

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: Аналіз впливу несиметрії напруги на втрати електроенергії в електричних мережах

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи ЕТмз-61
спеціальності 141

електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

| | | |
|-------------------|------------------------------------|--|
| | <u>Красножон М. П.</u> (підпис) | <u>Красножон М. П.</u> (прізвище та ініціали) |
| Керівник | <u>Бабюк С. М.</u> (підпис) | <u>Бабюк С. М.</u> (прізвище та ініціали) |
| Нормоконтроль | <u>Мовчан Л. Т.</u> (підпис) | <u>Мовчан Л. Т.</u> (прізвище та ініціали) |
| Завідувач кафедри | <u>Коваль В. П.</u> (підпис) | <u>Коваль В. П.</u> (прізвище та ініціали) |
| Рецензент | <u></u> (підпис) | <u></u> (прізвище та ініціали) |

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра Електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль В. П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« 11 » листопада 2023 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

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

студенту Красножону Максиму Павловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз впливу несиметрії напруги на втрати електроенергії в електричних мережах

Керівник роботи Бабюк Сергій Миколайович, к.т.н.

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

Затверджені наказом ректора від « 10 » листопада 2023 року № 4/7-1039

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20 грудня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи методи математичного моделювання трифазних систем з несиметричними елементами, експериментальні дані при різних рівнях несиметрії

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

1. Аналітичний розділ

2. Розрахунково-дослідницький розділ

3. Проектно-конструкторський розділ

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

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

Вплив несиметрії напруги на асинхронні двигуни при повному навантаженні. Класифікація методів симетрування. Математична модель режимів трифазної системи електропостачання з ізольованою нейтраллю. Експериментальна установка для дослідження режимів роботи асинхронного електродвигуна. Принципова електрична схема експериментальної установки. Залежність ККД асинхронного двигуна від навантаження. Оцінка впливу зниження якості електроенергії на роботу електрообладнання.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 13 листопада 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|--------------------------------|----------|
| 1 | Вступ | 15.11.2023 | |
| 2 | Аналітичний розділ | 25.11.2023 | |
| 3 | Розрахунково-дослідницький розділ | 20.11.2023 | |
| 4 | Проектно-конструкторський розділ | 15.12.2023 | |
| 5 | Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях | 15.12.2023 | |
| 6 | Висновки | 15.12.2023 | |
| 7 | Оформлення пояснювальної записки | 20.12.2023 | |
| 8 | Оформлення графічної частини | 20.12.2023 | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Студент

(підпис)

Красножон М. П.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Бабюк С. М.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Красножон Максим Павлович –Аналіз впливу несиметрії напруги на втрати електроенергії в електричних мережах.

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Стор.– 74; рис. - 22; табл. - 7; слайдів - 18; джерел - 21; додатків - 2.

В даній кваліфікаційній роботі проведено аналіз впливу несиметрії напруги на втрати електроенергії в електричних мережах.

Проведено дослідження математичної моделі узагальненої трифазної несиметричної системи, здійснено аналіз методики оцінки збитків від зниження якості електричної енергії, проведено аналіз несиметричних режимів промислових систем електропостачання.

Здійснено дослідження методів зниження несиметрії напруги в системах електропостачання шляхом зміни схем їхнього підключення та збільшення потужності короткого замикання.

Перелік ключових слів: АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, НЕСИМЕТРИЯ, ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ВТРАТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП | 5 |
| 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ | 9 |
| 1.1 Режими роботи багатофазних систем з несиметричними елементами | 9 |
| 1.2 Класифікація і порівняльний аналіз методів симетрування багатофазних систем | 15 |
| 1.3 Аналіз елементів вибору оптимального рівня зниження несиметрії напруги | 20 |
| 2.3 Висновки до розділу 1 | 24 |
| 2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ | 25 |
| 2.1 Опис експериментальної установки | 25 |
| 2.2 Статистичний аналіз і оцінка результатів досліджень | 28 |
| 2.3 Графічний аналіз і оцінка результатів досліджень | 30 |
| 2.4 Висновки до розділу 2 | 35 |
| 3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ | 36 |
| 3.1. Оцінка несиметрії режиму промислової системи електропостачання | 36 |
| 3.2. Симетрування напруг шляхом збільшення потужності короткого замикання | 42 |
| 3.3. Схемні рішення в промислових системах електропостачання з несиметричними навантаженнями | 51 |
| 3.4 Висновки до розділу 3 | 61 |
| 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ | 62 |
| 4.1 Заходи безпеки при обслуговуванні електродвигунів | 62 |
| 4.2 Надання першої допомоги потерпілому при ураженні електричного струму | 64 |
| 4.3 Шляхи та заходи підвищення стійкості роботи інженерно-технічного комплексу | 69 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 71 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ | 72 |

ВСТУП

Стан проблеми. Важливого значення в умовах сучасності з'являється проблема підвищення якості електроенергії (ЯЕ). Системи електропостачання міст, промислових підприємств, електричні мережі з тяговими навантаженнями, нетранспортовані лінії електропередачі, системи автономного живлення і інші системи, характеризуються довготривалими несиметричними усталеними режимами, які обумовлені особливостями різних технологічних процесів та конструктивним виконанням елементів. При цьому в багатьох випадках показники ЯЕ, у тому числі і несиметрія напруги; не завжди відповідають вимогам, встановленим діючим стандартом 1. ДСТУ EN 50160:2014 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT) [1], що супроводжується серйозними негативними наслідками. У масштабах країни мінімальний економічний збиток, обумовлений низькою ЯЕ, за експертними оцінками фахівців 2 млрд. грн [2].

Сьогодні основним способом вирівнювання режимів багатофазних систем є використання стаціонарних компенсуючих пристроїв (КП) поперечної структури. Ці пристрої коригують складові струмів зворотної послідовності (реактивна потужність) в точках підключення несиметричних навантажень. Застосування КП дає змогу ефективно керувати режимом, одночасно виконуючи такі функції [2]:

- Компенсація реактивної потужності.
- Регулювання напруги.
- Фільтрація вищих гармонік.
- КП також можуть використовуватися для виконання інших функцій, таких як покращення якості електроенергії, захист обладнання від перевантажень та коротких замикань.

Хоча використання КП, що ґрунтуються на методах симетрування струмів, має багато плюсів, воно потребує значних витрат на встановлену

потужність обладнання, яка часто перевищує потужність самих симетруючих навантажень. Це робить пошук нових, більш економних методів нормалізації якості електроенергії (ЯЕ) в системах електропостачання з несиметричними елементами особливо актуальним..

Актуальність. Впровадження методів симетрування напруги в практику стримується низкою невирішених проблем, зокрема:

- Відсутність чітких рекомендацій щодо їх застосування при проектуванні систем електропостачання.
- Недостатнє вивчення питань схемного втілення статичних компенсуючих пристроїв (КП) різного функціонального призначення.

Найбільш гострою проблемою є математичний опис багатofазних систем, які містять КП та несиметричні елементи подовжньо-поперечної структури. Недостатньо розвинений математичний апарат ускладнює визначення параметрів пристроїв для симетрування напруги.

Важливо зазначити, що вирішення цих проблем є ключовим фактором для успішного впровадження методів симетрування напруги в практику. Для підвищення економічності рішень, що приймаються, потрібен пошук методів і алгоритмів оптимального симетрування режимів систем електропостачання, за допомогою статичних КП і вибору схем і параметрів мережі.

Мета і задачі дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є дослідження впливу несиметрії напруги на втрати електроенергії в електричних мережах з ізольованою нейтралю і створення на основі даних досліджень алгоритмів вибору оптимального рівня зниження несиметрії напруги та рекомендацій по раціональній побудові систем електроспоживання з несиметричним навантаженням.

Визначена мета досягається розв'язанням наступних основних задач:

1. Аналіз методів математичного моделювання трифазних систем з несиметричними елементами довільної структури.

2. Дослідження впливу несиметрії напруги на роботу найбільш поширених споживачів електроенергії (синхронні машини, асинхронні двигуни, силові трансформатори).

3. Дослідження впливу несиметрії напруги на втрати електроенергії в лініях електропередач, асинхронних двигунах синхронних машинах та трансформаторах.

4. Дослідження методів зниження несиметрії напруги в системах електропостачання шляхом зміни схем їхнього підключення та збільшення потужності короткого замикання.

5. Розробка на основі отриманих результатів рекомендацій по оптимальній корекції режимів систем електропостачання з несиметричними елементами.

Об'єкт дослідження – система електропостачання з несиметричним навантаженням

Предмет дослідження – втрати електроенергії в електротехнічному обладнанні при підвищеному рівні несиметрії напруги.

Практичне значення отриманих результатів. Полягає в розробці методів зниження несиметрії напруги в системах електропостачання шляхом зміни схем їхнього підключення та збільшення потужності короткого замикання. Вони забезпечують оптимальну корекцію режимів систем електропостачання з несиметричними елементами.

Основні положення та результати досліджень доповідались та обговорювались на XII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» 6-7 грудня 2023 р., на базі Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Структура роботи. Робота складається із вступу, 4 розділи, висновки, перелік посилань (21 найменування).

Загальний обсяг текстової частини – 74 сторінки.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Режими роботи багатофазних систем з несиметричними елементами

Багатофазні системи, що містять несиметричні елементи характеризуються особливими несиметричними режимами роботи. На практиці розрізняють тривалі і короткочасні несиметричні режими. Останні мають місце при різного роду аварійних ситуаціях і протікають у відносно короткі проміжки часу.

Головними причинами тривалих несиметричних режимів роботи багатофазних систем є несиметрія джерел живлення і наявність в електричній мережі несиметричних елементів у вигляді повздовжніх гілок з різними параметрами фаз і поперечних гілок несиметричних навантажень.

Строго кажучи, усі багатофазні системи, які використовуються на практиці, працюють в несиметричних режимах, оскільки в тій чи іншій мірі містять вище відмічені джерела несиметрії. У багатьох випадках вказана несиметрія проявляється досить несуттєво, тому нею виправдано нехтують, а режими розглядають, як симетричні. Проте в існуючій техніці передачі, розподілу і перетворення електричної енергії виділилися цілий ряд об'єктів, в яких несиметрія робить визначальний вплив на протікаючі процеси. В першу чергу до них відносяться промислові системи електропостачання з потужними нелінійними і несиметричними електротехнологічними установками. Сучасне промислове виробництво широко використовує однофазні зварювальні апарати і агрегати потужністю до 500-900 кВ·А, несиметричні електротермічні установки (електрошлакової переплавки, індукційні, руднотермічні, сталеплавильні печі та інші) потужністю, що досягає декількох десятків МВ·А. Несиметрія і несинусоїдальність істотно проявляються в режимах роботи тягових електричних мереж. Потужність тягових навантажень працюючих на змінному струмі, досягає 50 МВт і більше. В області передачі електричної енергії дуже

перспективним вважається застосування неповнофазних режимів і ліній електропередачі з подовженими циклами транспозиції проводів, що з одного боку дає значну економію витрат, а з іншої - вносить додаткову несиметрію. Дослідження режимів перерахованих багатофазних систем необхідно робити з урахуванням несиметрії.

Основними параметрами як симетричного, так і несиметричного режимів багатофазної системи є струми, напруга і потужність. Проте на відміну від першого режиму, в другому випадку струми і напругу необхідно визначати для кожної фази із-за їх відмінності по модулю і порушенню кутової симетрії. Для аналізу таких режимів найбільше поширення отримав метод симетричних складових, згідно з яким будь-яка система векторів може бути розкладена на три симетричних складових системи прямої, зворотної і нульової послідовностей. Великою перевагою вказаного методу є те, що він дає можливість використати для дослідження несиметричних режимів багатофазних систем весь наявний арсенал методів, що описують процеси в симетричних колах.

Енергетичні процеси, що протікають у багатофазних системах при симетричному і несиметричному режимах мають істотну відмінність. Для несиметричного режиму миттєва потужність системи визначається як:

$$p = \text{Re}(\dot{S}_m + \dot{N}_m \cdot e^{j2\omega t}) \quad (1.1)$$

де \dot{S}_m - повна потужність m - фазної системи;

\dot{N}_m - пульсуюча потужність m - фазної системи.

З виразу (1.1) випливає, що в несиметричному режимі миттєва потужність змінюється з подвійною частотою і в кожен момент часу дорівнює сумі двох векторів, один з яких не залежить від часу. Останні мають наступний вигляд:

$$\dot{S}_m = \sum_{i=1}^m \dot{U}_i \hat{I}_i \quad (1.2)$$

$$\dot{N}_m \cdot e^{j2\omega t} = N_m \cdot e^{j\phi} \cdot e^{j2\omega t} \quad (1.3)$$

У роботі [28] відзначається, що пульсуюча потужність у багатофазній системі за своєю суттю "має таке ж значення, як і реактивна потужність". Їй

властиві усі негативні наслідки, пов'язані з протіканням реактивної потужності в мережі (додаткове завантаження елементів систем електропостачання, збільшення втрат і так далі).

Для генерації і передачі електричної енергії в наш час, як правило, використовуються трифазні системи. На стадії розподілу і споживання застосовуються як трифазні, так і однофазні системи. Несиметрія струмів і напруги в трифазній системі визначається у вигляді відношення симетричних складових :

а) коефіцієнти несиметрії струмів і напруг

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \varepsilon_i \cdot e^{j\psi_i} \quad (1.4)$$

$$\dot{\varepsilon}_u = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \varepsilon_u \cdot e^{j\psi_u} \quad (1.5)$$

б) коефіцієнт невривноваженості струмів і напруг

$$\dot{\varepsilon}_{0i} = \frac{\dot{I}_0}{\dot{I}_1} = \varepsilon_{0i} \cdot e^{j\psi_{0i}} \quad (1.6)$$

$$\dot{\varepsilon}_{0u} = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_1} = \varepsilon_{0u} \cdot e^{j\psi_{0u}} \quad (1.7)$$

де індекси 0, 1, 2 означають відповідно складові нульовою, прямою і зворотною послідовностей.

На практиці дуже поширеним є використання коефіцієнтів несиметрії струмів і напруг у вигляді відношення симетричних складових зворотної послідовності до номінальних значень:

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{\dot{I}_2}{I_n}; \quad \dot{\varepsilon}_u = \frac{\dot{U}_2}{U_n} \quad (1.8)$$

Робота багатofазних систем в несиметричних і несинусоїдальних режимах супроводжується, як правило, серйозними негативними наслідками. В першу чергу до них відноситься погіршення режиму роботи електроустаткування систем електропостачання . Велика кількість досліджень, проведених

українськими і зарубіжними вченими з цієї проблеми, свідчить про її глобальний характер і важливе практичне значення.

Найбільш схильні до впливу несиметрії напруги електричні машини і, зокрема, асинхронні двигуни, на долю яких в промисловому навантаженні припадає 50-70 % і більше. Опір обертових машин струмам зворотної послідовності у декілька разів нижче опору струмам прямої послідовності, внаслідок чого присутність навіть незначної несиметрії напруги призводить до істотного росту втрат активної потужності і викликає додатковий нагрів обмоток. Згідно з дослідженнями термін служби асинхронних двигунів скорочується вдвічі при нарузі зворотної послідовності 4 % від номінального. У табл.1.1 приведені експериментальні дані, що характеризують роботу асинхронних двигунів при несиметрії живлячої напруги (несиметрія напруги в табл.1.1 визначена як максимальне відхилення фазної напруги від середнього значення для трьох фаз, поділене на це значення).

Таблиця 1.1 – Вплив несиметрії напруги на асинхронні двигуни при повному навантаженні

| Найменування | Несиметрія напруги, % | | | |
|--|-----------------------|-----|-----|-------|
| | 0 | 2,0 | 3,5 | 5,0 |
| Струм зворотної послідовності, % | 0 | 15 | 27 | 38 |
| Струм статора, % | 100 | 101 | 104 | 107,5 |
| Збільшення втрат, % середнє в статорі | 0 | 2 | 8 | 15 |
| максимальне - у статорі | 0 | 33 | 63 | 93 |
| - у роторі | 0 | 12 | 39 | 76 |
| Загальні в двигуні | 0 | 8 | 25 | 50 |
| Збільшення температури, °С клас А | 60 | 65 | 75 | 90 |
| клас В | 80 | 86 | 100 | 120 |

Особливе значення має вплив несиметрії і несинусоїдальності напруги на роботу великих синхронних машин, зокрема, генераторів електростанцій. В Україні ця проблема вивчена досить детально, що знайшло відображення в нормативних матеріалах, що регламентують роботу синхронних машин в

несиметричних режимах. У табл.1.2 приведені дані температури нагріву турбогенераторів при несиметрії навантаження.

Таблиця 1.2 – Найбільші місцеві перегрівання в роторах турбогенераторів при тривалому несиметричному навантаженні

| Струм зворотної послідовності | Перегрів, °С | | | |
|-------------------------------|--------------|-----|-----|-----|
| | 140 | 173 | 220 | 265 |
| 10 | 21 | 12 | - | 9 |
| 15 | 50 | 22 | 7 | 13 |
| 20 | - | 35 | 10 | 22 |
| 25 | - | - | 16 | - |

Дія вищих гармонік на роботу обертових машин за своїм характером аналогічна дії несиметрії напруги. Як показують проведені дослідження, при несиметрії і несинусоїдальності напруги на затискачах електричних машин знижуються корисний момент і потужність, з'являється вібрація статора і ротора.

Вище відзначалося, що присутність у багатофазній системі пульсуючої потужності призводить до додаткового завантаження передавальних елементів і збільшення втрат. Це твердження повною мірою справедливо і за наявності вищих гармонік. Для силових трансформаторів, які працюють в умовах несиметрії і несинусоїдальності напруги, характерні додаткові втрати активної потужності і обтяжуючий температурний режим роботи, що обумовлює або недовикористання потужності трансформаторів, або прискорений вихід їх з ладу.

Як показують дослідження, до несиметрії і несинусоїдальності напруги дуже чутливі силові конденсатори, які широко використовуються в електричних мережах для компенсації реактивної потужності і регулювання рівня напруги. Особливо сильно такий вплив проявляється за наявності вищих гармонік струму, опір яким у силових конденсаторів значно менше і обернено пропорційно до порядку гармоніки. Найбільш частою причиною виходу з ладу силових конденсаторів в системах електропостачання є виникнення резонансних явища. несинусоїдальности напруги ще більше ускладнює роботу конденсаторних

Таким чином, робота багатофазних систем в несиметричних, несинусоїдальних режимах, характеризується значним зниженням ефективності процесів на всіх стадіях від генерації до споживання електричної енергії. Необхідно особливо підкреслити, що робота усіх ланок багатофазної системи одночасно при несиметрії і несинусоїдальності не адекватна по дії простій сумі несиметричного і несинусоїдального режимів і призводить до тяжких негативних наслідків.

Для забезпечення нормальної роботи споживачів в Україні і за кордоном встановлені норми на показники ЯЕ, у тому числі на величину несиметрії і несинусоїдальності режиму. ДСТУ EN 50160:2014 регламентує у приймачів при живленні від електричних мереж трифазного струму наступні показники якості електричної енергії : відхилення частоти, відхилення напруги, розмах коливань частоти, коефіцієнт несинусоїдальності напруги і коефіцієнти несиметрії і нерівномірності напруги, розмах зміни напруги,.

Коефіцієнт несиметрії напруги рівний відношенню напруги зворотньої послідовності основної частоти, яка визначається розкладанням на симетричні складові системи лінійної напруги, до номінальної лінійної напруги

$$\varepsilon_2 = \frac{U_2}{U_n} \cdot 100\% \quad (1.9)$$

Допустиме значення коефіцієнту несиметрії напруги на затискачах приймачів встановлене в межах до 2%.

Коефіцієнт незрівноваженості напруги визначається як співвідношення напруги нульової послідовності основної частоти до номінальної фазної напруги

$$\varepsilon_0 = \frac{U_0}{U_n} \cdot 100\% \quad (1.10)$$

З врахуванням значення коефіцієнта незрівноваженості та інших впливаючих чинників діючі значення напруги не повинні виходити за межі.

Межі допустимих відхилень напруги:

- Для приладів робочого освітлення та прожекторних установок зовнішнього освітлення: від -2,5% до +5% на затискачах.

- Для електродвигунів та апаратів їх пуску й управління: від -5% до +10% на затискачах.

