вимірів за 10 хвилин. Виконати вимірювання.

8. Налаштувати прилад для фіксації перехідних процесів. Для цього, встановити пороги спрацювання при збільшенні напруги більше 5% від номінальної (SWELL), при зменшенні напруги нижче 5% від номінальної (DIP) та при зменшенні напруги нижче 10% від номінальної (OUTAGE).

Змінюючи напругу ЛАТР-ом впевнитись у реєстрації перехідних процесів приладом.

9. У висновку дати оцінку можливостям приладу AFLEX 6300 з вимірювання показників якості електроенергії.

1.3 Контрольні запитання

1. Назвіть показники якості електричної енергії.
2. Які показники якості дозволяє вимірювати AFLEX 6300?
3. Якими стандартами в Україні визначаються норми якості електричної енергії в системах електропостачання?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

ОСНОВНІ ДЖЕРЕЛА ВИНИКНЕННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК

Мета роботи: закріпити на практиці знання про основні джерела виникнення вищих гармонік струму в системах електропостачання, виміряти гармонійний склад струму типових промислових навантажень та проаналізувати спотворення напруги до яких вони призводять.

2.1 Рекомендації для якісної підготовки студента до виконання роботи

1. Ознайомитися зі схемою лабораторної установки і теоретичними відомостями про основні навантаження, що генерують в мережу вищі гармоніки. При цьому рекомендується використовувати не тільки ці методичні вказівки, але й літературу, яка зазначена наприкінці методичних вказівок [4, стор. 49-86], [6, стор. 70-80].

2. При підготовці особливу увагу звернути:

- на послідовність дій при проведенні дослідів;
- на дії, що можуть викликати аварійний режим роботи устаткування.

3. Знати та розуміти:

- основні типи навантажень, що генерують в мережу вищі гармоніки;
- як періодичний струм чи напругу розкласти в ряд Фур'є синусоїдальних (гармонійних) складових;
- як виміряти гармонійний склад струму і напруги за допомогою приладу Aflex 6300.

При підготовці слід пам'ятати, що знання студента з теорії та послідовності дій при проведенні дослідів обов'язково перевіряються викладачем перед виконанням роботи.

2.2 Короткі теоретичні відомості

Електроприймачі з нелінійною вольт-амперною характеристикою споживають струм, форма кривої якого відрізняється від синусоїдальної. А протікання такого струму по елементах електричної мережі створює на них падіння напруги, відмінне від синусоїдального, це і є причиною спотворення синусоїдальної форми кривою напруги.

Функцію, що описує несинусоїдальну криву струму чи напруги, можна розкласти в ряд Фур'є синусоїдальних (гармонійних) складових, що мають частоту, яка у ν разів перевищує частоту мережі електропостачання. В електроенергетиці першу частоту (50 Гц) прийнято називати «основна частота», а усі інші – вищими гармоніками напруги або струму.

Для прикладу на рисунку 2.1 приведено осцилограми струму однофазного та трифазного випрямляча (без вхідного фільтру), та осцилограми гармонік струму, які знаходяться шляхом розкладання відповідної осцилограми струму в ряд Фур'є, при синусоїдальній живлячій напрузі.

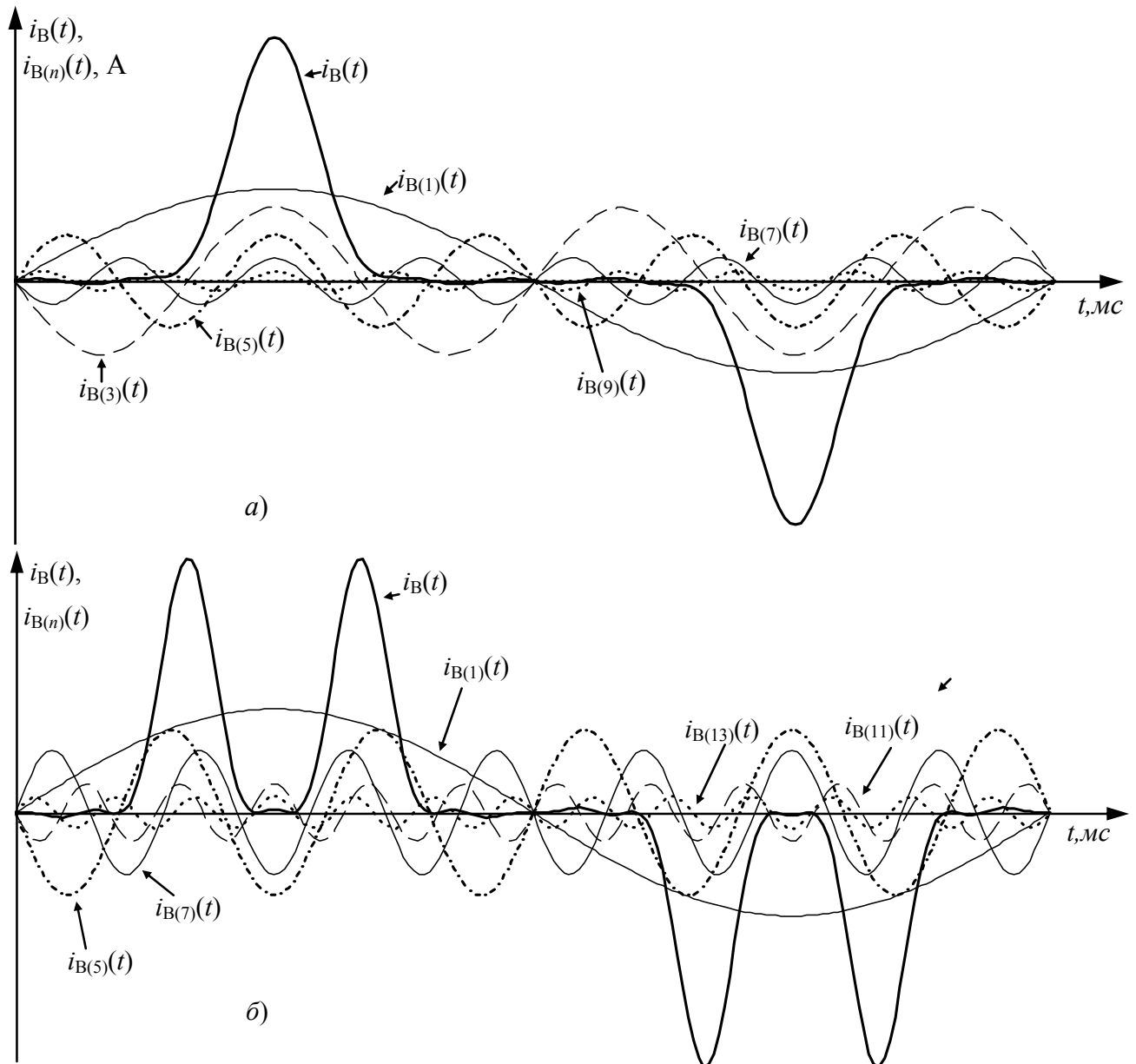


Рисунок 2.1 – Осцилограма струму однофазного (а) та трифазного (без фільтру) випрямляча $i_B(t)$, та осцилограми гармонік струму $i_{B(n)}(t)$

З осцилограм видно, що амплітуда основної частоти (першої гармоніки) значно менша ніж максимальний миттєвий струм осцилограми вхідного струмі випрямлячів. Слід пам'ятати, що потужність передається від джерела до електроприймача лише на першій гармоніці, а на інших гармоніках – в зворотному напрямку (від електроприймача з нелінійною вольт-амперною характеристикою в мережу та в інші електроприймачі), та витрачається у переважній більшості на нагрів елементів мережі.

З осцилограм також можливо прослідкувати початкову фазу гармонік струму. Наприклад, фаза п'ятої гармоніки у однофазного та трифазного випрямляча відрізняється на 180 градусів. В наслідок цього, при одночасній роботі обох випрямлячів ця гармоніка буде взаємно компенсуватися.

Нижче наведемо електроприймачі з нелінійною вольт-амперною характеристикою, що найбільш розповсюджені в системах електропостачання побутового сектору, та їх блоки живлення і характерні осцилограми струмів.

Тиристорний регулятор потужності (диммер). Використовуються для регулювання яскравості ламп розжарення та регулювання потужності (а як наслідок температури), що виділяється у електричних «теплих полах». На рисунку 2.2 наведена схема блоку живлення та осцилограми напруги та струму, що споживає такий електроприймач.

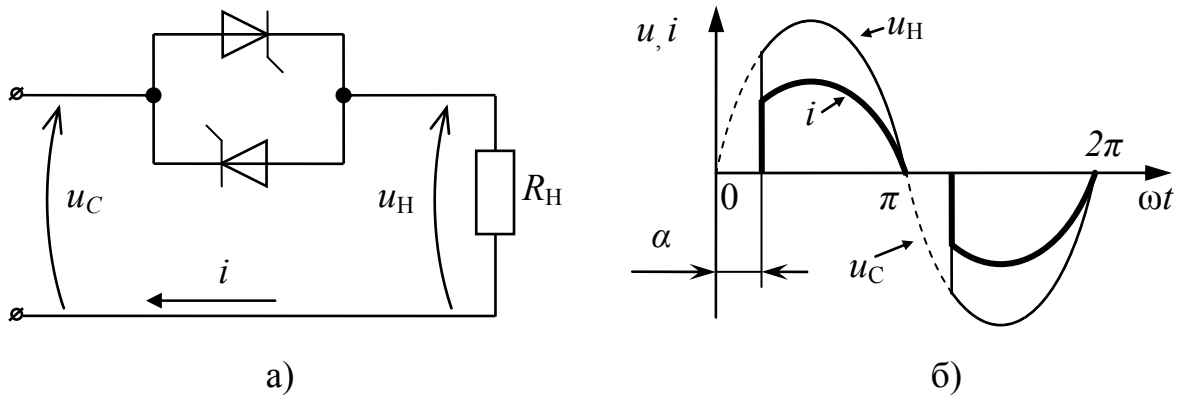


Рисунок 2.2

Електрообладнання з імпульсними блоками живлення. Дані блоки живлення застосовуються майже в усіх офісних приладах (комп'ютерах, моніторах, принтерах, люмінесцентних лампах тощо). На рисунку 2.3 наведена спрощена схема блоку живлення та осцилограми напруги та струму, що споживає електроприймач.

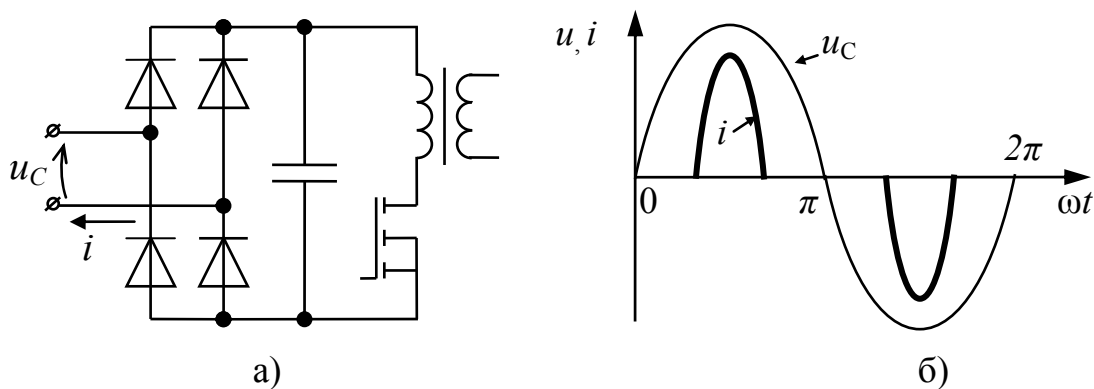


Рисунок 2.3

Навіть *трансформатори* споживають несинусоїдальний струм холостого ходу. На рисунку 2.4 наведена спрощена схема включення трансформатора в мережу та осцилограми напруги та струму холостого ходу в первинній обмотці.

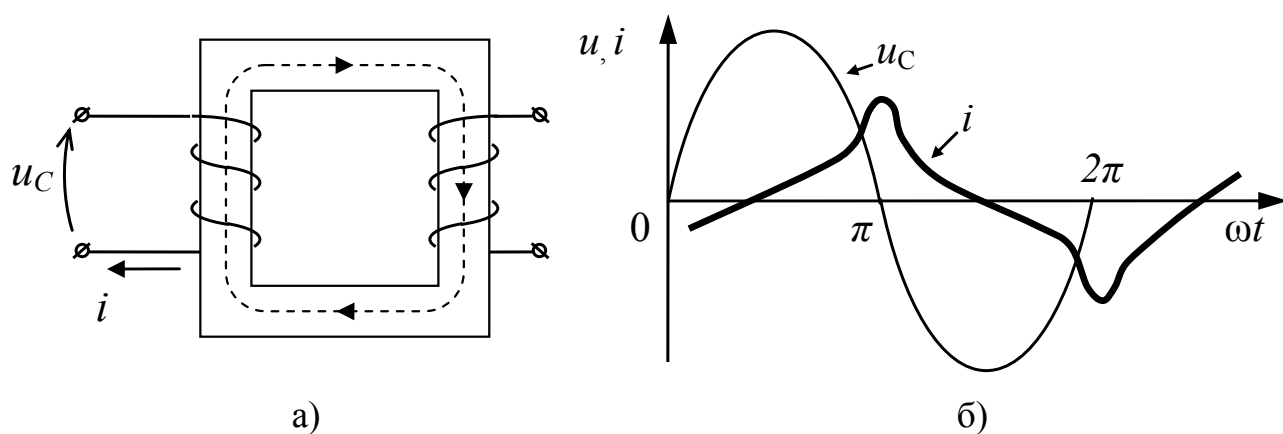


Рисунок 2.4

Нижче наведено електроприймачі з нелінійною вольт-амперною характеристикою, що найбільш розповсюджені в системах електропостачання промислових підприємств.

Вентильні перетворювачі. Використовуються для випрямлення напруги для подальшого її перетворення. Такі перетворювачі застосовуються для живлення частото-керуємих асинхронних двигунів, батарей акумуляторів та інше. Найбільш розповсюдженою схемою перетворювача для живлення потужних навантажень є трифазна мостова схема (рисунок 2.5). Ці схеми можуть з'єднуватися послідовно або паралельно і живитися від напруги, що зсунута на відповідний кут (від різних обмоток трансформатора). В цьому випадку можна отримати 12, 18, 24, 36, 48... – фазні схеми випрямлення. Чим вище за пульсністю схема, тим ближче до синусоїдальної форми наближається струм, що споживається з мережі.

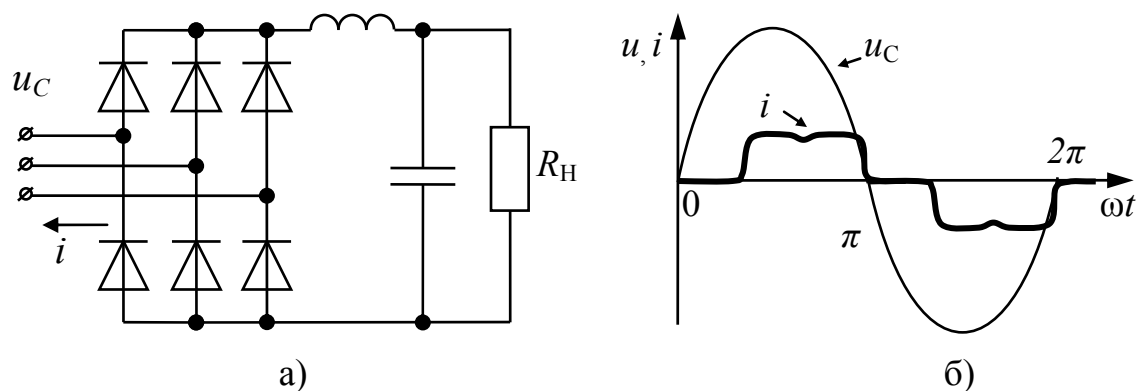


Рисунок 2.5 – Схема та осцилограма струмів шестипульсного вентильного перетворювача

Електродугові сталеплавильні печі. При роботі електродугових сталеплавильних печей спотворення живлячого струму і напруги виникає за рахунок нелінійної характеристики дуги і нелінійної характеристики пічного трансформатора, що працює при підвищених значеннях індукції. Рівень гармонік при роботі печі менше рівня гармонік, що виникають при роботі вентильних перетворювачів, а їх виникнення носить суто випадковий характер і не піддається аналітичному визначенню.

Зварювальні навантаження. За своєю дією на мережу зварювальні навантаження ділять на дві категорії: установки електродугового і контактного зварювання змінним струмом, установки електродугового зварювання постійним струмом. Установки електродугового зварювання змінним струмом впливають на мережу аналогічно електродуговим сталеплавильним печам. У зварювальних машинах контактного зварювання є тиристори з фазовою системою регулювання. Еквівалентна схема зварювальної машини приведена на рисунку 2.6.

