

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

Ткачук Дмитро Миколайович

УДК 621.359.4

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Обґрунтування та розробка комп'ютерної моделі електричної мережі з  
косинусними батареями конденсаторів  
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Ткачук Д. М.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Журавльов Валерій Пилипович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

д.ф-м.н., професор кафедри вищої  
та прикладної математики  
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2024

## АНОТАЦІЯ

Ткачук Д. М. Обґрунтування та розробка комп'ютерної моделі електричної мережі з косинусними батареями конденсаторів. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка методики та реалізація на її основі програмного комплексу з розрахунку гармонійних складових струму батарей конденсаторів залежно від параметрів елементів системи електропостачання та розрахункової потужності джерела вищих гармонік.

Ціллю досліджень являється розробка методики та моделі ефективного управління компенсацією реактивної потужності батареями конденсаторів з аналізом частотної характеристики розподільчої мережі, що містять джерела вищих гармонік.

**Ключові слова:** батарея конденсаторів, реактивна потужність, вищі гармоніки.

## ABSTRACT

Tkachuk D. M. Justification and development of a computer model of an electric network with cosine capacitor banks. Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Pollessia National University, Zhytomyr, 2024.

The purpose of the qualification work is to develop a methodology and implement a software complex based on it for calculating the harmonic components of the current of capacitor banks depending on the parameters of the elements of the power supply system and the calculated power of the source of higher harmonics. The purpose of the research is to develop a methodology and model for effective control of reactive power compensation by capacitor banks with analysis of the frequency response. distribution network containing sources of higher harmonics.

**Keywords:** capacitor bank, reactive power, higher harmonics.

## ЗМІСТ

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП                                                                                                         | 4  |
| РОЗДІЛ 1 ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ<br>ФАЗНИХ КОНДЕНСАТОРНИХ БАТАРЕЙ ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ<br>РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ | 7  |
| Висновки по розділу 1                                                                                         | 13 |
| РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ<br>ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З КОСИНУСНИМИ БАТАРЕЯМИ<br>КОНДЕНСАТОРІВ          | 14 |
| 2.1 Інструментальні обстеження гармонійного складу струмів та<br>напруг у діючих електроустановках            | 14 |
| 2.2 Розрахункова схема заміщення електричної мережі.<br>Визначення струмів вищих гармонік                     | 18 |
| 2.2.1 Еквівалентна схема електричної мережі з джерелами<br>найвищих гармонік                                  | 18 |
| 2.2.2 Розрахунок параметрів елементів схеми заміщення                                                         | 21 |
| 2.3 Методика розрахунку струмів найвищих гармонік в<br>електричній мережі з батареями конденсаторів           | 24 |
| Висновки по розділу 2                                                                                         | 29 |
| РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ РЕЗОНАНСНИХ РЕЖИМІВ<br>РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ                                        | 30 |
| 3.1 Резонансні явища в електричних мережах із косинусними<br>конденсаторами                                   | 30 |
| 3.2 Моделювання резонансних режимів роботи електричної<br>мережі                                              | 34 |
| Висновки по розділу 3                                                                                         | 41 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ                                                                                             | 42 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ                                                                                    | 43 |

## ВСТУП

Одним з основних питань, пов'язаних з підвищенням якості електроенергії в мережах, які вирішуються як на стадії проектування, так і на стадії експлуатації систем промислового електропостачання, є питання про компенсацію реактивної потужності, що включає вибір доцільних джерел, розрахунок та регулювання їх потужності, розміщення джерел у системі електропостачання. Раціональна (оптимальна) компенсація реактивної потужності в промислових електромережах включає широкий комплекс питань, спрямованих на підвищення економічності роботи електроустановок, поліпшення якості споживаної електроенергії, включає методи вибору та розрахунку компенсуючих пристроїв, виходячи з умов виконання завдань енергосистеми

Вибір раціональної компенсації реактивної потужності призводить до зниження втрат потужності, забезпечення належної якості споживаної електроенергії за рахунок регулювання та стабілізації рівня напруг в електромережах, досягненню високих техніко- економічних показників роботи електроустановок.

У заводських умовах, де встановлені верстати які споживають не тільки активну потужність, але і реактивну, зокрема, індуктивну потужність.

При зниженні вироблення активної потужності порівняно з номінальним значенням, можливе збільшення генерування реактивної потужності понад номінальну. У цьому випадку деяка частина генераторів може переводитися на роботу з зниженим коефіцієнтом потужності, тобто з цільовим збільшенням виробітку реактивної енергії.

Збільшення ж вироблення реактивної потужності як найбільших активних навантажень, з допомогою зниження генерації активної потужності, економічно недоцільно. Ефективніше замість зниження активної потужності генераторів електростанцій, застосовувати для вироблення реактивної потужності компенсуючі пристрої.

Відповідно до чинних нормативних документів і керівними технічними матеріалами в якості основного засобу компенсації реактивної потужності (РП) на промислових підприємствах слід застосовувати силові конденсатори . Для компенсації РП в електричних мережах загального призначення, як правило, застосовуються комплектні конденсаторні установки (КУ), що містять крім конденсаторів різне допоміжне електрообладнання: комутаційні та захисні апарати, розрядні резистори, пристрої управління і т.д. п. . На промислових підприємствах насамперед слід використовувати КУ напругою до 1 кВ. Високовольтні конденсаторні батареї, які випускаються заводами-виробниками на номінальну напругу 6,3 і 10,5 кВ, можуть застосовуватися лише на промислових підприємствах з безперервним режимом роботи при техніко-економічному обґрунтуванні .

Конденсатори забезпечують розвантаження від реактивних струмів всіх елементів системи електропостачання (СЕП) від місця встановлення КУ до джерела живлення в енергосистемі. При цьому знижуються втрати активної потужності та електроенергії в лініях електропередачі, а також у силових трансформаторах, до яких вони підключені.

Тому важливим аспектом являється оцінка можливості застосування батарей конденсаторів для компенсації реактивної потужності з урахуванням їхнього допустимого перевантаження струмами вищих гармонік залежно від номера гармонік на кожному ступені компенсації при заданих потужностях джерела вищих гармонік та короткого замикання на шинах системи.

Відповідно до вище обумовленого **метою роботи є** розробка методики та реалізація на її основі програмного комплексу з розрахунку гармонійних складових струму батарей конденсаторів залежно від параметрів елементів системи електропостачання та розрахункової потужності джерела вищих гармонік.

**Ціллю досліджень** являється розробка методики та моделі ефективного управління компенсацією реактивної потужності батареями конденсаторів з аналізом частотної характеристики. розподільчої мережі у системі

електропостачання промислових підприємств, що містять джерела вищих гармонік.

Досягнення поставленої мети в роботі базувалося на основних законах електротехніки та виконувалося застосування сучасних цифрових пристроїв. **Для вирішення поставлених завдань використано методи** математичного моделювання, аналітичні та чисельні методи розрахунку, метод вузлових потенціалів.

**Перелік публікацій автора за темою дослідження :**

Любевич А.О., Ткачук Д. М. АНАЛІЗ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 195-198.

Любевич А.О., Ткачук Д. М. РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ КУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕОБХІДНОГО ЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 201-204.

Любевич А.О. СПОСОБИ ЗНИЖЕННЯ ЧАСТКИ ВИЩИХ ГАРМОНІЙНИХ СКЛАДОВИХ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 208-210.

## РОЗДІЛ 1

### ОБГРУНТУВАННЯ                      ВИКОРИСТАННЯ                      ФАЗНИХ КОНДЕНСАТОРНИХ БАТАРЕЙ ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Компенсація реактивної потужності – є одним з найбільш важливих і відповідальних заходів щодо підвищення енергоефективності. У комплексі питань, присвячених передачі, розподілу та споживанню електроенергії, проблема компенсації реактивної енергії завжди була на одному з найважливіших місць. Правильне вирішення таких завдань значною мірою визначає економію грошових та матеріальних ресурсів, підвищення якості електропостачання.

Реактивна потужність та енергія погіршують показники роботи енергосистеми, тобто завантаження реактивними струмами генераторів електростанцій збільшує витрату палива, збільшуються втрати в підводячих мережах і приймачах, збільшується падіння напруги у мережах. І було б доцільно встановлювати установки компенсації реактивної потужності, оскільки вони приносять безліч позитивних показників.

Установки компенсації реактивної потужності приносять відчутні фінансові вигоди. Вони також дозволяють довше зберігати обладнання у робочому стані.

Ось кілька причин, через які це відбувається [2]:

- а) зменшення навантаження на силові трансформатори, збільшення у зв'язку з цим терміну їхньої служби;
- б) зменшення навантаження на проводи та кабелі, можливість використання кабелів меншого перерізу;
- с) зниження рівня споживання електроенергії.

При використанні установок суттєво знижується навантаження через мережу, збільшується можливий термін експлуатації обладнання, зростає надійність системи живлення підприємства загалом. Для сучасної техніки

використовуються конденсатори, які сприяють довговічності, надійності та високій якості роботи установки.

Фазні конденсатори мають такі переваги[6]::

- 1) проста конструкція, яка не потребує спеціального обслуговування;
- 2) простий монтаж;
- 3) висока надійність;
- 4) низька вартість;
- 5) можливість швидкого та точного підбору величини компенсованої реактивної потужності;
- 6) малі питомі втрати (високий ККД);
- 7) відсутність шуму під час експлуатації.

При нормальних робочих умовах усі електричні споживачі, режим функціонування яких супроводжується постійним виникненням та зникненням магнітних полів (наприклад, індукційні двигуни, цехові верстати), забирають від мережі не тільки активну, а й індуктивну реактивну потужність. Ця реактивна потужність необхідна для роботи обладнання та, в той же час, може бути розглянута як небажане додаткове навантаження мережі. При передачі струму непотрібна реактивна частина має бути по можливості малою. З іншого боку, реактивну потужність використовує споживач, тому її потрібно намагатись передати не через мережу загального електропостачання, а виробити безпосередньо у місці її споживання.

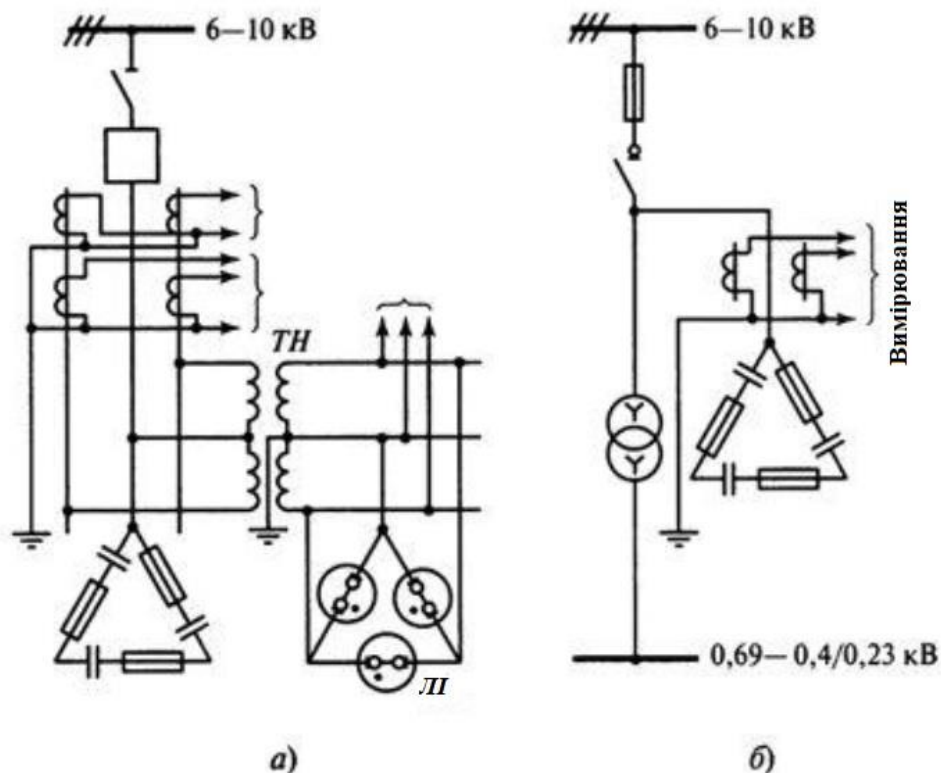
При включенні до трифазної мережі однофазні конденсатори напругою 6 (10) КВ з'єднують між собою у трикутник (рис. 1.1), що в порівнянні зі з'єднанням у зірку дозволяє отримати від конденсатора однієї і тієї ж ємності в три рази більше реактивну потужність.

Конденсаторна установка складається з одного або декількох паралельно з'єднаних конденсаторів, які утворюють батарею. Потужність такої батареї визначається відповідними розрахунками. Число конденсаторів в батареї визначається її реактивною потужністю та потужністю одного елемента, з якого вона складається. Уся батарея зосереджена у розподільчому пристрої

заводу. Заводські умови застосовують переважно центральну форму компенсації. Батарею статичних конденсаторів приєднують через масляний вимикач до збірних шин 6 (10) КВ головної понижувальної підстанції.

На (рис. 1.1) наведено схему конденсаторної батареї напругою 10 кВ. Батарею підключено до збірних шин електроустановки через високовольтний вимикач. Первинні обмотки трансформатора напруги ТН (трифазний, тристрижневий) використовуються як розрядний опір. У ланцюзі кожного конденсатора встановлені запобіжники. Груповий захист від струмів короткого замикання підключають до трансформаторів струму.

Після вступного вимикача 10 кВ через відповідні вимірювальні трансформатори зазвичай в щитовій заводу розташовуються лічильники активної та реактивної електроенергії. Залежно від показань лічильників завод платить гроші підприємству електричних мереж за споживану електроенергію. Але, на відміну від побутових споживачів, оплата йде і за реактивну (індуктивну) потужність, яка, як відомо, корисної роботи не виконує. Як відомо з курсу електротехніки, є засіб для зменшення індуктивної складової – підключення конденсатора.