1.2 Класифікація і порівняльний аналіз методів симетрування багатофазних систем

Несиметричні і неврівноважені режими багатофазних систем характеризуються наявністю в струмах і напрузі симетричних складових зворотної і нульової послідовностей. При цьому в колі виникає пульсуюча потужність. Під симетруванням режиму розуміється цілеспрямоване наближення його до симетричного стану шляхом зниження значень напруги і струмів зворотної послідовності до нуля або якоїсь певної величини.

Методи симетрування режимів багатофазних систем залежно від того, на який параметр спрямована дія, можна поділити на методи симетрування струмів і методи симетрування напруги (рис.1.1).

Перша група методів пов'язана з рівномірним розподілом струмів, обумовлених підключенням несиметричних навантажень, по фазах електричного кола. В силу причин, що історично склалися, ця група методів отримала переважний розвиток і в наш час є найбільш дослідженою.

Методи симетрування струмів умовно діляться на методи, засновані на комутації несиметричних навантажень, перетворення видів енергії, фільтрації симетричних складових струмів і компенсації симетричних складових струмів.

Симетрування струмів за допомогою комутації несиметричних навантажень може бути здійснене різними шляхами. Найбільш простий з них – рівномірне підключення однофазних споживачів на лінійну або фазну напругу. Такий шлях у ряді випадків дозволяє істотно понизити результуючу пульсуючу потужність в системі.

Іншим шляхом симетрування струмів за допомогою комутації несиметричних навантажень є застосування схем випрямлення та перетворення живлення однофазних навантажень. При цьому забезпечується циклічна

комутація однофазного навантаження до фаз електричного кола. Одним з прикладів вказаних схем є широко поширена випрямна схема Ларіонова. Відомі також схеми циклічної комутації, в яких живлення однофазних навантажень здійснюється на змінному струмі. Ці пристрої виконують інтегральне в часі симетрування режиму, оскільки у будь-який момент часу струми залишаються несиметричними. Недоліком циклічної комутації однофазних навантажень є істотне спотворення режиму живлячої мережі вищими гармоніками струму і напруги.

Симетрування струмів на основі перетворення видів енергії виконується шляхом використання спеціальних агрегатних комплексів "Асинхронний двигун - однофазний генератор на одному валу" . При цьому однофазне навантаження живиться від однофазного генератора і отримує перетворену енергію системи, до якої підключений асинхронний двигун. Цей шлях пов'язаний зі значними витратами, встановленою потужністю устаткування і втратами енергії, внаслідок чого не отримав практичного застосування.

Принципова можливість симетрування струмів існує при використанні методу фільтрації їх симетричних складових зворотної послідовності. В електричних мережах з ізольованою нейтраллю цей метод реалізується на основі обертових машин, опір зворотної послідовності яких у декілька разів менше опору прямої послідовності. Причому, симетруючий ефект обертових машин має параметричний характер і не залежить від характеру і величини несиметрії струмів. Проте, із-за вкрай негативної дії несиметрії на роботу обертових машин цей шлях недоцільний ні з технічної, ні з економічної точок зору.

Найбільше поширення в нашій країні і за кордоном в наш час має метод компенсації симетричних складових струмів у багатофазній системі з несиметричними навантаженнями. Він є основним методом, який використовується для симетрування струмів в електричних мережах з ізольованою нейтраллю. Суть його полягає в тому, що симетричні складові струму, обумовлені несиметричним навантаженням, компенсуються за допомогою рівних за величиною і протилежних по фазі штучно створеного в

електричній мережі симетричних складових. У трифазних системах з ізольованою нейтраллю, де струми мають складові тільки зворотній послідовності, симетрування останніх адекватно компенсацією пульсуючої потужності.

Перевага цього методу симетрування полягає в простоті і економічності його реалізації за допомогою спеціальних статичних КП.

За способом з'єднання і кількістю елементів статичні КП для трипровідних систем поділяються на одно-, двох- і трьохелементні пристрої з електричними і електромагнітними зв'язками. Схеми статичних КП для компенсації складової струму зворотної послідовності мають поперечну структуру і виконуються, як правило, на реактивних елементах. Схеми на активних і активно-реактивних елементах характеризуються великими втратами активної потужності і застосовуються тільки в спеціальних випадках. Елементи КП поперечної структури можуть з'єднуватися в "зірку" або "трикутник". Останній вид з'єднання є доцільнішим, оскільки лінійна напруга, на яку при цьому підключаються елементи КП, змінюється в змінних режимах у відносно вузьких межах. Аналіз схем КП поперечної структури, показав, що за умови повного симетрування струмів однофазного навантаження, сумарна встановлена потужність елементів не може бути менша потужності цього навантаження. В наш час найбільшого поширення в Україні і за кордоном мають наступні схеми для трипровідних систем: з'єднання реактивних елементів в "трикутник" на основі схеми Штейнметца, доповненою ємністю, підключеною паралельно однофазному навантаженню; з'єднання трьох ємнісних елементів в "трикутник" і схема з дроселем-дільником. Вказані схеми забезпечують ефективне симетрування струмів і компенсацію реактивної потужності несиметричних навантажень і мають сумарну встановлену потужність елементів, яка складає 100-200 % і більше від потужності навантаження.

В той же час методи першої групи спрямовані на симетрування струмів. Проте в цьому немає протиріччя при традиційній постановці завдання симетрування режиму, згідно якого усі елементи багатofазної системи за

винятком навантаження симетричні і лінійні, а лінійна напруга утворює симетричну систему прямої послідовності. У цих умовах усунення симетричних складових струмів зворотної і нульової послідовностей в місцях їх виникнення призводить до симетрії і врівноваженості напруги на затискачах навантаження.

У ряді випадків завдання симетрування струмів і напруги вирішуються окремо. До них відносяться режими роботи електричних мереж при несиметрії живлячих ЕРС і наявності джерел подовжньої несиметрії у поєднанні з симетричними або несиметричними навантаженнями. При цьому симетрування напруги, як правило, не супроводжується симетруванням струмів, а у багатьох випадках несумісне з ним. Сказане дозволяє виділити другу самостійну групу методів, спрямованих на симетрування напруги у багатофазних системах.

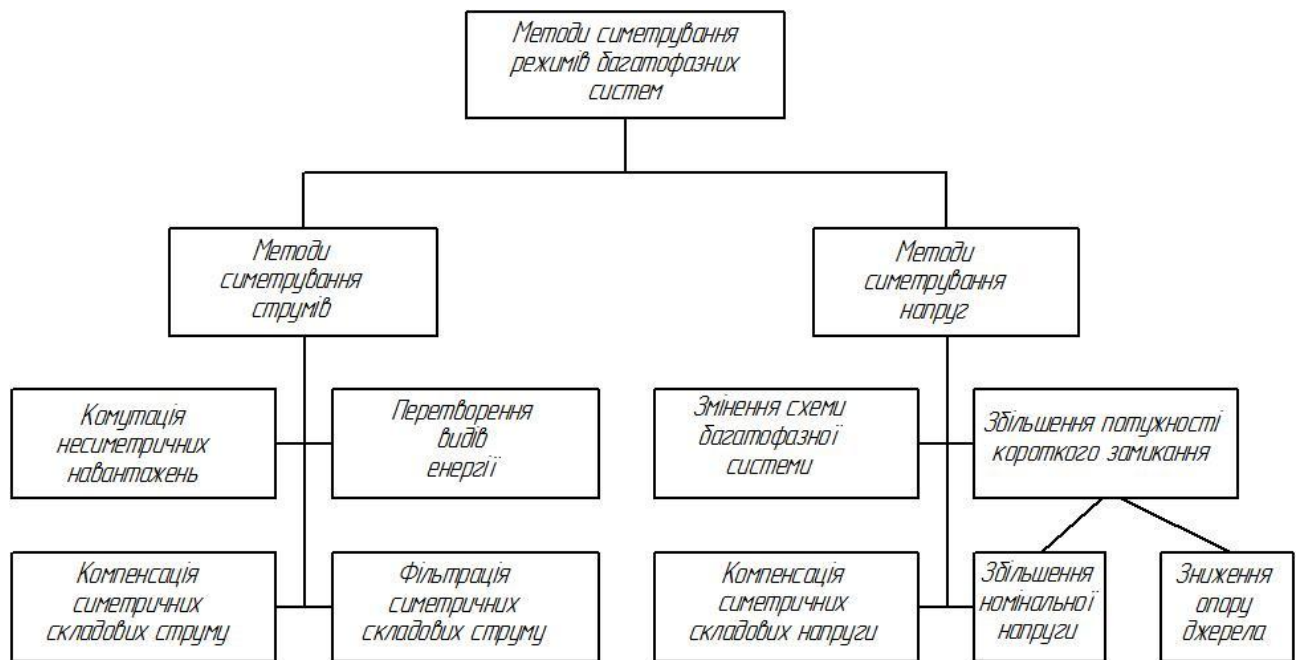


Рисунок 1.1 – Класифікація методів симетрування

Згідно класифікації, приведеної на рис. 1.1, методи симетрування напруги включають методи, засновані на зміні схеми багатофазної системи, збільшенні потужності короткого замикання і компенсації симетричної складової напруги.

Несиметрія напруги має максимальні значення в точці підключення несиметричного навантаження. Отже, електрично віддаляючи "чутливі" приймачі від точки підключення несиметричного навантаження, можна понизити на їх затискачах рівень несиметрії напруги. Цього можна добитися

шляхом зміни схеми багатофазної системи. Наприклад, в електричній мережі можна використати роздільне підключення несиметричною і симетричною навантажень за допомогою трансформатора або реактора з розщепленими обмотками. Можливе також застосування індивідуального живлення несиметричного навантаження від енергосистеми через двообвитковий трансформатор. Ці методи іноді використовуються при проектуванні систем електропостачання, проте до теперішнього часу дослідження їх ефективності і сфер доцільного застосування не проводилося.

Можливість симетрування напруги шляхом збільшення потужності короткого замикання витікає з відомої формули наближеної оцінки несиметрії напруги в трифазній системі, згідно якої остання визначається у вигляді відношення потужності несиметричного навантаження до потужності короткого замикання в місці її підключення

$$\varepsilon_u \approx \frac{S^{(H)}}{S_K} \cdot 100\% \quad (1.11)$$

де $S^{(H)}$ - потужність еквівалентного однофазного навантаження.

У свою чергу, потужність короткого замикання в системі електропостачання приблизно оцінюється виразом:

$$S_K = \frac{U_{нл}^2}{Z_c} \quad (1.12)$$

де $U_{нл}$ - номінальна лінійна напруга;

Z_c - опір живлячої мережі.

Таким чином, збільшуючи номінальну лінійну напругу або знижуючи опір живлячої системи, можна зменшити несиметрію напруги на затискачах навантаження. Відповідно до цього, методи, засновані на збільшенні потужності короткого замикання, розбиті на рис. 1.1 на дві групи. Вказані методи поки що не знайшли широкого практичного використання, що багато в чому пов'язане з недостатнім дослідженням питань техніко-економічної доцільності і відсутністю обґрунтованих рекомендацій по їх застосуванню.

Симетрування напруги у багатофазних системах може бути також здійснене за допомогою компенсації симетричної складової напруги зворотної послідовності. При цьому симетрія лінійної напруги на затискачах навантаження забезпечується спеціальними пристроями, що створюють компенсуючу систему напруги зворотної послідовності. До таких пристроїв відносяться трансформатори з пофазним регулюванням напруги, статичні апарати з магнітним полем, що обертається, статичні КП на основі активних і реактивних елементів з схемами подовжньої і поперечної структури. Трансформатори з пофазним регулюванням є дуже ефективним засобом симетрування напруги, проте із-за складності і дороговизни вони не отримали поширення в нашій країні. Внаслідок великої встановленої потужності також не отримали практичного застосування апарати з магнітним полем, що оберталося.

Перспективними для цілей симетрування напруги в наш час є статичні КП з схемами подовжньої структури. Відомі симетруючі пристрої з електричними і електромагнітними зв'язками, що мають подовжню структуру і характеризуються низькими значеннями сумарної встановленої потужності елементів.

1.3 Аналіз елементів вибору оптимального рівня зниження несиметрії напруги

Як вже відзначалося, основним заходом по симетруванню режимів багатофазних систем з ізольованою нейтраллю в наш час є застосування статичних КП зі схемами поперечної структури, які забезпечують компенсацію складових струмів зворотної послідовності, обумовлених підключенням несиметричних навантажень. Перевагами їх використання є високі техніко-економічні показники, багатофункціональність, можливість реалізації на базі стандартного мережевого устаткування (реакторів, конденсаторів, трансформаторів та ін.), простота управління і надійність. Проте вони мають сумарну встановлену потужність елементів, як правило, яка перевищує

потужність симетруючих навантажень. Це зумовлює порівняно високу вартість таких пристроїв, і, як наслідок, велику витрату матеріалів і устаткування.

У цих умовах особливу актуальність і значення набуває пошук нових шляхів по вдосконаленню і розробці методів і засобів ефективного управління несиметричними режимами електричних мереж, що дозволяють понизити витрату матеріалів і підвищити якість і надійність електропостачання споживачів.

Одним з таких шляхів є розробка статичних КП, які реалізують методи симетрування напруги на основі компенсації симетричних складових зворотній послідовності. Як відзначалося, вказані пристрої можуть мати подовжню, поперечну і комбіновану структуру.

Схеми КП поперечної структури є найбільш дослідженими. У роботах українських вчених глибокий і всебічний розвиток отримали методи аналізу і синтезу вказаних пристроїв. Серед них, як найчастіше вживані, слід виділити методи пульсуючих потужностей і поєднаних діаграм струмів зворотної послідовності. Суть цих двох близьких графоаналітичних методів полягає у використанні рівняння балансу пульсуючих потужностей (складових струмів зворотної послідовності), обумовлених підключенням несиметричного навантаження і елементами КП. При використанні цих методів виконуються допущення про симетрію і лінійність усіх елементів системи, за винятком навантаження і про те, що лінійна напруга мережі утворює симетричну систему прямої послідовності. Методи пульсуючих потужностей і поєднаних діаграм мають наочність і дуже зручні для дослідження поперечних схем КП компенсаційного типу. Проте вони непридатні для розрахунку схем КП, що мають повздовжню або комбіновану структуру. Недоліками цих методів також є складність реалізації на ЕОМ і відсутність обліку зміни параметрів режиму при підключенні КП.

Принципова можливість симетрування напруги існує при використанні повздовжніх структур з електричними і електромагнітними зв'язками. У ряді випадків вони мають меншу встановлену потужність в порівнянні з КП

поперечної структури і можуть виконувати декілька функцій по управлінню режимом системи. Відомий метод синтезу подовжніх КП, з магнітозв'язаними елементами. Проте він призначений для дослідження вузькоспеціального класу трансформаторних схем, є досить складним і викликає труднощі при реалізації на ЕОМ.

У літературних джерелах зустрічаються описи окремих схем КП, що мають складнішу структуру.

Використовувані для їх розрахунку методи в основному орієнтовані на конкретні схеми. Метод синтезу КП зі схемами складної структури, теоретично придатні для розрахунку досить широкого класу схем, проте складність їх реалізації і громіздкість обчислень істотно обмежують сферу їх застосування.

Зі сказаного виходить, що існуючі методи розрахунку не дозволяють ефективно досліджувати усе різноманіття структур КП, що обумовлює недостатню вивченість їх властивостей, параметрів і можливостей. У зв'язку з цим виникла необхідність в розробці універсальних підходів і методів, що забезпечують аналіз і синтез схем КП з довільною структурою елементів. В основу таких методів мають бути покладені узагальнені математичні моделі багатофазних систем, адекватно відбиваючі процеси, що протікають в них, за наявності різного виду джерел несиметрії; тривалої і короткочасної дії. Слід зазначити, що в цій області є публікації і розробки, у яких розглядаються окремі види несиметрії стосовно різного роду завданням (розрахунок струмів короткого замикання, моделювання усталених несиметричних режимів та ін.). Для створення узагальнених математичних моделей несиметричних систем потрібні систематизація і розвиток існуючих наукових положень.

Важливим шляхом економії приведених витрат і сумарної встановленої потужності елементів КУ є визначення раціональних рівнів зниження несиметрії струмів і напруги в електричних мережах. Повне симетрування режиму, рідко необхідне за технічними умовами в системах електропостачання, вимагає установки максимальної потужності елементів КП. За діючим стандартом в електричних мережах загального призначення допускається робота споживачів

при несиметрії напруги 2%, що дозволяє робити вибір параметрів КП з умов часткового симетрування.

Слід зазначити, що у багатьох випадках економічно доцільним є зниження несиметрії напруги нижче нормованих значень. Про це свідчать результати досліджень, виконаних для КП поперечної структури. Вибір рівня зниження несиметрії напруги в системі електропостачання - завдання оптимізаційне. При цьому найбільш доцільним критерієм оптимізації є приведені витрати, залежні від параметрів якості електроенергії. Вказані витрати визначаються, головним чином, двома складовими: приведеними витратами на КП і економічним збитком від зниження якості електроенергії.

Важливим елементом вибору оптимального рівня зниження несиметрії напруги є визначення економічного збитку від зниження ЯЕ. В наш час розроблені методики для визначення економічного збитку від зниження різних показників ЯЕ. Серед них, як найбільш закінчену, слід виділити методику за визначенням економічного збитку, обумовленого несиметрією і несинусоїдальністю напруги в системах електропостачання промислових підприємств. Згідно з цією роботою весь збиток, обумовлений зниженням якості електроенергії, ділиться на дві складові: технологічний і електромагнітний. Причому останній визначається як сума збитків від несиметрії і несинусоїдальності напруги. Таке визначення електромагнітної складової збитку є не цілком коректним, оскільки одночасний вплив несиметрії і несинусоїдальності режиму не адекватно їх простій сумі. Істотно утрудняє розрахунок за методикою виведення виразів збитків відносно номінальних втрат активної потужності в конкретному електроустаткуванні при оцінці збитку в існуючих промислових системах електропостачання, що містять велику кількість різнотипних споживачів.

Таким чином, для обґрунтованого вибору раціональних рівнів зниження несиметрії напруги потрібний подальший розвиток методів і математичних моделей розрахунку схем КП довільної структури з умови мінімуму приведених витрат, залежних від якості електроенергії. Це вимагає з одного боку точнішого

обліку взаємозв'язку параметрів режиму і КП, з іншого боку - вдосконалення методики розрахунку економічного збитку в системах електропостачання з несиметричними і нелінійними елементами, орієнтованої на інженерні розрахунки в умовах великої кількості різнотипного устаткування.

Заходи по підвищенню ЯЕ в системах електропостачання з несиметричними елементами не обмежуються застосуванням одних тільки КП. Як показано вище, симетрування напруги можливе за допомогою зміни схеми електропостачання і збільшення потужності короткого замикання. Відсутність досліджень техніко-економічної ефективності цих методів, перешкоджає їх широкому впровадженню в експлуатацію і проектну практику. В той же час слід зазначити істотну перевагу відмічених методів симетрування напруги перед іншими, що полягає в можливості використання стандартного устаткування електричних мереж.

1.4 Висновки до розділу 1

В даному розділі розглянуто режими роботи багатофазних систем з несиметричними елементами.

Подано класифікацію і порівняльний аналіз методів симетрування багатофазних систем

Здійснено аналіз елементів вибору оптимального рівня зниження несиметрії напруги.

2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Опис експериментальної установки

Експериментальна установка має моделювати ситуації, в яких можуть бути досліджувані електричні двигуни в реальних умовах експлуатації. Вигляд експериментальної установки показано на рисунку 2.1.

Установка, схему якої наведено на рис. 2.2, складається з: досліджуваного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором $M1$, він механічно зв'язаний з генератором $G1$ (навантаження двигуна є керованим), два однофазні лабораторні автотрансформатори на струм 9А, які призначені для формування зміщення фазної напруги (фази В та С; фаза А є не регульованою). В силове коло (коло струму) електродвигуна увімкнено трансформатори струму $TA1 \div TA3$ (клас точності 0.5) для гальванічної розв'язки силового та вимірювального кіл, зменшення амплітуди струму через прилади вимірювання (ватметри, амперметри, шунти) під час пуску двигуна. Напруга електродвигуна подається на багатопозиційні перемикачі $SA1$ та $SA2$. З допомогою $SA1$ синхронно перемикаються фазні напруги для подачі на осцилограф ($U_a, U_{Ia}; U_b, U_{Ib}; U_c, U_{Ic}$ відповідно), також цей перемикач на канал U_I дає сигнал від давача частоти обертів двигуна ($1024 \text{ імн} / 1 \text{ об}$). З допомогою перемикача $SA2$ перемикаються фазні напруги на ватметри та вольтметри в різні вимірювальні схеми, а саме:

- напруги U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} ; потужність P_{IbUab}, P_{IcUac} ;
- напруги U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} ; потужність $Q_{IaUbc}, Q_{IbUac}, Q_{IcUab}$;
- напруги U_{An}, U_{Bn}, U_{Cn} ; потужність $P_{IaUan}, P_{IbUbn}, P_{IcUcn}$.