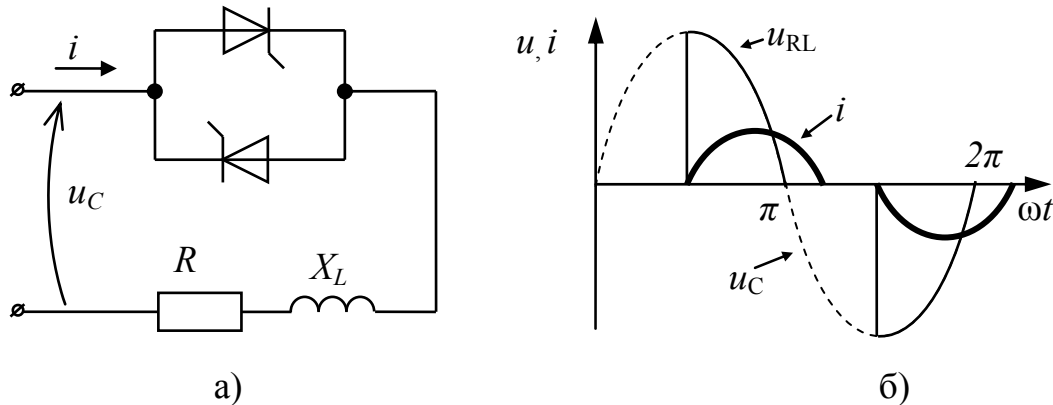


Рисунок 2.6

В разі електродугового зварювання постійним струмом дуга живиться від випрямляча.

Печі опору з тиристорним регулюванням. У системах автоматизованого резистивного нагріву застосовуються тиристорне регулювання потужності. Спрощена схема живлення електропечі опору аналогічна регулятору потужності і наведена на рисунку 2.2.

Трифазні трансформатори та автотрансформатори, що застосовуються в промисловості, споживають несинусоїдальний струм холостого ходу. На рисунку 2.7 наведена спрощена схема включення трансформатора в мережу та осцилограми струмів холостого ходу в первинних обмотках.

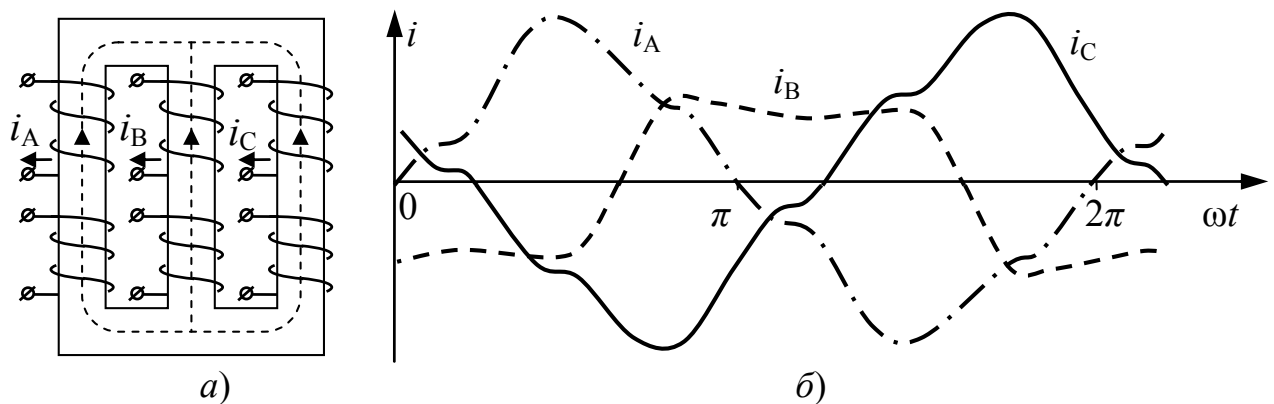


Рисунок 2.7

З вище наведеного зрозуміло, що більшість промислового обладнання і є джерелами виникнення вищих гармонік.

2.3 Хід роботи

1. В ході лабораторної роботи слід виміряти форму та гармонійний склад струму основних джерел вищих гармонік (рисунки 2.2-2.7). Для цього слід зібрати схему, що зображена на рисунку 2.8.

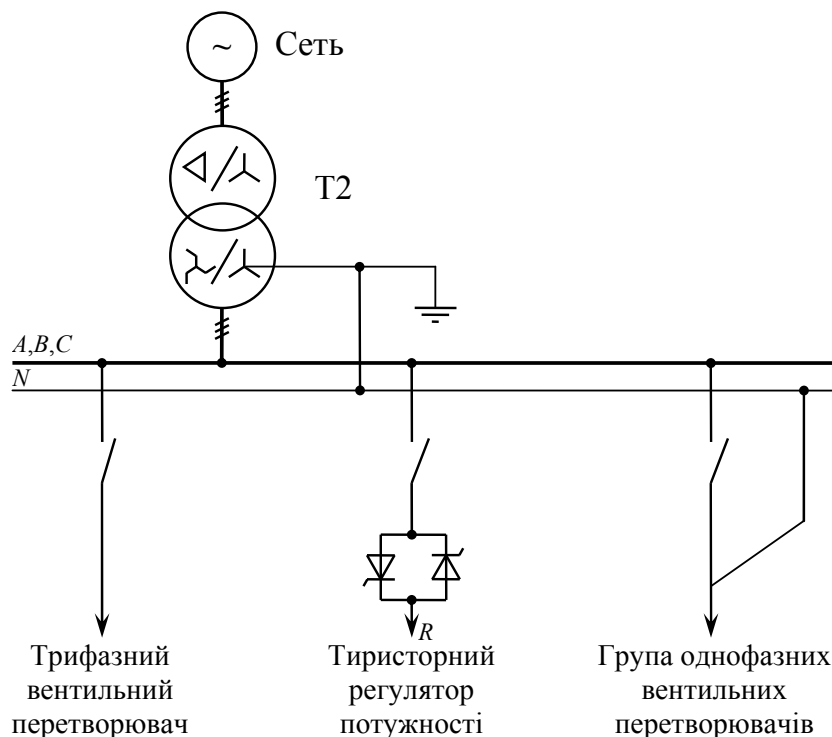


Рисунок 2.8 – Схема вимірювання гармонійного складу емісії струму однофазного випрямляча

2. Налаштувати вимірювальний прилад Aflex 6300 на вимірювання струму у фазі однофазного випрямляча (вентильного перетворювача) та напруги його живлення.

4. За допомогою перемикачів S3 налаштувати схему з'єднання обмоток трансформатора Т2 – У/Ун-0 або Д/Ун-0 або У/Зн-0 або Д/Зн-0 (за вказівкою викладача). *При цьому слід пам'ятати, що змінювати схему з'єднань обмоток трансформатора при увімкненому живленні може призвести до аварійного режиму роботи устаткування та виходу його з ладу.*

5. Вимикачем S1 увімкнути живлення вторинним колам.

6. Увімкнути живлення зібраної схеми. Живлення може забезпечуватися від напруги ~ 380 В та ~ 220 В. При виборі живлення слід знати, що для схем з'єднання обмоток трансформаторів Т1 та Т2 Д/Ун-0 та Д/Зн-0 максимальна лінійна напруга складає 220 В, а для схем з'єднання обмоток трансформатора Т2 У/Ун-0 та У/Зн-0 максимальна лінійна напруга складає 380 В. *Неправильний вибір напруги живлення може призвести до виходу устаткування з ладу!*

7. Увімкнути навантаження перемикачем SA24-SA26. Виміряти форму та гармонійний склад струму та напруги однофазного вентильного перетворювача. Результати дослідження занести до таблиці 2.1.

При проведенні досліду слід звернути увагу які гармоніки мають суттєве діюче значення струму, а які – майже нульове.

Таблиця 2.1 – Діючі значення гармонік емісії струму та напруги

Електроприймач	Діюче значення	Гармонійний склад								$K_U / THD_U, \%$ ($THD_I, \%$)
		1	3	5	7	9	11	13	15	
однофазний вентильний перетворювач	U, V									
	I, A									
однофазний вентильний перетворювач	U, V									
	I, A									
трифазний некерований вентильний перетворювач	U, V									
	I, A									

8. Вимкнути живлення схеми.

9. Налаштувати вимірювальний прилад Aflex 6300 на вимірювання струму у фазі трифазного некерованого вентильного перетворювача змінного струму в постійний та напруги його живлення.

10. Увімкнути живлення зібраної схеми. Увімкнути навантаження перемикачем SA20. Виміряти форму та гармонійний склад струму та напруги. Результати досліду занести до таблиці 2.1.

11. Зібрати схему тиристорного регулятора потужності (рис. 2.2). Усі комутації виконувати при вимкненому живленні схеми.

12. Налаштувати вимірювальний прилад Aflex 6300 на вимірювання струму у фазі тиристорного регулятора потужності та напруги його живлення.

13. Увімкнути живлення зібраної схеми. Увімкнути навантаження перемикачем SA23. Виміряти форму та гармонійний склад струму та напруги. Результати досліду занести до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Діючі значення гармонік емісії струму та напруги

Електроприймач	Діюче значення	Гармонійний склад								$K_U / THD_U, \%$ ($THD_I, \%$)
		1	3	5	7	9	11	13	15	
тиристорний регулятор потужності	45°	U, V								
		I, A								
	90°	U, V								
		I, A								
	135°	U, V								
		I, A								

16. Зібрати схему для вимірювання намагнічуючого струму трифазного трансформатора. Налаштувати вимірювальний прилад Aflex 6300 на вимірювання струму у фазі трансформатора та напруги його живлення.

17. Увімкнути живлення зібраної схеми. Послідовно виміряти форму та гармонійний склад струму у кожній фазі. Усі комутації виконувати при вимкненому живленні схеми. Результати досліду занести до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Результати вимірювань параметрів струму намагнічування трифазного трансформатора

Електроприймач	Фаза	Параметри струму, А										
		Діюче значення	Діюче значення гармонік струму							$K_U / THD_U, \%$ ($THD_I, \%$)		
			1	3	5	7	9	11	13	15		
трифазний трансформатор	А											
	В											
	С											

17. Зробити висновки.

2.4 Обробка результатів

У звіті привести осцилограми та стовпчикові діаграми струмів та напруг відповідних електроприймачів.

Для порівняння гармонійного складу емісії струму вищих гармонік різних електроприймачів стовпчикові діаграми струмів доцільно об'єднати.

2.5 Рекомендації до написання висновку

У висновку слід:

- порівняти характерні риси та ступінь спотворення форми кривої напруги від струмів відповідних електроприймачів;
- проаналізувати, який гармонійний склад струму характерний для різних електроприймачів.

2.6 Контрольні запитання

1. Чому напруга в електромережах стає несинусоїдальною?
2. Чому деякі електроприймачі називають нелінійними?
3. Які електроприймачі з нелінійною вольт-амперною характеристикою найбільш розповсюджені в системах електропостачання промислових підприємств?
4. Від чого залежить форма струму, який споживає електроприймач з нелінійною вольт-амперною характеристикою?
5. Чим відрізняється гармонійний склад фазного струму трифазного та однофазного вентильного перетворювача?
6. Які гармоніки струму електроприймачів з нелінійною вольт-амперною характеристикою мають найбільше значення, а які майже дорівнюють нулю?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

РЕЗОНАНСНІ ЯВИЩА ПРИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З НЕЛІНІЙНИМИ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧАМИ

Мета роботи: пересвідчитись у справедливості теоретичних положень щодо резонансних явищ в системах електропостачання.

3.1 Рекомендації для якісної підготовки студента до виконання роботи

1. Ознайомитися зі схемою лабораторної установки і теоретичними відомостями щодо резонансних явищ в системах електропостачання з нелінійними електроприймачами при компенсації реактивної потужності електроприймачів. При цьому рекомендується використовувати ці методичні вказівки або літературу [8, стор. 141-143].

2. При підготовці особливу увагу звернути:

- на послідовність дій при проведенні дослідів;
- на дії, що можуть викликати аварійний режим роботи устаткування.

3. Знати та розуміти:

- причини виникнення паралельного та послідовного резонансу в системах електропостачання при компенсації реактивної потужності електроприймачів;
- методи та засоби запобігання виникненню резонансних явищ;
- методику розрахунку умов виникнення резонансних явищ в системах електропостачання.

При підготовці слід пам'ятати, що знання студента з теорії та послідовності дій при проведенні дослідів обов'язково перевіряються викладачем перед виконанням роботи.

3.2 Короткі теоретичні відомості

Наявність в мережах конденсаторів для компенсації реактивній потужності, може привести до місцевих резонансів, які, у свою чергу, можуть викликати:

- збільшення струму вищих гармонік в конденсаторі і вихід їх з ладу;
- збільшення напруги вищих гармонік і вихід з ладу устаткування, що живиться від того ж вузла.

Паралельний резонанс виникає при наявності в мережі потужного джерела вищих гармонік струму та за умови коли реактивний опір БК на резонансній гармоніці співпадає з еквівалентним реактивним опором системи електропостачання.

Найбільш розповсюдженим випадком є виникнення паралельного резонансу у системі коли БК приєднана до тих же шин, до яких приєднано джерело вищих гармонік (рисунок 3.1).

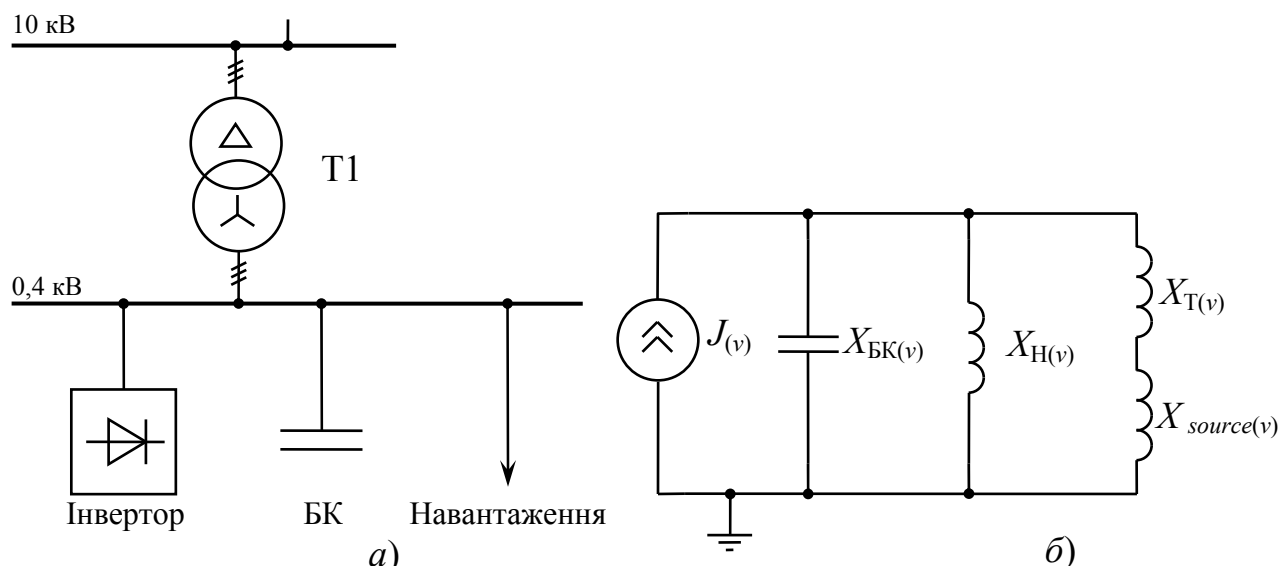


Рисунок 3.1 – Схема СЕП в якій може виникнути паралельний резонанс (а) та розрахункова схема заміщення такої системи (б)

При паралельному резонансі струми гармонік можуть збільшуватися в 10-15 разів тому такий резонанс ще отримав назву резонанс струмів.

Послідовний резонанс виникає за наявності спотворень напруги на шинах джерела живлення. На рисунку 3.2 наведена спрощена схема системи електропостачання в якій може виникнути послідовний резонанс та розрахункова схема такої системи.

На частотах вищих гармонік реактивний опір навантаження різко збільшується, а опір БК різко зменшується, тому в розрахунковій схемі опір навантаження може не враховуватися через його незначний вплив.