### Рисунок 1.1. Схема увімкнення батарей конденсаторів

а) – з окремим вимикачем, б) – з вимикачем навантаження, ТН – трансформатор напруги, що використовується як розрядний опір для батарей конденсаторів, ЛП - сигнальні індикаторні лампи.

Після вступного вимикача 10 кВ через відповідні вимірювальні трансформатори зазвичай в щитовій заводу розташовуються лічильники активної та реактивної електроенергії. Залежно від показань лічильників завод платить гроші підприємству електричних мереж за споживану електроенергію. Але, на відміну від побутових споживачів, оплата йде і за реактивну (індуктивну) потужність, яка, як відомо, корисної роботи не виконує. Як відомо з курсу електротехніки, є засіб для зменшення індуктивної складової – підключення конденсатора.

Статичні конденсатори отримали широке застосування промислових установках для покращення коефіцієнта потужності  $\cos \alpha$ . Вітчизняні заводи виготовляли статичні конденсатори на напругу 6 та 10 кВ. Реактивна потужність такого конденсатора порядку становить 10 КВАр[22]:.

Але при виконанні схем згідно з (рис. 1.1) треба враховувати наступні моменти:

1) після відключення конденсаторів від мережі на їх обкладках зберігається електричний заряд, що може досягати вершини напруги мережі;

2) в момент включення батареї конденсаторів через виникнення перехідного процесу (див. курс електротехніки) відбувається кидок струму, який може досягти  $3 \div 7$  кратного значення струму номінальної величини.

Збереження електричного заряду на затискачах конденсаторів після відключення їх від мережі небезпечно для обслуговуючого персоналу цієї електроустановки, про що персонал має бути проінструктований. Для зменшення цього електричного заряду конденсаторні батареї забезпечуються розрядними опорами, які підключають паралельно до конденсаторів. Як розрядні опори можуть застосовуватися індуктивні опори – наприклад, первинні обмотки вимірювальних трансформаторів напруги.

Враховуючи перехідний процес, що виникає в момент включення конденсаторів, для статичних батарей конденсаторів застосовуються вимикачі, здатні включити струм пускового режиму та відключити номінальну потужність батареї. Вимикачі, вибрані з умов вимкнення струмів короткого замикання в місці встановлення батареї, задовольняють цим вимогам. У ланцюгу, що живить конденсаторну батарею, встановлюють максимальну струмовий захист від коротких замикань. Крім того в ланцюзі кожного конденсатора високої напруги передбачається індивідуальний захист від струмів короткого замикання, що виконується за допомогою запобіжників. Їхня наявність забезпечує відключення лише одного конденсатора, а не всієї батареї, при пошкодженні саме в ньому. При струмах замикання на землю більш ніж 20 А конденсаторні батареї утворюють захист від замикання на землю, якщо індивідуальні запобіжники не захищають від замикань на землю.

Конденсаторні батареї, як сказано вище, можуть бути також підключені до збірних шин через високовольтні запобіжники та вимикач навантаження. Наявність останніх дозволяє здійснити захист конденсаторної батареї від коротких замикань та однофазних замикань на землю. Але вимикачі навантаження та запобіжники можуть бути застосовані тільки для батареї статичних конденсаторів потужністю до 400 КВАР включно [24].

Слід зазначити, що робота у заводських цехах ведеться в основному в денний час – з 8:00 до 17:00 і обідню перерву зазвичай зміщено у різних цехах. У нічний час можуть залишатися в роботі тільки електричні печі та опалення. Тому в нічний час завод практично не споживає індуктивну потужність. Якщо згідно (рис. 1.1) у нічний час буде включено батарею статичних конденсаторів, то відбудеться споживання реактивно-ємнісної потужності. Тому працівник заводу включає батарею конденсаторів у ранковий час і після закінчення робочого дня відключає її (Для цього служить вимикач Вк).

Можливий варіант автоматичного керування реактивною потужністю споживача залежно від реактивного навантаження.

Для цієї мети як датчик пропонується використовувати лічильник реактивної енергії, виконаний з упором (рис. 1.2).

На рисунку: 1) диск із ізоляційного матеріалу з прорізом, куди введено механічну пластину датчика; 2) диск лічильника реактивної потужності.

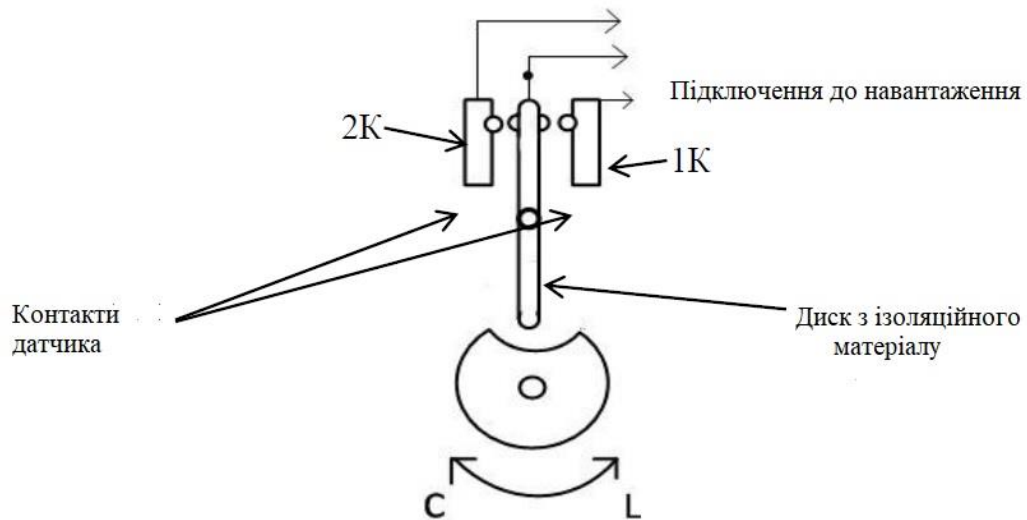


Рисунок 1.2 - Приклад датчика реактивної енергії.

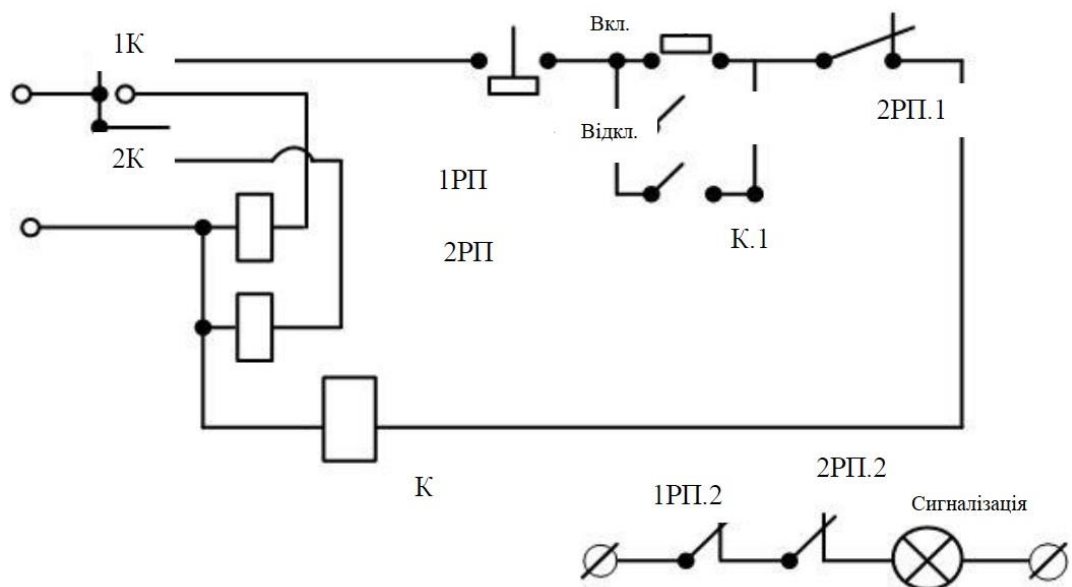


Рисунок 1.3 - Схема автоматичного управління компенсацією реактивної потужності

На рис. 1.3 показана схема автоматичного керування компенсацією реактивної потужності. При зниженні споживання реактивно-індуктивної потужності виникає питання: «включати конденсаторну батарею?» У цьому

випадку доцільно конденсаторну батарею не включати, оскільки тариф за споживання реактивно-ємнісної потужності перевищує тариф за споживання реактивно-індуктивної потужності.

### **Висновки по першому розділу**

Вибір раціональної компенсації реактивної потужності призводить до зниження втрат потужності, забезпечення належної якості споживаної електроенергії за рахунок регулювання та стабілізації рівня напруг в електромережах, досягненню високих техніко- економічних показників роботи електроустановок.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З КОСИНУСНИМИ БАТАРЕЯМИ КОНДЕНСАТОРІВ

#### 2.1 Інструментальні обстеження гармонійного складу струмів та напруг у діючих електроустановках

Гармонічний склад напруги у системах електропостачання нормується відповідно до Наказу МЕтаВП №87. Цей нормативний документ введений у дію як національний стандарт України з 1 липня 2018 р. Результати інструментального обстеження в діючих електроустановках багато в чому визначаються методами та засобами вимірювання, що застосовуються. При цьому важливе значення має тривалість та періодичність вимірів, умови їх проведення [11].

Особливу увагу слід приділяти обробку отриманих даних. З цієї причини проведення інструментальних обстежень в електроустановках регламентується вимогами чинних стандартів.

З метою виявлення найбільш поширеного в системах електропостачання типу джерела вищих гармонік (ДВГ) виконані інструментальні вимірювання гармонійного складу напруги та струму в електроустановках, що діють. На рисунку 2.1 наведено гістограми сумарного коефіцієнта гармонійних складових напруг та струмів фаз на введенні 10 кВ промислового підприємства, отримані експериментальним шляхом. Вимірювання виконані в електричній мережі без КУ, що виключає можливість спотворення даних в результаті резонансних явищ.

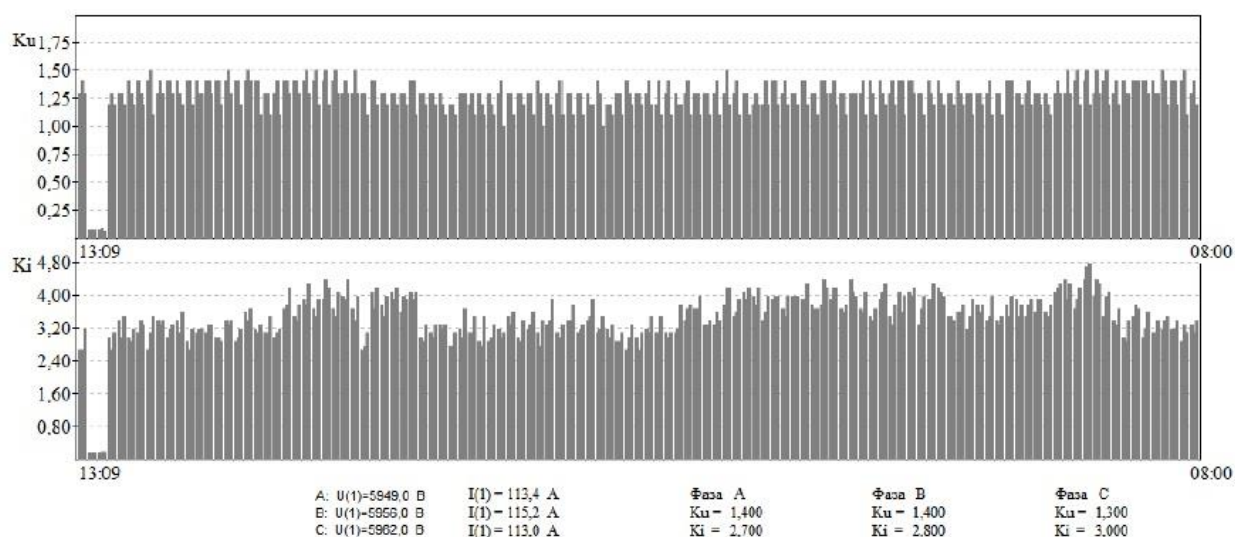


Рисунок 3.1 – Сумарний коефіцієнт гармонійних складових напруг та струмів на введенні 10 кВ промислового підприємства

Як очевидно з гістограм, сумарний коефіцієнт гармонійних складових напруги змінюється в інтервалі від 0,62 до 1,50%. Її середнє значення становить 1,06%. Сумарний коефіцієнт гармонійних складових струму в межах 1,73-4,8%. Середнє значення цього показника дорівнює 3,27%. Слід зазначити, що є незначний розкид значень коефіцієнтів по фазах, як з напруги, і струму. У цілому нині за період вимірювань значення сумарних коефіцієнтів напруги і струму залишаються практично стабільними.

На рисунку 2.2 представлені гістограми коефіцієнтів гармонійних складових напруг та струмів на введенні 10 кВ енергооб'єкта. З рисунка видно, що частка вищих гармонік незначна, і вона не перевищує значень, що нормуються. За всіма гармоніками є багаторазовий запас, а по 7-й гармоніці коефіцієнт гармонійних складових напруги менший у 3,5 рази вимогам ДСТУ. Всі ці факти свідчать, що застосування БК припустимо, оскільки гармонійний склад напруги задовольнятиме встановленим нормам.

З рисунка 2.2 видно, що у введенні 10 кВ мережі промислового підприємства є практично всі гармоніки.

Зокрема, гармонійні складові п'ятої гармоніки напруги становлять ( $U_5=0,54\%$ ), на сьомий ( $U_7=0,85\%$ ), на одинадцятій ( $U_{11}=0,28\%$ ), на

тринадцятій ( $U_{13}=0,20\%$ ) у той час як гармонійні складові п'ятої гармоніки по струму становить ( $I_5=1,76\%$ ), сьомий ( $I_7=1,36\%$ ), одинадцятій ( $I_{11}=0,52\%$ ), тринадцятій ( $I_{13}=0,22\%$ )[18]:.