Для гальванічної розв'язки і пропорційного масштабування силового (фазні напруги) та вимірювального кола осцилографа використано трансформатор $TV1$. З метою синхронізації осцилограм використовується трансформатор $TV2$, первинне коло якого постійно підключено до фази А. За

допомогою лабораторного автотрансформатора *TV5* через випрямляч *VD1*, перемикач полярності *SA3* на обвитку збудження генератора подаємо живлення, струм та напруга контролюється вольтметром *PV5* та амперметром *PA5*. Генеровна енергія з генератора через вимикач *QF4* подається на навантаження R_n , струм та напруга контролюються амперметром *PA4* та вольтметром *PV4* відповідно.

Під час дослідження контролюється проведення вимірювань таких величин:

- фазної напруги статорних обвиток - вольтметр приладу *K50* (клас точності 0.5);
- фазного струму статорних обвиток - амперметр приладу *K50* (клас точності 0.5);
- осцилограми фазної напруги та струму статорних обвиток - осцилограф;
- реактивна потужність, яка споживається обвитками двигуна - ваттметр приладу *K50* (клас точності 0.5);
- активна потужність, яка споживається обвитками двигуна - ваттметр приладу *K50* (клас точності 0.5);
- частота обертання двигуна – осцилографом.

Під час проведення експерименту реєструються наступні величини:

- активна і реактивна потужність фазних обвиток статора;
- струм і напруга фазних обвиток статора;
- частота обертання вала асинхронного двигуна;
- осцилограм фазної напруги і струму статорних обвиток
- струм та напруга в обвитках збудження і якоря двигуна постійного струму.

В якості навантаження на асинхронний двигун, на якому проводиться дослідження служить двигун постійного струму, який працює в режимі генераторів *П-32М* з незалежним збудженням, в обвитці якоря якого підключено навантажувальний реостат.

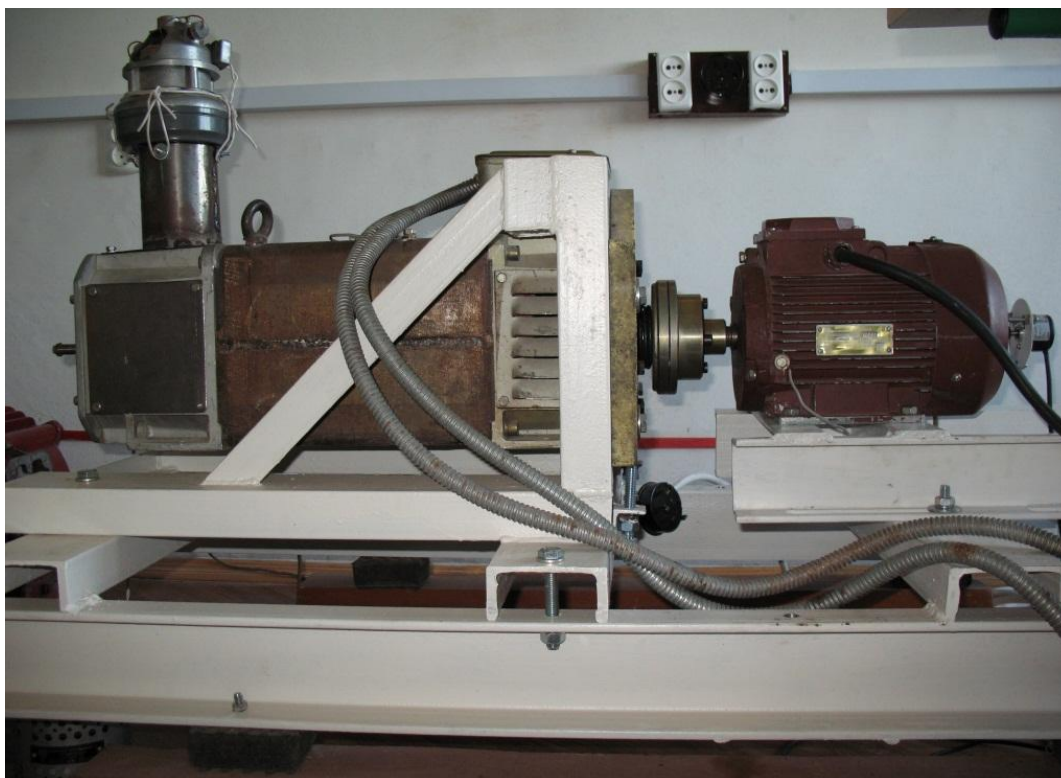


Рисунок 2.1 – Експериментальна установка для дослідження режимів роботи асинхронного електродвигуна

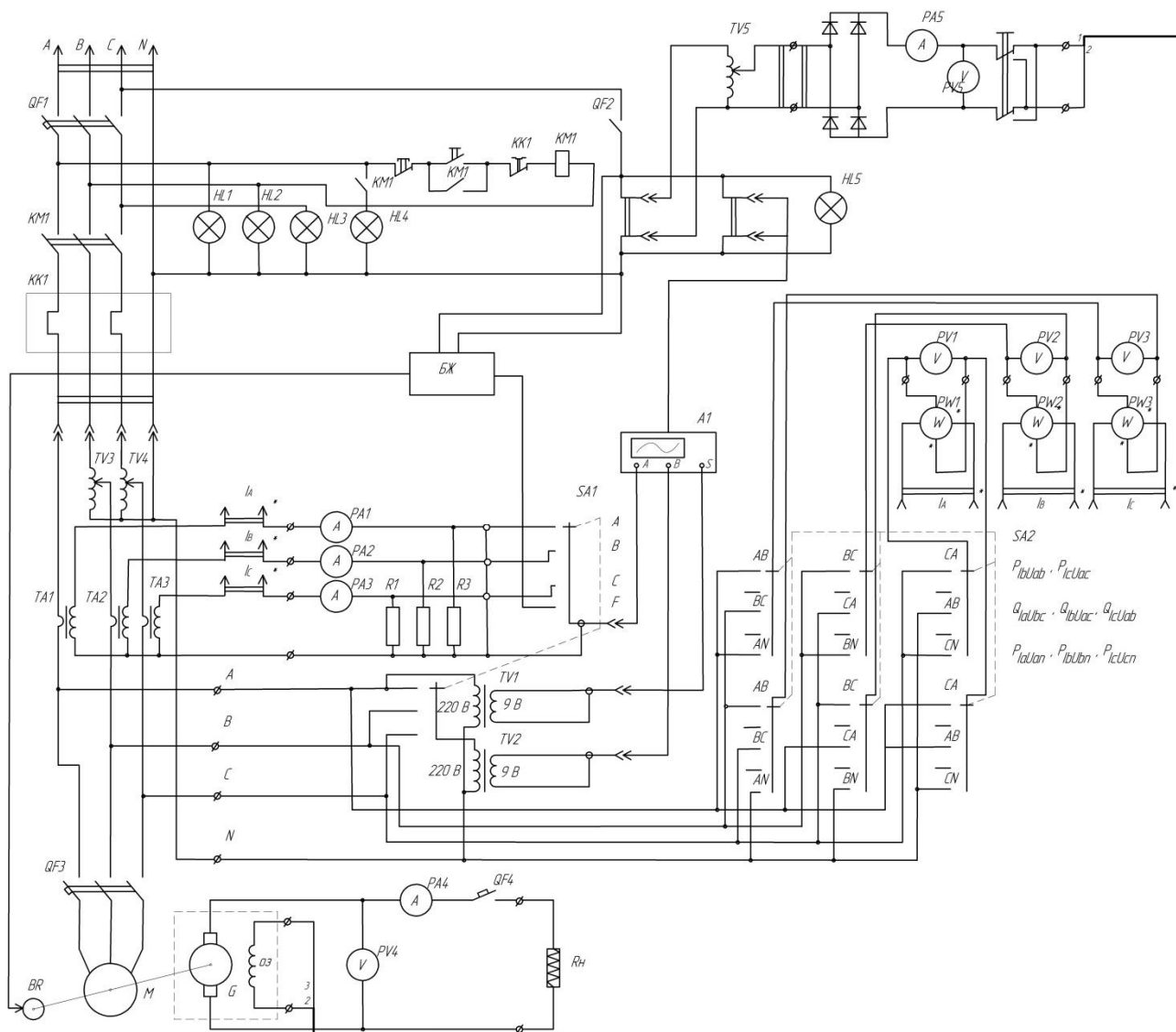


Рисунок 2.2 – Принципова електрична схема експериментальної установки

2.2 Статистичний аналіз і оцінка результатів досліджень

При обробці результатів експериментальних досліджень одержана статистична інформація вихідного інформаційного параметра - корисна механічна потужність асинхронного електродвигуна.

Результати дослідження зводимо в табл. 2.2 для їх систематизації та аналізу. Враховуючи умови симетрії двигуна (дані фаз В та С змінюються місцями), проведено серію досліджень згідно даних табл. 2.2. Також

розподіляються серії даних параметра навантаження електродвигуна: 1%, 72%, 90%, 100%, 125%.

Таблиця 2.1 – Відхилення напруг на фазах В і С при експериментальних дослідженнях

| № досліджу | A | B | C | U _a | U _b | U _c |
|------------|---|-----|-----|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 220 | 220 | 220 |
| 2 | 0 | 5 | -5 | 220 | 225 | 215 |
| 3 | 0 | 10 | -10 | 220 | 230 | 210 |
| 4 | 0 | 15 | -15 | 220 | 235 | 205 |
| 5 | 0 | 20 | -20 | 220 | 240 | 200 |
| 6 | 0 | -5 | 5 | 220 | 215 | 225 |
| 7 | 0 | -10 | 10 | 220 | 210 | 230 |
| 8 | 0 | -15 | 15 | 220 | 205 | 235 |
| 9 | | -20 | 20 | 220 | 200 | 240 |

В табличних обчисленнях проводилось визначення наступних параметрів:

Споживана потужність двигуна

- активна $P=P_A+P_B+P_C$

- реактивна $Q=(Q_A+Q_B+Q_C)/3$

Коефіцієнт ковзання двигуна $S=(1-N_{\partial\theta}/N_{cx})\cdot 100\%$

де P_A, P_B, P_C – активна потужність виміряна ватметрами PW1, PW2, PW3

(відповідно);

Q_A, Q_B, Q_C – реактивна потужність виміряна ватметрами PW1, PW2, PW3

(відповідно);

$N_{\partial\theta}$ – виміряна частота обертання двигуна;

N_{cx} – синхронна частота обертання двигуна.

Отримані результати вимірювань подані в табл. 4.2.

Таблиця 2.2 – Результати вимірювань при симетричному режимі

| | | | | | |
|-----------------|------|------|------|------|------|
| I_3, A | 0 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| U_3, B | 20 | 40 | 80 | 100 | 160 |
| U_A, B | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 |
| U_B, B | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 |
| U_C, B | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 |
| U_{AB}, B | 370 | 377 | 373 | 374 | 377 |
| U_{BC}, B | 374 | 377 | 375 | 379 | 373 |
| U_{CA}, B | 392 | 394 | 391 | 388 | 395 |
| I_A, A | 2,8 | 2,4 | 3 | 3,2 | 4,4 |
| I_B, A | 2 | 2,8 | 2,8 | 3 | 4,8 |
| I_C, A | 2 | 2 | 2 | 2,2 | 3,6 |
| $P_A, Вт$ | 75 | 120 | 300 | 435 | 810 |
| $P_B, Вт$ | 180 | 240 | 405 | 495 | 975 |
| $P_C, Вт$ | -15 | 60 | 225 | 330 | 735 |
| $P_{AB}, Вт$ | 30 | 0 | 300 | 345 | 1110 |
| $P_{AC}, Вт$ | 30 | 450 | 615 | 840 | 1455 |
| $Q_A, Вар$ | 1050 | 1020 | 1035 | 975 | 1230 |
| $Q_B, Вар$ | 750 | 780 | 690 | 720 | 870 |
| $Q_C, Вар$ | 645 | 660 | 675 | 735 | 765 |
| $N_{cx}, об/хв$ | 1496 | 1489 | 1474 | 1465 | 1411 |

Результати вимірювань для інших режимів представлені у додатку А

2.3 Графічний аналіз і оцінка результатів досліджень

Отримані результати експериментальних досліджень несиметрії напруги живлення подані на наступних рисунках:

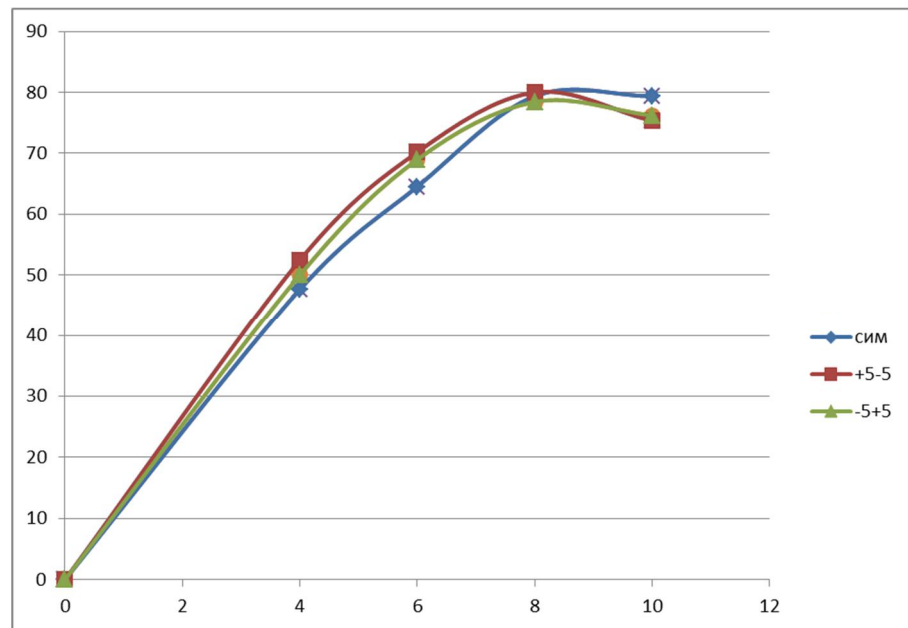


Рисунок 2.3 – Залежність ККД асинхронного двигуна від навантаження при відхиленні напруги ± 5 на фазах В і С

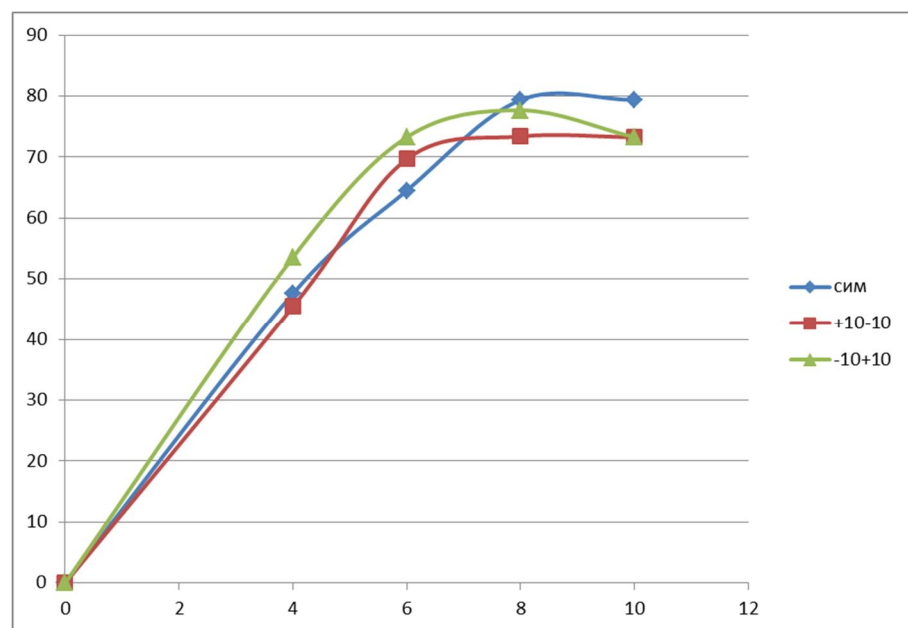


Рисунок 2.4 – Залежність ККД асинхронного двигуна від навантаження при відхиленні напруги ± 10 на фазах В і С

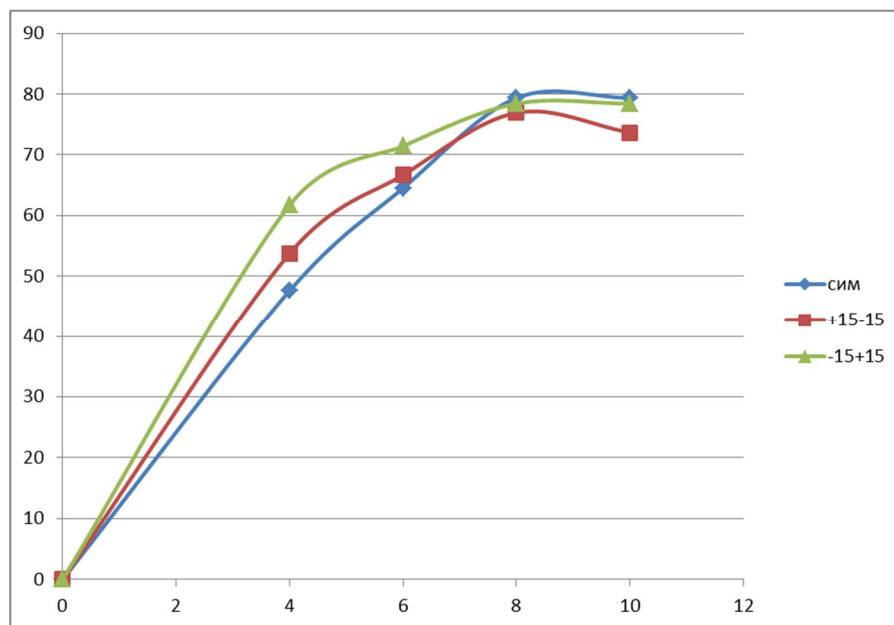


Рисунок 2.5 – Залежність ККД асинхронного двигуна від навантаження при відхиленні напруги ± 15 на фазах В і С

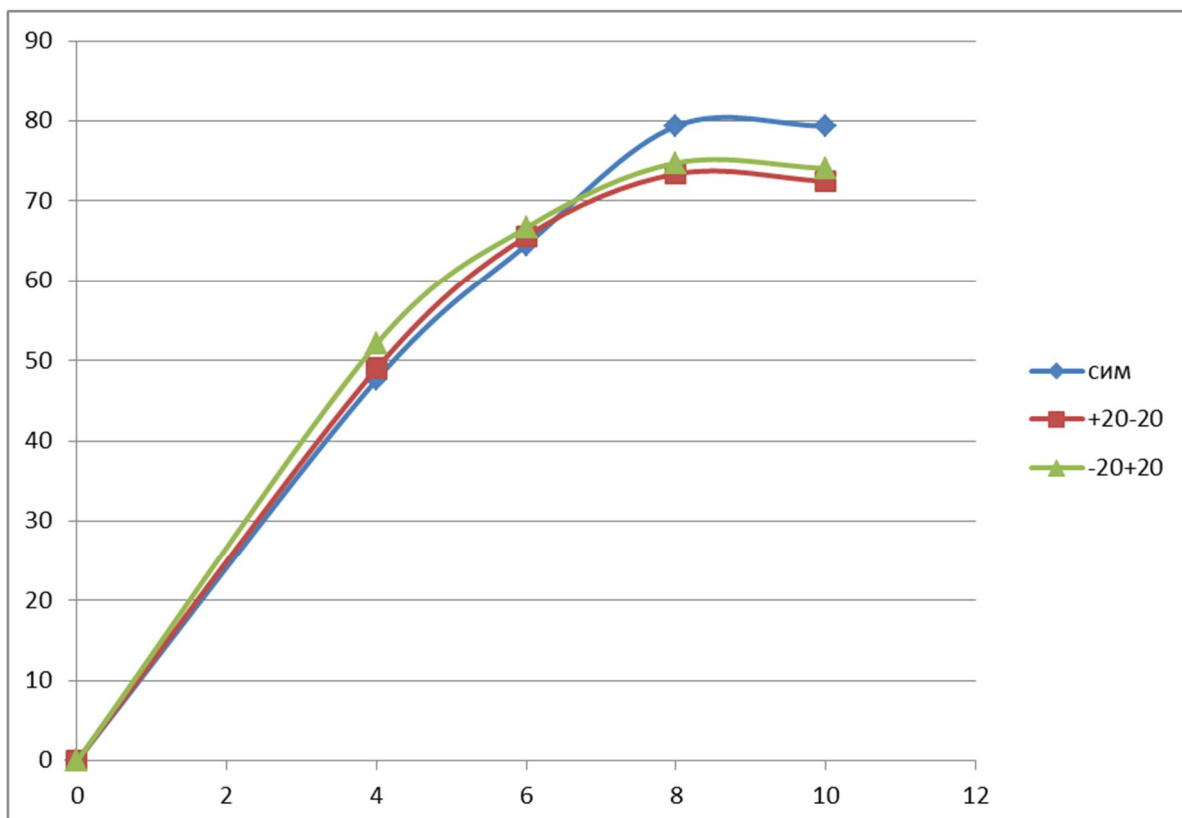


Рисунок 2.6 – Залежність ККД асинхронного двигуна від навантаження при відхиленні напруги ± 20 на фазах В і С