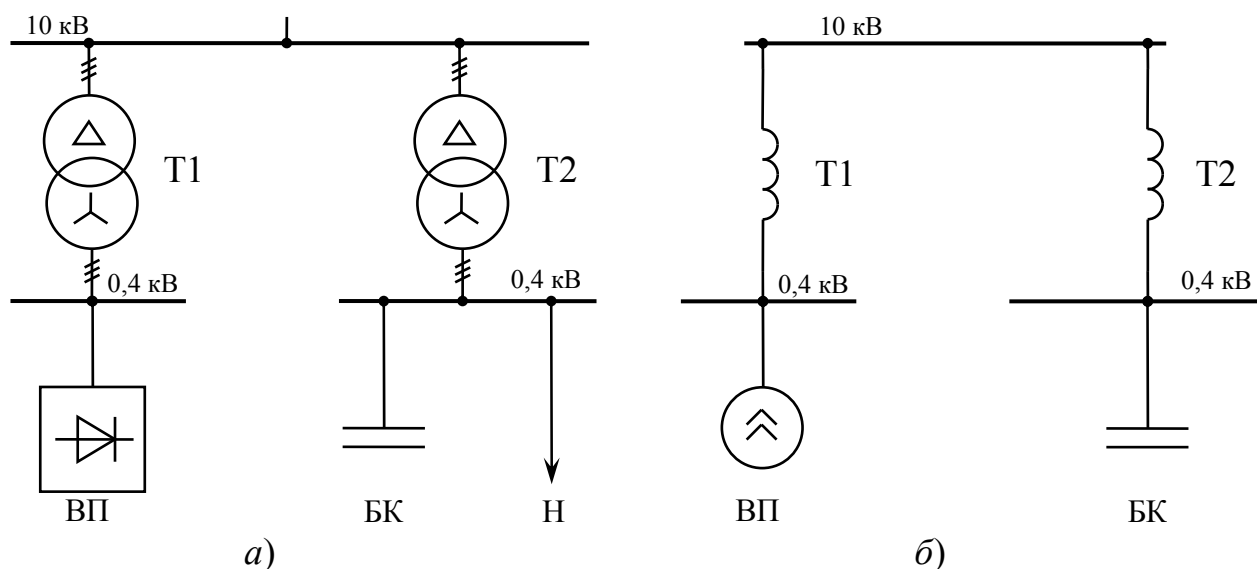


Рисунок 3.2 – Схема СЕП в якій може виникнути послідовний резонанс (а) та розрахункова схема такої системи (б)

У системі (рисунок 3.2) резонанс виникає між трансформатором Т2 та БК за умови рівності їх опорів на резонансній частоті. Такий резонанс ще називають

резонансом напруг, тому значення напруги резонансної гармоніки на шинах 0,4кВ може значно збільшитись.

Рекомендації. Кожного разу, коли в системі встановлені нелінійні навантаження (інвертори, ІБЖ, всі види випрямлячів і т.д.), слід проявляти обережність при розробці системи компенсації реактивної потужності.

Щоб уникнути паралельного або послідовного резонансу слід дотримуватися рекомендацій:

- при низькому рівні спотворень форми напруги ($K_U < 5\%$) слід встановлювати БК з захисним реактором;

- при більших рівнях несинусоїдальності напруги слід встановлювати резонансні фільтри (інша назва фільтрокомпенсуючі пристрої), що налаштовані на резонансні частоти згідно з рекомендаціями IEEE 519-1992.

Резонансний фільтр (РФ) у найпростішому випадку представляє собою послідовне з'єднання реактора та БК. Реактор в такому випадку розраховується виходячи з умов резонансу на частоті канонічної гармоніки (наприклад 5,7,11). РФ на частоті основної гармоніки має ємнісний характер та компенсує реактивну потужність, а на резонансній гармоніці РФ (в ідеальному випадку) має чисто активний опір обмоток реактора та шунтує резонансну гармоніку, тому такий пристрій часто називають фільтрокомпенсуючий пристрій (*англ. назва Shunt passive filter*). Більш детально теорія РФ викладена у теоретичних відомостях до лабораторної роботи №5.

Захисний реактор (ЗР) розраховується з умови розладу резонансної частоти нижче від найменшої значимої гармоніки (в більшості систем 5 гармоніка). Таким чином на резонансній частоті БК з ЗР буде мати індуктивний характер, що унеможливить виникнення резонансу. Тому ЗР отримав назву *захисний антирезонансний реактор (англ. назва PFC detuned filter)*.

Коефіцієнт частотного розладу, що вноситься дроселем:

$$p = \frac{X_L}{X_C} \cdot 100\% = \left(\frac{f}{f_{PE3}} \right)^2 \cdot 100\%,$$

а його, прийняті VDEW (Association of German Power Supply Companies) стандартні значення – 14%, 7%, 5,67%, що відповідають f_{PE3} – 135 Гц, 189 Гц, 210 Гц.

На рис. 3.3 наведена схема системи електропостачання при встановленій БК з ЗР та при встановленій РФ, що налаштовані на 5, 7 і 11 гармоніку. На рисунку також схематично показано розподіл струму ВГ у обох випадках.

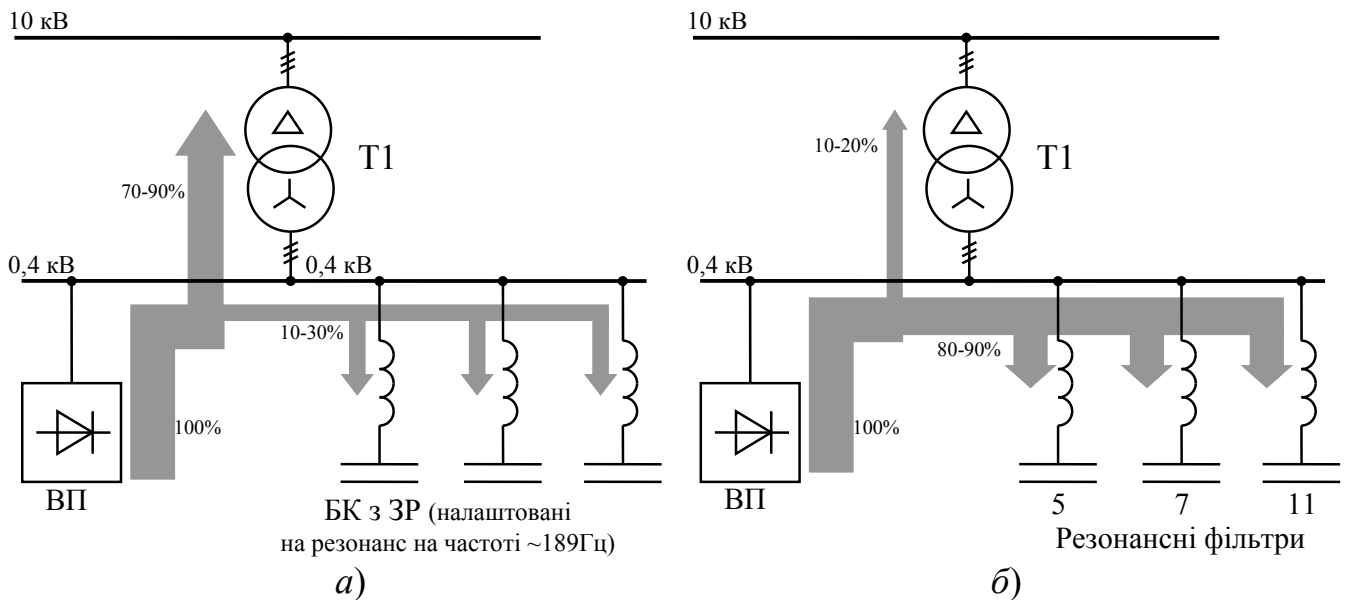


Рисунок 3.3 – Схема СЕП при встановленій БК з ЗР (а) та при встановленій РФ, що налаштовані на 5, 7 і 11 гармоніку (б)

3.3 Хід роботи

1. Отримати у викладача параметри схем (рисунок 3.1,3.2) та розрахувати при якій ємності БК підключених до шини 0,4кВ в системі виникнуть умови паралельного та послідовного резонансу.

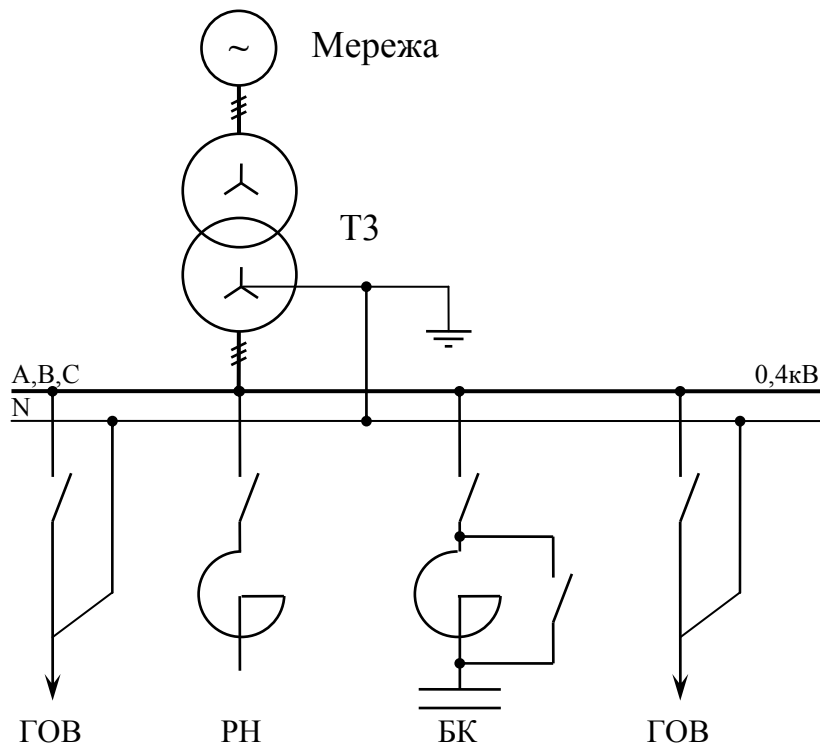


Рисунок 3.4 – Схема досліду

2. Зібрати схему (рисунок 3.1) та перевірити отримані результати. Увімкнути реактивне навантаження (РН), встановити необхідну ємність батареї конденсаторів

(БК). Занести до таблиці 3.1 діючі значення та гармонійний склад струмів і напруг. Зафіксувати осцилограми напруг та струмів.

Таблиця 3.1 – Результати вимірювань

№	Вимірювання	$U_{\partial}, \text{В}$ ($I_{\partial}, \text{А}$)	$U_v, \text{В}$ ($I_v, \text{А}$)							$K_U /$ $THD_U, \%$ ($THD_I, \%$)	
			1	3	5	7	9	11	13		15
	Напруга на шинах 0,4 кВ (за умови резонансу)										
	Струм БК										
	Струм фази силового трансформатору										

3. Зібрати схему (рисунок 3.2) та перевірити отримані результати. Діючі значення та гармонійний склад струмів і напруг слід занести до таблиці 3.1. Зафіксувати осцилограми напруг та струмів.

Таблиця 3.2 – Результати вимірювань

№	Вимірювання	$U_{\partial}, \text{В}$ ($I_{\partial}, \text{А}$)	$U_v, \text{В}$ ($I_v, \text{А}$)							$K_U /$ $THD_U, \%$ ($THD_I, \%$)	
			1	3	5	7	9	11	13		15
	Напруга на шинах 0,4 кВ										
	Струм БК										
	Струм фази силового трансформатору										

4. Повторити досліди за умови увімкненого захисного антирезонансного реактора та пересвідчитись у відсутності резонансних явищ. У звіт занести відповідні осцилограми.

3.4 Обробка результатів

У звіті привести осцилограми струмів та напруг та стовпчикові діаграми струмів усіх вимірювань.

3.5 Рекомендації до написання висновку

У висновку слід прокоментувати Ваші дії при виникненні резонансних явищ.

3.6 Контрольні запитання

1. Що таке паралельний та послідовний резонанс?
2. За яких умов виникає паралельний та послідовний резонанс?
3. Що таке захисний антирезонансний реактор для БК? За якими умовами розраховується його опір?
4. Що таке фільтрокомпенсуючий пристрій та чим він відрізняється від БК з захисним антирезонансним реактором?
5. Як розподіляються ВГ струму у системах електропостачання з фільтрокомпенсуючим пристроєм та з БК з захисним антирезонансним реактором?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

РОЗПОДІЛ ВИЩИХ ГАРМОНІК У ПРОВІДНИКАХ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ОБМОТКАХ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Мета роботи: дослідити розподіл вищих гармонік у провідниках системи електропостачання та обмотках силових трансформаторів (з різними схемами з'єднання обмоток) при симетричному та асиметричному нелінійному навантаженні.

4.1 Рекомендації для якісної підготовки студента до виконання роботи

1. Ознайомитися зі схемою лабораторної установки і теоретичними відомостями щодо розподілу вищих гармонік у провідниках трифазної системи з нульовим проводом.

2. При підготовці особливу увагу звернути:

- на послідовність дій при проведенні дослідів;
- на дії, що можуть викликати аварійний режим роботи устаткування.

3. Знати та розуміти:

- особливості вищих гармонік кратних трьом;
- як змінюється форма та гармонійний склад струму при проходженні через розподільні трансформатори з різними схемами з'єднання обмоток.

4.2 Короткі теоретичні відомості

В зв'язку з особливостями розподілу вищих гармонік в трифазній системі гармоніки струму та напруги умовно поділяють на гармоніки кратні трьом та не кратні трьом.

Як відомо трифазна система електропостачання використовує три фазні напруги зсунуті одна відносно одної на кут 120 градусів. Тому при симетричному розподілі лінійного навантаження струми фаз такої системи взаємно компенсуються в нульовій точці та не викликають струм у нульовому провіднику, а при наявності асиметрії в нульовому провіднику протікає лише струм небалансу, який значно менше фазного струму.

Це твердження не виконується при встановленні в мережі однофазних електроприймачів з нелінійною вольт-амперною характеристикою. Більш того в деяких випадках (наприклад при значній частці нелінійних навантажень в мережі) струм в нульовому провіднику може перевищувати фазний струм навіть при симетричному розподілі навантажень між фазами. Цей ефект виникає внаслідок наявності в гармонійному складі фазного струму, що споживають однофазні нелінійні електроприймачі, гармонік, які кратні трьом.

Розглянемо принцип утворення струму в нульовому провіднику на прикладі третьої гармоніки. Третя гармоніка має в тричі більшу частоту ніж основна гармоніка тому на періоді основної частоти третя гармоніка буде мати три періоди. Якщо рахувати в кутах для основної частоти, то період третьої гармоніки буде складати 120 градусів. Тому третя гармоніка не взаємно компенсується в нульовій точці, а складається та стає в нульовому провіднику в тричі більшою. Це наглядно видно з рисунку 4.1. Тому струми гармоніки кратні трьом утворюють струми нульової послідовності.

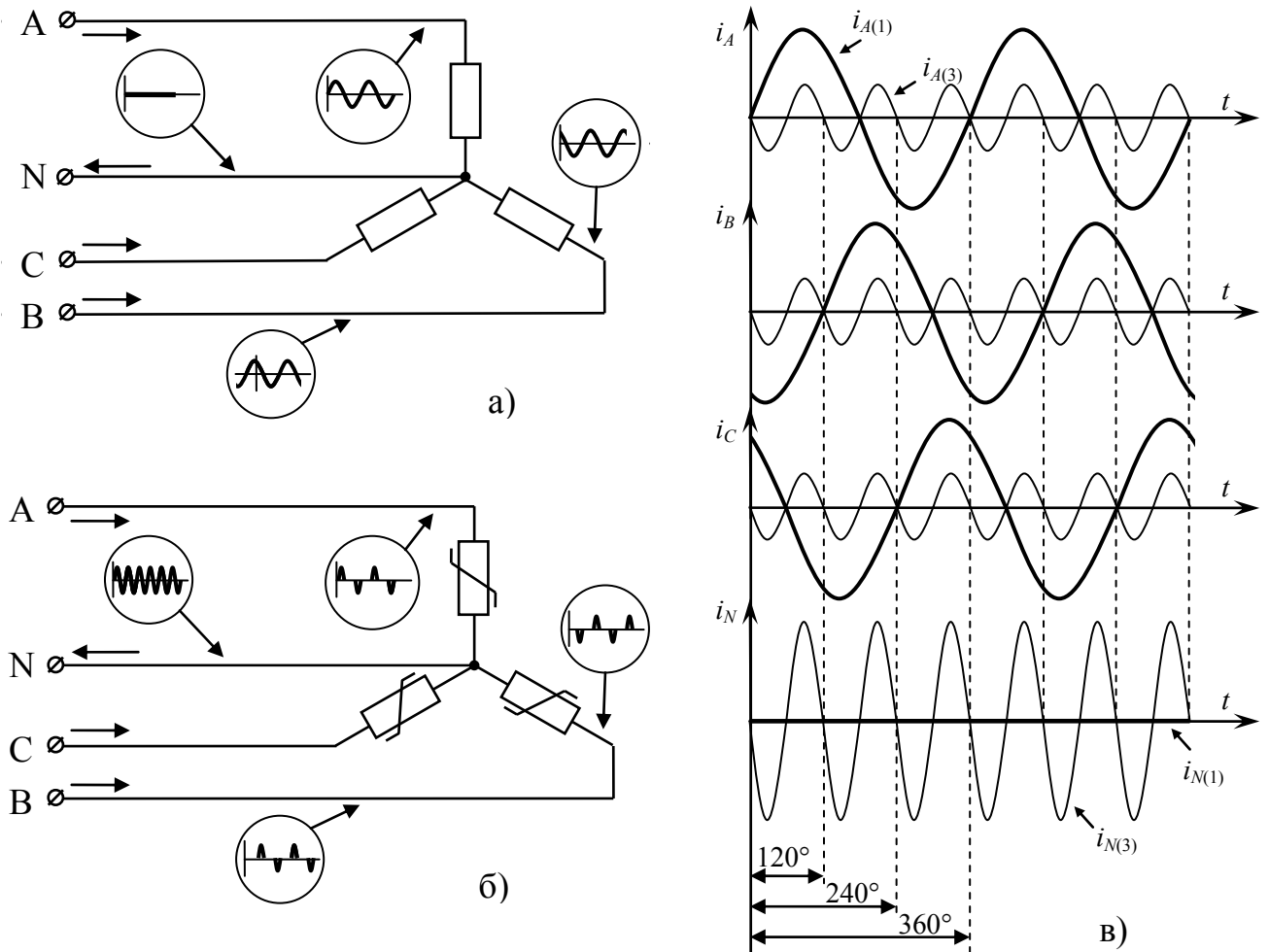


Рисунок 4.1 – Схеми заміщення симетричного лінійного (а) і нелінійного (б) навантаження з осцилограмами струму в гілках та осцилограми першої та третьої гармонік струму в гілках схеми заміщення при нелінійному навантаженні (в)

Зазначений вище принцип виконується для усіх гармонік кратних трьом. Гармоніки не кратні трьом зсунуті відносно одна одного на 120° градусів та, при умові симетрично розподіленого між фазами навантаження, взаємно компенсуються в нульовій точці (у нульовий провідник не потрапляють). Наявність в нульовому провіднику струмів вищих гармонік не кратних трьом вказує на асиметрію струмів гармонік в фазах мережі.