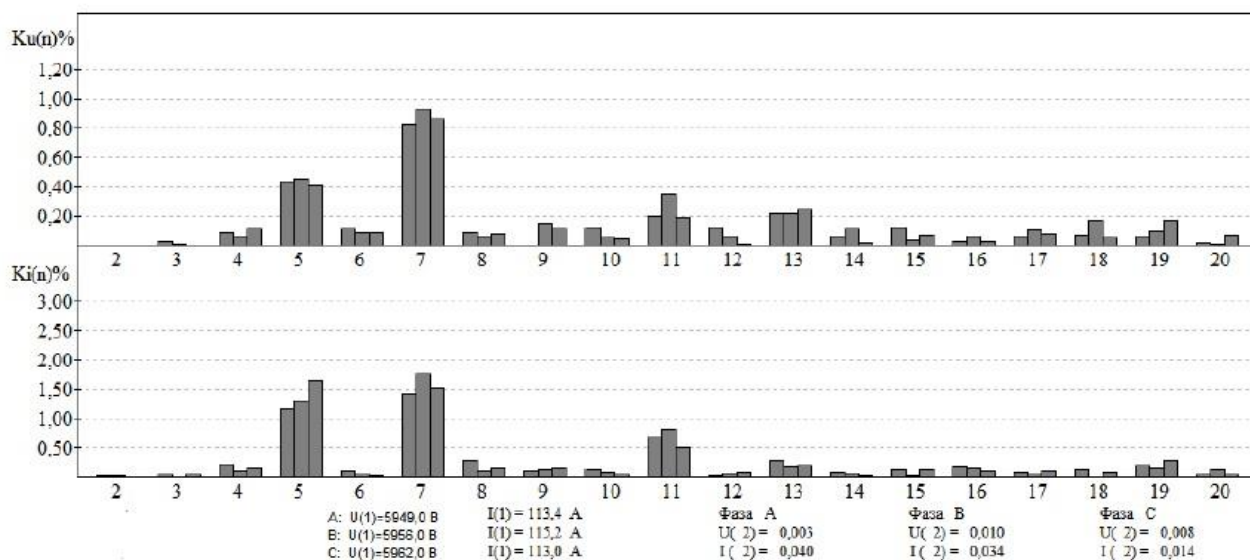


Рисунок 2.2 – Коефіцієнти гармонійних складових напруг та струмів на введенні 10 кВ промислового підприємства

Цей спектр гармонік струму ідеально підходить до спектру струму випрямлячів, які працюють за схемою шестипівперіодного випрямлення.

На рисунку 2.3 і 2.4 наведено гістограми сумарного коефіцієнта гармонійних складових та коефіцієнтів окремих гармонійних складових напруг та струмів на введенні 0,4 кВ.

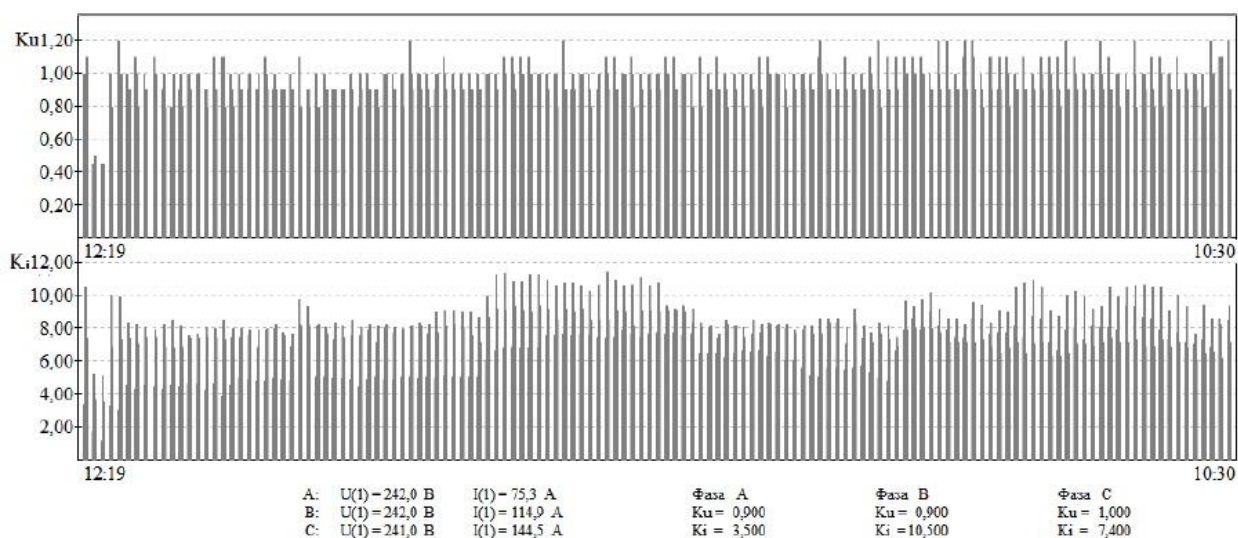


Рисунок 2.3 – Сумарний коефіцієнт гармонічних складових напруг і струмів на вводі 0,4 кВ промислового підприємства

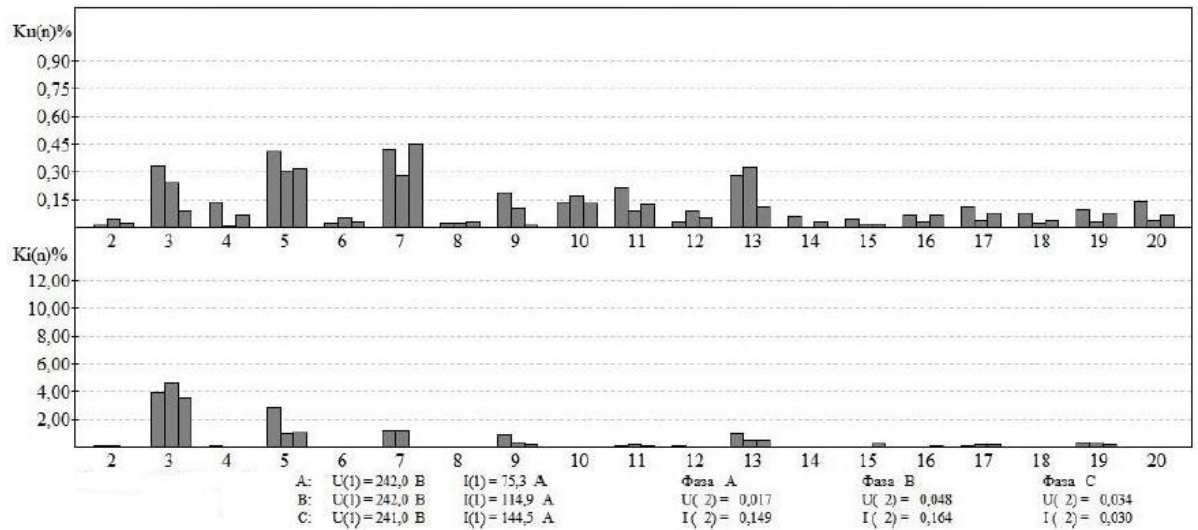


Рисунок 3.4 – Коефіцієнти гармонічних складових напруг і струмів на вводі 0,4 кВ промислового підприємства

Рисунок 3.4 показує, що гістограма гармонійних складових напруг та струмів на введенні 0,38 кВ промислового підприємства практично заповнена всіма гармоніками. Тим не менш, і тут частка гармонік по напрузі п'ятої, сьомої, одинадцятої та тринадцятої превалює над іншими гармоніками ( $U_5=0,41\%$ ,  $U_7=0,46\%$ ,  $U_{11}=0,25\%$ ,  $U_{13}=0,34\%$ ). Суттєвіше переважає третя гармоніка.

Однак, частка всіх цих гармонійних складових значно менша, ніж це вимагає. Отже, висновок напрашується саме собою. Як компенсацію реактивної потужності цілком прийнято застосовувати БК.

В останні роки в народному господарстві широко використовуються електроприводи, забезпечені частотним регулюванням швидкості. У цих пристроях випрямлення змінного струму проводиться за шестипівперіодною схемою. У спектрі кривої струму даного електроустаткування переважно присутні 5, 7, 11, 13 гармоніки. Відомо, що зварювальні агрегати генерують ці ж гармоніки. Ця обставина змушують нас стверджувати, що у системі

електропостачання промислових підприємств найпоширенішими джерелами ДВГ є шестифазні перетворювачі.

На основі аналізу гармонійного складу струмів і напруг у системах електропостачання виробничих об'єктів, а також з урахуванням застосовуваних в даний час схем випрямлення частотно-регульованих електроприводів можна зробити висновок, що як розрахунковий тип ДВГ слід прийняти шестипівперіодний випрямляч.

## **2.2 Розрахункова схема заміщення електричної мережі визначення струмів вищих гармонік**

### **2.2.1 Еквівалентна схема електричної мережі з джерелами найвищих гармонік**

Схема електропостачання промислового підприємства визначається багатьма чинниками, серед яких:

- кількість джерел живлення;
- кількість ступенів трансформації;
- сумарна встановлена потужність електроприймачів;
- поодинокі потужності електроприймачів;
- розташування споживачів електроенергії;
- технологічний процес тощо.

При цьому довжина та переріз ліній, номінальні параметри окремих елементів СЕП для різних підприємств можуть змінюватися в широких межах. Тому систему електропостачання доцільно подати у вигляді еквівалентної схеми, де всі високовольтні та низьковольтні споживачі представлені у вигляді сумарних навантажень відповідної напруги.

Наведемо спрощену розрахункову схему мережі енергетичного об'єкта, де встановлено конденсаторну батарею на стороні високої напруги (ВН) розподільчого пристрою (див. рис. 2.5). Розглянемо звичайний режим роботи. Підприємство живиться від системи, яка має деяку потужність короткого замикання  $S_{кз}$ . Навантаження підключене як по високій (НВ<sub>ВН</sub>), так і по низькій (НВ<sub>НН</sub>) стороні розподільчого пристрою.

У цій розрахунковій схемі для оцінки вищих гармонійних складових є чотири характерні гілки. Відповідно, кожна з цих гілок складається з системи живлення (С) з кабельною лінією (КЛ), високовольтного навантаження (НВ<sub>ВН</sub>) з встановленими електродвигунами і трансформаторними підстанціями, понижуючого трансформатора (Т) з підключеним до нього навантаженням низької напруги (НН) - НВ<sub>НН</sub>, БК компенсації реактивної потужності[10]:.

Очевидно, що джерело вищих гармонік може розташовуватися в будь-якій із цих трьох гілок. Виняток становить гілка з БК (рисунок 2.5 б). У системі живлення (ДВГ<sub>С</sub>), вищі гармоніки можуть входити до складу як високовольтного, так і низьковольтного навантаження (ДВГ<sub>ВН</sub> і ДВГ<sub>НН</sub>).

У той самий час місце підключення ДВГ може бути від РП за певним опором  $k_{\text{ДВГ}} Z_{\text{гілки}}$ , де  $k_{\text{ДВГ}}$  – коефіцієнт, який характеризує віддаленість ДВГ від РП ( $0 \leq k_{\text{ДВГ}} \leq 1$ ) і  $Z_{\text{гілки}}$  – опір гілки схеми, де є ДВГ.

Не виключається варіант розташування ДВГ, який може бути підключений безпосередньо до РП (ДВГ<sub>РП</sub>).

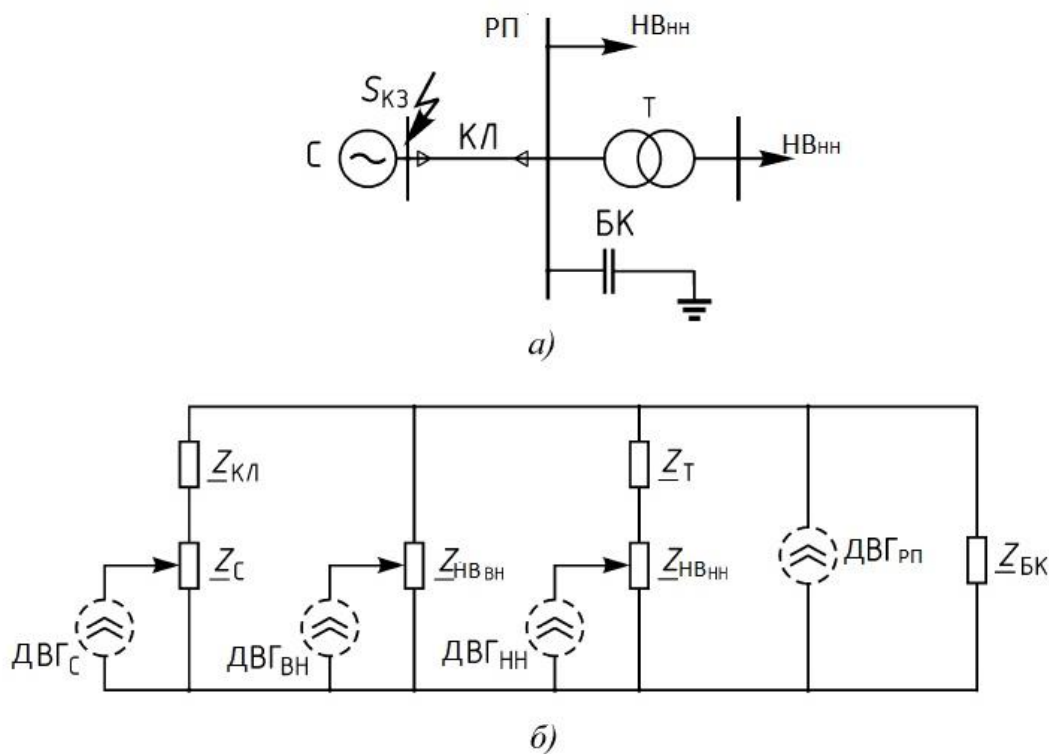


Рисунок 2.5 - Розрахункова схема СЕП з БК на стороні ВН (а), її схема заміщення залежно від місця підключення ДВГ(б)

У практичній діяльності схем електропостачання та типів навантажень може бути безліч. Враховувати всі аспекти цих різноманітностей практично неможливо. Враховуючи цю обставину, всі перелічені варіанти схем доцільно подати у вигляді певної еквівалентної системи, що має характерний тип ДВГ у якийсь розрахунковій точці. Цю точку можна визначити з умови відповідності електромагнітних процесів у галузі, де встановлена батарея конденсаторів, досліджуваної та розрахункової схеми.