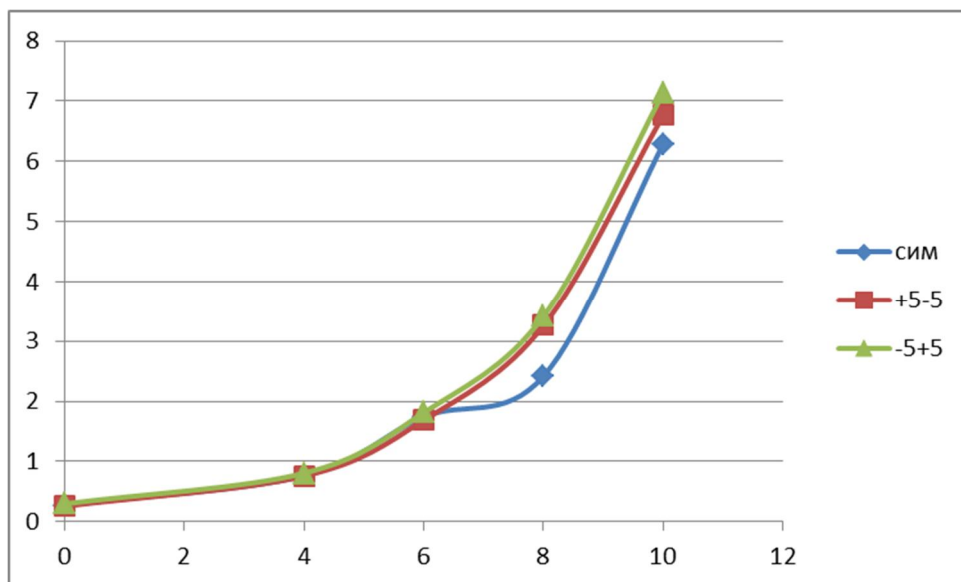


Рисунок 2.7 – Залежність ковзання асинхронного двигуна від навантаження при відхиленні напруги ± 5 на фазах В і С

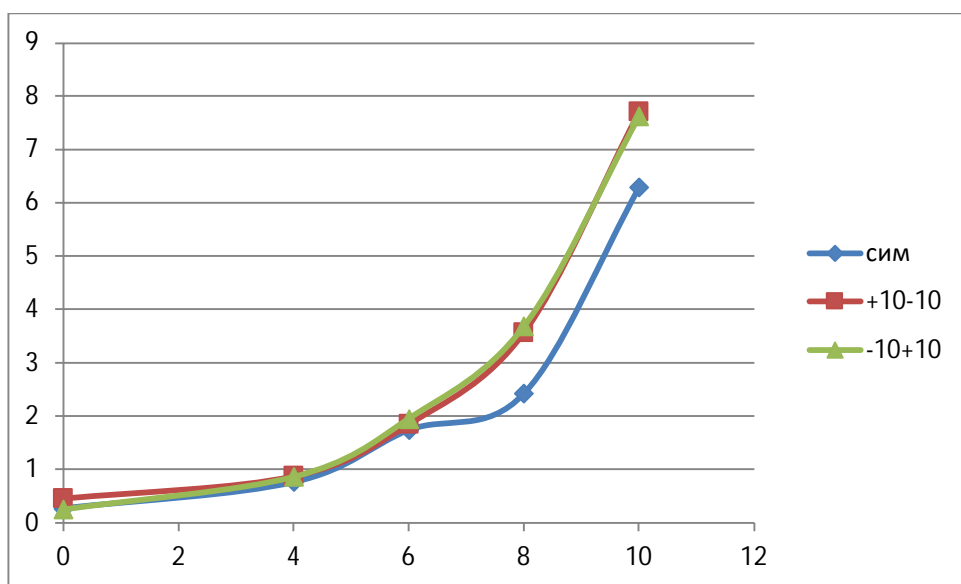


Рисунок 2.8 – Залежність ковзання асинхронного двигуна від навантаження при відхиленні напруги ± 10 на фазах В і С

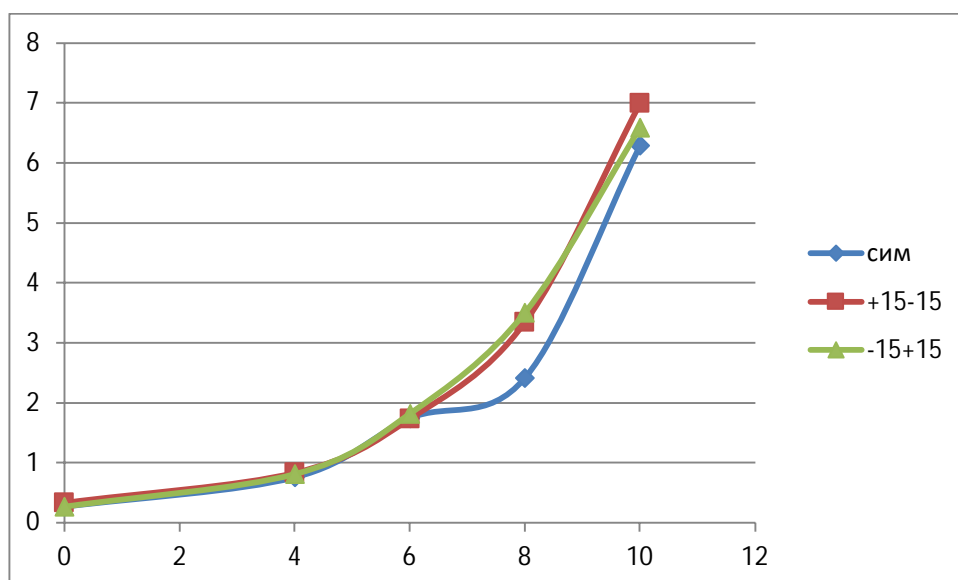


Рисунок 2.9 – Залежність ковзання асинхронного двигуна від навантаження при відхиленні напруги ± 15 на фазах В і С

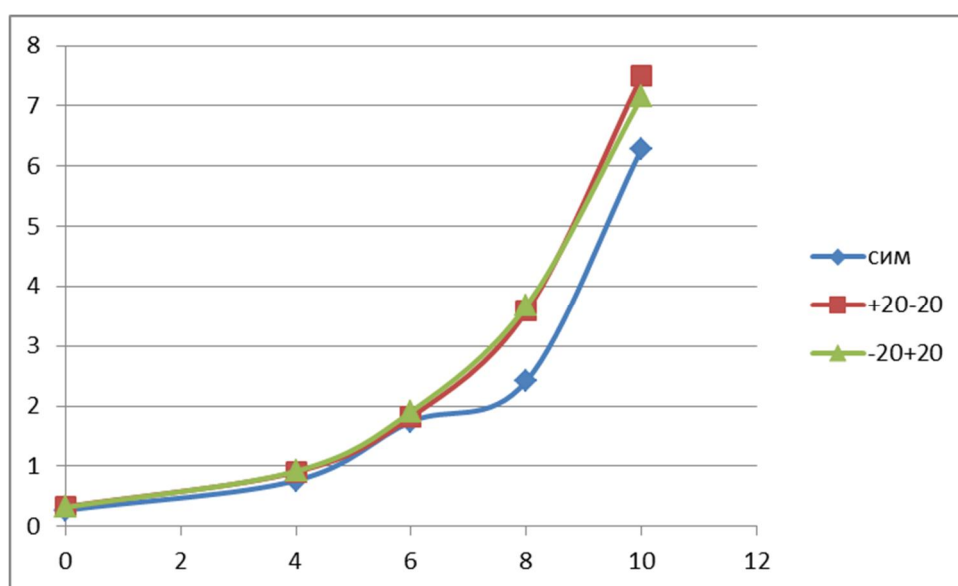


Рисунок 2.10 – Залежність ковзання асинхронного двигуна від навантаження при відхиленні напруги ± 20 на фазах В і С

2.4 Висновки до розділу 2

В даному розділі дано опис експериментальної установки та статистичний аналіз і оцінка результатів досліджень.

Проведено графічний аналіз і дано оцінка результатів досліджень, які були зняті при різних рівнях несиметрії. Показано, що ККД двигуна при виникненні несиметрії дещо зменшується. Аналізуючи дані графіки можна сказати що при несиметрії в 20 В на фазах В і С знижується майже на 10 %. Аналогічно можна сказати і про ковзання двигуна воно також при однакових навантаженнях практично на 1 % більше від значення що було отримане при симетричній напрузі. Аналізуючи дані графіки можна зробити висновок що принесиметрії напруги втрати в АД зростають.

3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1. Оцінка несиметрії режиму промислової системи електропостачання

Основним джерелом несиметрії напруги в системах електропостачання промислових підприємств є несиметричні навантаження. Визначення параметрів режиму в таких системах може бути виконане на основі раніше розглянутих математичних моделей у вигляді лінійних алгебраїчних рівнянь. При цьому навантаження в електричній мережі представляються повним опором або провідністю. В цей же час на практиці при розрахунках режимів систем електропостачання навантаження, як правило, представлені у вигляді повних потужностей. Саме тому доцільно розглянути визначення параметрів несиметричного режиму трифазної мережі з ізольованою нейтраллю в потужностях.

Для аналізу в якості основної схеми приймаємо трифазну систему, приведену на рис.2.1 з нелінійним навантаженням, підключеної на лінійну напругу. Струми, які протікають в плечах несиметричного навантаження, визначаються як:

$$\left. \begin{aligned} \dot{i}_{AB}^{(H)} &= \frac{\hat{S}_{AB}^{(H)}}{\hat{U}_{AB}} \\ \dot{i}_{CA}^{(H)} &= \frac{\hat{S}_{CA}^{(H)}}{\hat{U}_{CA}} \\ \dot{i}_{BC}^{(H)} &= \frac{\hat{S}_{BC}^{(H)}}{\hat{U}_{BC}} \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

де $\hat{S}_{AB}^{(H)}$, $\hat{S}_{CA}^{(H)}$, $\hat{S}_{BC}^{(H)}$ – спряжені комплекси повних потужностей плечей несиметричного навантаження;

\hat{U}_{AB} , \hat{U}_{CA} , \hat{U}_{BC} – спряжені комплекси лінійних напруг на затискачах навантаження;

Лінійні напруги на затискачах навантаження можна представити через симетричні складові фазних напруг наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} \hat{U}_{AB} &= \hat{U}_1 \cdot (1 - \alpha) + \hat{U}_2 \cdot (1 - \alpha^2) \\ \hat{U}_{CA} &= \hat{U}_1 \cdot (\alpha^2 - 1) + \hat{U}_2 \cdot (\alpha - 1) \\ \hat{U}_{BC} &= \hat{U}_1 \cdot (\alpha - \alpha^2) + \hat{U}_2 \cdot (\alpha^2 - \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

Підставивши (3.2) в (3.1) отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \dot{i}_{AB}^{(H)} &= \frac{\hat{S}_{AB}^{(H)}}{\hat{U}_1 \cdot (1 - \alpha) + \hat{U}_2 \cdot (1 - \alpha^2)} \\ \dot{i}_{CA}^{(H)} &= \frac{\hat{S}_{CA}^{(H)}}{\hat{U}_1 \cdot (\alpha^2 - 1) + \hat{U}_2 \cdot (\alpha - 1)} \\ \dot{i}_{BC}^{(H)} &= \frac{\hat{S}_{BC}^{(H)}}{\hat{U}_1 \cdot (\alpha - \alpha^2) + \hat{U}_2 \cdot (\alpha^2 - \alpha)} \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

Фазні струми, які протікають до вузлів трикутника несиметричного навантаження, при направленні струмів в останньому проти годинникової стрілки запишуться:

$$\left. \begin{aligned} \dot{i}_A^{(H)} &= \dot{i}_{AB}^{(H)} - \dot{i}_{CA}^{(H)} \\ \dot{i}_B^{(H)} &= \dot{i}_{BC}^{(H)} - \dot{i}_{AD}^{(H)} \\ \dot{i}_C^{(H)} &= \dot{i}_{CA}^{(H)} - \dot{i}_{BC}^{(H)} \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

З врахуванням виразу (3.4) складові прямої та зворотної послідовностей фзних струмів, обумовлених несиметричним навантаженням, визначаються як:

$$\left. \begin{aligned} \dot{i}_1^{(H)} &= \frac{1}{3} \left[(1 - \alpha) \cdot \dot{i}_{AB}^{(H)} + (\alpha^2 - 1) \cdot \dot{i}_{CA}^{(H)} + (\alpha - \alpha^2) \dot{i}_{BC}^{(H)} \right] \\ \dot{i}_2^{(H)} &= \frac{1}{3} \left[(1 - \alpha^2) \cdot \dot{i}_{AB}^{(H)} + (\alpha - 1) \cdot \dot{i}_{CA}^{(H)} + (\alpha^2 - \alpha) \dot{i}_{BC}^{(H)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Перш ніж перейти до подальшого аналізу, відмітимо вірність наступних співвідношень, які отримані шляхом нескладних перетворень:

$$\left. \begin{aligned} \hat{U}_{AB} \cdot \hat{U}_{CA} &= -3(\hat{U}_1^2 + \hat{U}_1 \cdot \hat{U}_2 + \hat{U}_2^2) \\ \hat{U}_{AB} \cdot \hat{U}_{BC} &= -3(\alpha^2 \cdot \hat{U}_1^2 + \hat{U}_1 \cdot \hat{U}_2 + \alpha \cdot \hat{U}_2^2) \\ \hat{U}_{CA} \cdot \hat{U}_{BC} &= -3(\alpha \cdot \hat{U}_1^2 + \hat{U}_1 \cdot \hat{U}_2 + \alpha^2 \cdot \hat{U}_2^2) \\ \hat{U}_{AB} \cdot \hat{U}_{CA} \cdot \hat{U}_{BC} &= -3(\alpha - \alpha^2)(\hat{U}_1^3 - \hat{U}_2^3) \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

З врахуванням відношення (3.6) після підстановки (3.3) в (3.5) і перетворення отримаємо складові прямої і зворотної послідовностей струму несиметричного навантаження, які виражені через потужності:

$$\left. \begin{aligned} \hat{i}_1^{(H)} &= \frac{1}{3} \cdot \frac{\hat{U}_1^2 \cdot \hat{S}_z^{(H)} + \hat{U}_1 \cdot \hat{U}_2 \cdot \hat{S}_p^{(H)} + \hat{U}_2 \cdot \hat{S}_n^{(H)}}{\hat{U}_1^3 - \hat{U}_2^3} \\ \hat{i}_2^{(H)} &= \frac{1}{3} \cdot \frac{\hat{U}_1^2 \cdot \hat{S}_p^{(H)} + \hat{U}_1 \cdot \hat{U}_2 \cdot \hat{S}_n^{(H)} + \hat{U}_2 \cdot \hat{S}_z^{(H)}}{\hat{U}_1^3 - \hat{U}_2^3} \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

де

$$\begin{aligned} \hat{S}_z^{(H)} &= \hat{S}_{AB}^{(H)} + \hat{S}_{CA}^{(H)} + \hat{S}_{BC}^{(H)}; \\ \hat{S}_p^{(H)} &= \alpha^2 \cdot \hat{S}_{AB}^{(H)} + \alpha \cdot \hat{S}_{CA}^{(H)} + \hat{S}_{BC}^{(H)}; \\ \hat{S}_n^{(H)} &= \alpha \cdot \hat{S}_{AB}^{(H)} + \alpha^2 \cdot \hat{S}_{CA}^{(H)} + \hat{S}_{BC}^{(H)}. \end{aligned}$$

У відповідності з виразом (3.7) комплексний коефіцієнт несиметрії струмів несиметричного навантаження рівний:

$$\varepsilon_i^{(H)} = \frac{\hat{i}_2^{(H)}}{\hat{i}_1^{(H)}} = - \frac{\hat{U}_1^2 \cdot \hat{S}_p^{(H)} + \hat{U}_1 \cdot \hat{U}_2 \cdot \hat{S}_n^{(H)} + \hat{U}_2^2 \cdot \hat{S}_z^{(H)}}{\hat{U}_1^2 \cdot \hat{S}_z^{(H)} + \hat{U}_1 \cdot \hat{U}_2 \cdot \hat{S}_p^{(H)} + \hat{U}_2^2 \cdot \hat{S}_n^{(H)}} \quad (3.8)$$

Позначивши спряжені комплекси коефіцієнта несиметрії напруги на затискачах навантаження у вигляді

$$\hat{\varepsilon}_U = \frac{\hat{U}_2}{\hat{U}_1}$$

отримаємо на основі (3.8):

$$\varepsilon_i^{(H)} = - \frac{\hat{S}_p^{(H)} + \hat{\varepsilon}_U \cdot \hat{S}_n^{(H)} + \hat{\varepsilon}_U^2 \cdot \hat{S}_z^{(H)}}{\hat{S}_z^{(H)} + \hat{\varepsilon}_U \cdot \hat{S}_p^{(H)} + \hat{\varepsilon}_U^2 \cdot \hat{S}_n^{(H)}} \quad (3.9)$$

Приймаючи до уваги дуже малі значення $\hat{\varepsilon}_U^2$ коефіцієнт несиметрії струмів несиметричного навантаження можна представити у вигляді:

$$\dot{\hat{\epsilon}}_i^{(H)} \approx -\frac{\hat{S}_p^{(H)} + \hat{\epsilon}_U \cdot \hat{S}_n^{(H)}}{\hat{S}_z^{(H)} + \hat{\epsilon}_U \cdot \hat{S}_p^{(H)}} \quad (3.10)$$

Вирази (3.9) і (3.10) визначають залежність між комплексними коефіцієнтами несиметрії струмів і напруг несиметричного навантаження.

Для виводу виразу коефіцієнта несиметрії напруг розглянемо рівняння, яке складено для схеми рис.2.1 відносно провідностей симетричного навантаження живлячої системи

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 - \left(\dot{I}_1^{(C)} + \dot{I}_1^{(H)} \right) \cdot \frac{1}{Y_C} \quad (3.11)$$

$$\dot{U}_2 = -\frac{\dot{I}_2^{(H)}}{Y_C + Y_2^{(C)}} \quad (3.12)$$

де Y_C – повна провідність живлячої системи;

$Y_2^{(C)}$ - повна провідність зворотної послідовності симетричного навантаження.