Слід запам'ятати, що гармоніки кратні трьом протікають не лише в фазних провідниках мережі але й у нульовому провіднику тому створюють більше падіння напруги ніж інші гармоніки.

Струми нульової послідовності, що утворюються гармоніками кратними трьом, не потрапляють до провідників первинної напруги трансформаторів, які працюють в режимі ізольованої нейтралі, тому форма струму в провідниках первинної напруги змінюється¹⁾. Разом з цим, змінюється форма струму в

¹⁾ Гармоніки кратними трьом потрапляють до провідників первинної напруги трансформаторів лише частково за умови асиметрії навантажень в фазах.

трансформаторах, обмотки яких з'єднані таким чином, що зсувають вторинну напругу відносно первинної. На рисунках 4.2 та 4.3 зображені однолінійні схеми електричних з'єднань трансформаторів з різними схемами з'єднань обмоток та осцилограмами струму у фазах.

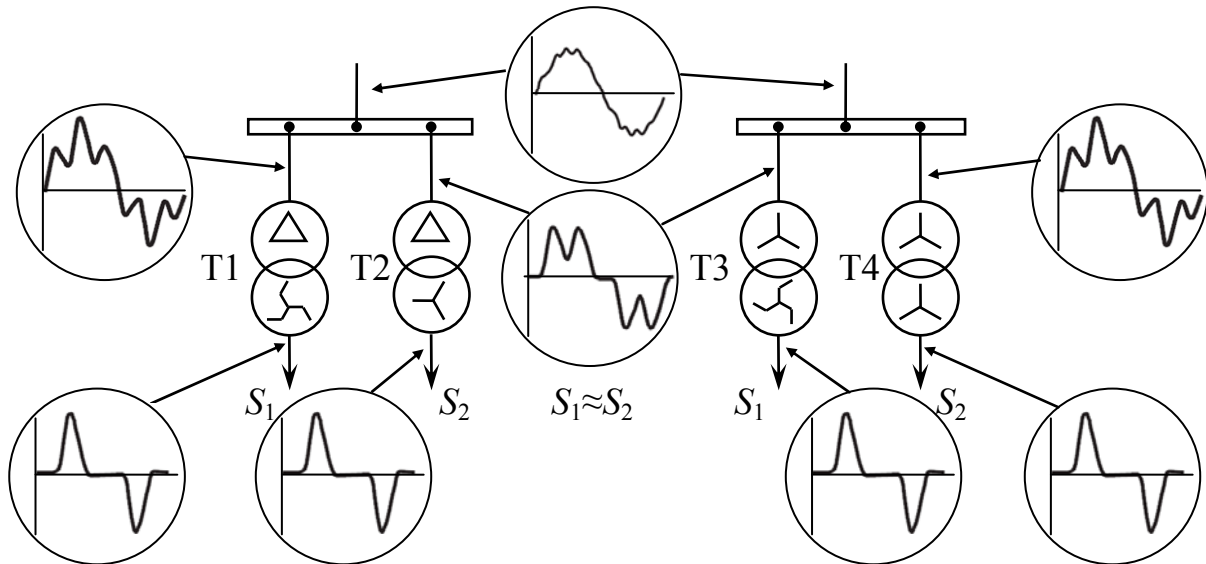


Рисунок 4.2 – Однолінійні схеми електричних з'єднань трансформаторів з різними схемами з'єднань обмоток з осцилограмами струму у фазах при умові живлення побутових та офісних електроприймачів

Трансформатори T1 та T4 не зсувають вторинну напругу відносно первинної, але за рахунок того, що струми гармонік кратних трьом не потрапляють до провідників первинної напруги, форма струму змінюється. Трансформатори T2 та T3 зсувають вторинну напругу відносно первинної на 30 градусів, тому форма струму змінюється інакше.

Якщо трансформатор, що зсуває напругу на 30 градусів (T2 та T3), та трансформатор, що не зсуває напругу (T1 та T4), живляться від однієї секції шин, тоді за умови однофазового навантаження гармоніки струму (5, 7, 17, 19 та інші) двох трансформаторів частково взаємокомпенсуються, а сумарний струм стає майже синусоїдальний. Взаємна компенсація гармонік виникає через те, що відносно гармоніки з номером ν кут зсуву розраховується за формулою $\nu \cdot 30$. Тому, для 5 п'ятої гармоніки кут дорівнює 150, а для 7 – 210, що досить близько до кута повної компенсації 180.

В сумарний струм найвагоміший внесок вносять гармоніки 11, 13, 23, 25. Для їх взаємної компенсації необхідно використовувати такі трансформатори T1 та T2, один з яких зсуває напругу на 15 градусів. Але такі трансформатори досить дорогі, що стримує їх використання у електричних мережах.

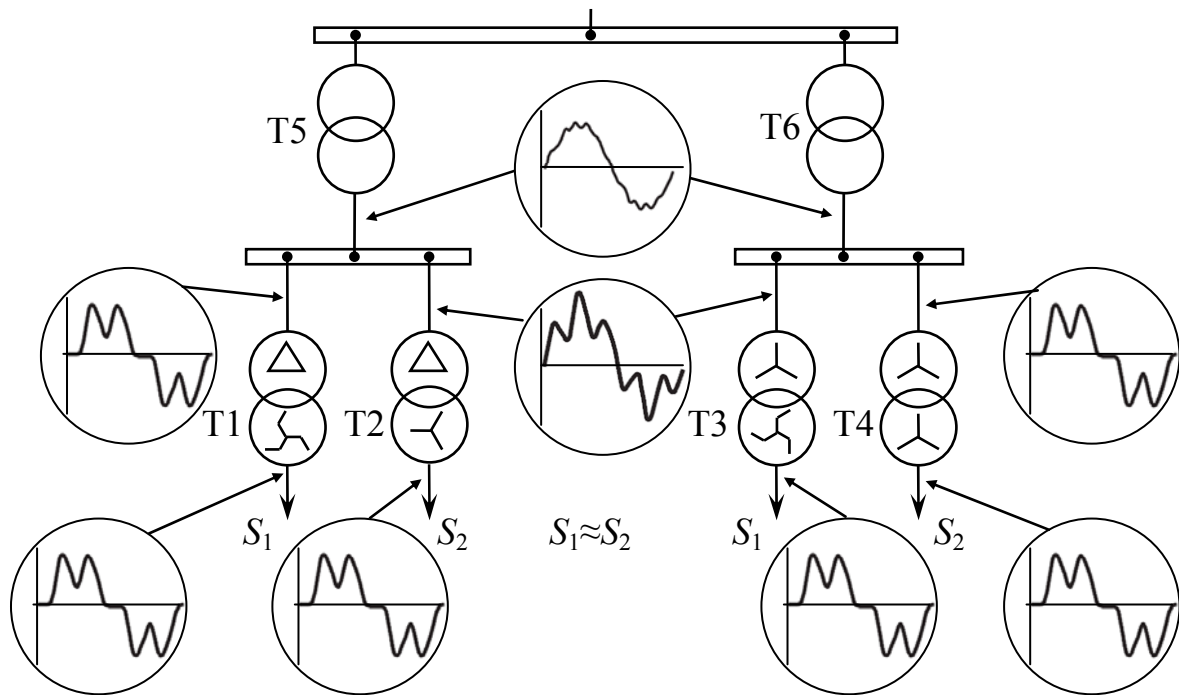


Рисунок 4.3 – Однолінійні схеми електричних з'єднань трансформаторів з різними схемами з'єднань обмоток з осцилограмами струму у фазах при умові живлення промислових електроприймачів

4.3 Хід роботи

1. Дослідити розподіл вищих гармонік у провідниках системи електропостачання та обмотках силових трансформаторів (з різними схемами з'єднання обмоток) при симетричному та асиметричному нелінійному навантаженні. Для цього слід зібрати схему, що зображена на рисунку 4.4.

2. За допомогою перемикачів S2, S3 налаштувати схему з'єднання обмоток трансформатору T1 – У/Ун-0 або Д/Ун-0, T2 – У/Зн-0 або Д/Зн-0 (за вказівкою викладача). При цьому слід пам'ятати, що зміна схеми з'єднання обмоток трансформатора при увімкненому живленні може призвести до аварійного режиму роботи устаткування та виходу його з ладу.

3. Налаштувати вимірювальний прилад Aflex 6300 на вимірювання гармонійного складу струму та напруги.

4. Вимикачем S1 увімкнути живлення вторинним колам.

5. Увімкнути живлення зібраної схеми. Живлення може виконуватися від напруги ~380 В та ~220 В. При виборі живлення слід знати, що для схем з'єднання обмоток трансформаторів T1 та T2 Д/Ун-0 та Д/Зн-0 максимальна лінійна напруга складає 220 В, а для схем з'єднання обмоток трансформатору T1 та T2 У/Ун-0 та У/Зн-0 максимальна лінійна напруга складає 380 В. Неправильний вибір напруги живлення може призвести до виходу устаткування з ладу!

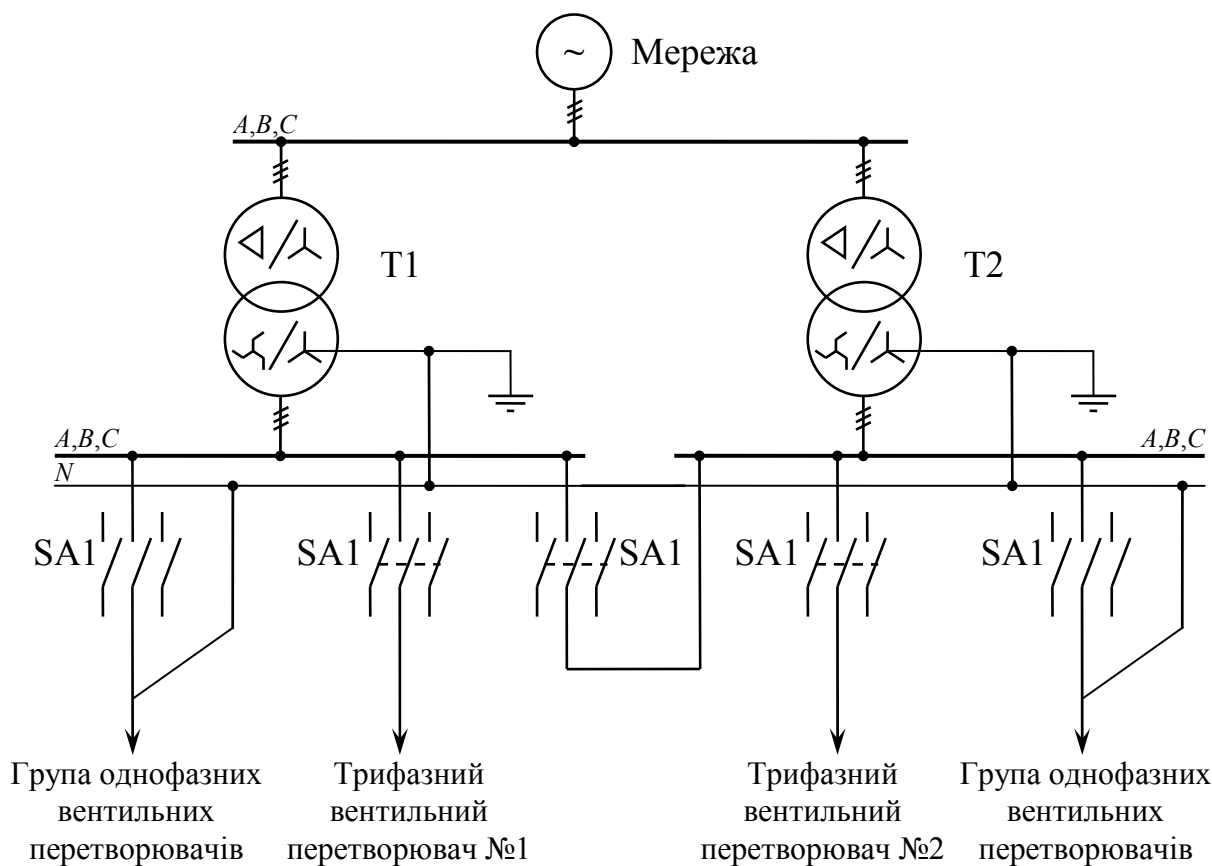


Рисунок 4.4 – Схема стенду

6. Включити групу однофазний вентильних перетворювачів трансформатору T1 для імітування симетричного нелінійного навантаження.

Виміряти:

– діюче значення I_{δ} , форму та гармонійний склад струму $I_{(v)}$ у фазних та нульовому провідниках навантаження і коефіцієнт спотворення кривої струму THD_I ;

– діюче значення U_{δ} , форму та гармонійний склад напруги $U_{(v)}$ і коефіцієнт спотворення кривої напруги K_U (THD_U) на первинній та вторинній обмотці трансформатору.

– діюче значення, форму та гармонійний склад струму у фазних провідниках з яких живиться трансформатор (достатньо однієї фази).

Результати вимірювань занести до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати вимірювань

№	Параметр, який вимірюється	$U_{\delta}, \text{В}$ ($I_{\delta}, \text{А}$)	$U_{(v)}, \text{В}$ ($I_{(v)}, \text{А}$)							$K_U / THD_U, \%$ ($THD_I, \%$)	
			1	3	5	7	9	11	13		15
1	Струм фази А НН T1										
2	Напруга фази А НН T1										
	...										

7. Повторити дослід за умови несиметричного навантаження. Для цього увімкнути групу однофазний випрямлячів (вимикачі S2-S3) та вимкнути трифазний випрямляч (вимикач S5). Повторити вимірювання відповідно до пункту 6.

8. Повторити дослід за умови живлення групи однофазних вентильних перетворювачів від трансформатора з іншою схемою з'єднання вторинних обмоток. Повторити вимірювання пункту 6 (достатньо однієї фази та нульового провідника).

9. Одночасно включити трансформатори Т1 та Т2 на однакове нелінійне навантаження та виміряти діюче значення, форму і гармонійний склад струми, що споживаються з мережі двома трансформаторами (достатньо однієї фази). Результати занести до таблиці 4.2. Повторити дослід при різних схемах з'єднання вторинних обмоток трансформаторів.

Таблиця 4.2 – Результати вимірювань

№	Схеми з'єднань обмоток трансформаторів, які використовуються в досліді	I_D, A	$I_{(v)}, A$							$THD_I, \%$	
			1	3	5	7	9	11	13		15
1	T1 – У/У _Н -0, T2 – У/У _Н -0										
2	T1 – У/У _Н -0, T2 – У/З _Н -11										
3	T1 – Д/У _Н -11, T2 – Д/У _Н -11										
4	T1 – Д/У _Н -11, T2 – Д/З _Н -0										

4.4 Обробка результатів

1. За результатами пункту 6:

а) побудувати стовпчикові діаграми вимірних вищих гармонік струму у фазних провідниках вторинної напруги (повинні міститися на одному рисунку і мати вигляд, рисунок 4.5).