З урахуванням цих міркувань, як розрахункову точку слід прийняти РП.

У цьому випадку потужність ДВГ еквівалентної схеми з урахуванням прийнятої розрахункової точки визначається за наступною формулою

$$S_{ДВГ} = S_{ДВГсх} \frac{Z_{г\ddot{u}}(1 - k_{ДВГ})}{Z_{г\ddot{u}}},$$

де  $S_{ДВГсх}$  – потужність ДВГ у схемі мережі.

Очевидно, що у цій схемі всі елементи СЕП мають активно-індуктивні опори. Тільки БК має активно-ємнісний характер. Звичайно, що в такій електричній мережі певних режимах її роботи не виключаються резонансні явища [3, 7, 9]. Досвід експлуатації мереж показує, що резонанс струмів можуть бути більш високих частотах, ніж основна частота мережі (50 Гц) [12, 36, 39, 53]. У СЕП підприємств саме резонансні режими можуть спричинити великі спотворення струмів і напруг у розподільчій мережі з підвищенням струмів БК. Підвищення струмів у конденсаторах спричиняє їх перевантаження з наступним виходом з ладу [2, 5, 16].

Виконання розрахунку струмів та напруг  $n$ -ої гармоніки проводиться згідно з еквівалентною схемою заміщення (див. рис. 2.6). Тут гілка системи, навантажень  $НВ_{ВН}$  та  $НВ_{НН}$  утворюють паралельні ланцюги у вигляді еквівалентної  $R-L$  ланцюга.

У свою чергу отримана гілка активно-індуктивного характеру з'єднана паралельно з гілкою конденсаторів, що має активно-ємнісний характер. Тому в цій електричній схемі, за певних умов, можливі резонансні явища.

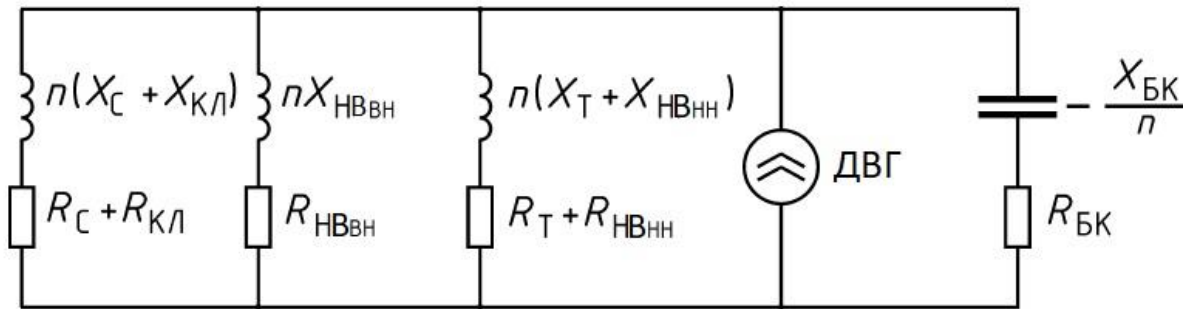


Рисунок 2.6 – Еквівалентна схема заміщення електричної мережі для розрахунку струмів та напруг вищих гармонік

### 2.2.2 Розрахунок параметрів елементів схеми заміщення

Вихідними даними для розрахунку струмів та напруг вищих гармонік є [21]:

- система – номінальна напруга  $U_{\text{ном}}$ , потужність трифазного короткого замикання (КЗ)  $S_{\text{КЗ}}$ , ударний коефіцієнт  $k_{\text{уд}}$
- лінія – довжина  $L$ , питомі опори  $R_{\text{уд}}$  та  $X_{\text{уд}}$ ;
- високовольтне навантаження НВ<sub>ВН</sub> - активна потужність  $P_{\text{ВН}}$  та коефіцієнт потужності  $\cos\phi_{\text{НВ ВН}}$ ;
- трансформатор Т – номінальна потужність  $S_{\text{ном}}$ , напруга КЗ ( $U_{\text{К}}\%$ ) та втрати КЗ ( $\Delta P_{\text{К}}$ );
- низьковольтне навантаження НВ<sub>НН</sub> – активна потужність  $P_{\text{НН}}$  та коефіцієнт потужності  $\cos\phi_{\text{НВ НН}}$ ;
- БК - потужність кожного ступеня  $Q_{i \text{ ст}}$ ;
- ДВГ – тип та розрахункова потужність  $S_{\text{ДВГ}}$ .

Елементи СЕП у схемі заміщення можуть бути представлені у вигляді активно-реактивних опорів, з'єднаних послідовно або паралельно. У першому випадку кількість струмів і гілок у схемі вдвічі менше, ніж у другому. З огляду на це елементи СЕП моделюються у вигляді послідовно з'єднаних опорів. Також слід зазначити, що значення струмів гілок у схемі заміщення з послідовним з'єднанням активних реактивних опорів, на відміну від схеми з

паралельним з'єднанням, відповідають фактичним струмам в елементах електричної мережі.

Опір елементів схеми електропостачання струму основної гармоніки визначаються за відомими виразами [18, 22, 24]:

$$X_C = \frac{U_C}{\sqrt{3}I_K},$$

$$R_C = -X_C \frac{\ln(k_{y\partial} - 1)}{0,01\omega},$$

де  $U_C, I_K$  – напруга та струм КЗ на шинах 6(10) кВ розподільчого пристрою підстанції 110(220)/6(10) кВ;  $k_{y\partial}$  – ударний коефіцієнт при КЗ у тій же точці ( $k_{y\partial}=1,92\dots1,94$  за трансформатором потужністю 25...80 МВА);  $\omega=2\pi f$  – циклічна частота мережі,  $f=50$  Гц;

де  $X_0, R_0$  – питомі реактивний та активний опір лінії;  $L$  – Довжина лінії;  
- трансформатор:

$$X_T = \frac{U_K \% \cdot U_{ном}^2}{100\% \cdot S_{ном}},$$

$$R_T = \frac{\Delta P_K \cdot U_{ном}^2}{S_{ном}^2},$$

де  $S_{ном}, U_{ном}$  – номінальні значення потужності та напруги;  $U_K\%$  - напруга КЗ, %;

$\Delta P_K$  – втрати КЗ;  
- навантаження:

$$Z_{нв} = \frac{U_{ном}^2}{\sqrt{P_{нв}^2 + Q_{нв}^2}},$$

$$X_T = Z_{нв} \frac{Q_{нв}}{\sqrt{P_{нв}^2 + Q_{нв}^2}},$$

$$R_T = Z_{нв} \frac{P_{нв}}{\sqrt{P_{нв}^2 + Q_{нв}^2}},$$

де  $P_{нв}, Q_{нв}$  – активна та реактивна потужності навантаження.

Опір БК визначається з урахуванням питомих втрат активної потужності

$\Delta P_{пит}$  (кВт/квар):

$$X_{BK} = \frac{U_{ном}^2}{(1 + \Delta P_{пит}^2) Q_{BK}},$$

$$R_{BK} = \Delta P_{пит} X_{BK}.$$

Для розрахунку вищих гармонік елементи СЕП у схемі заміщення надаються опорами струму відповідної гармоніки. Активні опори елементів майже не залежить від номера гармоніки та його значення можна прийняти постійними.

Індуктивні опори елементів струмам вищих гармонік розраховуються по виразу

$$X_n = nX,$$

де  $X$  - опір елемента струму промислової частоти;

$n$  – номер гармоніки, для котрої розраховуються струми гілок.

Ємнісні опори елементів обернено пропорційні номеру гармоніки:

$$X_n = X/n.$$

Таблиця 2.1 - Номери гармонік, що генеруються різними типами ДВГ

| №<br>п/п | Тип ДВГ                             | Номера гармонік                |
|----------|-------------------------------------|--------------------------------|
| 1.       | Піч для плавки метала               | $n=2, 3, \dots, 10, 11$ і т.п. |
| 2.       | Пристрій для зварювального агрегата | $n=5, 7, 11, 13$               |
| 3.       | Газорозрядні лампи                  | $n=3$                          |
| 4.       | Шестифазні випрямні пристрої        | $n=5, 7, 11, 13$               |
| 5.       | Дванадцятифазні випрямні пристрої   | $n=11, 13$                     |
| 6.       | Другий тип ДВГ                      | $I_n$ – ввод з клавіатури      |

Таблиця 2.2 - Розрахункові формули для визначення струмів ДВГ

| №<br>п/п | Тип ДВГ                             | Розрахункова формула                                            |
|----------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1.       | Піч для плавки металу               | $I_n = \frac{1,25 S_{\text{ДВГ}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} n^2}$ |
| 2.       | Пристрій для зварювального агрегата | $I_n = \frac{S_{\text{ДВГ}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} n^2}$      |
| 3.       | Газоразрядні лампи                  | $I_n = \frac{0,2 S_{\text{ДВГ}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}}}$      |
| 4.       | Шестифазні випрямні пристрої        | $I_n = \frac{S_{\text{ДВГ}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} n}$        |
| 5.       | Дванадцятифазні випрямні пристрої   |                                                                 |
| 6.       | Інший тип ДВГ                       | $I_n$ – ввід з клавіатури                                       |

### 2.3 Методика розрахунку струмів найвищих гармонік в електричній мережі з батареями конденсаторів

Для розрахунку гармонійного складу струму будемо виконувати із застосуванням стандартних пакетів, наприклад, математичних пакетів Matlab/Simulink. [20, 23, 24]. Однією з основних вимог до розробленої методики є простота виконання розрахунків незалежно від рівня знань із програмування.

Для виявлення можливих резонансних процесів розроблено методику розрахунку гармонійних складових струму на різних ступенях компенсації реактивної потужності. У даній методиці передбачений розрахунок гармонік струмів залежно від параметрів системи живлення, навантажень 6 (10) і 0,38 кВ і розрахункової потужності ДВГ  $S_{\text{ДВГ}}$  [6, 17].

У реальних умовах експлуатації перетворювач може генерувати неканонічні (анормальні) гармоніки, причинами виникнення яких є асиметрія параметрів ланцюга, наявність вищих гармонік в напрузі живлення, відхилення кутів управління по фазах. У даних розрахунках ці фактори не враховуються.

Розрахунок режимів роботи мережі здійснюється з урахуванням таких припущень:

- система електропостачання симетрична;
- опір елементів електричної мережі мають лінійний характер;
- джерела вищих гармонік представляються симетричними трифазними джерелами струму.

Прийняті припущення дозволяють визначити режим кожної гармонійної складової незалежно від інших режимів і використовувати для обчислення діючих значень струмів принцип накладання. Розрахунок через великий обсяг розрахунків неможливо виконати без застосування сучасної обчислювальної техніки.

На малюнку 2.7 показано розширену схему електричної мережі, що містить БК на стороні ВН і НН.

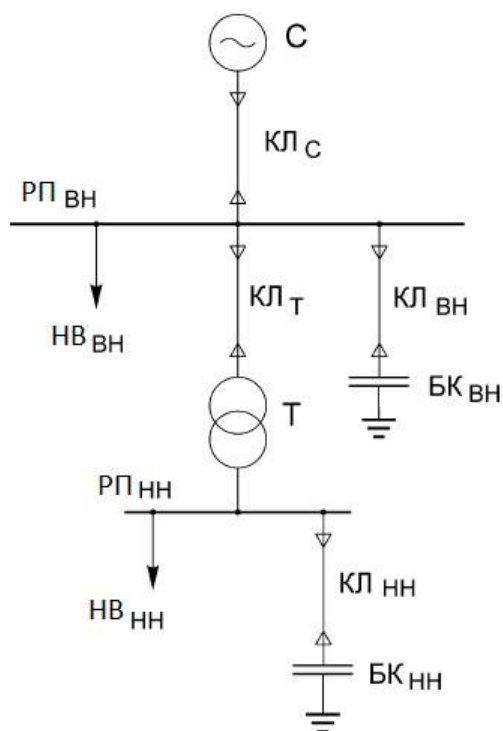


Рисунок 3.7 – Схема електричної мережі з БК на стороні ВН та ПН гармонік

Дана схема складена з урахуванням перспективи дослідження резонансних явищ в електричних мережах, що містять високовольтні та (або) низьковольтні БК. Частка активного опору сучасних конденсаторів дуже мала. З урахуванням цього активні опори кабелів  $KЛ_{ВН}$  і  $KЛ_{НН}$  можуть бути зіставні з активними опорами відповідних конденсаторів, що може відбиватися на резонансних процесах. З цієї причини доцільно більш точно врахувати опір таких ліній, особливо при їх значній довжині та малому перерізі.

На рисунку 2.8 представлено схему заміщення електричної мережі. Вона містить 9 гілок і 5 незалежних вузлів, пронумеровані та показані, відповідно, у трикутниках та кружечках. Таким чином, кількість перших значно перевищує кількість других.

З огляду на це найбільш ефективним є застосування методу вузлових потенціалів.