Поділивши (3.12) на (3.11) отримаємо комплексний коефіцієнт несиметрії напруги:

$$\dot{\hat{\epsilon}}_U = -\frac{\dot{I}_2^{(H)} \cdot Y_C}{\left(Y_C + Y_2^{(C)} \right) \cdot \left(\dot{E}_1 \cdot Y_C - \dot{I}_1^{(C)} - \dot{I}_1^{(H)} \right)} \quad (3.13)$$

Враховуючи, що в реальних системах електропостачання несиметрія напруги складає величину порядку декількох відсотків від номінальної напруги, складові прямої та зворотної послідовностей струмів несиметричного навантаження можна наближено визначити на основі формули (3.7) відкинувши в ній члени, які містять \hat{U}_2 . При цьому вираз (3.13) можна представити в наступному вигляді:

$$\dot{\hat{\epsilon}}_U = \frac{\hat{S}_p^{(H)} \cdot Y_C}{\left(Y_C + Y_2^{(C)} \right) \cdot \left[3 \cdot \hat{U}_1 \cdot \left(\dot{E}_1 \cdot Y_C - \dot{I}_1^{(C)} \right) - \hat{S}_z^{(H)} \right]} \quad (3.14)$$

Потужність симетричного навантаження згідно роботи [3] при відсутності складової нульової послідовності рівна:

$$\dot{S}^{(c)} = 3 \cdot \dot{U}_1 \cdot \hat{I}_1^{(c)} + 3 \cdot \dot{U}_2 \cdot \hat{I}_2^{(c)} \quad (3.15)$$

Потужність короткого замикання на затискачах навантаження визначається як:

$$\dot{S}_\kappa = 3 \cdot U_{ном}^2 \cdot \hat{Y}_C \quad (3.16)$$

Другим доданком в (3.15) можна знехтувати. З врахуванням цього на основі (3.14)-(3.16) отримаємо наближену формулу для визначення комплексного коефіцієнта несиметрії напруги:

$$\dot{\varepsilon}_U = \frac{\hat{S}_p^{(H)}}{(1 + \dot{\lambda}) \cdot (\hat{S}_\kappa - \hat{S}^{(c)} - \hat{S}_z^{(H)})} \quad (3.17)$$

де

$$\dot{\lambda} = \frac{\hat{S}^{(c)} \cdot Y_2^{(c)}}{\hat{S}_\kappa \cdot Y_1^{(c)}}$$

Вираз (3.17) дозволяє оцінювати несиметрію напруг як по модулю, так і по фазі з врахуванням реального складу комплексного симетричного навантаження. Комплексний коефіцієнт $\dot{\lambda}$ залежить від складу і потужності навантаження систем електропостачання. Для схеми електропостачання з опором живлячої мережі у вигляді індуктивного реактансу трансформатора формула для визначення $\dot{\lambda}$ перетворюється в наступний вигляд:

$$\dot{\lambda} = j \frac{u_\kappa}{\beta \cdot (1 + \sqrt{3} \cdot \lambda)} \cdot Y_2^{(c)} \quad (3.18)$$

де u_κ - напруга короткого замикання трансформатора зв'язку з системою;

β – коефіцієнт, який рівний відношенню потужності трансформатора до потужності навантаження (у відповідності з нормами проектування для одно трансформаторної підстанції $\beta=1$, для двотрансформаторної підстанції $\beta=1,4$);

α – коефіцієнт, який рівний відношенню модуля потужності несиметричного навантаження до модуля потужності симетричного навантаження;

$Y_2^{(c)}$ – повна провідність зворотної послідовності симетричного навантаження віднесена до одиниці потужності.

Аналогічним чином на основі виразів (3.7), (3.12), (3.15), (3.16) можна отримати формулу для визначення несиметрії напруг, рівної відношенню напруг зворотної послідовності до номінальної напруги мережі:

$$\dot{\varepsilon}_2 \approx \frac{\hat{S}_p^{(H)}}{\hat{S}_k \cdot (1 + \dot{\lambda})} \quad (3.19)$$

На рис.3.1 приведений графік зміни $|\dot{\lambda}|$ в залежності від α для різних галузей промисловості. В табл.3.1 приведені відповідні діапазони зміни $|\dot{\lambda}|$ і значення $\arg(\dot{\lambda})$.

Отримані розрахункові значення $\dot{\lambda}$ рекомендується використовувати для наближеної оцінки несиметрії напруг при відсутності відомостей про завантаження трансформатора і складу комплексного симетричного навантаження.

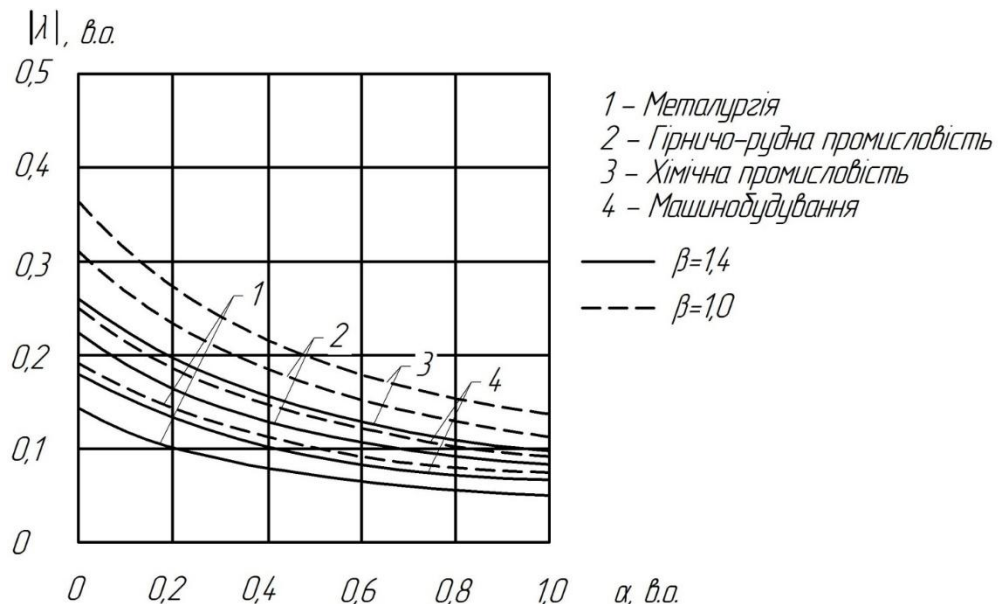


Рисунок 3.1 – Графік зміни $|\dot{\lambda}|$ в залежності від α для різних галузей промисловості

Таблиця 3.1 – Розрахункові значення λ

| Найменування | Металур- гія | Гірничо- рудна промисловість | Хімічна промисловість | Машинобудування |
|---|-----------------|------------------------------------|--------------------------|-----------------|
| Діапазон $ \lambda $ ($\beta=1,4$) | 0,05-0,14 | 0,08-0,22 | 0,1-0,26 | 0,06-0,18 |
| Діапазон $ \lambda $ ($\beta=1$) | 0,07-0,19 | 0,11-0,31 | 0,13-0,37 | 0,09-0,25 |
| $arg(\lambda)$ | 34,9° | 29,7 ° | 23,8 ° | 29,7 ° |

3.2. Симетрування напруг шляхом збільшення потужності короткого замикання

У відповідності з формулами (3.13), (3.17), (3.19) несиметрія напруги на затискачах навантаження зворотно пропорційна потужності короткого замикання. Тому, збільшуючи потужність короткого замикання, можна досягти зниження рівня несиметрії напруги на затискачах навантаження.

Відповідно до формули (3.16) потужність короткого замикання прямо пропорційна квадрату номінальної напруги на затискачах навантаження. Звідси впливає один зі шляхів збільшення S_k , який закладається в переводі системи електропостачання на більш високу ступінь напруги.

Розглянемо систему електропостачання, яка містить симетричні та несиметричні навантаження і які отримують живлення через понижуючий трансформатор від енергосистеми нескінченної потужності. Приведемо техніко-економічне порівняння варіантів електропостачання навантаження на різних ступенях напруги при умові сталості опорів живлячої мережі. При цьому для співставленості порівнюваних варіантів приймаємо в них однакове по потужності навантаження. У відповідності зі схемою системи електропостачання умові сталості опорів живлячої мережі еквівалентна умова незмінності опору трансформатора зв'язку з енергосистемою. Представляючи останнє у вигляді індуктивного реактансу можна записати:

$$X^{(T)} = \frac{u_{K3} \cdot U_{нл}^2}{S^{(T)}} = const \quad (5.20)$$

де $X^{(T)}$ – індуктивний реактанс трансформатора;

$S^{(T)}$ – номінальна потужність трансформатора;

$U_{нл}$ – номінальна лінійна напруга мережі.

Враховуючи, що відносне значення u_{K3} для широкого класу понижувальних трансформаторів 35-110 кВ знаходиться в доволі вузькому діапазоні, його можна рахувати незмінним в порівнюваних варіантах. Тоді з (3.20) випливає:

$$\frac{U_{нл}^2}{S^{(T)}} = const \quad (3.21)$$

З відношення (3.21) випливає, що переведення системи електропостачання на більш високий ступінь напруги при прийнятих умовах супроводжується ростом номінальної потужності трансформаторів зв'язку з енергосистемою.

Приймаємо в якості базового варіанту систему електропостачання з самою низькою номінальною напругою. Тоді номінальну напругу трансформатора i -го варіанту електропостачання на основі (3.21) можна виразити наступною формулою:

$$S_i^{(T)} = S_1^{(T)} \cdot \frac{U_{нл.i}^2}{U_{нл1}^2} \quad (3.22)$$

де індексом «1» позначається параметр базового варіанту.

Представивши $S_1^{(T)}$ у вигляді:

$$S_1^{(T)} = \beta \cdot (S^{(C)} + \sqrt{3} \cdot S^{(H)}) \quad (3.23)$$

після підстановки в (3.22) отримаємо:

$$S_i^{(T)} = \beta \cdot (S^{(C)} + \sqrt{3} \cdot S^{(H)}) \cdot \frac{U_{нл.i}^2}{U_{нл1}^2} \quad (3.24)$$

або у відносних одиницях

$$S_i^{(T)} = \beta \cdot (1 + \sqrt{3} \cdot \alpha) \cdot \frac{U_{нл.i}^2}{U_{нл1}^2} \quad (3.25)$$

На рис.3.2 і рис.3.3 представлені графіки залежності коефіцієнта несиметрії і номінальної потужності трансформатора зв'язку з енергосистемою від ступені напруги, розраховані по формулах (3.17), (3.25) для значення $\beta=1$.

Розрахунки, які приведені для систем електропостачання з типовим складом комплексного симетричного навантаження показали, що в умовах прийнятих припущень переведення системи на сусідню більш високу ступінь напруги в діапазоні стандартних номінальних напруг 6÷35 кВ призводить до збільшення потужності трансформатора в 2,8÷4,0 рази. Якщо при цьому опір живлячої системи рівний реактивному опору трансформатора то в стільки ж раз знижується коефіцієнт несиметрії напруги на зажимах навантаження. Необхідно відмітити, що підвищення ступеня напруги при прийнятих умовах, тягне за собою значне збільшення додаткових приведених затрат, які обумовлені ростом потужності трансформатора. Це пов'язано як зі збільшенням втрат активної потужності в трансформаторі так і з дискретністю шкали номінальних потужностей стандартних трансформаторів.

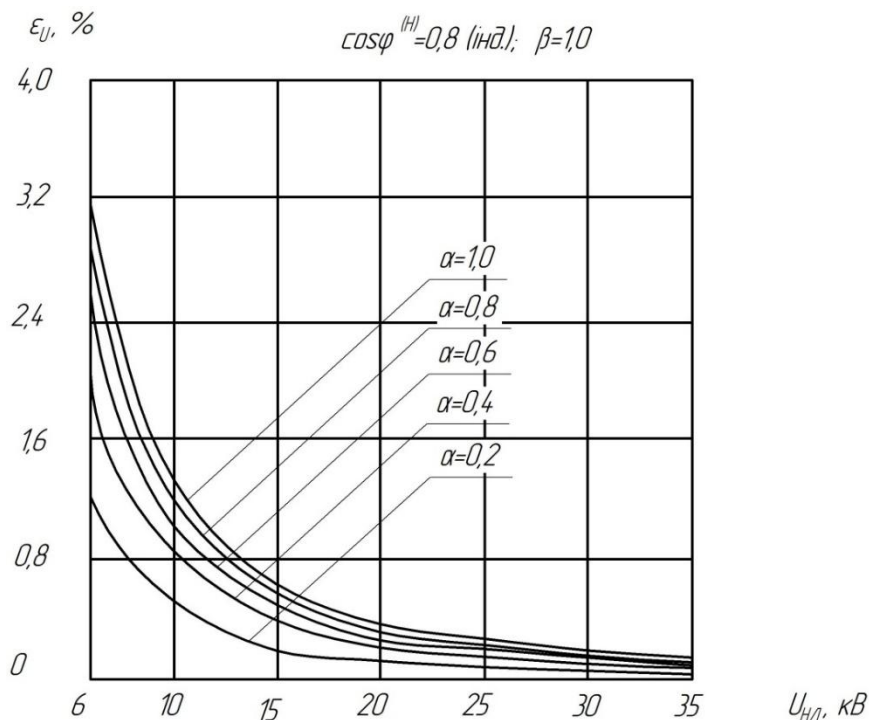


Рисунок 3.2 – Графіки залежності коефіцієнта несиметрії від ступеня напруги

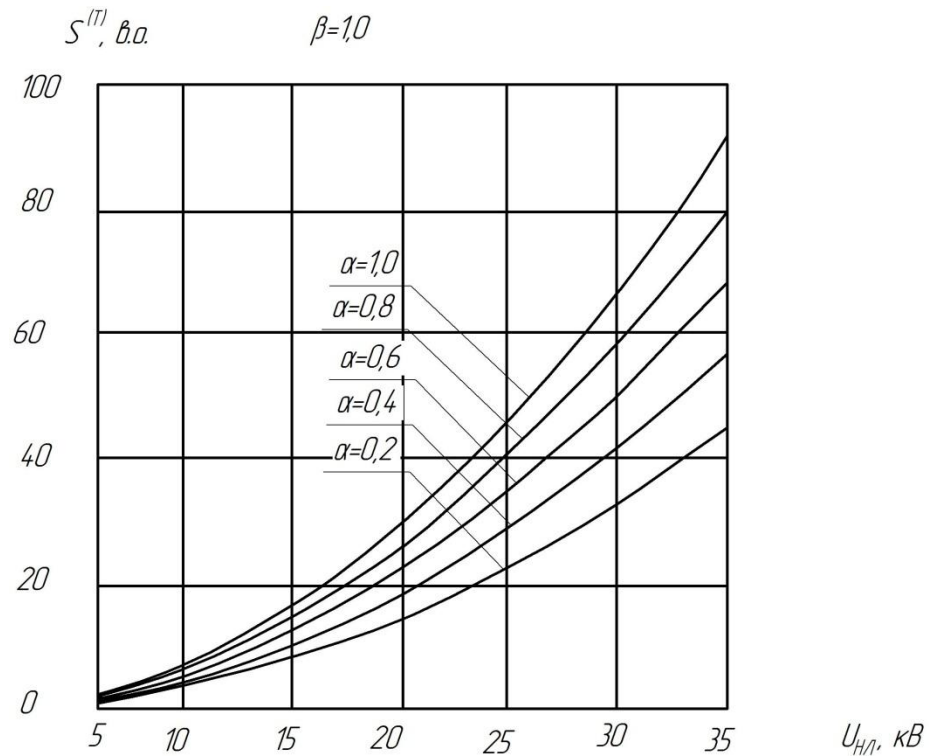


Рисунок 3.3 – Графіки залежності номінальної потужності трансформатора зв'язку з енергосистемою від ступені напруги

Враховуючи те, що в промислових системах електропостачання опір трансформаторів зв'язку з енергосистемою, складає значну долю в опорі мережі живлення то метод корекції напруги, який розглядається, є економічно недоцільним.

Іншим методом зниження несиметрії напруги на зажимах навантаження, який базується на збільшенні опору короткого замикання, як впливає з формули (3.16), є зменшення опору системи живлення.

В загальному випадку, опір системи живлення складається з опору лінії електропередачі, трансформатора та в деяких випадках струмообмежуючого реактора. Розглянемо можливість зниження опору системи живлення за рахунок зміни кожної з її складових.

Опір лінії електропередачі можна знизити за рахунок збільшення поперечного перерізу проводів. При цьому значення повного опору зменшиться, за рахунок зменшення його активної складової, тоді як реактивний опір змінюється несуттєво та в деяких випадках може навіть збільшитися.

Взявши до уваги те, що в промислових системах електропостачання значення опору ліній електропередачі значно менше опору трансформаторів то вказаний спосіб є малопридатним.

Також важко зменшити опір живлячої системи за рахунок зміни опору реактора, оскільки параметри останніх вибираються по умовах обмеження струмів короткого замикання.

Опір трансформатора зв'язку з енергосистемою можна зменшити у відповідності з виразом (3.20) шляхом збільшення номінальної потужності при незмінному ступені напруги. Враховуючи те, що опір трансформатора для більшості промислових систем електропостачання складає значну частину опору мережі живлення то спосіб, який пов'язаний зі зменшенням опору живлячого трансформатора, може бути застосований для симетрування напруг.

Розглянемо систему електропостачання, яка отримує живлення від енергосистеми нескінченної потужності через понижувальний трансформатор. При цьому, як і раніше, потужність короткого замикання на зажимах навантаження визначається через параметра трансформатора зв'язку з енергосистемою. В цьому випадку умові сталості ступеня номінальної напруги відповідає вираз (при незмінній $u_{кз}$):

$$S^{(T)} \cdot X^{(T)} = const \quad (3.26)$$

Звідси випливає, що збільшення потужності короткого замикання шляхом зниження опору трансформатора еквівалентно збільшенню потужності останнього і обернено пропорційно зміні $X^{(T)}$. Приймаємо в якості базового варіанту систему електропостачання за допомогою трансформатора, яка визначається згідно (3.23). Тоді на основі відношення (3.26) номінальна потужність трансформатора i -го варіанту визначається як:

$$S_i^{(T)} = \beta \cdot \left(S^{(C)} + \sqrt{3} \cdot S^{(H)} \right) \cdot \frac{X_i^{(T)}}{X_i^{(T)}} \quad (3.27)$$

На рис.3.4 та рис.3.5 приведені розрахункові залежності коефіцієнта несиметрії напруги і потужності живлячого трансформатора від його опору при різних α і β . Із аналізу приведених розрахунків очевидно, що переведення

потужності трансформатора на сусідню вищу ступінь стандартної шкали номінальних потужностей при значенні α в діапазоні 0-1,0 в більшості випадків приведе до зниження несиметрії напруги на затискачах навантаження нижче нормованої границі. При цьому збільшення номінальної потужності трансформатора зв'язку з енергосистемою для класу 10 ÷ 80 МВА знаходиться в межах 1,25 ÷ 1,6. В табл.3.2 приведені значення перевищення вартості трансформатора (тис.грн.) класу 35, 110, 220 кВ потужністю 10 ÷ 80 МВА при зміні їх номінальної потужності на найближчу більш високу ступінь.

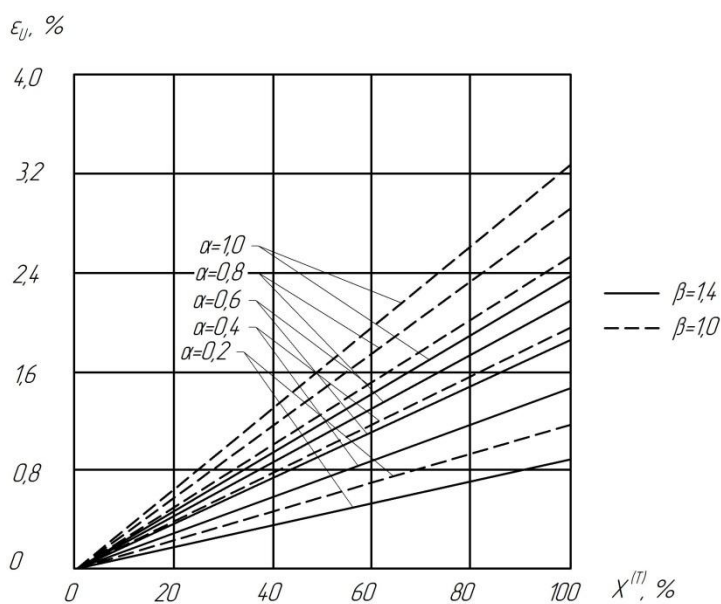


Рисунок 3.4 – Розрахункові залежності коефіцієнта несиметрії напруги живлячого трансформатора від його опору при різних α і β .