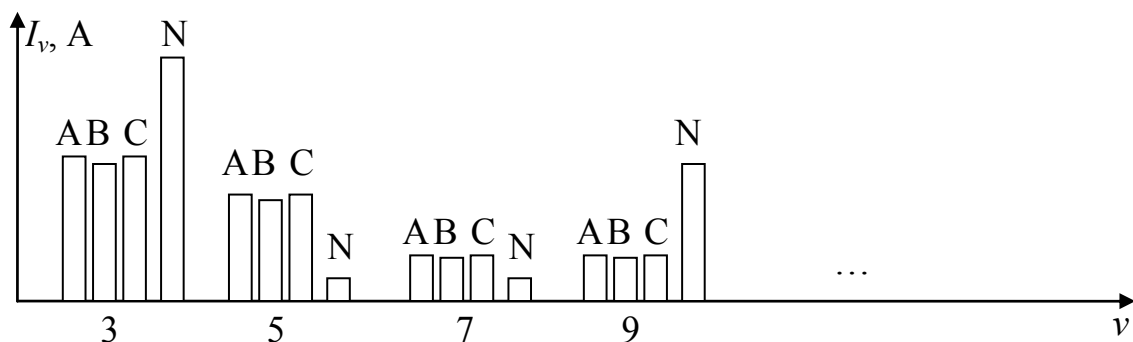


Рисунок 4.5 – Приблизний вигляд стовпчикової діаграми вищих гармонік струму у провідниках навантаження

Проаналізувати, як відрізняється гармонійний склад струму в фазних та нульовому провіднику. Пояснити чому це відбувається.

б) на одному рисунку привести форми струмів у провідниках ВН та НН трансформатора Т1;

в) для того, щоб проаналізувати як змінюється гармонійний склад струму, побудувати на одному рисунку стовпчикові діаграми вимірних вищих гармонік струму у ВН та НН трансформатора Т1.

Проаналізувати, як змінюється гармонійний склад струму у провідниках первинної та вторинної напруги. Пояснити чому це відбувається;

д) поряд побудувати форми та стовпчикові діаграми вимірних напруг на вторинних обмотках;

Проаналізувати, які гармоніки найбільше впливають на спотворення форми напруги.

2. За результатами пункту 8 проаналізувати причини значно різних в значеннях вищих гармонік напруги на вторинних обмотках трансформаторів з різними схемами з'єднань обмоток. Виходячи з отриманих результатів, зазначити чому, на Ваш погляд, рекомендації документа ДБН В. 2.5-23-2010 «Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення», який рекомендує застосовувати лише трансформатори зі схемами з'єднань обмоток «зірка – зигзаг з нулем» та «трикутник-зірка з нулем», є необхідними.

3. За результатами пункту 9 побудувати стовпчикові діаграми вимірних вищих гармонік струму у фазних провідниках (усі досліді пункту 9 повинні міститися на одному рисунку).

4.5 Рекомендації до написання висновку

У висновку надати характеристику перевагам та недолікам трансформаторів з різними схемами з'єднань обмоток. Надати рекомендації до їх спільного використання.

4.6 Контрольні запитання

1. Чому в енергетиці гармоніки умовно поділяють на гармоніки кратні та не кратні трьом?
2. Як змінюється гармонійний склад струму при проходженні через трансформатори з різними схемами з'єднань обмоток? Чому відбувається зміна гармонійного складу?
3. Які Ви можете надати рекомендації до спільного застосування трансформаторів з різними схемами з'єднання обмоток?
4. Які гармоніки найбільше впливають на спотворення форми кривої напруги?
5. Які гармоніки називають гармоніками нульової послідовності? Чому?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 ФІЛЬТРАЦІЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК СТРУМУ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Мета роботи: закріплення на практиці знань про електромагнітні та енергетичні процеси, які протікають в системі електропостачання загального призначення при фільтрації вищих гармонік струму за допомогою фільтрокоректуючих пристроїв (ФКП) та фільтрів струмів нульової послідовності (ФСНП).

5.1 Рекомендації для якісної підготовки студента до виконання роботи

1. Ознайомитися зі схемою лабораторної установки і теоретичними відомостями щодо фільтрації вищих гармонік у системах електропостачання. При цьому рекомендується використовувати не тільки ці методичні вказівки, але й літературу [6, стор. 87-97] та [5, стор. 143].

2. При підготовці особливу увагу звернути:

- на послідовність дій при проведенні дослідів;
- на дії, що можуть викликати аварійний режим роботи устаткування.

3. Знати та розуміти:

- принцип дії та різновиди резонансних фільтрів;
- принцип дії та різновиди фільтрів струмів нульової послідовності.

При підготовці слід пам'ятати, що знання студента з теорії та послідовності дій при проведенні дослідів обов'язково перевіряються викладачем перед виконанням роботи.

5.2 Короткі теоретичні відомості

Електроприймачі з нелінійною вольт-амперною характеристикою споживають струм, форма кривої якого відрізняється від синусоїдальної. А протікання такого струму по елементах електричної мережі створює на них падіння напруги, відмінне від синусоїдального, це і є причиною спотворення синусоїдальної форми кривою напруги.

Основною причиною спотворення синусоїдальної форми кривої напруги є падіння напруги на елементах електричної мережі від протікання несинусоїдального струму. Тому для зменшення несинусоїдальності напруги використовують різноманітні фільтри активного та пасивного типу, які шунтують гармоніки струму та не допускають протікання гармонік вверх до джерела.

Найбільшій розповсюженості серед пасивних фільтрів набули резонансні фільтри (РФ) (рисунок 5.1).

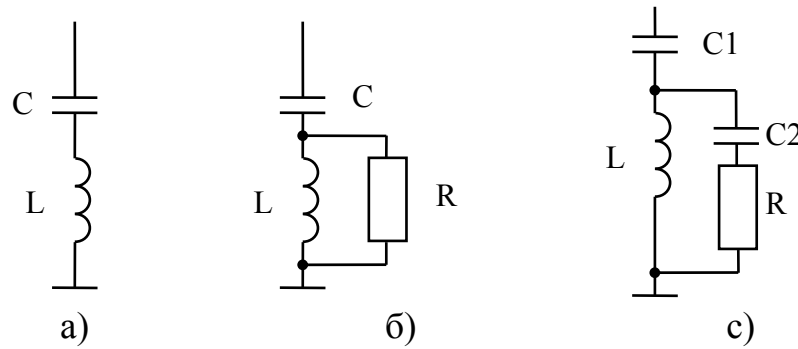


Рисунок 5.1 – Схеми резонансних фільтрів

Їх часто називають фільтрокомпенсуючими пристроями. Таку назву вони отримали завдяки своїй здатності компенсувати реактивну складову струму та фільтрувати гармоніку (чи гармоніки) струму, на яку вони налаштовані.

Режекторні фільтри (рисунок 5.1 (а)), їх ще називають фільтрами першого порядку, є вузкосмуговими, тобто налаштовуються лише на одну гармоніку. Вони застосовуються для шунтування однієї гармоніки, та мають обмеження при використанні для шунтування інтергармонік.

Модуль опору (імпеданс) фільтра визначається за виразом:

$$Z = R + j \cdot (X_L - X_C),$$

де R – активний опір реактора, що виникає завдяки втратам в обмотках та осерді реактора;

X_L – реактивний опір реактора, $X_L = \omega \cdot L$;

X_C – реактивний опір батареї конденсаторів, $X_C = 1/(\omega \cdot C)$.

Добротність контуру Q визначається виразом

$$Q = \omega \cdot L / R = X_L / R.$$

Типове значення добротності фільтра при частоті 50Гц, складає 30-50.

Резонансна частота фільтру розраховується за формулою

$$\omega_p = 1/(L \cdot C)^{1/2}.$$

Демпфуючий фільтр (фільтр другого порядку) складається з конденсатора і реактора, паралельно якому підключений активний опір (рисунок 5.1 (б)). На рисунку 5.2 приведені частотні характеристики повного опору демпфуючого фільтру при різних значеннях активного опору. З рисунку видно, що демпфуючий фільтр дозволяє розширити смугу пропускання вищих гармонік, завдяки чому для досягнення допустимого рівня несинусоїдальності напруги потрібна установка меншої кількості фільтрів, в порівнянні з установкою фільтрів першого порядку. Цей фільтр використовується для фільтрації широкого спектру гармонік, а в більшості випадків саме для фільтрації інтергармонік.

Складний фільтр (фільтру третього порядку) має дві резонансні частоти, одна з яких відповідає послідовному резонансу, інша – паралельному, що дозволяє виконувати фільтрацію в широкому діапазоні частот, як менших, так і більших по відношенню до частоти основної гармоніки. На рисунку 5.2 (б) наведений приклад

частотної характеристики модулю повного опору складного фільтру, що ілюструє ефективність його використання.

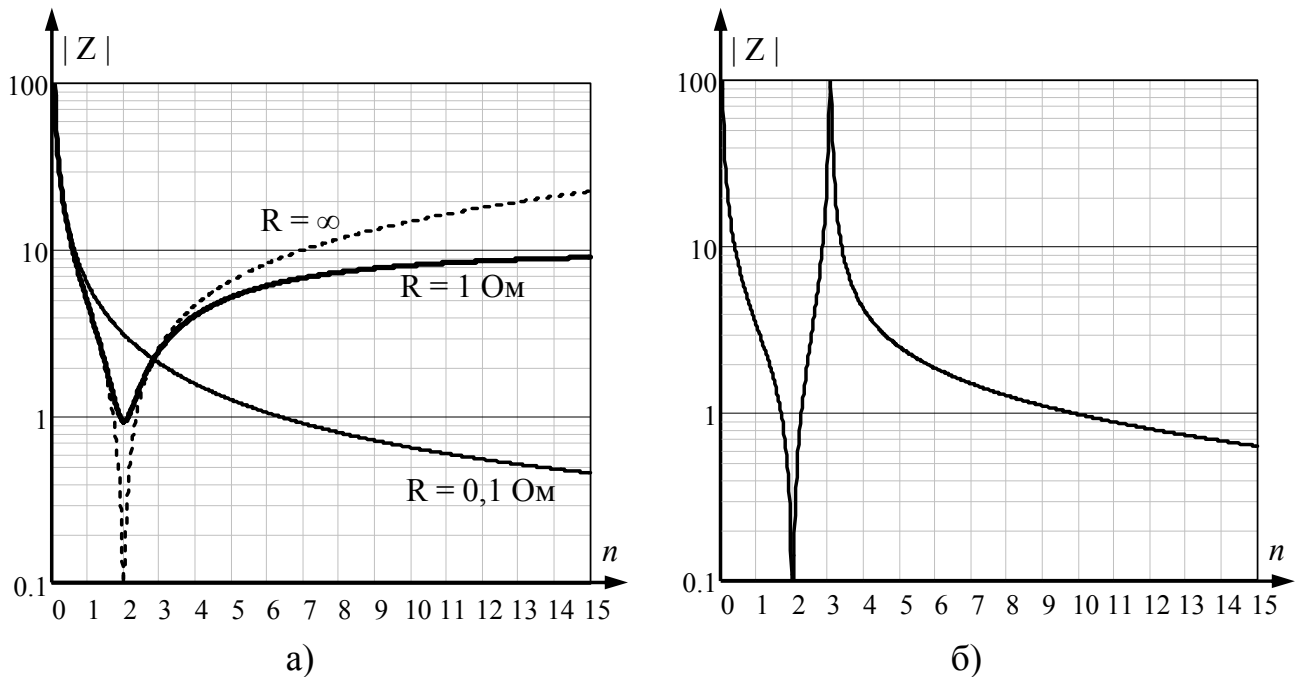


Рисунок 5.2 – Частотні характеристики модулю повного опору демпфуючого фільтру при різних значеннях активного опору (а) та фільтру третього порядку (б)

Розподіл гармонік в СЕП з РФ наглядно зображено на рис. 3.3,б.

На практиці при розробці та встановленні резонансних фільтрів слід враховувати наступні аспекти [6]:

- Налаштування. При налаштуванні фільтр слід налаштовувати на резонансній частоті дещо нижчі, ніж частоти відповідних гармонік. Це необхідно для збереження їх ефективності при старінні конденсаторів в батареї, що супроводжується зменшенням ємності та збільшенням резонансної частоти фільтра. Зазвичай для фільтра 5-ї гармоніки зсув частоти приймають 4,85 Гц, для 7-ї – 6,7 Гц, для 11-ї – 10,6 Гц.

- Включення. В періоди незначного навантаження мережі для виключення ризику збільшення напруги, слід передбачити можливість вимкнення частини фільтрів.

- Розміщення. Фільтри слід розміщувати якнайближче до нелінійного навантаження.

- Вибір. Гранично допустимі значення струму в реакторі та напруги на батареї конденсаторів повинні обиратися з врахуванням суми основної та гармонійних компоненті струму та напруги в фільтрі.

Для фільтрації гармонік струму також застосовуються автотрансформаторні ФСНП. Найрозповсюджені схеми фільтрів приведені на рисунку 5.3.

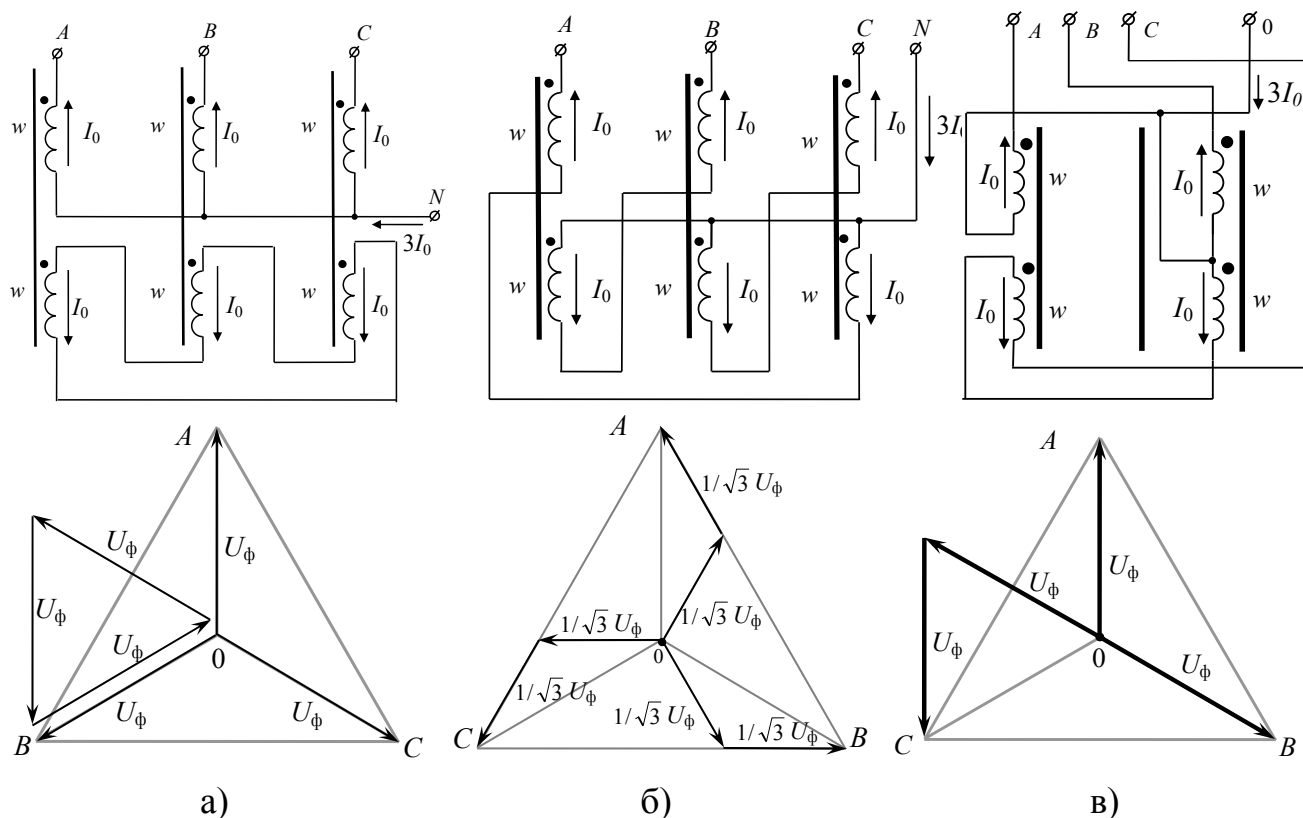


Рисунок 5.3 – Схеми та векторні діаграми напруг на обмотках ФСНП типів (а) зірка-трикутник, (б) зигзаг, (в) частковий зигзаг

Принцип дії ФСНП заснований не на резонансних явищах, а на спеціальній конструкції автотрансформатора. Обмотки такого автотрансформатора з'єднані таким чином, щоб забезпечити зустрічне їх з'єднання відносно струмів нульової послідовності [9]. Інакше кажучи обмотки автотрансформатора з'єднані таким чином, щоб струм нульової послідовності, що протікає по обмоткам, не створював магнітного потоку в магнітопроводі, а струми прямої та зворотної послідовності, навпаки, створювали магнітний потік. При цьому опір фільтру струмам нульової послідовності майже нульовий (приблизно дорівнює активному опору обмотки, $\sim 10 \div 20 \text{ мОм}$), а опір струмам прямої та зворотної послідовності на 5÷8 порядків більше (дорівнює індуктивному опору обмоток).