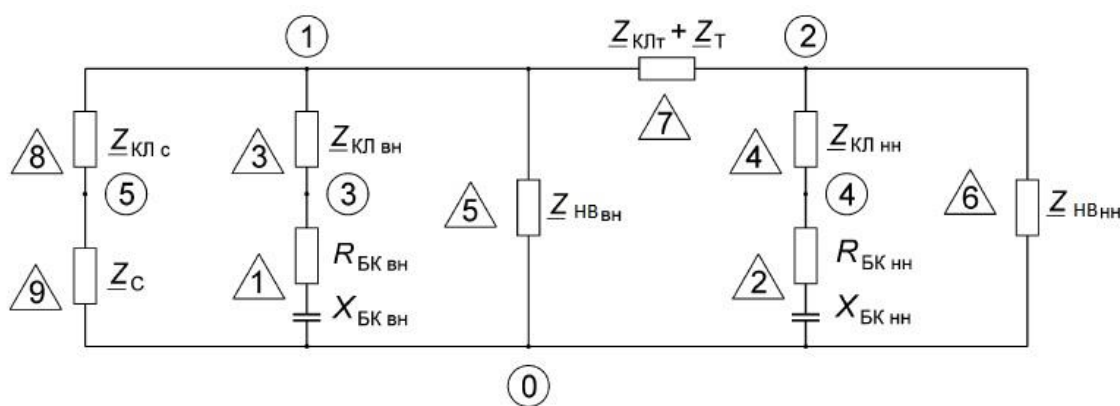


Рисунок 3.8 – Схема заміщення електричної мережі

З метою уніфікації та подальшої модернізації програмного комплексу під конкретну схему електропостачання методику доцільно реалізувати на основі матричного способу розрахунку.

Як відомо, матриця вузлових провідностей  $Y$  є квадратною. Реалізація методу вузлових потенціалів матричному вигляді вимагає обчислення зворотної матриці вузлових провідностей  $Y^{-1}$ . У класичному варіанті визначення даної матриці проводиться через доповнення алгебри елементів матриці вузлових провідностей. Реалізація такої методики як програмного комплексу вимагає значного обсягу неоднотипних обчислень. Також існує

метод Гауса-Жордана [24], який значно простіше запрограмувати. Слід зазначити, що така процедура має істотно менший обсяг програмного коду та арифметичних операцій, має велику точність розрахунку.

Суть методу Гауса (Гаусса-Жордана) полягає в наступному:

- складається розширена матриця, що містить поруч матрицю вузлових провідностей  $\mathbf{Y}$  і одиничну матрицю  $\mathbf{E}$  такого ж розміру, що і матриця  $\mathbf{Y}$ ;

- з допомогою елементарних перетворень шляхом найпростіших арифметичних операцій домагаються, щоб ліва частина розширеної матриці (вихідна матриця  $\mathbf{Y}$ ) стала одиничною.

До елементарних перетворень відносяться такі дії:

- зміна місць двох рядків;
- множення всіх елементів рядка на деяке число, що не дорівнює нулю;
- підсумовування елементів одного рядка з відповідними елементами іншого рядка, помноженими на будь-який множник.

В результаті таких перетворень частина розширеної матриці, що представляє вихідну матрицю  $\mathbf{Y}$ , перетворюється на одиничну матрицю, одинична матриця - на зворотну матрицю вузлових провідностей  $\mathbf{Y}^{-1}$ .

Розрахункова модель побудована таким чином, що в ній як джерело вищих гармонік можна задавати шести і дванадцяти фазні випрямлячі, в якості яких можуть бути сталеплавильні печі, зварювальні випрямлячі, газорозрядні лампи.

Як вказується в джерелах [14, 22], спектр гармонік струму в реальній електричній мережі суттєво відрізняється від спектра, що виходять від вказаних вище пристроїв. Тому розрахунок резонансних режимів слід виконувати за фактичними значеннями гармонійних складових струму  $I_n$  енергетичного об'єкта, що досліджується, тобто. значення гармонік струму, можливо визначити на основі аналізу Фур'є осцилограм струмів, отриманих експериментальним шляхом [9, 19]. Значення струмів гармонік в розрахункову модель вводиться за допомогою клавіатури персонального комп'ютера.

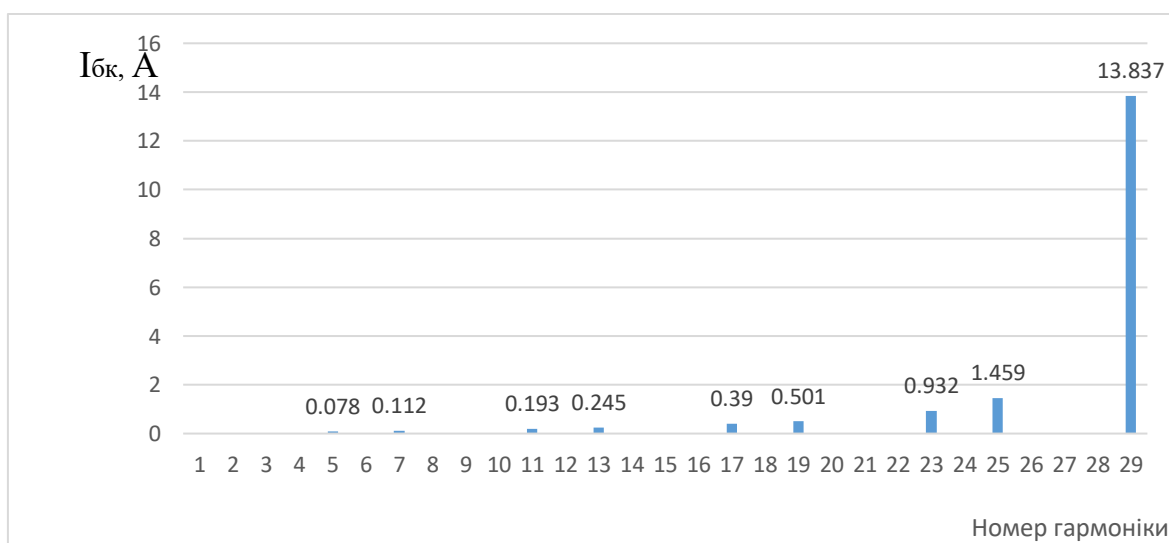
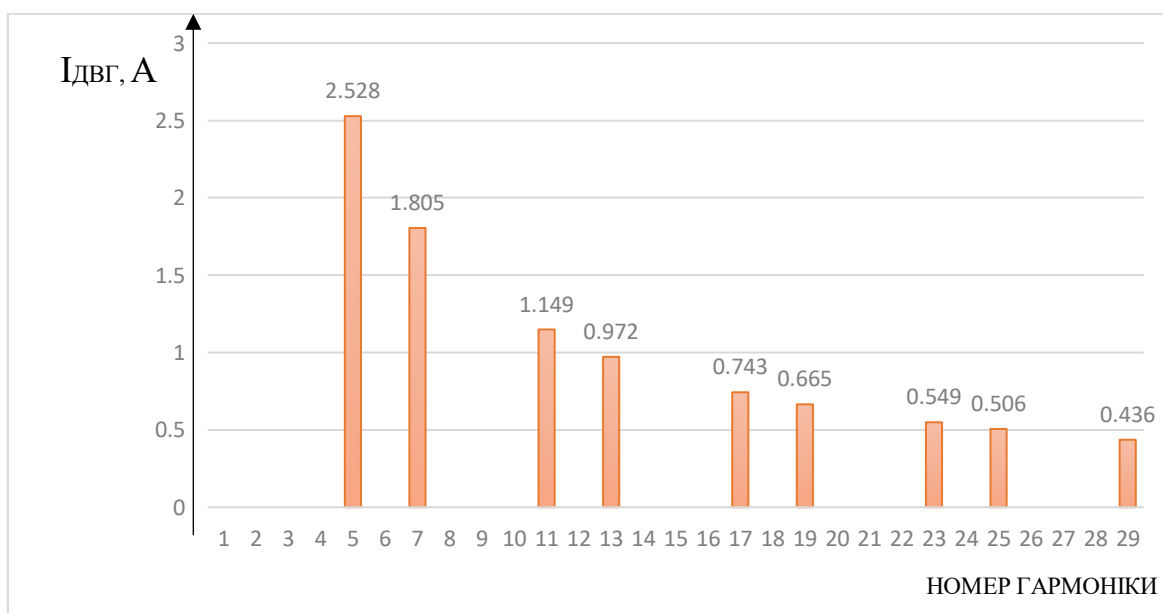
Значення струмів кожної гармоніки у гілках схеми визначаються незалежно з інших з урахуванням даних, які у таблицях 2.1 і 2.2. При цьому чинне значення струму конденсаторів виражається формулою

$$I_{БК} = \sqrt{\sum_{n=1}^{40} I_{БКn}^2}, \quad (2.1)$$

де  $n$  – номер гармоніки;

$I_{БКn}$  - струм  $n$ -ої гармоніки струму конденсаторів, струм основної гармоніки береться рівною номінальному значенню.

Для виконання розрахунків, згідно з рівнянням (2.1), слід враховувати тільки ті гармоніки, які генерує тип джерела вищих гармонік, що розглядається.



### Рисунок 2.10. Графіки розрахунку струмів ДВГ та БК

На рисунку 2.10 зображені графіки розрахунку струмів ДВГ та БК які виконані при слідуєчих умовах:

Джерело ДВГ – шести фазний випрамляч потужністю 218 КВА;

Перша ступінь БК  $Q_{\text{БК}} = 3 \times 100$  квар.

### **Висновки по другому розділу**

Для аналізу та виконання розрахунків, згідно з рівнянням (2.1), слід враховувати тільки ті гармоніки, які генерує тип джерела вищих гармонік, що розглядається.

## РОЗДІЛ 3

### МОДЕЛЮВАННЯ РЕЗОНАНСНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

#### 3.1 Резонансні явища в електричних мережах із косинусними конденсаторами

Резонансні явища розглядаються стосовно пасивних електричних ланцюгів, що містять індуктивності і ємності. Залежно від зміни схеми розрізняють резонанс напруг та резонанс струмів. Перший режим має місце в ланцюгах з послідовним з'єднанням ділянок, що містять індуктивності та ємності, другий режим – у ланцюгах з паралельним з'єднанням таких ділянок.

Дослідження резонансних режимів в електричних ланцюгах полягає у знаходженні резонансних частот, залежностей параметрів ланцюга (опірів  $r$ ,  $x$ ,  $z$  або провідностей  $g$ ,  $b$ ,  $y$ , фази  $\varphi$ ) від частоти (або параметрів  $L$  і  $C$ ), а також у розгляді енергетичних співвідношень [ 71]. Частотні характеристики  $r=f(\omega)$ ,  $x = f(\omega)$ ,  $z = f(\omega)$ ,  $g = f(\omega)$ ,  $b = f(\omega)$ ,  $y = f(\omega)$ ,  $\varphi = f(\omega)$  для заданого ланцюга взаємопов'язані. В більшості випадків достатньо знати лише частину із перерахованих характеристик, щоб можна було визначити інші. У класичному варіанті в ланцюгах із послідовним з'єднанням ділянок розглядаються частотні характеристики опорів, в ланцюгах з паралельним з'єднанням ділянок – частотні характеристики провідностей [10, 17]. Як відомо, опори та провідності є обернено залежними величинами.

На рисунку 3.1, а представлена спрощена схема електричної мережі енергетичного об'єкта. Вона містить живильну систему, навантаження і косинусні БК. Таким чином, у схемі є як індуктивні, так і ємнісні елементи, що зумовлює можливість резонансних явищ. Як частотну характеристику слід розглядати залежність опору щодо загальної точки індуктивної та ємнісної частин схеми від частоти. У нашому випадку такою є РП-10 кВ, щодо якої система, навантаження та БК з'єднані паралельно. До РП підключено нелінійне навантаження, що генерує струми вищих гармонік..

На рисунку 3.1 б зображена еквівалентна схема заміщення даної електричної мережі з виділенням активно-індуктивної ( $r_1-L$ ) і активно-ємнісної частин ( $r_2-C$ ). На вхід схеми надходить струм  $I_{\text{ДВГ}}$ , що містить канонічні гармоніки. Абсолютні значення гармонік цього струму не залежать від режиму роботи мережі та визначаються параметрами нелінійного навантаження.

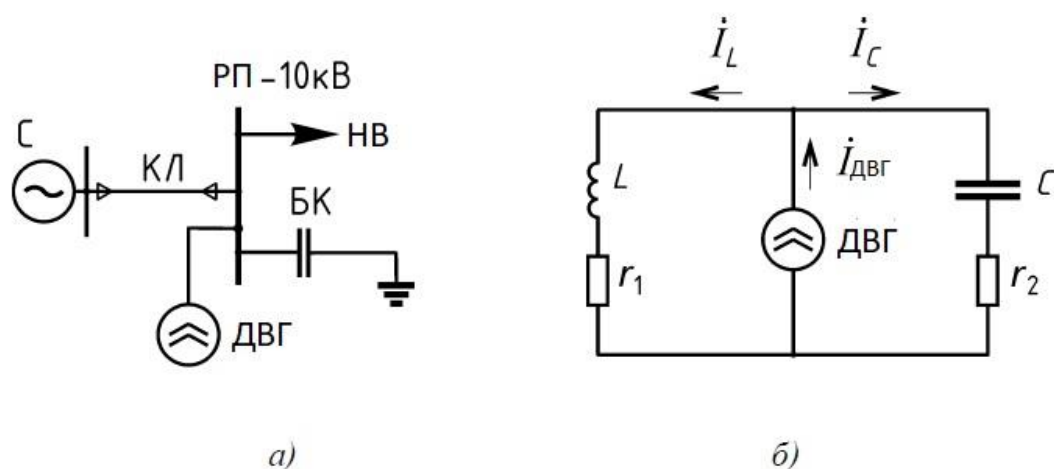


Рисунок 3.1 – Спрощена схема електричної мережі з ДВГ(а), її еквівалентна схема заміщення (б)

Дослідження резонансних явищ у СЕП, що містять БК, виконано на основі розрахунку частотних показників. Одним із видів частотних характеристик є залежність опорів схеми та її окремих ділянок від частоти  $z_c = f(\omega)$  [10, 71]. На такій характеристиці максимуми мають яскравіше виражений характер порівняно з частотною залежністю провідності. Активні та реактивні складові опорів схеми у випадку є параметрами, залежать від частоти [25].