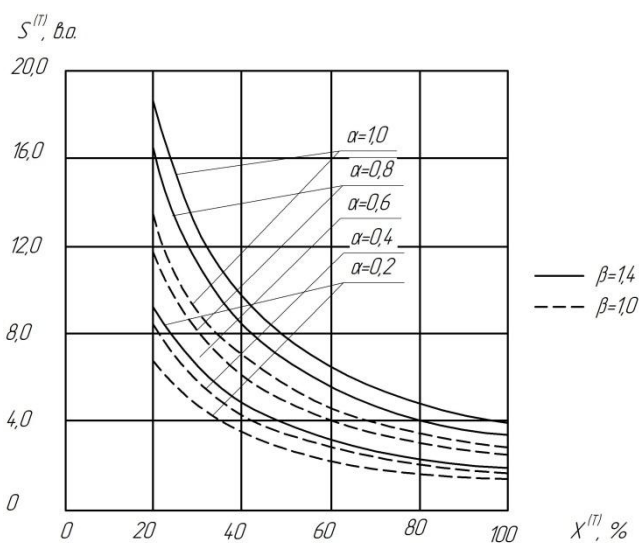


Рисунок 3.5 – Розрахункові залежності потужності трансформатора живлення від його опору при різних α і β .

Таблиця 3.2 – Значення перевищення вартості трансформаторів при зміні їх номінальної потужності на найближчу більш високу ступінь

| Номінальна напруга, кВ | Номінальна потужність, МВА | | | | | |
|------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 10/16 | 16/25 | 25/32 | 32/40 | 40/63 | 63/80 |
| 35 | 11 | 5 | 22 | 13 | 10 | -10 |
| 110 | 18 | 12 | 8 | 14 | 22 | 14 |
| 220 | 20* | - | 5 | 15 | 20 | -10 |

Примітка: * значення відповідає зміні від 10 до 25 МВА

Таким чином, з вище викладеного випливає, що при проектуванні промислових систем електропостачання симетрування напруги за допомогою збільшення потужності трансформатора живлення може розглядатися як технічно і економічно доцільний спосіб.

Для зниження опору системи живлення можуть бути також використані симетричні ємнісні пристрої повздожньої компенсації (ППК), які використовуються в електричних мережах для оптимізації режиму напруги. Ємнісні пристрої ППК дозволяють компенсувати індуктивні опори живлячої системи і тим самим знизити модуль її повного опору. В ідеальному випадку, коли активний опір живлячої системи рівний нулю, за допомогою ємнісного ППК можлива повна компенсація, що відповідає рівності нулю несиметрії напруги на затискачах навантаження. На рис.3.6 та рис.3.7 приведені графіки зміни коефіцієнта несиметрії напруги і встановленої потужності ППК ($Q_{ППК}$) в залежності від відносного значення реактивного опору ППК ($X_{ППК}$) для різних значень α і β . При цьому припускається, що потужність ППК змінюється безперервно, а опір системи живлення дорівнює реактивному опору трансформатора. Як випливає з рис.3.6 повне симетрування напруги і максимальна встановлена потужність ППК відповідає рівності реактивних опорів ППК і трансформатора зв'язку з енергосистемою. Необхідно відмітити, що в реальних системах електропостачання, коли значення активного опору живлячої системи відмінне від нуля, а шкала потужностей ППК має дискретний характер, зниження несиметрії напруги при використанні розглянутого способу можливе тільки до деякого мінімального значення, відмінного від нуля. В

табл.3.3 приведені розрахункові значення вартості ППК (тис.грн.), які забезпечують повну компенсацію реактивного опору трансформатора для граничної вартості ППК 7,5 грн/кВАр при номінальному навантаженні трансформатора. Для отримання ППК при завантаженні, яке відмінне від номінального, значення в табл. 3.3 необхідно помножити на квадрат відношення фактичного навантаження трансформатора до номінального. Виходячи з того що в реальних СЕП промислових підприємств завантаження трансформатора в нормальних режимах суттєво нижче (на 30% і більше) номінального, а також те, що для необхідного зниження несиметрії напруги необхідно лише часткова компенсація індуктивного опору системи живлення, фактичні затрати на ППК будуть суттєво менші значень, які приведені в табл. 3.3. Даний аналіз дозволяє зробити висновок, що застосування ППК в якості зниження несиметрії напруг є економічно доцільним заходом і може розглядатися як альтернатива спеціальним КП.

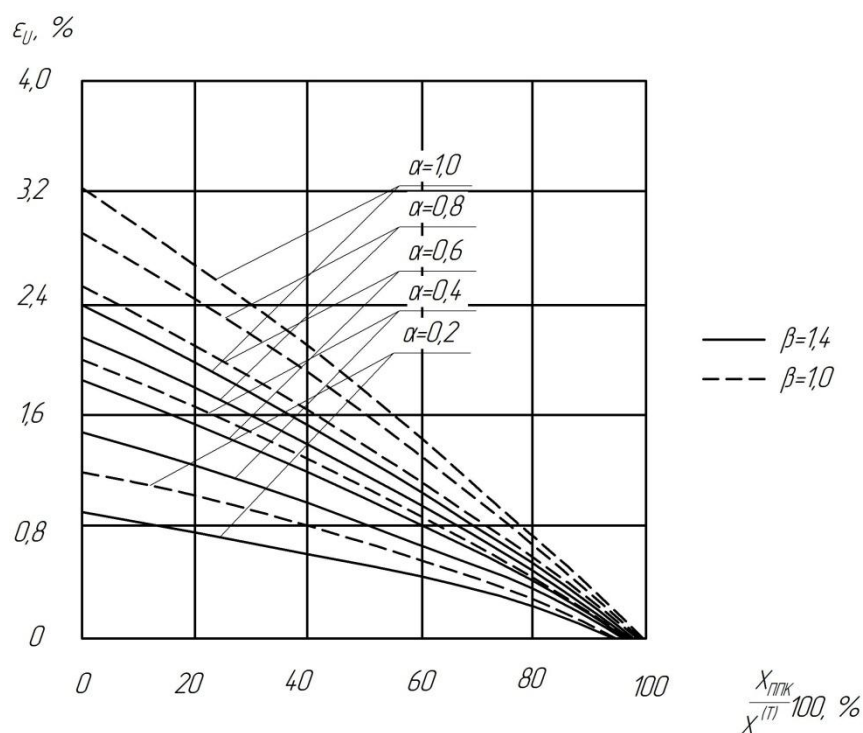


Рисунок 3.6 – Графіки зміни коефіцієнта несиметрії напруги в залежності від відносного значення реактивного опору ППК для різних значень α і β .

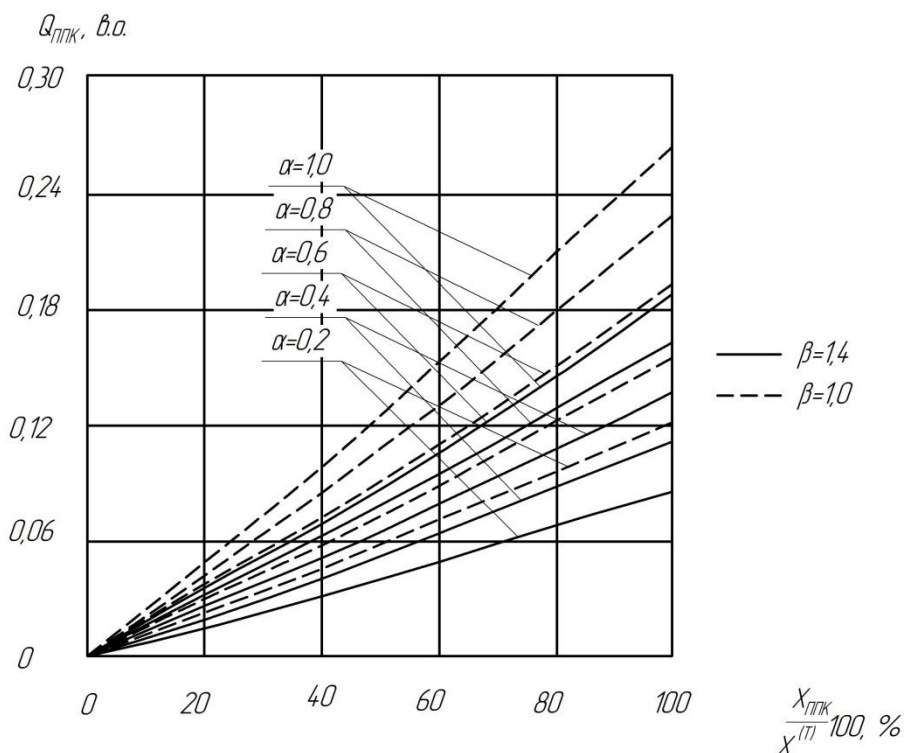


Рисунок 3.7 – Графіки зміни встановленої потужності ППК в залежності від відносного значення реактивного опору ППК для різних значень α і β .

Таблиця 3.3 – Розрахункові значення вартості ППК

| Номінальна напруга, кВ | Номінальна потужність трансформатора, МВА | | | | | | |
|------------------------|---|------|------|------|------|------|------|
| | 10 | 16 | 25 | 32 | 40 | 63 | 80 |
| 35 | 6,6 | 10,6 | 19,5 | 30,4 | 28,4 | 60,8 | 60,0 |
| 110 | 8,6 | 13,8 | 21,7 | 27,6 | 34,5 | 54,1 | 68,6 |
| 220 | - | - | 26,7 | 31,4 | 40,9 | 61,5 | 72,2 |

Слід зауважити такі позитивні сторони застосування ППК для симетрування напруг, як параметричний ефект регулювання, зниження коливання і підвищення рівня напруг на затискачах навантаження. Разом з цим використання ППК як і інші способи, які розглядаються вище призводить до збільшення потужності к.з. в СЕП, що погіршує умови роботи комутаційної апаратури. Дане протиріччя необхідно врахувати при виборі наведених способів симетрування напруг і, у випадку необхідності, передбачити заходи із обмеження струмів к.з.

3.3. Схемні рішення в промислових системах електропостачання з несиметричними навантаженнями

Вище були розглянуті схеми електропостачання в яких живлення несиметричних навантажень здійснювалось від одних шин з симетричними споживачами, що відповідало нульовій електричній відстані між ними. На практиці є різні способи, які дозволяють за допомогою підбору відповідних схем електричної мережі відділяти несиметричні навантаження від інших споживачів і тим самим знизити несиметрію напруги на зажимах останніх.

Серед можливих схемних рішень необхідно виділити наступні два варіанти:

- відділення несиметричних навантажень від інших споживачів на стороні низької напруги при збереженні загального живлення на стороні високої напруги

- роздільне живлення як на стороні низької та і на стороні високої напруги.

Перевагою цих двох варіантів перед іншими є можливість використання при проектуванні типових технічних рішень, які засновані на застосуванні обладнання, що серійно випускається.

Розглянемо схему електропостачання по першому варіанту, де роздільне живлення несиметричного навантаження і симетричних споживачів здійснюється за допомогою трансформатора з розщепленою обмоткою низької напруги. При цьому з врахуванням того, що схема заміщення трансформатора зв'язку з енергосистемою представлена трьохпроменевою зіркою з опорами 0; $2X^{(T)}$; $2X^{(T)}$, складова зворотної послідовності напруги симетричного навантаження визначається по формулі:

$$\dot{U}_2^{(C)} = \frac{\dot{U}_2^{(H)} + \dot{I}_2^{(H)} \cdot j2 \cdot X^{(T)}}{1 + j2 \cdot X^{(T)} \cdot Y_2^{(C)}} \quad (3.28)$$

Зі схеми заміщення зворотної послідовності мережі, що розглядається, складову зворотної послідовності напруги на затискачах несиметричного навантаження можна виразити як:

$$\dot{U}_2^{(H)} = -\dot{I}_2^{(H)} \cdot (Z_{2E} + j2 \cdot X^{(T)}) \quad (5.29)$$

$$\text{де } Z_{2E} = \frac{Z_{\text{л}} \cdot (Z_2^{(C)} + j2 \cdot X^{(T)})}{Z_{\text{л}} + Z_2^{(C)} + j2 \cdot X^{(T)}} \quad (Z_{\text{л}} - \text{опір лінії, який зв'язує енергосистему з}$$

понижуючим трансформаторам).

Підставляючи вираз (3.29) в (3.28) отримаємо:

$$\dot{U}_2^{(C)} = -\frac{\dot{I}_2^{(H)} \cdot Z_{2E}}{1 + j2 \cdot X^{(T)} \cdot Y_2^{(C)}} \quad (3.30)$$

Потужність трансформатора з розщепленою обмоткою складає 100 % для обмотки високої напруги і 50 % для обмоток низької напруги. Виходячи з цього, встановлена потужність вказаного трансформатора при роздільному живленні несиметричного навантаження і симетричних споживачів необхідно розраховувати як множення коефіцієнта β на подвійну потужність обмотки низької напруги з максимальним завантаженням. Звідси:

$$S^{(T)} = \begin{cases} 2 \cdot \beta \cdot S^{(C)} & \text{при } \alpha \leq \frac{1}{\sqrt{3}} \\ 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \beta \cdot S^{(H)} & \text{при } \alpha > \frac{1}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad (3.31)$$

В свою чергу, складову струму зворотної послідовності несиметричного навантаження наближено можна виразити як:

$$\dot{I}_2^{(H)} \approx \frac{\dot{S}^{(H)}}{U_{\text{нл}}} \cdot e^{j\psi_{\text{н}}} \quad (3.32)$$

де $\psi_{\text{н}}$ – кут, який в залежності від підключення несиметричного навантаження приймає значення: при підключенні на АВ - $\psi_{\text{н}}=90^\circ$, СА - $\psi_{\text{н}}=0^\circ$, ВС - $\psi_{\text{н}}=180^\circ$.

На основі (3.31), (3.32) формула для комплексного коефіцієнта несиметрії напруги на зажимах симетричного навантаження приводиться до наступного вигляду:

$$\dot{\varepsilon}_u^{(c)} = - \frac{\sqrt{3} \cdot \alpha \cdot Z_{2E^*} \cdot e^{j(\psi_n + \varphi^{(H)})}}{1 + \xi} \quad (3.33)$$

де Z_{2E^*} - опір Z_{2E} , приведений до базисних умов;

$\varphi^{(H)}$ - аргумент повної потужності несиметричного навантаження.

З аналізу (3.33) випливає, що величина несиметрії напруги на затискачах симетричного навантаження залежить від багатьох факторів і, в першу чергу, від потужності несиметричного навантаження і співвідношення між опорами лінії, трансформатора і симетричного навантаження. На рис.3.8 та рис.3.9 приведені розрахункові графіки модулів комплексних величин ξ та $\dot{\varepsilon}_u^{(c)}$ в залежності від α . Криві на рис.3.9 побудовані у відповідності з формулою (3.33) для значення $Z_n = j \cdot 0,1 \cdot X^{(T)}$. Графіки побудовані на рис.3.8 та рис.3.9 мають характерну точку при значенні $\alpha = 0,577$, в якій вони мають свою залежність, що пояснюється вибором потужності трансформатора у відповідності з виразом (3.31). Необхідно відмітити, що комплексний коефіцієнт ξ має значення аргументу, однакове з коефіцієнтом $\dot{\lambda}$, який був розглянутий раніше.

Із рис.3.9 виливає, що для прийнятого співвідношення між опорами лінії і трансформатора рівень несиметрії напруги на затискачах симетричного навантаження не перевищує одного відсотка і мало залежить від складу цього навантаження. Очевидно, що збільшення значення $\frac{|Z_{ln}|}{X^{(T)}}$ буде супроводжуватися збільшенням модуля коефіцієнта несиметрії напруги $|\dot{\varepsilon}_U^{(c)}|$.

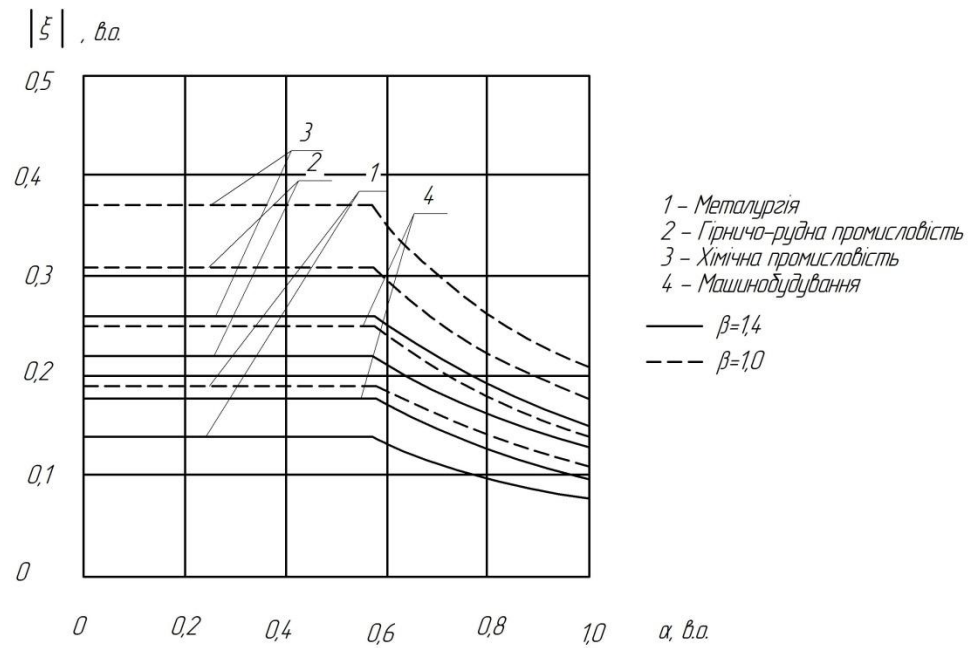


Рисунок 3.8 – Розрахункові графіки модулів комплексних величин ξ в залежності від α .

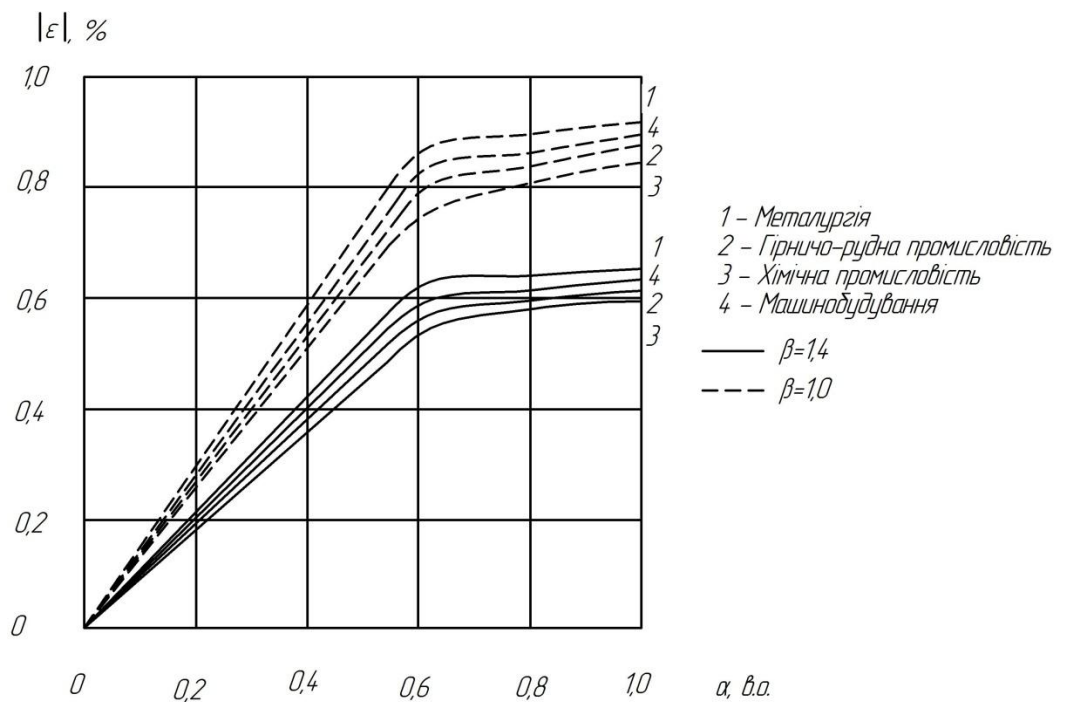


Рисунок 3.9 – Розрахункові графіки модулів комплексних величин $\epsilon_u^{(c)}$ в залежності від α .