На рисунку 5.4 зображена спрощена схема системи електропостачання без ФСНП та при його ввімкненні в мережу. На рисунку також наглядно показано розповсюдження вищих гармонік струму у провідниках мережі та обмотках трансформатора за обох умов. Слід розуміти, що при включенні ФСНП шунтує усі гармоніки, які утворюють нульову послідовність. Це призводить до зменшення напруги цих гармонік.

Нульову послідовність утворюють гармоніки кратні трьом (3, 9, 15 та інші) та несиметричні складові інших гармонік зокрема основної гармоніки. Тому даний пристрій також дозволяє зменшувати несиметрію напруг. Однак він зменшує лише складову напруги нульової послідовності.

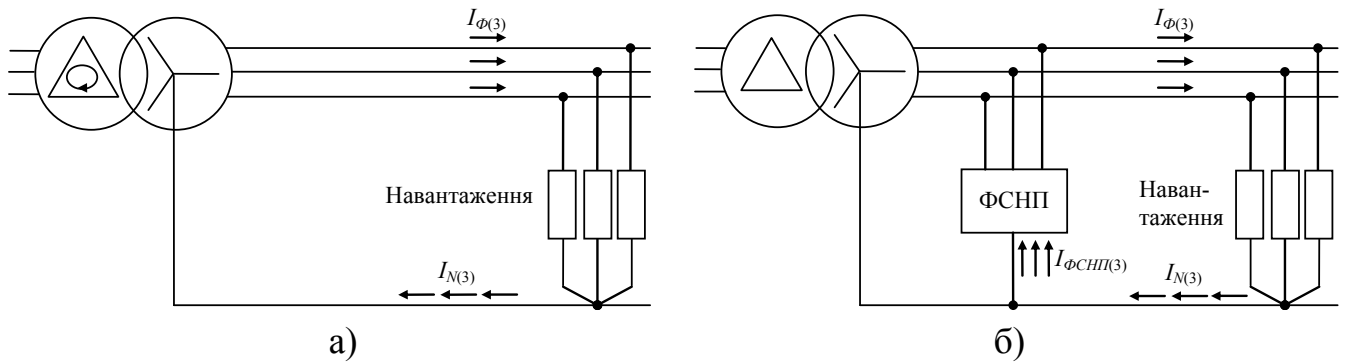


Рисунок 5.4 – Схема без ФСНП (а) та при його увімкненні ФСНП (б) з зображенням струмів гармонік, які кратні трьом

5.3 Хід роботи

1. Зібрати схему, що зображена на рисунку 5.5.

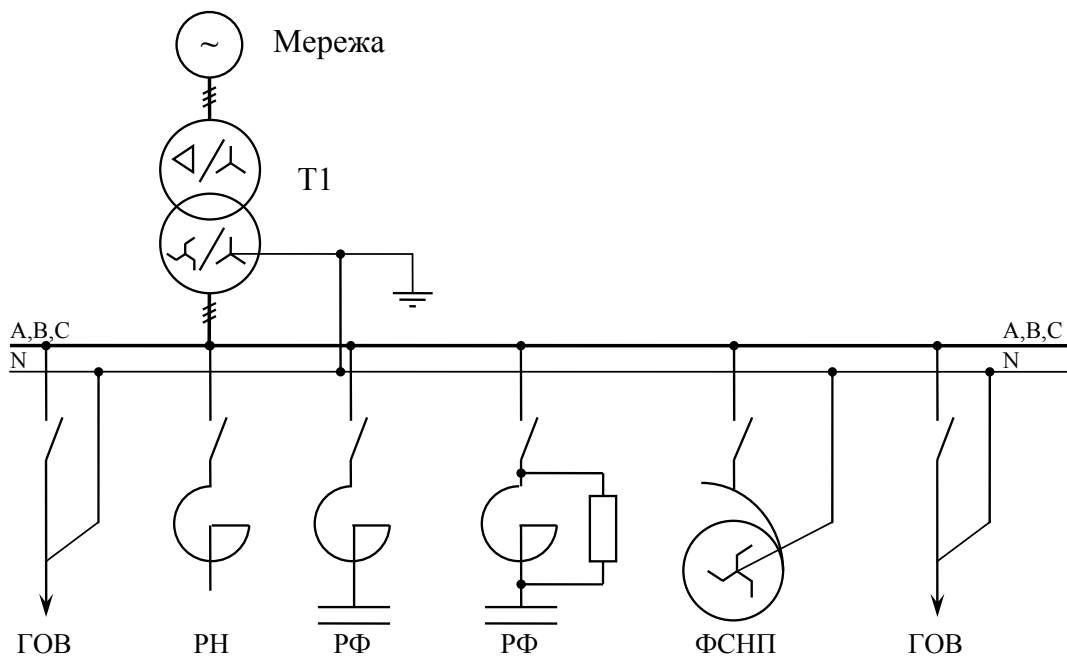


Рисунок 5.5 – Схема, за якою буде виконуватися дослід

2. За допомогою перемикача S2 встановити групу з'єднань обмоток трансформатора Т1 – У/Ун-0 або Д/Ун-0 або У/Зн-0 або Д/Зн-0 (за вказівкою викладача). При цьому слід пам'ятати, що зміна схеми з'єднань обмоток трансформатора при увімкненому живленні може призвести до аварійного режиму роботи устаткування та виходу його з ладу.

3. Увімкнути групу однофазний випрямлячів та виміряти:

- форму і гармонійний склад струму, коефіцієнт спотворення кривої струму (THD_I) у фазних та нульовому провідниках первинної та вторинної напруги трансформатору Т1;

- форму та гармонійний склад напруги і коефіцієнт спотворення кривої напруги (K_U або THD_U) на затискачах навантаження. Результати занести до таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати вимірювань

№	Параметр, який вимірюється	$U_{\delta}, \text{В}$ ($I_{\delta}, \text{А}$)	$U_{\nu}, \text{В}$ ($I_{\nu}, \text{А}$)							$K_U /$ $THD_U, \%$ ($THD_I, \%$)	
			1	3	5	7	9	11	13		15
	Напруга у фазі А на шині НН										
	Струм фази А вторинної напруги трансформатору										
	...										
	Струм в нульовому провіднику трансформатору										
	Напруга у фазі А на шині ВН										
	Струм фази А первинної напруги трансформатору										
	...										

Позначення використані в таблиці: U_{δ} , I_{δ} – діюче значення напруги та струму; U_{ν} , I_{ν} – діюче значення ν -ї гармоніки напруги та струму; $K_U / THD_U, \%$ ($THD_I, \%$) – коефіцієнт спотворення форми напруги (струму).

4. Ввімкнути ФСНП (вимикач SA8) та виміряти:

– форму і гармонійний склад струму, коефіцієнт спотворення кривої струму THD_I у фазних та нульовому провідниках трансформатору, навантаження та ФСНП, а також у провідниках високої напруги;

– форму та гармонійний склад напруги і коефіцієнт спотворення кривої напруги K_U на затискачах навантаження. Результати занести до таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Результати вимірювань

№	Параметр, який вимірюється	$U_{\delta}, \text{В}$ ($I_{\delta}, \text{А}$)	$U_{\nu}, \text{В}$ ($I_{\nu}, \text{А}$)							$K_U /$ $THD_U, \%$ ($THD_I, \%$)	
			1	3	5	7	9	11	13		15
	Напруга у фазі А на шині НН										
	Струм фази А вторинної напруги трансформатору										
	Струм фази А навантаження										
	Струм фази А ФСНП										
	...										
	Струм в нульовому провіднику трансформатору										
	Струм в нульовому провіднику навантаження										
	Струм в нульовому провіднику ФСНП										
	Напруга у фазі А на шині ВН										
	Струм фази А первинної напруги трансформатору										
	...										

5. Вимкнути ФСНП (вимикач SA8) та увімкнути РФ (вимикач SA5). Цей дослід дозволяється виконувати в однофазному режимі.

Під час досліду слід виміряти:

– форму і гармонійний склад струму, коефіцієнт спотворення кривої струму THD_I у фазних (достатньо однієї фази) та нульовому провідниках трансформатора, навантаження та РФ;

– форму та гармонійний склад напруги і коефіцієнт спотворення кривої напруги K_U на затискачах навантаження. Результати занести до таблиці за аналогією з таблицею 5.2.

5.4 Обробка результатів

Побудувати стовпчикові діаграми вимірних гармонік струмів у фазних та нульових провідниках трансформатора і фільтру таким чином, щоб на одному рисунку містилися результати дослідів без фільтрів та з фільтром. Приклад стовпчикової діаграми значень амплітуд вищих гармонік струму у фазному провіднику зображено на рисунку 5.6. Поясніть зміну значень кожної гармоніки.

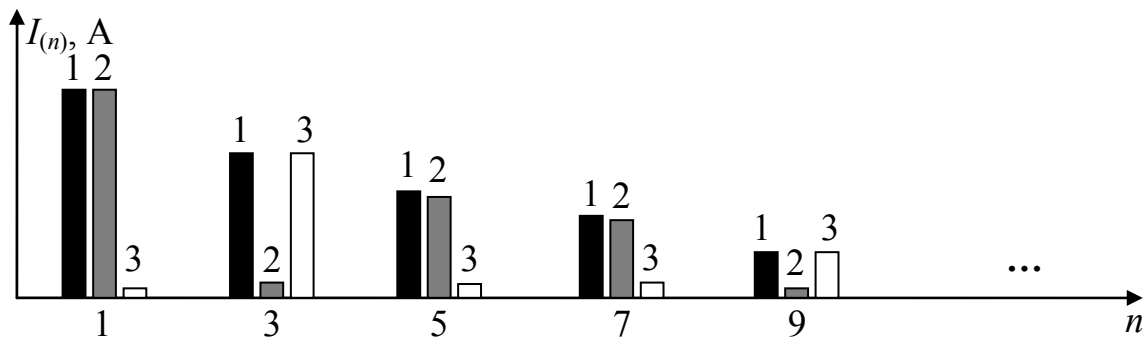


Рисунок 5.6 – Приблизний вигляд стовпчикової діаграми, де зображені діючі значення n -ї гармоніки струму 1 – трансформатора при вимкненому фільтрі; 2 – трансформатора при увімкненому фільтрі; 3 – фільтру

Побудувати стовпчикові діаграми вимірних гармонік напруг на шинах первинної та вторинної напруги таким чином, щоб на одному рисунку містилися результати дослідів без фільтру та з фільтром.

На одному рисунку побудувати стовпчикові діаграми вимірних гармонік струмів у фазних та нульових провідниках навантаження при вимкненому фільтрі та при увімкненому фільтрі.

5.5 Рекомендації до написання висновку

У висновку проаналізувати:

- чому фільтри, що шунтують струми гармонік, покращують якість напруги;
- на значення яких гармонік напруги найбільше впливає ФСНП;
- як змінюється струм нелінійного навантаження при включенні фільтрів.

5.6 Контрольні запитання

1. Які пасивні фільтри гармонік струму Ви знаєте?
2. На чому заснований принцип дії фільтрокомпенсуючого пристрою?
3. Які аспекти застосування фільтрокомпенсуючого пристрою Ви знаєте?
4. На чому заснований принцип дії фільтра струмів нульової послідовності?
5. Чому фільтрокомпенсуючі пристрої та фільтри струмів нульової послідовності зменшують гармоніки напруги?
6. Чому амплітудні значення емісії гармонік струму нелінійного навантаження збільшуються при включенні фільтрів?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

ЗНИЖЕННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК СТРУМУ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ФАЗОЗСУВНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Мета роботи: закріпити на практиці знання про електромагнітні процеси, які протікають в системі електропостачання при взаємокомпенсації вищих гармонік струму за рахунок використання фазозсувних автотрансформаторів.

6.1 Рекомендації для якісної підготовки студента до виконання роботи

1. Ознайомитися зі схемою лабораторної установки і теоретичними відомостями щодо взаємокомпенсації вищих гармонік струму за рахунок використання фазозсувних трансформаторів. При цьому рекомендується використовувати не тільки ці методичні вказівки, але й літературу [6, стор. 121-123], [6, стор. 121-123].

2. Знати та розуміти:

- схему та принцип дії трифазного випрямляча за схемою Ларіонова;
- принцип дії автотрансформаторного пристрою гексагонального типу;
- що розуміється під терміном випрямляч зі збільшеною кількістю пульсацій.

При підготовці слід пам'ятати, що знання студента з теорії та послідовності дій при проведенні дослідів обов'язково перевіряються викладачем перед виконанням роботи.

6.2 Короткі теоретичні відомості

Для зменшення вищих гармонік струму застосовуються фазозсувні трансформаторні та автотрансформаторні пристрої. Зазвичай вони використовуються за умови існування двох однакових за потужністю нелінійних навантажень, які генерують в мережу схожий спектр гармонік. В промисловості такими навантаженнями зазвичай є потужні випрямлячі.

Якщо випрямлячі живляться від одного класу напруги тоді достатньо послідовно лише з одним навантаженням включити фазозсувний пристрій, який зсуває живлячу напругу на відповідний кут. Наприклад, для взаємної компенсації 5, 7 та 17, 19, необхідний кут дорівнює 30 градусів. На рисунку 6.1 наведено схемне рішення, в якому для зсуву живлячої напруги застосовуються два трансформатори зірка-зірка та трикутник-зірка.

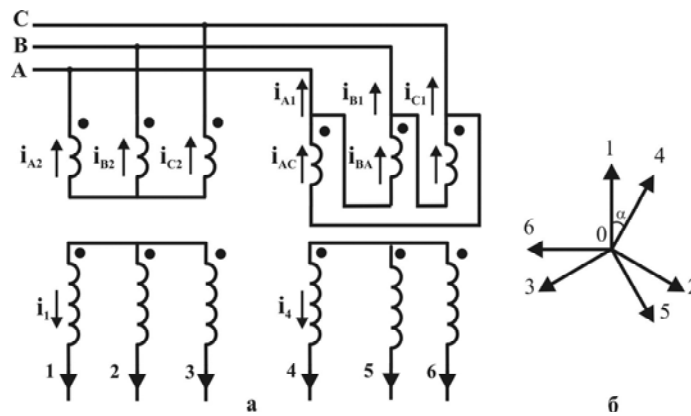


Рисунок 6.1 – Схемне рішення для зсуву живлячої напруги на кут 30 градусів (а) та векторна діаграма напруг на вторинних обмотках (б)

Якщо форма живлячого струму навантаження має вигляд, що зображений на рисунку 6.2(а), тоді при застосуванні схеми з рисунку 6.1, сумарний струм буде мати форму, що зображена рисунку 6.2(б).

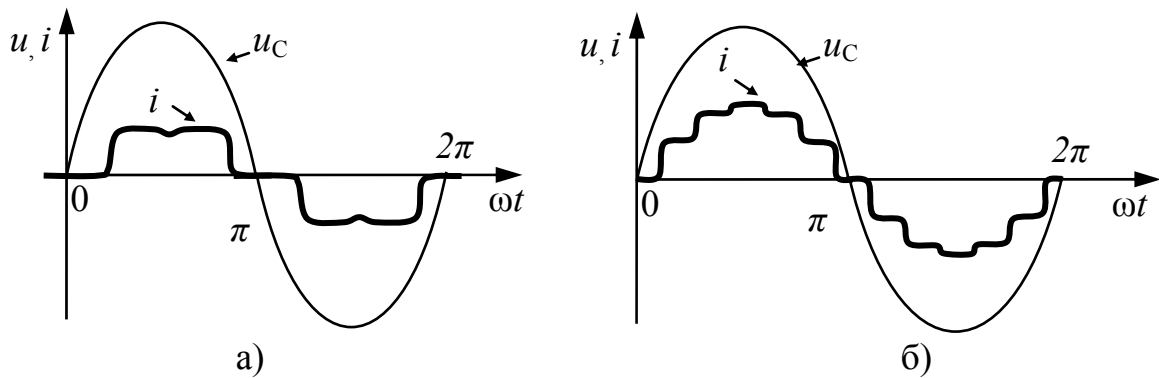


Рисунок 6.2 – Форма живлячого струму 6-пульсного трифазного випрямляча (а) та форма живлячого струму схеми рисунку 6.1 (б)

У випадках, коли не потрібно змінювати клас напруги, для здешевлення застосовують автотрансформаторні фазозсувні пристрої. Такі пристрої включаються послідовно з лише одним навантаженням. На рисунку 6.3 наведено схему автотрансформаторного пристрою для зсуву живлячої напруги на кут $\alpha=30$ градусів.