Комплексний опір схеми визначається виразом

$$\underline{Z} = \frac{(r_1 + r_2)(r_1 r_2 + L/C) + (\omega L - 1/\omega C)(r_2 \omega L - r_1/\omega C)}{(r_1 + r_2)^2 (\omega L - 1/\omega C)^2} - \\ - j \frac{(\omega L - 1/\omega C)(r_1 r_2 + L/C) - (r_1 + r_2)(r_2 \omega L - r_1/\omega C)}{(r_1 + r_2)^2 (\omega L - 1/\omega C)^2},$$

де  $r_1, L$  – активний опір та індуктивність першої частини схеми;  
 $r_2, C$  – активний опір та ємність другої частини схеми.

Комплексна провідність схеми має вираз [25]

$$\underline{Y} = \frac{r_1}{r_1^2 + \omega^2 L^2} + \frac{r_2}{r_2^2 + 1/(\omega^2 C^2)} + j \left( \frac{\omega L}{r_1^2 + \omega^2 L^2} - \frac{1/(\omega C)}{r_2^2 + 1/(\omega^2 C^2)} \right).$$

Резонанс має місце при частоті, що визначається виразом [71]

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\left( \frac{L}{C} - r_1^2 \right) / \left( \frac{L}{C} - r_2^2 \right)}.$$

На малюнку 3.2 наведено приклад частотних характеристик активного, реактивного та повних опорів електричної мережі з косинусними БК. Дані характеристики побудовано до частоти 2000 Гц ( $n=40$ ). При цьому враховувалося, що відповідно до ГОСТ 32144-2013 гармонійний склад напруги нормується до 40-ї гармоніки. На більш високих частотах посилення струмів гармонік відбувається незначно та резонансні режими не виражені.

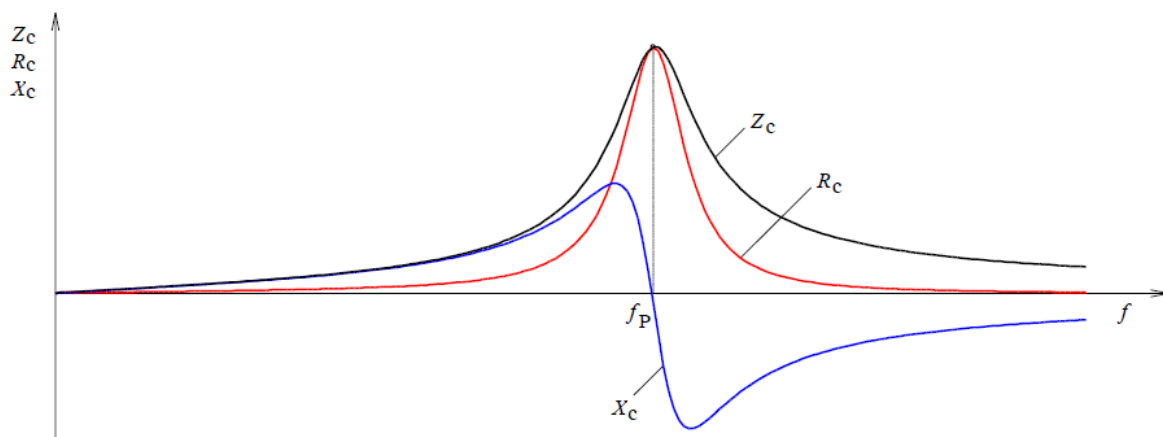


Рисунок 3.2 – Приклад частотних характеристик електричної мережі

Як правило, на частоті промислової мережі індуктивний опір мережі  $\omega L$  значно більший за ємнісний  $1/\omega C$  і струм основної гармоніки є активно-індуктивним. ємнісним. Резонансна частота дорівнює максимальному значенню опору. мережі  $Z_C$ .

Якщо резонансна частота мережі виявиться близькою до частоти канонічної гармоніки ДВГ, то у схемі, що розглядається, можливий резонанс

струмів [25]. На резонансній частоті індуктивний опір однієї частини схеми компенсується ємнісним опором іншої частини.

В результаті реактивний опір усієї схеми дорівнює нулю, але при цьому багаторазово зростає активний опір. Таким чином, повний опір схеми на резонансній частоті визначається її активною складовою відповідно реактивна потужність її виводах дорівнює нулю [25].

Слід зазначити, що в певних умовах резонансні явища можливі також на частотах понад 2000 Гц ( $n=40$ ). Такі явища, наприклад можуть мати місце в мережах, що живляться від системи із значною потужністю КЗ ( $S_{КЗ}>350$  кВА), у режимі компенсації БК невеликої потужності.

На резонансній частоті струм на вході схеми має активний характер (рисунок 3.3). У водночас струми даної частоти окремих частинах схеми містять значні реактивні складові  $I_{Lp}$  і  $I_{Cp}$ . Чим менше  $r_1$  і  $r_2$  в порівнянні з  $\omega L$  і  $1/\omega C$ , тим більше кратність реактивної складової струмів у гілках по відношенню до відповідних значень активних складових [10]. З достатньою точністю можна прийняти, що  $I_L \approx I_{Lp}$  і  $I_C \approx I_{Cp}$ . Таким чином, відбувається багаторазове посилення струмів резонансної частоти в окремих частинах схеми. При цьому абсолютні значення гармоніки вхідного струму, включаючи гармоніки резонансної частоти, залишаються незмінними.

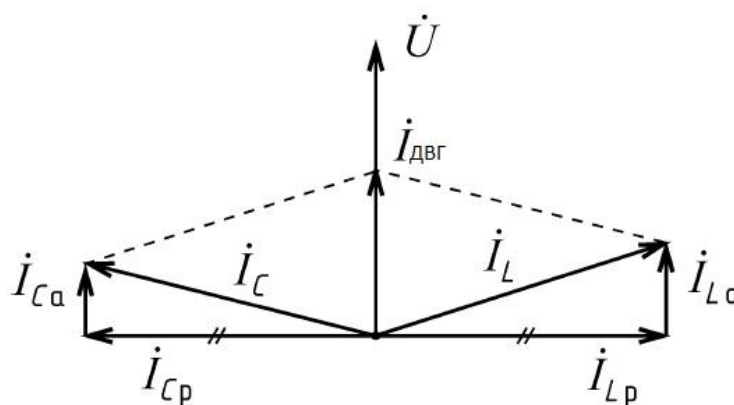


Рисунок 3.3 – Векторна діаграма струмів резонансної частоти

Статичні БК (наприклад, БК одного ступеня компенсації ПАКРП) дозволяють регулювати коефіцієнт реактивної потужності на введенні підприємства в рамках нормованих значень ( $0 \leq \tan \varphi \leq \tan \varphi_{\text{норм}}$ ) у фіксованому

інтервалі зміни навантаження  $P_{\text{нв}} = P_{\text{min}} \dots P_{\text{max}}$ . У межах даного інтервалу еквівалентний опір індуктивної частини схеми змінюється не більше, ніж на 23%. Відповідно до цього побудова частотних характеристик виконується у припущенні, що розрахункова потужність навантаження  $P_{\text{нг}}$  у межах робочої зони кожного ступеня компенсації незмінна і дорівнює середньоарифметичному значенню  $P_{\text{min}}$  та  $P_{\text{max}}$

$$P_{\text{нв}} = \frac{P_{\text{min}} + P_{\text{max}}}{2}.$$

### 3.2 Моделювання резонансних режимів роботи електричної мережі

Аналіз резонансних явищ слід здійснити з урахуванням розрахунку частотних характеристик електричної мережі з БК. Одним із видів частотних характеристик є залежність опору схеми та її окремих ділянок від частоти [10, 25]. На такій характеристиці максимуми мають яскравіше виражений характер порівняно з частотною залежністю провідності.

На малюнку 3.4,а наведено спрощену схему електричної мережі, що включає живильну систему, навантаження та косинусні БК. Таким чином, у схемі є як індуктивні, так і ємнісні елементи, що зумовлює можливість резонансних явищ. Щодо РП-10 кВ система, навантаження, а також БК з'єднані паралельно. До РП підключено нелінійне навантаження, в якості якого прийнято шестипівперіодний випрямляч (рисунк 3.4, б). Якщо резонансна частота мережі близька до частоти канонічної гармоніки ДВГ, то у схемі, що розглядається, можливий резонанс струмів. Резонансна частота на кожному ступені компенсації відповідає максимальному значенню опору  $Z_i$ .

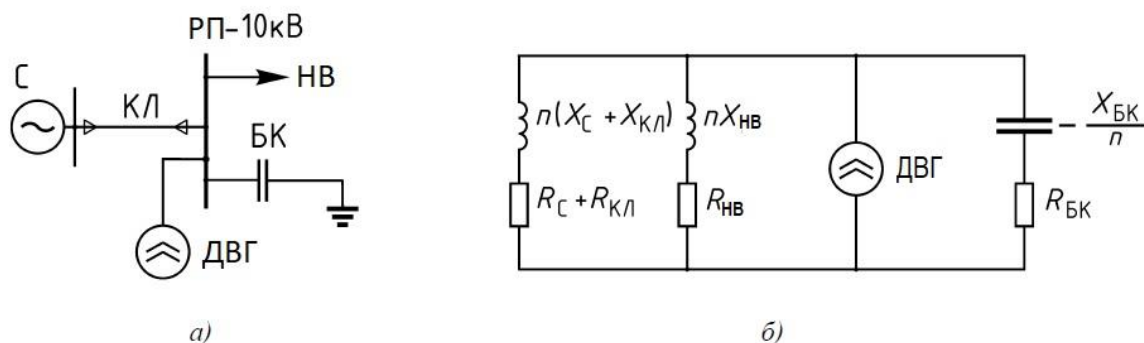
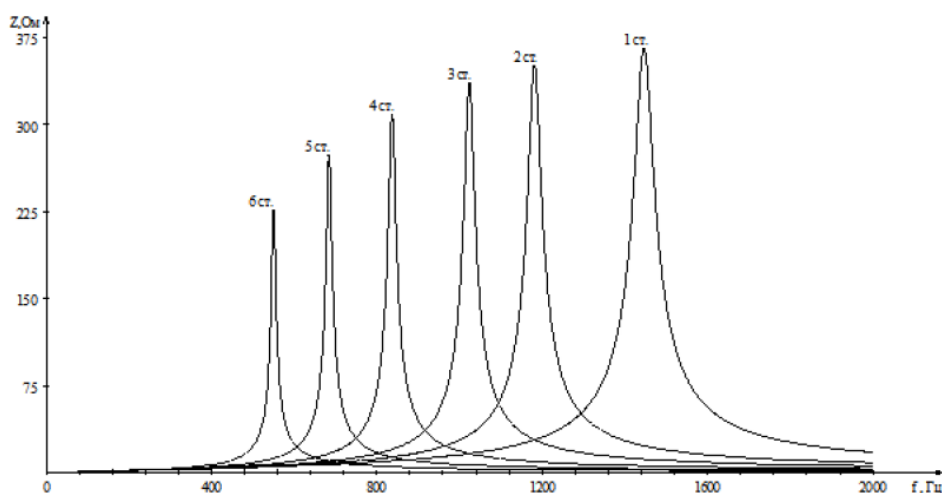


Рисунок 3.4 – Спрощена схема електричної мережі (а) та її схема заміщення для розрахунку частотної характеристики (б)

Виконано дослідження режимів роботи електричних мереж з потужність КЗ на РП-10 кВ рівною 278 кВА, ударний коефіцієнт струму КЗ  $k_{уд} = 1,8$ . Навантаження 10 кВ змінюється від 800 до 4000 кВт із коефіцієнтом потужності  $\cos\varphi_{нв}=0,75$ . Регулювання коефіцієнта реактивної потужності виконується за допомогою ПАКРП. Пристрій містить чотири секції БК - 150, 300, 600, 1200 квар. Компенсація реактивної потужності здійснюється шістьма ступенями, потужності яких дорівнюють 300, 450, 600, 900, 1350 і 2100 квар. У КУ, що розглядається, застосовуються стандартні конденсатори, які допускають перевантаження по струму на 30% [6, 16].

З метою виявлення можливих резонансних режимів для кожного ступеня компенсації побудовано частотні характеристики опору мережі щодо точки підключення БК (РУ-10 кВ), що показані на рисунку 3.5. Характеристики збудовані до частоти 2000 Гц ( $n=40$ ). При цьому враховувалося, що відповідно до ГОСТ 32144-2013, гармонійний склад напруги нормується до 40-ї гармоніки; на високих частотах посилення струмів гармонік відбувається незначно і резонансні режими не виражені [12].

Як відомо, резонансна частота відповідає максимальному значенню опору мережі  $Z$ . Даний опір визначається щодо загальної точки індуктивної та ємнісної частин схеми.



### Рисунок 3.5 – Частотна характеристика електричної мережі з БК

На першому ступені компенсації забезпечується нормоване значення коефіцієнта реактивної потужності ( $\text{tg}\varphi=0,00\dots0,40$ ) в інтервалі зміни навантаження від  $P_{1\min}=340,2$  кВт до  $P_{1\max}=622,5$  кВт.

Розрахунок частотних характеристик виконаний у припущенні, що потужність навантаження на кожному ступені компенсації  $Q_{\text{ст}i}$  незмінна і дорівнює середньоарифметичній величині граничних значень  $P_{i\min}$  і  $P_{i\max}$ , за яких коефіцієнт реактивної потужності на введенні підприємства відповідно дорівнює 0 і  $\text{tg}\varphi_{\text{норм}}$

З урахуванням цього на першому ступені потужність навантаження  $P_{\text{нв}}$  прийнята рівною 481,3 кВт.

Аналогічним чином виконані розрахунки інших ступенів компенсації. Зведені дані щодо розрахунку частотних характеристик на кожному ступені компенсації наведені в таблиці 3.3.

На аналізованому інтервалі зміни параметрів елементів СЕС резонансна частота змінюється не більше 550...1446 Гц.