В табл.3.4 приведені розрахункові допустимі значення відношення $\frac{|Z_{\text{лн}}|}{X^{(T)}}$, при перевищенні яких рівень несиметрії напруги на затискачах симетричного

навантаження буде більше 2%. На основі даних табл.3.4 можна оцінити можливість підключення несиметричного навантаження до розщепленої обмотки трансформатора для системи електропостачання зі складом комплексного навантаження близьким до одного з використовуваних в розрахунках.

Таблиця 3.3 – Розрахункові допустимі значення відношення $\frac{|Z_{\text{ЛН}}|}{X^{(T)}}$

| α , в.о. | $\beta=1,0$ | | | | $\beta=1,4$ | | | |
|-----------------|-------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------|-------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------|
| | Металургія | Гірничо-рудна промисловість | Хімічна промисловість | Машинобудування | Металургія | Гірничо-рудна промисловість | Хімічна промисловість | Машинобудування |
| 0,1 | 1,34 | 1,48 | 1,56 | 1,41 | 1,81 | 1,94 | 2,01 | 1,88 |
| 0,2 | 0,67 | 0,74 | 0,78 | 0,71 | 0,91 | 0,97 | 1,00 | 0,95 |
| 0,3 | 0,45 | 0,49 | 0,52 | 0,47 | 0,60 | 0,65 | 0,67 | 0,63 |
| 0,4 | 0,34 | 0,37 | 0,39 | 0,35 | 0,45 | 0,49 | 0,50 | 0,48 |
| 0,5 | 0,27 | 0,30 | 0,31 | 0,28 | 0,36 | 0,39 | 0,40 | 0,38 |
| 0,6 | 0,23 | 0,25 | 0,27 | 0,24 | 0,31 | 0,33 | 0,34 | 0,32 |
| 0,7 | 0,23 | 0,25 | 0,26 | 0,24 | 0,31 | 0,32 | 0,34 | 0,32 |
| 0,8 | 0,22 | 0,24 | 0,25 | 0,24 | 0,30 | 0,32 | 0,33 | 0,31 |
| 0,9 | 0,22 | 0,24 | 0,24 | 0,23 | 0,30 | 0,31 | 0,32 | 0,31 |
| 1,0 | 0,22 | 0,23 | 0,24 | 0,22 | 0,30 | 0,31 | 0,32 | 0,31 |

Співставлення отриманих результатів з параметрами існуючих систем електропостачання промислових підприємств показує, що в більшості випадків рівень несиметрії напруги на затискачах симетричного навантаження, яке живиться від розщепленої обмотки трансформатора, буде знаходитися в нормованих межах, при роздільному підключенні симетричного та несиметричного навантаження на обмотку нижчої напруги.

Для визначення практичної цінності методу симетрування за допомогою трансформатора з розщепленою обмоткою необхідно оцінити його економічну доцільність. Для цього розглянемо два варіанти живлення навантаження:

- живлення симетричного та несиметричного навантажень здійснюється від одних шин, які з'єднані з обмоткою низької напруги звичайного двообвиткового трансформатора

- живлення тих же навантажень здійснюється роздільно від розщепленої обмотки трансформатора.

Розрахунок потужностей трансформатора виконаний у відповідності з формулами (3.23), (3.31). Результати розрахунків приведені у вигляді графіків на рис.3.10, які побудовані в залежності від коефіцієнта α . При цьому прийнято припущення про безперервну зміну потужності трансформатора. Приведені на рис.3.10 криві потужностей трансформаторів $S_1^{(T)}$ та $S_2^{(T)}$ відносяться відповідно до першого і другого варіантів живлення навантаження. З рис.3.10 видно, що потужність трансформатора в другому варіанті у всьому діапазоні зміни α перевищує потужність трансформатора в другому варіанті і тільки в одній точці

$\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}}$ значення цих величин однакові. Очевидно, що в певній області в районі

даної точки знаходиться зона економічної доцільності використання способу симетрування навантаження за допомогою трансформатора з розщепленою обмоткою. Вказана область, яка визначена на основі порівняння значень економічних збитків від зниження ЯЕ зі затратами, які пов'язані з подорожчанням трансформаторів в реальних системах електропостачання, знаходиться в діапазоні зміни α від 0,4 до 0,8. У всіх інших випадках економічну доцільність використання трансформатора з розщепленою обмоткою для симетрування напруги потрібно оцінювати розрахунковим шляхом.

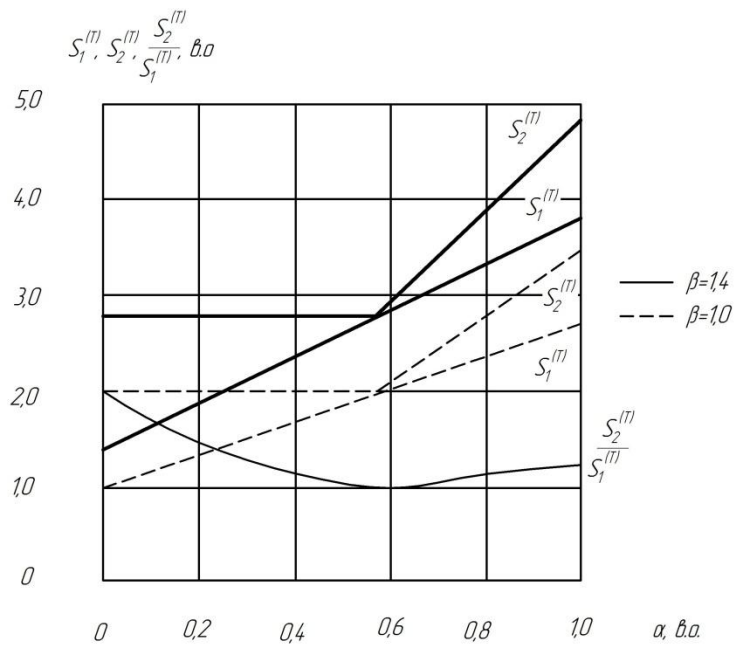


Рисунок 3.10 – Результати розрахунків потужності трансформатора

Необхідно відмітити, що спосіб симетрування напруги шляхом відділення несиметричного навантаження від інших споживачів на стороні низької напруги при збереженні загального живлення на стороні високої напруги може бути також реалізований з допомогою застосування здвоєного реактора, який підключається до обмотки низької напруги двообвиткового трансформатора. При цьому принцип симетрування і основні теоретичні викладки залишаються таким ж як і у випадку використання з розщепленою обмоткою. Однак при зміні здвоєного реактора є ряд серйозних недоліків. Головним з них є значний опір трансформаторів в загальній вітці схеми заміщення зворотної послідовності що суттєво знижує ефективність симетрування напруги. Крім цього, вказане схемне рішення потребує великих капітальних затрат, які обумовлені встановленням здвоєних реакторів, і характеризується підвищеними втратами напруги. Зі сказаного випливає, що застосування схеми зі здвоєним реактором для симетрування напруги недоцільно.

Схема електропостачання другого виду, яка забезпечує роздільне живлення симетричного та несиметричного навантажень як на стороні низької, так і на стороні високої напруги, може бути реалізована за допомогою типової двотрансформаторної підстанції з двообвитковими трансформаторами, один з

яких призначений для живлення тільки симетричного навантаження, а другий – для живлення несиметричного навантаження. При цьому схема заміщення зворотної послідовності даної системи електропостачання складається з двох паралельних гілок. В які входять опори живлячих ліній електропередачі і трансформаторів, і загальної гілки з ЕРС і опором енергосистеми. Для вказаної схеми заміщення справедливий наступний вираз:

$$\dot{U}_2^{(C)} = \frac{\dot{U}_2^{(H)} + \dot{I}_2^{(H)} \cdot (Z_n'' + jX^{(T)})}{1 + (Z_n' + jX^{(T)}) \cdot Y_2^{(C)}} \quad (3.34)$$

де Z_n' , Z_n'' - повні опори живлячих ліній електропередачі відповідно першого та другого трансформаторів.

Складову зворотної послідовності напруги на затискачах несиметричного навантаження можна представити як:

$$\dot{U}_2^{(H)} = -\dot{I}_2^{(H)} \cdot (Z_{2E}' + Z_n'' + jX^{(T)}) \quad (3.35)$$

$$\text{де } Z_{2E}' = \frac{Z_2^{(E)} \cdot (Z_n' + jX^{(T)} + Z_2^{(C)})}{Z_2^{(E)} + Z_n' + jX^{(T)} + Z_2^{(C)}}$$

$Z_2^{(E)}$ – повний опір зворотної послідовності енергосистеми.

Підставивши вираз (3.35) в (3.34), отримаємо:

$$\dot{U}_2^{(C)} = -\frac{\dot{I}_2^{(H)} \cdot Z_{2E}'}{1 + (Z_n' + jX^{(T)}) \cdot Y_2^{(C)}} \quad (3.36)$$

Як було відмічено вище, для реалізації розглянутого рішення прийнята двотрансформаторна підстанція. При цьому вибір потужності трансформаторів необхідно здійснювати для найбільшого навантаження на основі наступного виразу:

$$S^{(T)} = \begin{cases} \beta \cdot S^{(C)} & \text{при } \alpha \leq \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \sqrt{3} \cdot \beta \cdot S^{(C)} & \text{при } \alpha > \frac{1}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad (3.37)$$

З врахуванням (3.32), (3.36) і (3.37) вираз комплексного коефіцієнту несиметрії напруги на затискачах симетричного навантаження буде мати наступний вигляд:

$$\dot{\epsilon}_U^{(C)} = -\frac{\sqrt{3} \cdot \alpha \cdot Z'_{2E*} \cdot e^{j(\psi_n + \phi^{(H)})}}{1 + (1 + \dot{\gamma}) \cdot \dot{\zeta}} \quad (3.38)$$

де Z'_{2E*} - опір Z'_{2E} , приведений до базисних умов;

$\dot{\gamma}$ - комплексний коефіцієнт, який рівний відношенню опору лінії Z' до опору трансформатора $jX^{(T)}$. Співставлення виразів (3.33) і (3.38) показує, що їх чисельники відрізняються співмножниками Z_{2E*} і Z'_{2E*} , а знаменники – коефіцієнтом, який стоїть перед $\dot{\zeta}$;

Очевидно, що модуль знаменника в формулі (3.38) більший модуля знаменника виразу (3.33). В той же час відмінність опорів Z_{2E*} і Z'_{2E*} головним чином залежить від співвідношення між опорами лінії Z_l і енергосистеми $Z_2^{(E)}$. Враховуючи, що останнє, як правило, в реальних системах електропостачання, які живляться від потужних енергосистем, менше опору лінії, модуль чисельника формули (3.38) можна рахувати меншим модуля чисельника виразу (3.33). Таким чином, значення модуля комплексного коефіцієнта несиметрії напруги на затискачах симетричного навантаження при роздільному живленні навантажень як на стороні високої напруги, так і на стороні низької напруги, як правило, буде меншим ніж при використанні трансформаторів з розщепленою обмоткою. На рис.3.11 приведені розрахункові графіки значення несиметрії напруги на затискачах симетричного навантаження, які побудовані на основі (3.38) для співвідношення між опорами $Z'_{2E*} = j0,05 \cdot X^{(T)}$, $\dot{\gamma} = 0,1$. З рис.3.11 випливає, що при зміні значення коефіцієнта α в діапазоні від 0 до 1,0 рівень несиметрії напруг на затискачах вузла з типовим складом симетричного навантаження в системах електропостачання різноманітних галузей промисловості не перевищує 0,33 %. Аналіз формули (3.38) яка застосовувалась до параметрів різноманітних систем електропостачання промислових

підприємств показав, що при заданих симетричному і несиметричному навантаженнях величина модуля коефіцієнта несиметрії напруги в основному залежить від величини $|Z_2^{(E)}|$. У зв'язку з цим розрахункові допустимі значення

відношення $\frac{|Z_2^{(E)}|}{X^{(T)}}$, в межах яких на затискачах приймачів симетричного

навантаження несиметрія напруги не перевищує нормоване значення (2%),

практично співпадають з відповідними значеннями $\frac{|Z_{\alpha}|}{X^{(T)}}$, які приведені в

табл.3.3.

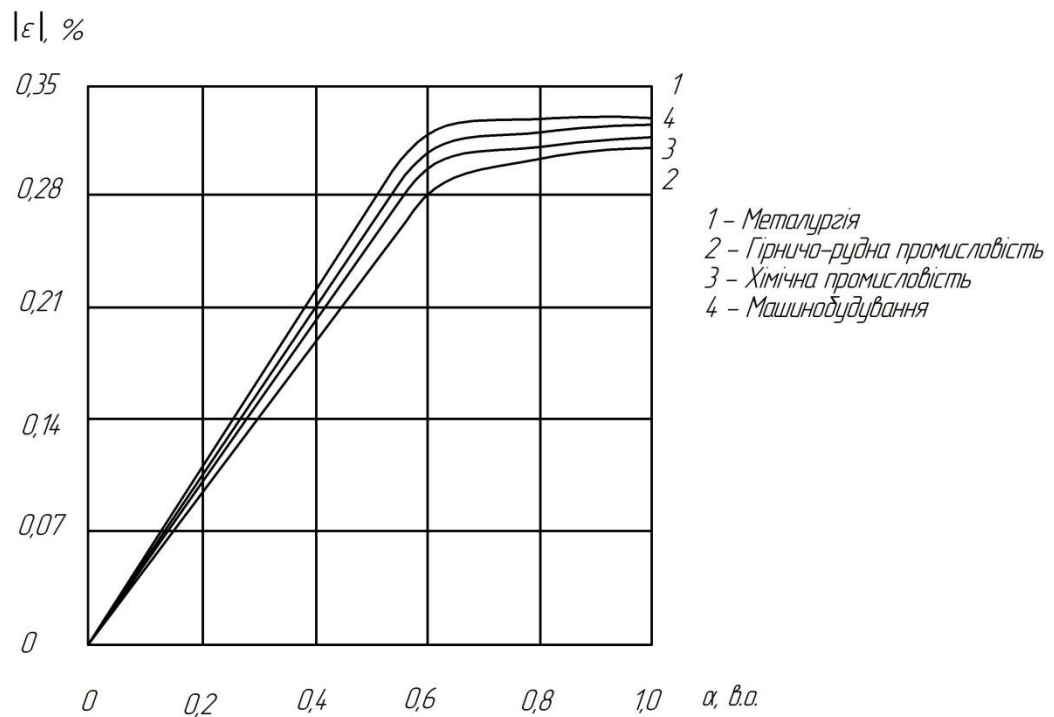


Рисунок 3.11 – Розрахункові графіки значення несиметрії напруги на зажимах симетричного навантаження

Для оцінки економічної доцільності симетрування напруги за допомогою схемного рішення на основі індивідуальних трансформаторів розглянемо два варіанти живлення навантажень. В першому варіанті живлення симетричного та несиметричного навантажень виконується від одного двообвиткового трансформатора, а в другому варіанті живлення тих же навантажень виконується роздільно від двох трансформаторів. Як показав аналіз, тут мають

місце такі ж залежності потужності трансформаторів від коефіцієнта α як для порівнюваних варіантів схемного рішення на основі трансформаторів з розщепленою обмоткою.

3.4 Висновки до розділу 3

В даному розділі проведений аналіз режимів промислових систем електропостачання, які містять несиметричні навантаження. Отримані формули для визначення комплексних значень коефіцієнтів несиметрії струмів та напруг, які дозволяють спростити інженерні розрахунки враховуючий вплив параметрів мережі та складу навантаження.

Виконано дослідження техніко-економічної ефективності методів симетрування напруги, які базуються на зміні схеми і збільшенні потужності короткого замикання системи електропостачання, яка містить несиметричні елементи.

Показано, що економічна доцільність є способом зниження опору живлячої системи на основі збільшення потужності трансформаторів зв'язку з енергосистемою і застосування ППК. При цьому переведення трансформатора на сусідню більш високу ступінь стандартної шкали номінальних потужностей при значенні потужності нелінійних навантажень, які не перевищують потужність симетричних навантажень, як правило, призводить до зниження несиметрії напруги на затискачах навантаження до допустимих значень.

Аналіз схемних рішень в системах електропостачання показав, що ефективними заходами симетрування напруги є роздільне живлення симетричного та несиметричного навантажень за допомогою трансформатора з розщепленою обмоткою або індивідуальних трансформаторів. При цьому зона економічної доцільності застосування вказаних рішень в промислових системах електропостачання знаходиться в діапазоні значень відношення потужності несиметричного навантаження до потужності симетричного навантаження від 0,4 до 0,8.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Заходи безпеки при обслуговуванні електродвигунів

Під час роботи, пов'язаної з доторканням до струмовідних частин електродвигуна або до частин електродвигуна, що обертаються, і механізму, який вони приводять у рух, необхідно зупинити електродвигун і на його пусковому пристрої або ключі керування вивісити плакат «Не вмикати! Працюють люди»

Під час роботи на електродвигуні напругою понад 1000 В або механізмі, що приводиться ним у рух, пов'язаної з доторканням до струмовідних, або тих, що обертаються, частин, з електродвигуна має бути знята напруга, згідно з вимогами Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

Під час роботи на електродвигуні заземлення встановлюється на кабелі (з від'єднанням або без від'єднання його від електродвигуна) або на його приєднанні в РП.

Під час роботи на електродвигуні напругою до 1000 В або механізму, який приводиться ним у рух, зняття напруги і заземлення струмовідних жил кабелю слід виконувати згідно з пунктами 4.2.6, 4.2.7, 4.6.7 Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

Перед допуском до роботи на електродвигунах насосів, димососів і вентиляторів, якщо можливе обертання електродвигунів від з'єднаних з ними механізмів, слід зачинити і замкнути на замок засувки і шибери цих механізмів, а також вжити заходів щодо гальмування роторів електродвигунів.

Забороняється знімати огороження тих частин електродвигунів, що обертаються, під час їх роботи.

Операції з вимикання і вмикання електродвигунів напругою понад 1000 В пусковою апаратурою з приводами ручного керування слід проводити пристроями з ізолювальної основи із застосуванням діелектричних рукавиць.

Обслуговувати щітковий апарат електродвигуна, що працює, допускається одноособово оперативному працівнику або виділеному для цього навченому працівнику з групою III. В цьому разі необхідно дотримуватися таких заходів безпеки:

- працювати в головному уборі і застебнутому спецодязі, остерігаючись захвату його частинами машини, що обертаються;
- користуватися діелектричним взуттям або гумовими килимками;
- не торкатися руками одночасно до струмовідних частин двох полюсів або струмовідних і заземлених частин.

Кільця ротора допускається шліфувати на електродвигуні, що обертається, лише за допомогою колодок з ізоляційного матеріалу, із застосуванням захисних окулярів.

У багатошвидкісного електродвигуна, що працює, обмотка, яка не використовується, і кабель, що її живить, слід розглядати як такі, що перебувають під напругою.

Під час роботи на електродвигуні заземлення може бути встановлене на будь-якій ділянці кабельної лінії, що з'єднує електродвигун з РП (збіркою). Під час роботи на механізмі, не пов'язаним з доторканням до частин, що обертаються, і у випадку роз'єднання з'єднувальної муфти, заземлювати кабельну лінію не слід.

Якщо на відключеному електродвигуні роботи не провадять або їх перервано на кілька днів, то від'єднана від нього кабельна лінія має бути заземлена з боку електродвигуна. В тих випадках, коли перетин жил кабелю не дозволяє застосовувати переносні заземлення, допускається у електродвигунів напругою до 1000 В заземлювати кабельну лінію мідним провідником, перетином не меншим від перетину з жили кабелю, чи з'єднувати між собою жили кабелю та ізолювати їх. Таке заземлення і з'єднання жил кабелю слід враховувати в оперативному журналі нарівні з переносним заземленням.

На однотипних або близьких за габаритом електродвигунах, встановлених поряд з тим, на якому провадять роботи, слід вивісити плакати «Стій! Напруга» незалежно від того, перебувають вони в роботі чи у резерві.

Випробування електродвигуна спільно з виконавчим механізмом слід провадити з дозволу начальника зміни технологічного цеху, в якому вони встановлені.

Під час видавання дозволу робиться запис в оперативному журналі технологічного цеху, а про отримання цього дозволу – в оперативному журналі цеху (дільниці), що проводиться випробування.

Ремонт і налагоджування електросхем електроприводів, не з'єднаних з виконавчим механізмом, регулювальних органів і запірної арматури, можна проводити за розпорядженням. Дозвіл на їх випробування дає працівник, який дав розпорядження на виведення електроприводу в ремонт, налагодження. Про це слід зробити запис під час оформлення розпорядження.