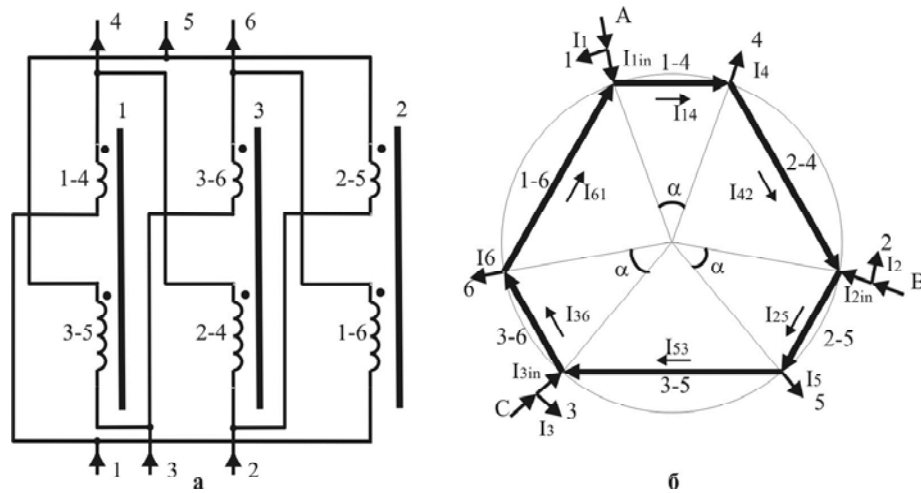


Рисунок 6.3 – Схемне рішення для зсуву живлячої напруги на кут 30 градусів (а) та векторна діаграма напруг на обмотках (б)

Такий автотрансформатор отримав назву фазозсувний автотрансформаторний пристрій гексагонального типу через те, що векторна діаграма напруг на обмотках такого пристрою (рисунок 6.3(б)) має вигляд шестикутника (*лат.* гексогона).

6.3 Хід роботи

1. Зібрати схему, що наведена на рисунку 6.4 (а). ТВ1, ТВ2 – трифазні вентильні перетворювачі змінної напруги в постійну (трифазні випрямлячі), що є нелінійними навантаженнями, TV1 – автотрансформатор гексагонального типу, який змінює фазу живлячої напруги.

2. Налаштувати вимірювальний прилад Aflex 6300 на вимірювання струму та напруги вторинної обмотки трансформатора.

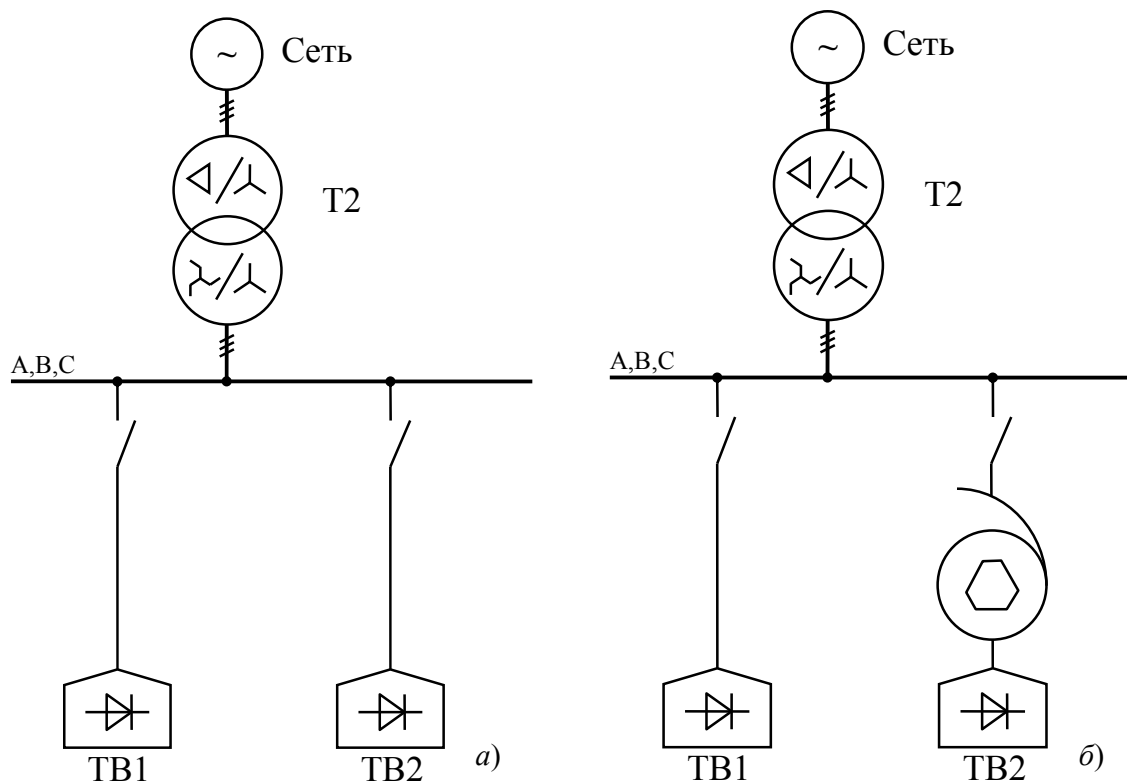


Рисунок 6.4 – Схема дослідів

3. Увімкнути живлення зібраної схеми. Живлення може виконуватися від напруги ~ 380 В та ~ 220 В. При виборі живлення слід знати, що для схем з'єднання обмоток трансформаторів Т1 та Т2 Д/Ун-0 та Д/Зн-0 максимальна лінійна напруга складає 220 В, а для схем з'єднання обмоток трансформатору Т1 та Т2 У/Ун-0 та У/Зн-0 максимальна лінійна напруга складає 380 В. *Неправильний вибір напруги живлення може призвести до виходу устаткування з ладу!*

4. Увімкнути стенд. Виміряти форму та показники несинусоїдальності напруги та струму за умови :

- увімкненого лише вентиляного перетворювача ТВ1,
- увімкненого лише вентиляного перетворювача ТВ2,
- увімкнених вентиляних перетворювачів ТВ1 та ТВ2.

Результати вимірювань занести до таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Результати вимірювань

№	Параметр, який вимірюється	$U_{\partial}, \text{В}$ ($I_{\partial}, \text{А}$)	$U_v, \text{В}$ ($I_v, \text{А}$)							$K_U /$ $THD_{U, \%}$ ($THD_I, \%$)	
			1	3	5	7	9	11	13		15
1	Напруга у фазі А на шині НН										
	Струм фазі А вторинної напруги трансформатора (навантаження ТВ1)										
	...										

5. Зібрати схему, що наведена на рисунку 6.4 (б), у якій послідовно з ТВ2 увімкнено автотрансформаторний пристрій гексагонального типу.

6. Виміряти форму та показники несинусоїдальності напруги та струму за умови :

- увімкненого лише вентиляного перетворювача ТВ1,
- увімкненого лише вентиляного перетворювача ТВ2,
- увімкнених вентиляних перетворювачів ТВ1 та ТВ2.

Результати вимірювань занести до таблиці, що аналогічна таблиці 6.1.

6.4 Обробка результатів

1. У звіті поряд привести рисунки, де зобразити форми фазного струму та напруги трансформатору при включенні одного трифазного випрямляча безпосередньо на шини НН та через автотрансформаторний пристрій гексагонального типу. Проаналізувати, як спотворюється напруга в одному та іншому випадку.

2. Поряд привести рисунки, де зобразити форми фазного струму та напруги трансформатору при паралельній роботі трифазних випрямлячів та при роботі одного з них через автотрансформаторний пристрій гексагонального типу. Пояснити, чому форма струму у другому випадку стає майже синусоїдальна.

3. Поряд привести рисунки, де зобразити форми фазного струму автотрансформатора і трифазного випрямляча та стовпчикові діаграми гармонік відповідних струмів. Пересвідчитись, що значення гармонік струмів не змінюється при проходженні через автотрансформатор, а форма струму змінюється.

4. Теоретично розрахувати значення коефіцієнта THD_I загального струму при встановленні зсувного автотрансформаторного пристрою гексагонального типу виходячи з виміряного гармонійного складу трифазного випрямляча.

6.5 Рекомендації до написання висновку

У висновку проаналізувати:

- як впливає автотрансформаторний пристрій гексагонального типу на форму та гармонійний склад струму трифазного випрямляча;
- чи підтвердилися теоретичні положення про взаємну компенсацію вищих гармонік струму двох трифазних випрямлячів за рахунок використання фазозсувного автотрансформаторного пристрою гексагонального типу;
- які вищі гармоніки взаємнокомпенсуються та як змінився коефіцієнт несинусоїдальності напруги при використанні зсувного пристрою.

6.6 Контрольні запитання

1. Поясніть, чому форма фазного струму нелінійного навантаження змінюється, а гармонійний склад – ні, при проходженні через автотрансформаторний пристрій гексагонального типу.
2. На чому заснований принцип дії автотрансформаторний пристрій гексагонального типу?
3. За рахунок чого зменшується спотворення форми напруги в системі електропостачання при використанні автотрансформаторного та трансформаторного фазозсувних пристроїв?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7 ЗНИЖЕННЯ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ СИМЕТРУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ

Мета роботи: закріплення на практиці знань про електромагнітні процеси, які протікають в системі електропостачання при зниженні несиметрії напруг за рахунок використання симетруючих пристроїв.

7.1 Рекомендації для якісної підготовки студента до виконання роботи

1. Ознайомитися зі схемою лабораторної установки і теоретичними відомостями щодо зниження несиметрії напруги. При цьому рекомендується використовувати не тільки ці методичні вказівки, але й літературу [5, стор. 149-155].

2. При підготовці особливу увагу звернути:

- на послідовність дій при проведенні дослідів;
- на дії, що можуть викликати аварійний режим роботи устаткування.

3. Знати та розуміти:

- якими коефіцієнтами нормується несиметрія напруги та як вони розраховуються;
- якими засобами виконується симетрування навантажень на промислових підприємствах;
- які особливості асиметрії навантажень у СЕП об'єктів громадського призначення та якими засобами виконується симетрування навантажень.

При підготовці слід пам'ятати, що знання студента з теорії та послідовності дій при проведенні дослідів обов'язково перевіряються викладачем перед виконанням роботи.

7.2 Короткі теоретичні відомості

Як вже згадувалося, найпоширенішою причиною виникнення несиметрії в трифазних СЕП промислових підприємств є потужні однофазні споживачі, наприклад індукційні плавильні та нагрівальні печі, зварювальні агрегати, установки електрошлакового переплаву, а також трифазні ЕП з нерівномірним навантаженням фаз тощо [13].

Згідно з нормативними документами [2,3,7] несиметрія напруг оцінюється коефіцієнтами несиметрії за зворотною та нульовою послідовністю.

Коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю оцінюють як відношення напруги зворотної послідовності основної частоти $U_{2(1)}$ до напруги прямої послідовності $U_{1(1)}$ (або номінальної лінійної напруги $U_{ЛНОМ}$):

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100\% \approx \frac{U_{2(1)}}{U_{ЛНОМ}} \cdot 100\%. \quad (7.1)$$

Коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю

$$K_{0U} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100\% \approx \frac{\sqrt{3} \cdot U_{0(1)}}{U_{ЛНОМ}} \cdot 100\%, \quad (7.2)$$

де $U_{0(1)}$ – напруга нульової послідовності основної частоти.

Згідно [1] значення напруг $U_{1(1)}$, $U_{2(1)}$, $U_{0(1)}$ допускається визначати методом симетричних складових або за формулами (7.3)-(7.8).

Значення напруги прямої послідовності допускається визначати

$$U_{1(1)} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3}U_{AB(1)} + \sqrt{4U_{BC(1)}^2 - \left(\frac{U_{BC(1)}^2 - U_{CA(1)}^2}{U_{AB(1)}} + U_{AB(1)} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC(1)}^2 - U_{CA(1)}^2}{U_{AB(1)}} \right)^2 \right]} \quad (7.3)$$

або за наближеною формулою

$$U_{1(1)} \approx \frac{1}{3}(U_{AB(1)} + U_{BC(1)} + U_{CA(1)}), \quad (7.4)$$

де $U_{AB(1)}$, $U_{BC(1)}$, $U_{CA(1)}$ – діюче значення міжфазної напруги основної частоти, В.
Значення напруги зворотної послідовності допускається визначати

$$U_{2(1)} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3}U_{AB(1)} - \sqrt{4U_{BC(1)}^2 - \left(\frac{U_{BC(1)}^2 - U_{CA(1)}^2}{U_{AB(1)}} + U_{AB(1)} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC(1)}^2 - U_{CA(1)}^2}{U_{AB(1)}} \right)^2 \right]} \quad (7.5)$$

або за наближеною формулою

$$U_{2(1)} \approx 0,62 \cdot (U_{\text{нб.л}(1)} + U_{\text{нм.л}(1)}), \quad (7.6)$$

где $U_{\text{нб.л}(1)}$, $U_{\text{нм.л}(1)}$ – найбільше і найменше з трьох діючих значень лінійних напруг основної частоти.

Значення напруги нульової послідовності допускається визначати [1]

$$U_{0(1)} = \frac{1}{6} \sqrt{\left(\frac{U_{BC(1)}^2 - U_{CA(1)}^2}{U_{AB(1)}} - 3 \cdot \frac{U_{B(1)}^2 - U_{A(1)}^2}{U_{AB(1)}} \right)^2 + \left[\sqrt{4U_{BC(1)}^2 - \left(U_{AB(1)} - \frac{U_{BC(1)}^2 - U_{CA(1)}^2}{U_{AB(1)}} \right)^2} - \right. \\ \left. - 3 \sqrt{4U_{B(1)}^2 - \left(U_{AB(1)} - \frac{U_{B(1)}^2 - U_{A(1)}^2}{U_{AB(1)}} \right)^2} \right]^2} \quad (7.7)$$

або за наближеною формулою

$$U_{0(1)} \approx 0,62 \cdot (U_{\text{нб.ф}(1)} + U_{\text{нм.ф}(1)}), \quad (7.8)$$

где $U_{A(1)}$, $U_{B(1)}$, $U_{C(1)}$ – діюче значення фазних напруг основної частоти, В,
 $U_{\text{нб.ф}(1)}$, $U_{\text{нм.ф}(1)}$ – найбільше і найменше з трьох діючих значень фазних напруг основної частоти.

В СЕП промислових підприємств найбільш вагомий внесок в несиметрію напруг вносять складові напруги зворотної послідовності. Тому під час розрахунків обмежуються визначенням даного коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю.

Як відомо [4,5], при співвідношенні потужностей КЗ у вузлі мережі і однофазного навантаження $S_K < 50 \cdot S_H$ коефіцієнт зворотної послідовності напруги не перевищує допустиме значення. Тому доцільно приєднувати електроприймачи, що викликають несиметрію, до вузлів мережі, де потужність КЗ задовольняє приведеному вище співвідношенню. При неможливості забезпечити необхідний рівень несиметрії напруги за допомогою схемних рішень застосовують симетруючі пристрої (СП).

Симетрування за допомогою СП зводиться до компенсації еквівалентного струму зворотної послідовності несиметричних навантажень i , як наслідок, обумовленої ними напруги зворотної послідовності.

Кожне конкретне схемне і технічне рішення СП має певні переваги і недоліки, що обмежують сферу їх застосування. Розглянемо деякі з відомих СП.

Симетруючі пристрої трансформаторного типу дуже різноманітні. За допомогою декількох трансформаторів або спеціального трансформатора, включеного певним чином між мережею і несиметричним навантаженням, отримують необхідну напругу на навантаженні, що дозволяє отримати деяке вирівнювання фазних струмів. На рисунку 7.1 приведений приклад такого пристрою – схема живлення двофазного навантаження від трансформатора Скотта і векторні діаграми струмів і напруги [5]. Співвідношення витків трансформаторів обираються так, щоб вторинні напруги їх були рівні. За цією схемою живиться два навантаження. Симетруючі пристрої трансформаторного типу є індивідуальними і нерегульованими, а їх симетруючі властивості залежать від характеру навантаження.

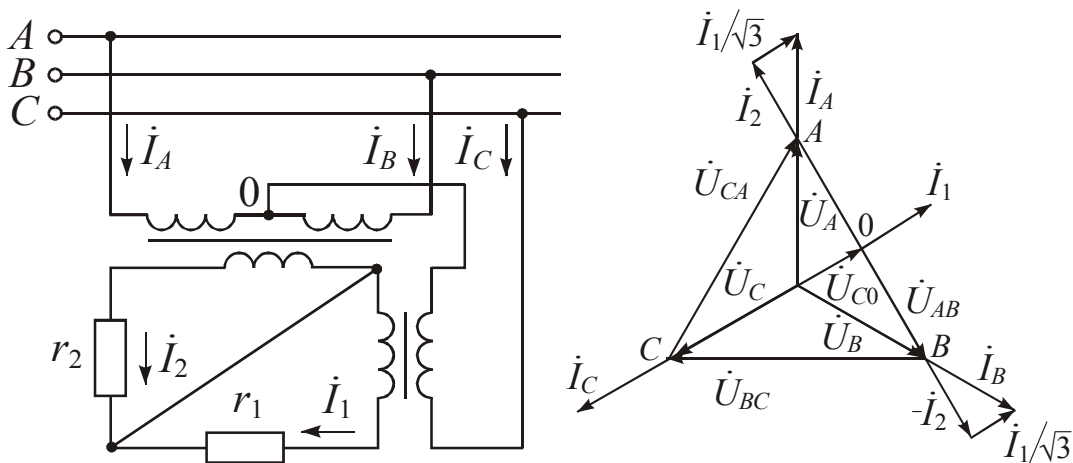


Рисунок 7.1– Схема та векторна діаграма струмів і напруги при живленні двофазного навантаження від трансформатора Скотта

Симетруючі пристрої з електромагнітними зв'язками згідно [5] діляться на дві групи: з дільниками (автотрансформаторні) і трансформаторні. У схемах з дільниками потужність СП зазвичай вибирається рівною потужності навантаження. За допомогою перемикав автотрансформаторного відгалуження можна симетрувати нелінійне навантаження з коефіцієнтом потужності, що змінюється. На рисунку 7.2,а представлена схема з одним регульованим елементом C_p . Така схема має значення $\cos \varphi \leq 0,7$.