На першому та шостому щаблях компенсації резонансна частота мережі практично збігається з канонічною частотою шестипівперіодного випрямляча: на першому ступені  $f_p=1449$  Гц ( $n_p=28,98$ ), на шостому ступені  $f_p=550$  Гц ( $n_p=11,0$ ). На шостому ступені компенсації ( $Q_{\text{БК}}=2100$  квар) забезпечується нормоване значення коефіцієнта реактивної потужності ( $\text{tg}\varphi=0,00\dots0,40$ ) в інтервалі зміни навантаження підприємства від  $P_{6\min}=2381,2$  кВт до  $P_{1\max}=4357,6$  кВт. З урахуванням виразу (3.2) розрахункова потужність навантаження  $P_{\text{нв}}$  у даному режимі прийнята рівною 3369,4 кВт.

Таблиця 3.3 – Дані щодо розрахунку частотної характеристики електричної мережі

| Ступінь | $Q_{\text{БК}}$ , квар | $P_{\text{нв}}$ , кВт | $P_{\text{ср}}$ , кВт | $f_p$ , Гц | $n_p$ |
|---------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-------|
| 1       | 300                    | 340,2...622,5         | 481,3                 | 1449       | 28,98 |
| 2       | 450                    | 510,3...933,8         | 722,0                 | 1184       | 23,68 |
| 3       | 600                    | 680,3...1245,0        | 962,7                 | 1026       | 20,52 |
| 4       | 900                    | 1020,5...1867,5       | 1444,0                | 838        | 16,76 |
| 5       | 1350                   | 1530,8...2801,3       | 2166,0                | 685        | 13,70 |
| 6       | 2100                   | 2381,2...4357,6       | 3369,4                | 550        | 11,00 |

Найгірші умови резонансу мають місце на гармоніках невеликих порядків (орієнтовно  $n \leq 20$ ) [12]. В даному випадку слід очікувати значного посилення струму БК 11-ї гармоніки в режимі роботи шостого ступеня пристрою ( $Q_{\text{БК}} = 2100$  квар). На цьому ступені виконується компенсація реактивної потужності у разі зміни навантаження підприємства від  $P_{6 \min} = 2381,2$  до  $P_{6 \max} = 4357,6$  кВт. Розрахункова потужність навантаження  $P_{\text{нв}}$  у разі становить 3369,4 кВт.

У режимі компенсації на другому та четвертому щаблях БК резонансна частота мережі досить близька до частот канонічних гармонік шестипівперіодного випрямляча: на другому ступені  $f_p = 1184$  Гц ( $n_p = 23,68$ ), на четвертому ступені  $f_p = 838$  Гц ( $n_p = 16,76$ ). У зазначених режимах можливі суттєві посилення струмів БК 23-ї та 17-ї гармонік, відповідно.

На третій і п'ятій ступені компенсації значення  $f_p$  відрізняються від частот канонічних гармонік настільки, що виключаються явно виражені резонансні явища. На цих щаблях можливі лише незначні посилення струмів найближчих до резонансної частоти мережі канонічних гармонік ДВГ.

Як джерело гармонік прийнятий шестипівперіодний випрямляч розрахунковою потужністю  $S_{\text{ДВГ}} = 250$  кВА. Даним типом нелінійного навантаження генеруються гармоніки порядку 5, 7, 11, 13 і т.д. На рисунку 3.6 показано гармонійний склад струму даного ДВГ.

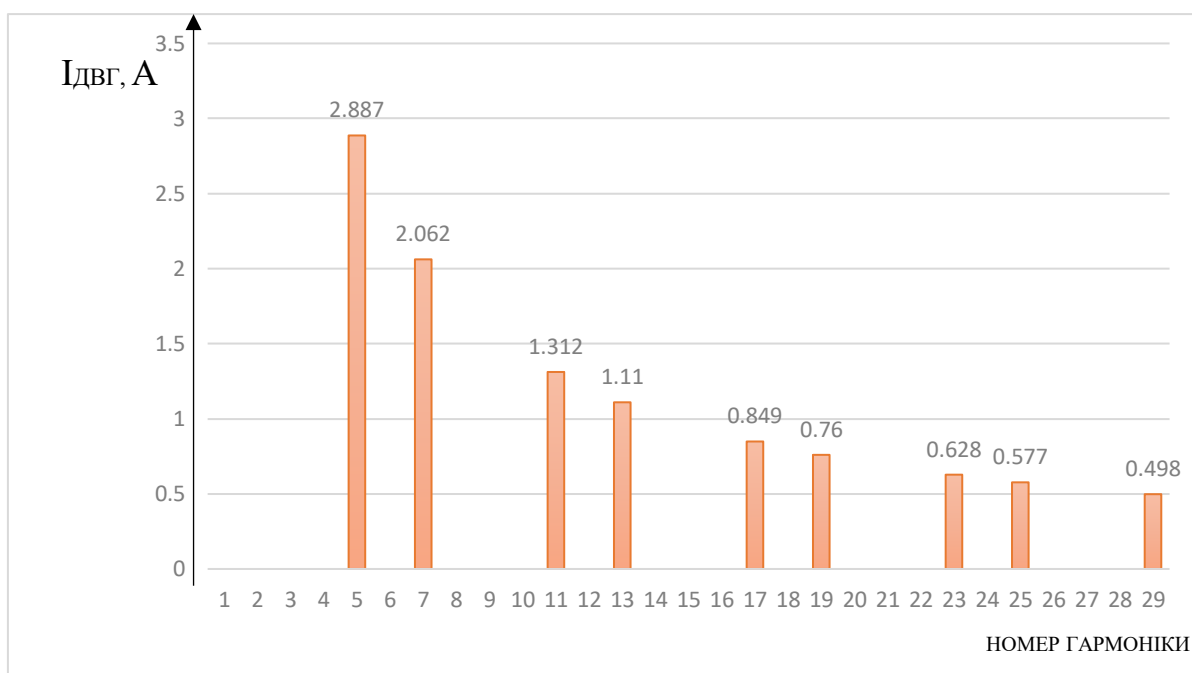


Рисунок 3.6 – Гармонічний склад струму шестипівперіодного випрямляча

Максимальне значення має струм п'ятої гармоніки -  $I_5 = 2,89$  А. Зі збільшенням частоти значення струмів гармонік зменшуються обернено пропорційно номеру гармоніки.

На рисунку 3.7 наведено гістограми гармонік струму БК у режимі компенсації шостим ступенем ПАКРП. У цьому режимі резонансна частота практично збігається з частотою одинадцятої гармоніки ( $f_p = 550$  Гц). Відбувається значне посилення струму цієї гармоніки: при струмі ДВГ 1,31 А (рисунок 3.7) струм БК становить 70,8 А. Його відносне значення дорівнює 0,58 у.о (за основу прийнято номінальний струм БК ступеня  $I_{БК\text{ ном}} = 121,2$  А при  $Q_{БК} = 2100$  квар). Кратність чинного значення струму БК з урахуванням вищих гармонік перебуває у допустимих межах (1,159 у.о.).

Відповідно до рисунка 3.8, у режимі компенсації першим ступенем ПАКРП резонансний режим виникає на 29-й гармоніці ( $f_p = 1449$  Гц).  $I_{БК^*}$  становить 0,91 у.о. ( $Q_{БК} = 300$  квар). Кратність струму БК першого ступеня з урахуванням вищих гармонік дорівнює 1,38 у.о. ).

Слід звернути увагу на те, що абсолютне значення струму БК першого ступеня на резонансній частоті більш ніж у чотири рази менше відповідного значення на шостій ступені БК на даних щаблях.

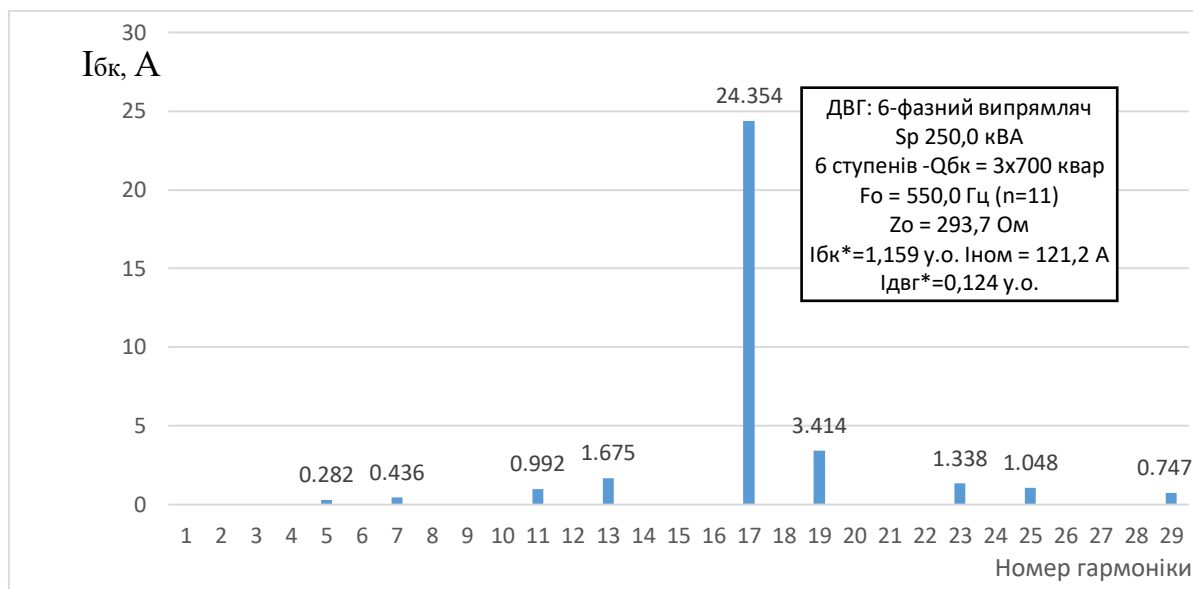


Рисунок 3.7 – Гармонічний склад струму БК на шостому ступені компенсації

В результаті компенсація першим ступенем пристрою призводить до більш важких наслідків порівняно з компенсацією шостим ступенем і є неприпустимим з точки зору навантаження БК.

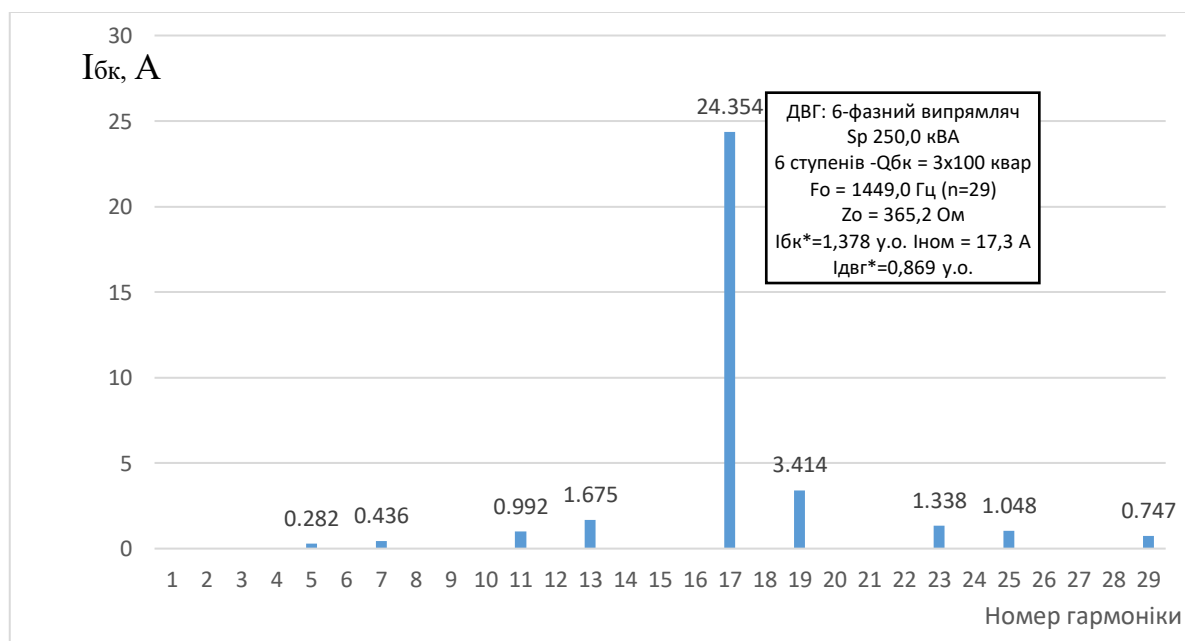
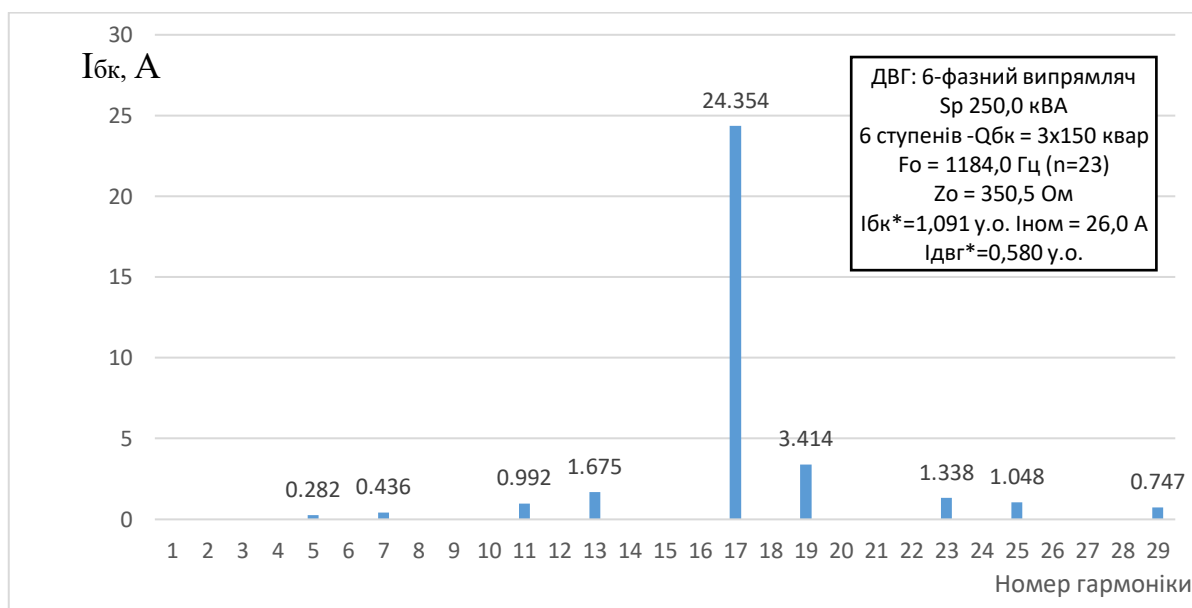
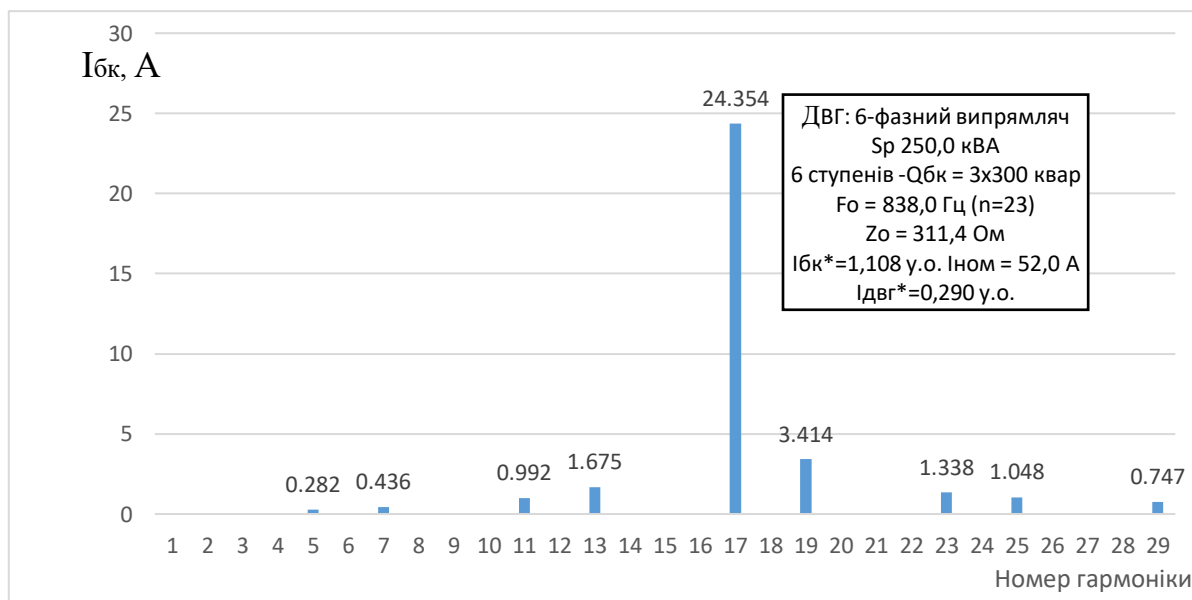