На рисунку 7.2,б показана схема СП з двома регульованими елементами C_p і L_p . За своїми характеристиками вона більш краща, ніж попередня схема, та використовується для навантажень з $\cos \phi = 1$.

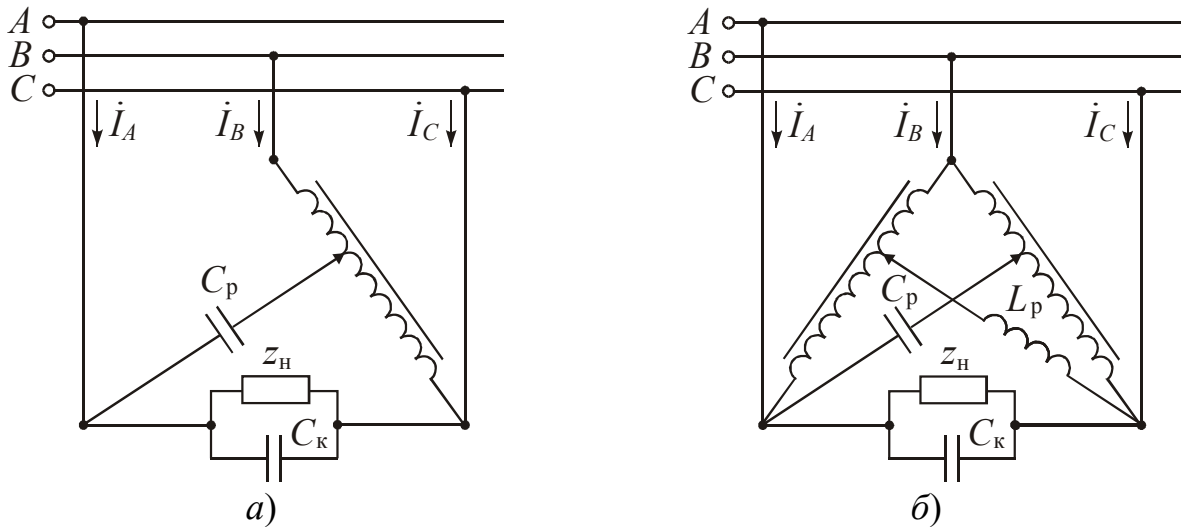


Рисунок 7.2– Автотрансформаторна схема з регулюючим елементом C_p (а), елементами C_p і L_p (б)

Індуктивно-ємнісні СП згідно [5] підключаються до мережі паралельно з несиметричним навантаженням; вони є комбінацією індуктивних і ємнісних елементів. Найбільшого поширення набула схема Штейнметца, показана на рисунку 7.3. Векторна діаграма, що пояснює роботу пристрою, приведена на цьому ж рисунку. Симетруючий пристрій Штейнметца найефективніший при коефіцієнті потужності навантаження, рівному одиниці. Тому при активно-індуктивному навантаженні паралельно їй підключається БК С2. Потужність реактора і БК С1 в цьому випадку вибирається з умови

$$Q_L = Q_C = P_{\text{ном}} / \sqrt{3} . \tag{7.9}$$

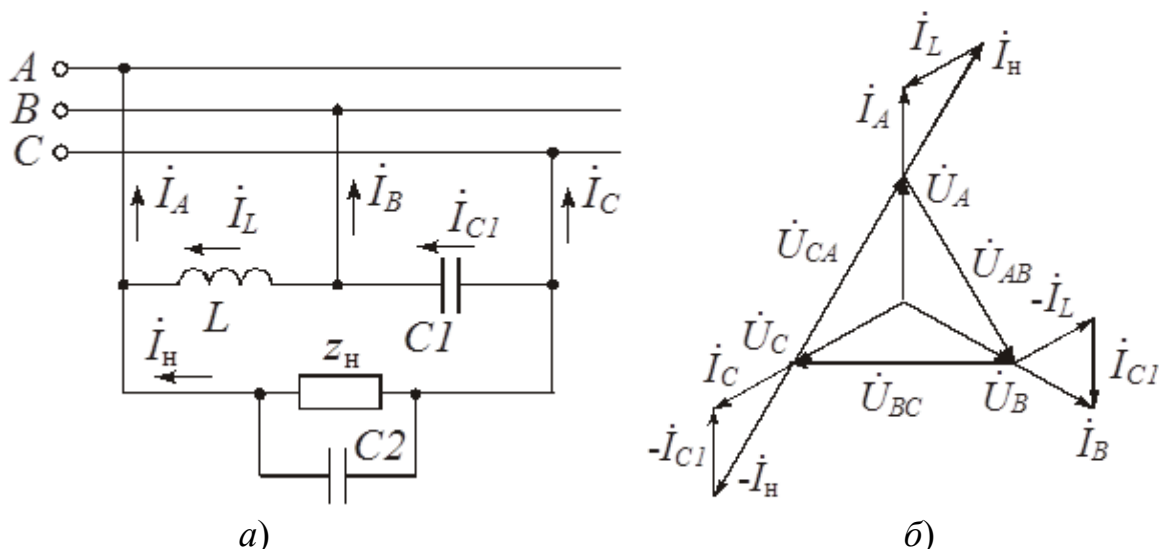


Рисунок 7.3 – Схема Штейнметца і векторна діаграма напруг для цієї схеми

Ємнісні СП. Для симетрування навантажень можна використовувати ємності включені в несиметричний трикутник (рисунок 7.4). Однак при використанні цієї схеми забезпечується симетрія струмів і напруг яка супроводжується зменшенням коефіцієнта потужності навантаження до 0,5. Це відповідає куту зсуву 60° між векторами лінійних напруг та струмів. Потужність першої БК (C1) та другої БК (C2) в цьому випадку вибирається з умови

$$P_H = \sqrt{3} \cdot Q_{C1} = \sqrt{3} \cdot Q_{C2} / 2. \quad (7.10)$$

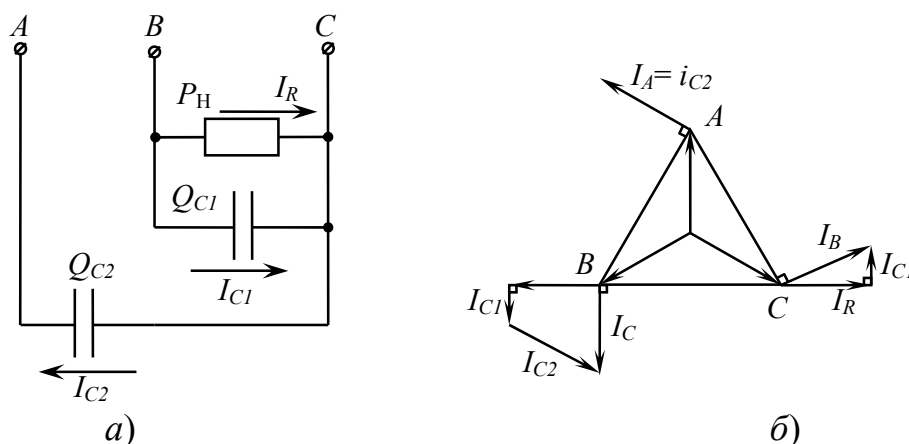


Рисунок 7.4 – Схема ємнісного СП і векторна діаграма напруг для цієї схеми

Вищенаведені схемні рішення використовуються для зменшення напруги зворотної послідовності, що є актуальним для СЕП промислових підприємств, через те що у них найчастіше використовуються потужні однофазні електроприймачи, які приєднуються до лінійної напруги мережі.

У СЕП об'єктів громадського призначення напругою 0,4кВ найбільш розповсюджені однофазні малопотужні навантаження, що приєднуються до фазної напруги мережі. Тому найбільш вагомий внесок в несиметрію напруг вносять складові напруги нульової послідовності.

Проблеми зазвичай виникають у точці загального приєднання, що знаходиться на значній відстані від розподільчого трансформатора при неможливості симетричного розподілення однофазних навантажень.

Найбільш розповсюдженими СП для зменшення напруги нульової послідовності є ФСП (рисунок 5.3).

7.3 Хід роботи

1. Зібрати схему, що наведена на рисунку 7.5. В якості однофазних навантажень використовувати два реостати розміщені зліва на стенді. Реостати необхідно приєднати до верхніх затискачів першого фідера за допомогою допоміжних провідників. Повзунки реостатів повинні бути встановлені у положення відмічене на реостатах. *При цьому слід пам'ятати, що встановлення наднизького значення опору призведе до великих струмів, аварійного режиму роботи устаткування та виходу його з ладу.*

2. Налаштувати вимірювальний прилад Aflex 6300 на вимірювання струму та напруги вторинної обмотки трансформатора.

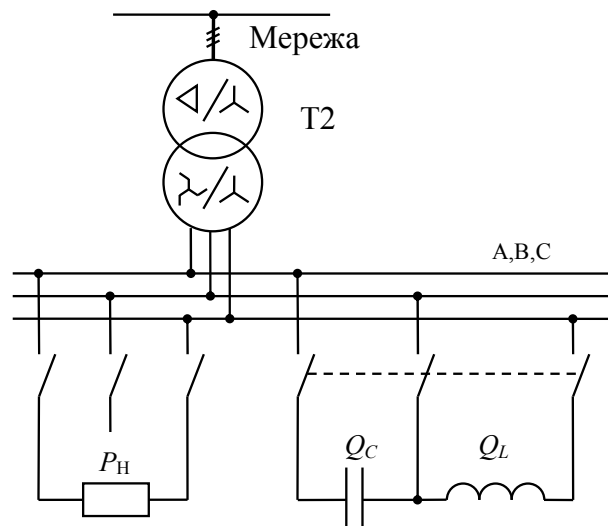


Рисунок 7.5 – Схема досліду

3. За допомогою перемикача S3 встановити групу з'єднань обмоток трансформатора T2 – У/Ун-0 або Д/Ун-0 або У/Зн-0 або Д/Зн-0 (за вказівкою викладача). При цьому слід пам'ятати, що зміна схеми з'єднань обмоток трансформатора при увімкненому живленні може призвести до аварійного режиму роботи устаткування та виходу його з ладу.

4. Увімкнути живлення зібраної схеми. Живлення може виконуватися від напруги ~ 380 В та ~ 220 В. При виборі живлення слід знати, що для схем з'єднання обмоток трансформаторів T1 та T2 Д/Ун-0 та Д/Зн-0 максимальна лінійна напруга складає 220 В, а для схем з'єднання обмоток трансформатору T1 та T2 У/Ун-0 та У/Зн-0 максимальна лінійна напруга складає 380 В. Неправильний вибір напруги живлення може призвести до виходу устаткування з ладу!

5. Увімкнути стенд.

6. Виміряти діючі значення фазних і лінійних напруг на вторинних затискачах трансформатору без навантаження. Результати вимірювань занести до таблиці 7.1.

7. Увімкнути навантаження. Виміряти діючі значення фазних і лінійних напруг на вторинних затискачах трансформатору та струм навантаження I_H . Результати вимірювань занести до таблиці 7.1 та 7.2.

8. Для симетрування напруги увімкнути СП. Виміряти діючі значення фазних і лінійних напруг на вторинних затискачах трансформатору та струм навантаження і СП. Результати вимірювань занести до таблиці 7.1 та 7.2.

9. Зібрати схему, що наведена на рисунку 7.6.

Таблиця 7.1 – Результати вимірювань напруги

Дослід	$U_{AB(1),B}$	$U_{BC(1),B}$	$U_{CA(1),B}$	$U_{A(1),B}$	$U_{B(1),B}$	$U_{C(1),B}$
1) без навантаження						
2) з навантаження без СП						
3) з навантаження та з СП						

Таблиця 7.2 – Результати вимірювань струму

Дослід	$I_{H(1)}, A$	Вторинний струм Т2			Струм СП		
		$I_{A(1)}, A$	$I_{B(1)}, A$	$I_{C(1)}, A$	$I_{A(1)}, A$	$I_{B(1)}, A$	$I_{C(1)}, A$
1) з навантаження без СП							
2) з навантаження та з СП							

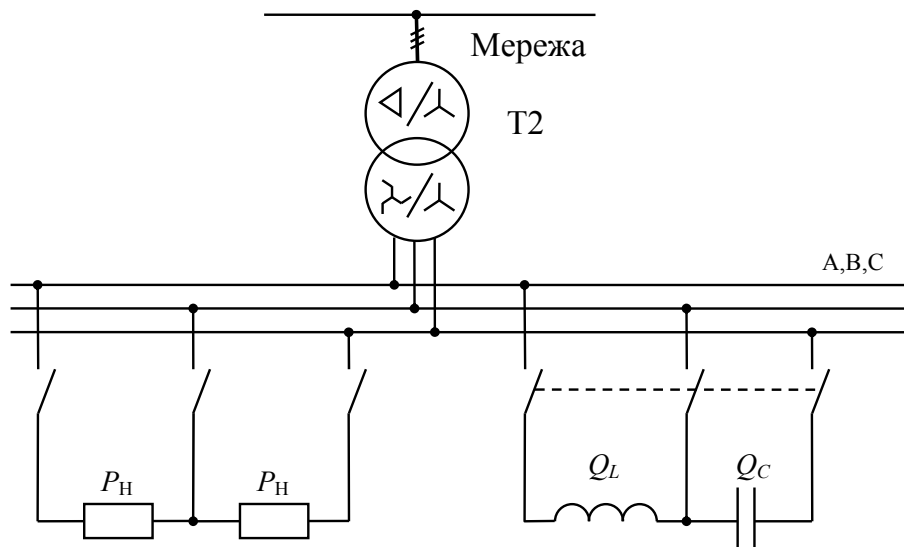


Рисунок 7.6 – Схема дослідів

10. Повторити вимірювання пунктів 6-8.

7.4 Обробка результатів

1. Побудувати векторні діаграми напруг для трьох дослідів за таблицею 7.1.

2. На векторних діаграмах напруги за таблицею 7.2 навести струми навантаження, СП та трансформатору. Приклад векторної діаграми наведено на рисунку 7.3,б.

3. Для трьох дослідів за таблицею 7.1 та формулами (7.3), (7.5), (7.1) визначити напруги прямої та зворотної послідовності та коефіцієнт несиметрії за зворотною послідовністю. Результати вимірювань занести до таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Результати розрахунків

Дослід	$U_{1(1)}, V$	$U_{2(1)}, V$	$K_{2U}, \%$
1) без навантаження			
2) з навантаження без СП			
3) з навантаження та з СП			

4. Зазначити чи відповідає коефіцієнт несиметрії за зворотною послідовністю вимогам стандартів.

5. Побудувати дві векторні діаграми напруг та струмів. Першу без СП, другу з СП. Приклад діаграми наведено на рисунку 7.3,б.

7.5 Рекомендації до написання висновку

У висновку слід:

- зазначити як саме СП симетріє навантаження та як це видно з векторних діаграм;
- зазначити чи відповідає коефіцієнт несиметрії за зворотною послідовністю вимогам стандартів.

7.6 Контрольні запитання

1. Якими стандартами нормується значення несиметрії напруг?
2. Які засоби зменшення несиметрії напруги Ви знаєте?
3. Якими коефіцієнтами згідно з нормативними документами нормується несиметрія напруг та як їх розрахувати?
4. Як розрахувати струм зворотної послідовності однофазного навантаження?
5. Як розрахувати напругу зворотної послідовності на шинах, якщо відома потужність однофазного навантаження, що приєднаний між фазами А і С?

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М: Стандартинформ, 2006. – 35с.
2. ГОСТ Р 54149-2010 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М: Стандартинформ, 2012. – 20с.
3. ДСТУ EN 50160: 2010 Характеристики напруги електроживлення, постачаної розподільчими мережами загальної призначеності (EN 50160:2007, IDT).
4. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331с.
5. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252с.
6. Куско А., Томпсон М. Качество энергии в электрических сетях. – Додэка XXI. – 2008. – 336 с.
7. Международный стандарт EN 50160:1995. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems.
8. Харлов Н.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 207 с.
9. Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. – К.: Наукова думка, 2005.– 210 с.