Рисунок 3.8 – Гармонічний склад струму БК на першому ступені компенсації

На другому ступені компенсації має місце посилення 23-ї гармоніки -  $I_{БК}^* = 0,37$  у.о. при номінальному струмі БК  $I_{БК\text{ ном}} = 26,0$  А (рисунок 3.9 а). Також відбувається незначне посилення 25-ї гармоніки -  $I_{БК}^* = 0,21$  у.о. Чинне значення струму БК становить 1,09 у.о.



а)



б)

Рисунок 3.19 – Гармонічний склад струму БК на другий (а) та четвертому (б) ступенях компенсації

На четвертому ступені компенсації відбувається посилення струму 17-ї гармоніки. З урахуванням  $I_{\text{БКном}} = 52,0$  А відносно значення струму БК дорівнює  $I_{\text{БК}}^* = 0,47$  у.о. (Рисунок 3.9, б). Чинне значення струму БК з урахуванням вищих гармонік дорівнює 1,11 у.о.

На третій та п'ятій щаблях виникає несуттєве посилення гармонік струму БК, близьких до канонічних частот шестипівперіодного випрямляча ( $I_{\text{БК}}^*=0,13$ , відповідно на 19-й та 13-й гармоніках). З цієї причини кратність струму БК у даних режимах не перевищує 1,02 у.о.

Зведені дані щодо розрахунку струмів гармонік наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Максимальні значення струмів гармонік БК

| Ступінь | $n$ | $I_{\text{ДВГ } n}, \text{ А}$ | $I_{\text{БК } n}, \text{ А}$ | $I_{\text{БК } n}^*, \text{ у.о.}$ | $I_{\text{БК}}^*, \text{ у.о.}$ |
|---------|-----|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| 1       | 29  | 0,50                           | 15,80                         | 0,91                               | 1,38                            |
| 2       | 23  | 0,63                           | 9,53                          | 0,38                               | 1,09                            |
| 3       | 19  | 0,76                           | 4,53                          | 0,13                               | 1,02                            |
| 4       | 17  | 0,85                           | 24,35                         | 0,47                               | 1,09                            |
| 5       | 13  | 1,11                           | 9,85                          | 0,13                               | 1,01                            |
| 6       | 11  | 1,31                           | 70,82                         | 0,58                               | 1,16                            |

### Висновки по третьому розділу

Розроблено методику розрахунку гармонічних складових струмів і напруг в залежності від розрахункової потужності джерела вищих гармонік, параметрів системи, батарей конденсаторів, навантажень 6(10) кВ та 0,38 кВ стосовно підприємств з малою сумарною встановленою потужністю електроприймачів.

## ВИСНОВКИ

1. На основі натурних вимірювань гармонійного складу напруги і струму на об'єкті дослідження як розрахунковий тип джерела вищих гармонік прийнятий шестипівперіодний випрямляч.

2. З огляду на різноманіття типів та можливих варіантів розташування елементів СЕС та навантажень з нелінійними вольт-амперними характеристиками та, відповідно, великого обсягу досліджень та складності аналізу результатів розрахунку, систему електропостачання доцільно подати у вигляді еквівалентної схеми, що містить розрахунковий тип джерела вищих гармонік, підключений до РП-6 (10) кВ.

3. Розроблено методику розрахунку гармонічних складових струмів і напруг в залежності від розрахункової потужності джерела вищих гармонік, параметрів системи, батарей конденсаторів, навантажень 6(10) кВ та 0,38 кВ стосовно підприємств з малою сумарною встановленою потужністю електроприймачів. На основі отриманої методики реалізовано алгоритм та програмний комплекс для розрахунку вищих гармонік струму батарей конденсаторів та напруги у точці передачі електричної енергії.

4. Програмний комплекс дозволяє визначити застосування батарей конденсаторів для компенсації реактивної потужності з урахуванням їхнього допустимого перевантаження струмами вищих гармонік, залежно від номера гармонік на кожному ступені компенсації. Програма дозволяє оцінити можливість застосування цих пристроїв з урахуванням допустимого навантаження струмами вищих гармонік за заданих потужностей джерела вищих гармонік та короткого замикання на шинах системи.

5. Показано, що із зменшенням потужності конденсаторних батарей збільшується ймовірність виникнення резонансу струмів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. НАКАЗ МІНІСТЕРСТВА ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ від 30.11.2020 № 764 «Про затвердження Змін до Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії»// <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0109-21#Text>
2. Конспект лекцій з дисципліни "Електропостачання промислових підприємств" для студентів напряму 6.050701 – електротехніка і електротехнології, 6.050702 - електромеханіка / Укладачі Є.Д.Хмельницький, О.О.Крупник — Дніпродзержинськ, ДДТУ, 2016, 126 с.(Частина 2)
3. Домнин, И. Ф. Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах силовой электроники / И. Ф. Домнин, Г. Г. Жемеров, Д. С. Крылов, Е. И. Сокол // Техн. электродинамика. – 2004. – Тем. выпуск. – С. 80–91.
4. [https://www.nerc.gov.ua/storage/app/sites/1/Docs/Postanova\\_obgruntuvannya/2022/veresen/30.09.2022/p1\\_30-09-22.pdf](https://www.nerc.gov.ua/storage/app/sites/1/Docs/Postanova_obgruntuvannya/2022/veresen/30.09.2022/p1_30-09-22.pdf)
5. Б. С. Рогальський, С. О. Кузьмінська, ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО СТУПЕНЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З УРАХУВАННЯМ ЧУТЛИВОСТІ// Вісник ВПІ, 2004, № 5
6. Рогальський Б. С., Вознюк С. І. Обґрунтування необхідності і метод визначення оптимального ступеня компенсації реактивних навантажень в електричних мережах споживачів і енергосистем // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2001. — № 6. — С. 87—90.
7. Рогальський Б. С. Методи поетапного розрахунку компенсації реактивної потужності в електричних мережах енергосистем і споживачів // Промислова електроенергетика та електротехніка. — 2001. — Вип. 6. — С. 22—39.
8. Карпов Ф. Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях. М.: Энергия, 1975. — 182 с. 6. Астахов Ю. Н., Лежнюк П. Д. Применение критериального метода в электроэнергетике. — Киев: УМК ВО, 1989. — 137 с.

9. Лежнюк П. Д. Аналіз чутливості оптимальних рішень в складних системах критеріальним методом. — Вінниця: УНІВЕРСУМ—Вінниця, 2003. — 131 с.

10. Рогальський Б. С. Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління. I частина. Навчальний посібник. — Вінниця: 2002. — 119 с.

11. Про затвердження Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії: наказ Міністерство енергетики та вугільної промисловості України від 06.02.2018 р. №87

12. Спосіб підвищення енергоефективності технічних систем технологічних агрегатів з синхронними приводами шляхом регулювання їх реактивної потужності: пат. 141771 Україна: G01N 25/30, G21C 3/40, G01R 15/12. u 2019 10423; заявл. 17.10.2019; опубл. 27.04.2020, Бюл.№8. 11 с.

13. Пристрій для підвищення енергоефективності технічних систем технологічних агрегатів з синхронними приводами: пат. 149078 Україна: E21C 41/00, E21C 41/16 u 2021 02972; заявл. 03.06.2021; опубл. 13.10.2021, Бюл.№41. 10 с.

14. Купін А.І.,Осадчук Ю.Г.,Савицький О.І. Шерстньов Ю.В. (аспірант). До питання керування процесом компенсації реактивної потужності та підвищення якості напруги живлення підстанцій промислових підприємств. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/23>. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 33 (72) № 4 2022. С. 149-159.

15. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами. Затверджена наказом Міністерства палива та енергетики України №19 від 17.01.2002/ Офіційний вісник України. – 2002. – №48. – С. 71 – 147.

16. Омельчук А.О. Щодо балансу реактивної потужності в мережах живлення в нових нормативних умовах перетоків реактивної енергії в Україні / А.О.Омельчук, А.М.Скрипник, В.С.Трондюк// Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК».– 2011.– №161.– С. 111 – 119.

18. Резніченко Т.П., Омельчук А.О. Про ефективність компенсації реактивної потужності в районних електричних мережах// Энергетика и электрификация. –2001. – №6. – С. 26 – 29. 6. Указания по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях.– М.: Энергия, 1974. – 73 с.

19 Паламарчук О.П., Демов О.Д., Григораш Ю.А., Бандура І.О. Спрощений розрахунок плати за реактивну енергію// Промелектро. –2010. – №2. – С. 9 – 11.

20. Скрипник А.М. Використання методу питомих транспортних витрат для сезонної оптимізації конфігурації схем / А.М.Скрипник, А.О.Омельчук, О.В. Хоменко // Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК», 2011.– №166, частина 3. – С. 133-140.

21. ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ДЖЕРЕЛ РЕАКТИВНОЇ В РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ А.О./ Омельчук, А.М., Б.П. Савченко, //Національний університет біоресурсів і природокористування України- Енергетика і автоматика", №4, 2013 р

22. Обґрунтування рівня компенсації реактивної потужності для систем підземного електропостачання шахт / Г.Г. Півняк, В.Т. Заїка, В.В. Самойленко // Доп. НАН України. — 2007. — N 4. — С. 96-103.

23. Папаїка, Ю. А., Лисенко, О. Г., & Буртний, Д. І. (2024). ПРОБЛЕМА ПЕРЕТОКІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПІДЗЕМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ. Електротехнічні та інформаційні системи, (105), 14–17. <https://doi.org/10.32782/EIS/2024-105-3>

24. Реактивна потужність в електричних мережах : монографія / І. В. Жежеленко, Г. Г. Півняк, Г. Г. Трофімов, Ю. А. Папаїка ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. у-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2020. 72 с.

25. Енергетична ефективність систем електропостачання : монографія / Г. Г. Півняк, І. В. Жежеленко, Ю. А. Папаїка ; М-во освіти і науки України, Нац.

техн. ун-т «Дніпровська політехніка». 2-ге вид. Дніпро: НТУ «ДП», 2018. 148 с.

26. Папаїка Ю. А. Застосування індивідуал. графіків вищих гармонік в задачах електромагн. сумісності та енергоефективності гірничих підприємств / І. В. Жежеленко, Ю. А. Папаїка, О. Г. Лисенко, К. С. Родна. Гірничя електромеханіка. 2019. № 101. С. 3–7.

27. Оціночні методи визначення економічного еквівалента реактивної потужності / І. В. Жежеленко, Ю. А. Папаїка, О. Г. Лисенко. Гірничя електромеханіка та автоматика. 2017.

28. СОУ – Н МПЕ 40.1.20.510.:2006. Методика визначення економічно доцільних обсягів компенсації реактивної енергії, яка перетікає між електричними мережами електропередавальної організації та споживача (основного споживача та субспоживача). – 48 с.