Вмикання електродвигуна для випробування до повного закінчення роботи здійснюється після виведення бригади з робочого місця. Після випробування проводиться повторний допуск з оформленням у наряді.

Під час виконання роботи за розпорядженням на повторний допуск розпорядження дається знову.

4.2 Надання першої допомоги потерпілому при ураженні електричного струму

Послідовність надання першої допомоги:

- усунути вплив на організм ушкоджуючих факторів, котрі загрожують здоров'ю та життю потерпілих, оцінити стан потерпілого;
- визначити характер та важкість травми, найбільшу загрозу для життя потерпілого і послідовність заходів щодо його рятування;
- виконати необхідні заходи з рятування потерпілих в послідовності терміновості (відновити прохідність дихальних шляхів, здійснити штучне

- дихання, провести зовнішній масаж серця);
- підтримати основні життєві функції потерпілого до прибуття медичного працівника;
 - викликати швидку медичну допомогу або вжити заходів щодо транспортування потерпілого до найближчого лікувального закладу.

Рятування потерпілих від впливу електричного струму залежить від швидкості звільнення його від струму, а також від швидкості та правильності надання йому допомоги. Зволікання може зумовити загибель потерпілого. При ураженні електричним струмом смерть часто буває клінічною, тому ніколи не слід відмовлятися від надання допомоги потерпілому і вважати його мертвим через відсутність дихання, серцебиття, пульсу.

Дотик до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою, викликає мимовільне судомне скорочення м'язів та загальне збудження, котре може призвести до порушення і навіть повного припинення діяльності органів дихання та кровообігу. Якщо потерпілий тримає провід руками, його пальці так сильно стискаються, що звільнити провід стає неможливим. В зв'язку з цим першою дією того, хто надає першу допомогу, повинне бути швидке вимкнення тієї частини електроустановки, до котрої доторкається потерпілий. Вимкнення здійснюється за допомогою вимикачів, рубильника або іншого вимикаючого апарата.

Якщо вимкнути установку швидко не можна, слід вжити заходів щодо звільнення потерпілого від струмоведучих частин, до котрих він торкається. У всіх випадках той, хто надає допомогу, не повинен доторкатися до потерпілого без належних запобіжних заходів, оскільки це небезпечно для життя. Він також повинен слідкувати, щоб самому не опинитися в контакті з струмоведучою частиною або під кроковою напругою.

Для звільнення потерпілого від струмоведучих частин або провода напругою до 1000 В слід скористатись канатом, палицею, дошкою або будь-яким сухим предметом, що не проводить електричного струму.

Потерпілого можна також відтягнути за його одяг (якщо він сухий та

відстає від тіла), уникаючи дотику до оточуючих металевих предметів та частин тіла. З метою ізоляції рук той, хто надає допомогу, повинен одягнути діелектричні рукавиці або обмотати руку шарфом, натягнути , на руку рукав піджака або пальто, накинути на потерпілого гумовий килимок, прогумований матеріал (плащ) або просто сухий матеріал. Можна також ізолювати себе, ставши на гумовий килимок, суху дошку або непровідну підстилку, жмут одягу. При відділенні потерпілого від струмопровідних частин рекомендується діяти однією рукою.

Якщо електричний струм проходить в землю через потерпілого і він судорожно стискає один провід, то простіше перервати струм, відокремивши потерпілого від землі (підсунувши під нього суху дошку, або відтягнувши за ноги від землі вірвовкою, або відтягнувши за одяг), дотримуючись при цьому запобіжних заходів. Можна також перерубати дроти сокирою з сухою ручкою або перекусити їх інструментом з ізолюваними ручками. Перерубувати або перекушувати проводи слід пофазово, тобто кожний провід окремо, при цьому рекомендується стояти на сухих дошках, на дерев'яній драбині.

Для звільнення потерпілого від струмоведучих частин під напругою понад 1000 В слід одягнути діелектричні рукавиці та боти і діяти штангою або ізолюваними кліщами, розрахованими на відповідну напругу.

На лініях електропередачі, коли їх не можна швидко вимкнути, слід з цією метою здійснити замикання проводів накоротко, накинувши на них гнучкий провід. Провід повинен бути відповідного поперечного перетину, щоб він не перегорів при проходженні через нього струму короткого замикання. Перед накиданням провода один кінець слід заземлити (приєднати його до металевій опорі, до заземлювального спуску). З метою забезпечення зручності накидання на вільний кінець провідника бажано прикріпити вантаж.

Заходи долікарської допомоги залежать від стану, в якому знаходиться потерпілий після звільнення від електричного струму. У всіх випадках ураження електричним струмом необхідно обов'язково викликати лікаря незалежно від стану потерпілого.

Якщо потерпілий при свідомості та рівномірно дихає і є пульсом, але до цього втрачав свідомість, його слід покласти на підстилку з одягу, розстебнути одяг, котрий затруднює дихання, забезпечити приплив свіжого повітря, розтерти і зігріти тіло та забезпечити повний спокій, дати понюхати нашатирний спирт, сполоснути обличчя холодною водою. Якщо потерпілий, котрий знаходиться без свідомості, прийде до тями, слід дати йому випити 15-20 крапель настоянки валеріани і гарячого чаю.

Для визначення стану потерпілого потрібно покласти його на спину й перевірити наявність дихання і серцевих скорочень.

Наявність дихання в потерпілого визначають за підйомом і опусканням грудної клітки під час самостійного вдиху й видиху. При порушенні дихання потерпілого необхідно зробити штучне дихання.

При наявності серцевих скорочень пульс найкраще перевіряти по сонній артерії. Відсутність пульсу на ній свідчить, як правило, про припинення руху крові в організмі.

Про відсутність кровообігу в організмі можна судити за станом очних зіниць, які в цьому випадку розширені. При відсутності пульсу необхідний зовнішній масаж серця.

Перевірка стану потерпілого, включаючи надання його тілу відповідного положення, перевірку дихання, пульсу і стану зіниць, повинна виконуватися швидко – протягом 15...20 с.

У період клінічної смерті протягом 4...5 хв. зміни на останньому рівні життєзабезпечення людини ще оборотні й її можна врятувати. Отже, допомога потерпілому повинна бути зроблена кваліфіковано, протягом перших 4...5 хв. Основні методи долікарської допомоги включають: штучне дихання «рот у рот», «рот у ніс», а також непрямий масаж серця.

Для проведення штучного дихання потерпілого потрібно покласти на спину на тверду основу, розстебнути одяг і забезпечити прохідність верхніх дихальних шляхів, які можуть бути закриті запалим язиком, сторонньою речовиною або предметом у порожнині рота. Голову потерпілого треба

повернути набік, очистити рот пальцем, обгорненим марлею або хусткою. Після цього той, хто надає допомогу, одну руку підсуває потерпілому під шию, а долонею іншої надавлює на чоло, максимально закидаючи голову назад. При цьому корінь язика відходить від задньої стінки гортані, відкриваючи вільний доступ повітря в легені, а рот відкривається.

Штучне дихання виконують в такий спосіб. Глибоко вдихнувши, той, хто надає допомогу, робить енергійний видих у рот потерпілого. Як тільки грудна клітка потерпілого піднялася, наповнення повітря припиняють. Після цього у потерпілого відбувається пасивний видих. Якщо пульс у потерпілого визначається добре, то інтервал між вдуванням повітря повинен складати 5 с (12 дихальних циклів на хвилину).

При зупинці серця, не втрачаючи ні секунди, потерпілого треба укласти на тверду основу і звільнити від одягу, оголити груди. Далі прощупуванням потрібно визначити місце натиснення: воно повинне знаходитися на два пальці вище м'якого кінця грудини. Після цього той, хто надає допомогу, повинен покласти на це місце долоню однієї руки, а поверх неї під кутом 90° – долоню другої руки. Надавлювати треба швидким поштовхом, злегка допомагаючи нахилом усього корпусу. Нижня частина грудини у потерпілого при натисненні повинна зміститися вниз на 3...5 см. Тривалість натиснення – не більше 0,5 с, з інтервалом 0,5 с. З появою самостійного пульсу, що свідчить про відновлення серцевої діяльності, потрібно негайно припинити масаж серця, але продовжувати проведення штучного дихання.

Штучне дихання і непрямий масаж серця необхідно проводити до відновлення стійкого самостійного дихання й діяльності серця в потерпілого або до передачі його медичному персоналу.

4.3 Шляхи та заходи підвищення стійкості роботи інженерно-технічного комплексу

Одним із основних завдань цивільного захисту є забезпечення стійкості роботи об'єктів народного господарства в умовах надзвичайних ситуацій мирного і воєнного часу.

Під стійкістю функціонування підприємства розуміють його здатність в надзвичайних ситуаціях випускати продукцію в запланованому об'ємі і номенклатурі, а у випадку аварії відновлювати виробництво в номінально короткий термін. На відновлення виробництва впливають наступні фактори: надійність захисту робітників і службовців від наслідків стихійних лих, аварій, катастроф, здатність інженерно-технічного комплексу об'єкту протистояти у визначеній степені цим впливам і надійність систем постачання об'єкту всім необхідним для виробництва продукції (сировиною, паливом, електроенергією, газом водою та іншим), стійкість і неперервність управління виробництвом; підготовленість об'єкту до виконання робіт по відновленню виробництва.

Особливого значення в даний час набувають вимоги до стійкості функціонування промислових підприємств в умовах надзвичайних ситуацій мирного часу, для того, щоб в майбутньому виключити аварії, подібні до Чорнобильської. Ці вимоги закладені в нормах проектування інженерно-технічних заходів цивільного захисту, а також в розроблених на їх основі відомчих нормативних документів, які застосовуються у відповідній галузі.

Шляхи і способи підвищення стійкості функціонування об'єкту народного господарства в умовах надзвичайних ситуацій в мирний і військовий час досить різноманітні і визначаються конкретними специфічними особливостями кожного окремого об'єкту чи підприємства. Для вибору найбільш ефективного шляху і способу підвищення стійкості функціонування, необхідно оцінити дане підприємство, як об'єкт цивільного захисту.

Оцінка стійкості об'єкту до впливу радіації, ядерного вибуху полягає у визначенні максимального значення дози випромінювання, що очікується на

об'єкті, визначенні степені ураження людей і пошкодження матеріалів і пристроїв, чутливих до радіації. При радіаційному забрудненні слід провести дезактивацію території, будівель, техніки, з якою працює людина. Необхідно забезпечити людей засобами індивідуального захисту, встановити особливий режим роботи підприємства. Вихід людей на відкриту місцевість обмежується.

Надійний захист робітників і службовців є важливим фактором підвищення стійкості будь-якого об'єкту народного господарства. З цією метою будуються захисні споруди – спеціальні будівлі для захисту населення від аварій на АЕС, хімічного та вибухонебезпечних об'єктах, від ядерної, хімічної зброї та від звичайних військових засобів ураження.

Захисні споруди в залежності від захисних властивостей поділяються на: сховища, протирадіаційні укриття, найпростіші укриття – щілини.

Сховище – це інженерна споруда герметичного типу, котра забезпечує надійний захист від вражаючих чинників ядерного вибуху. Отруйні речовини, СДОР, бактеріальних засобів, високих температур та обвалів будівель.

Робітники і службовці на підприємстві вчать застосовувати засоби захисту, правильно діяти в надзвичайних ситуаціях.

На підприємстві повинні бути плани першочергових відновлювальних робіт, план-графік послідовності їх здійснення.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В даній роботі проведено аналіз впливу несиметрії напруги на втрати електроенергії в електричних мережах з ізольованою нейтраллю і створення рекомендацій по раціональній побудові систем електроспоживання з несиметричним навантаженням.

Отримані наступні результати:

1. Проведений аналіз методів корекції режимів систем електропостачання з несиметричними елементами. Показано, що одним з ефективних шляхів нормалізації ЯЕ є використання методів симетрування напруги, що реалізовується за допомогою статичних КП подовжньо-поперечної структури і раціональної побудови систем електропостачання

2. На основі еквівалентної заміни несиметричних елементів джерелами напруги проведено математичне моделювання узагальненої трифазної несиметричної системи. Показано, що режим електричній мережі істотно залежить від структури і параметрів джерел несиметрії. При цьому врахування впливу останніх на режим необхідно робити шляхом спільного розв'язання рівнянь складених для схем заміщення прямої, зворотної і нульової послідовностей і рівнянь, які відображають схемно-параметричні особливості несиметричних елементів.

3. Досліджено математичну модель узагальненої трифазної несиметричної системи. Отримані при цьому матричне рівняння в Z та Y-формі, які дозволяють розраховувати режими при будь-яких параметрах і структурі джерел несиметрії.

4. Досліджена методика оцінки економічних збитків від зниження ЯЕ в електричних мережах з несиметричними і нелінійними навантаженнями, що дозволяє, на відміну від відомих, робити розрахунки в умовах великої кількості різнотипного устаткування, і яка враховує спільний вплив несиметрії і несинусоїдальності напруги.

5. Проведений аналіз несиметричних режимів промислових систем електропостачання. Отримані спрощені формули для інженерної оцінки несиметрії напруги з врахуванням параметрів мережі і складу навантаження. Розроблені рекомендації по раціональній побудові систем електропостачання з несиметричними навантаженнями, засновані на зміні схеми мережі і збільшенні потужності короткого замикання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ EN 50160:2014 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT)
2. Якість електроенергії та її вплив на електроспоживання і надійність роботи електроустаткування // PATRIOT-NRG. Міжнародний портал з енергозбереження [Веб-сайт]. - Київ. - URL: <https://patriot-nrg.com/content/yakist-elektroenergiyi-ta-yiyi-vplyv-na-elektrospozhyvannya-i-nadiynist-roboty> (дата звернення: 23.10.2023).
3. Юрковський, І. "Дослідження впливу несиметричних режимів мережі на показники якості електроенергії на базі асинхронних двигунів." Матеріали VI всеукраїнської студентської науково-технічної конференції „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання.“ 1 (2013): 212-212.
4. Євтух П. Облік електроенергії при несинусоїдальних і несиметричних режимах у мережах електропостачання міст / П. Євтух, С. Бабюк, Т. Кислиця // Вісник ТНТУ. – 2013. – Том 70. – № 2. –С.183-189.
5. Куско А. Мережі електропостачання. Методи і засоби забезпечення якості енергії / А. Куско, М. Томпсон: транс. з англійською мовою А. Н. Рабодзея. – К.: Додека-XXI, 2010. – 336 с.
6. Вербицький Є. В. Компенсатор реактивної потужності у перехідних режимах. Вісник НТУ «ХП», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХП». 2018. № 26 (1302). Т. 2. С. 121-125.
7. Буняк, О., Бабюк, С., & Сисак, І. (2019). Інтелектуальний пристрій автоматичного регулювання параметрів електомережі. Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій “присвячена 80-ти річчю з дня народження професора ЯІ Проця, 268-270.
8. Аналіз якості електроенергії // SATEC Ltd [Веб-сайт]. - Київ. - URL: <https://www.satec-global.com.ua/analiz-yakosti-elektroenergi/> (дата звернення: 25.03.2024).

9. Тютюнник, Н.Л. Аналіз пристроїв регулювання напруги / Н.Л. Тютюнник, Г.О. Шеїна // Наукові праці ДонНТУ : Всеукр. наук. зб. – Покровськ, 2020. – Серія : Електротехніка і енергетика. - № 2(23). – С. 44-47.
10. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Видавництво "Форт", 2017. - 760 с.
11. Клочков, І. О. (2023). Підвищення енергоефективності електротехнологічних комплексів шляхом компенсації реактивної потужності (Bachelor's thesis, КПІ ім. Ігоря Сікорського).
12. Бабюк С. М. Вплив відхилення напруги в мережі 0,4 кВ: причини, наслідки та шляхи вирішення проблеми / С. М. Бабюк, С. О. Задорожний, М. П. Красножон // Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 6-7 грудня 2023 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2023. — С. 210–211.
13. Bohdan Orobchuk, Ivan Sysak, Oleh Buniak, Serhii Babiuk, Vadym Koval (2023) Development of the reactive power compensation laboratory bench and its integration into the training simulator of dispatch control system. The 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2023 (ITTAP 2023).
14. Бабюк, С. М., & В Пліс, Я. (2020). Шляхи підвищення енергоефективності систем електропостачання. Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 2, 82-83.
15. Vakulenko, O., Sysak, I., Babiuk, S., & Bunko, V. (2021, December). Features of the enameled wires insulation diagnosing by voltage. In Proceedings of the International Conference „Advanced applied energy and information technologies 2021”, 2021 (pp. 27-32). TNTU, Zhytomyr «Publishing house „Book-Druk “» LLC.
16. Orobchuk B., Sysak I., Babiuk S., Rajba T., Karpinski M., Klos-Witkowska A., Szkarczyk R., Gancarczy J. Development of simulator automated dispatch control system for implementation in learning process. 2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing

Systems: Technology and Applications (IDAACS). IEEE, Buharest, vol. 1, September 2017, pp. 210–214.

17. Design of an intelligent system to control educational laboratory equipment based on a hybrid mini-power plant. Orobchuk, B., Buniak, O., Babiuk, S., Sysak, I. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2023, 2(9-122), pp. 59–72. ISSN 1729-3774

18. Babiuk, Serhiy, et al. "Algorithms for automatic of metrological characteristics of transducers." Вісник Тернопільського національного технічного університету 107.3 (2022): 67-75.

19. Технічна політика: Побудова та експлуатація електричних мереж. Технічна політика // Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Київ: ДП «НЕК «Укренерго», 2014. 250 с.

20. М.С. Сегеда «Електричні мережі та системи». Підручник - Львів. Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2007.

21. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання «БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ» / В.С. Стручок –Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., –156 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А.1 – Результати випробувань електричної енергії з відхилення напруги за добу, (у %).

| Добовий режим навантаження | | | | | | | | | |
|-----------------------------|----------------------|---------------------|----------------|----------------|-----------------------------|----------------------|---------------------|----------------|----------------|
| Вимірювальна характеристика | Результат вимірювань | Нормативне значення | T ₁ | T ₂ | Вимірювальна характеристика | Результат вимірювань | Нормативне значення | T ₁ | T ₂ |
| Прямі послідовності | | | | | Фаза «А» | | | | |
| δU_H | 0.00 | -5.0% | - | | δU_H | -6.52 | -5.0% | 39.70 | |
| δU_B | 0.00 | +5.0% | | | δU_B | 5.22 | +5.0% | | |
| δU_{HM} | 0.00 | -10.0% | | - | δU_{HM} | -9.50 | -10.0% | | 0.00 |
| δU_{Hb} | 0.00 | +10.0% | | | δU_{Hb} | 7.38 | +10.0% | | |
| Фаза «В» | | | | | Фаза «С» | | | | |
| δU_H | -4.56 | -5.0% | 29.34 | | δU_H | -13.42 | -5.0% | 20.55 | |
| δU_B | 3.94 | +5.0% | | | δU_B | -1.00 | +5.0% | | |
| δU_{HM} | -6.75 | -10.0% | | 0.00 | δU_{HM} | -21.38 | -10.0% | | 0.11 |
| δU_{Hb} | 6.15 | +10.0% | | | δU_{Hb} | 6.27 | +10.0% | | |
| Похибка вимірювань | | | | | | | | | |
| Позначення | | | Результат | | | Нормативне значення | | | |
| $\Delta_{\delta U}$ | | | ± 0.20 | | | 0.50 | | | |

Умови відповідності вимогам ДСТУ:

$$\delta U_H \geq \delta U_H^{(норм)}, \delta U_B \leq \delta U_B^{(норм)}, \delta U_{HM} \geq \delta U_{HM}^{(норм)}, \delta U_{Hb} \leq \delta U_{Hb}^{(норм)}, T_1 \leq 5\%, T_2 = 0$$

Таблиця А.2 – Результати випробувань електричної енергії за коефіцієнтом викривлення синусоїдальності кривої напруги (у %).

| Вимірювальна характеристика | Фаза «А» | | | Фаза «В» | | | Фаза «С» | | | Нормативне значення |
|-----------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------|---------------------|----------------------|----------------|----------------|---------------------|
| | Результат вимірювань | T ₁ | T ₂ | Результат вимірювань | T ₁ | T ₂ | Результат вимірювань | T ₁ | T ₂ | |
| K _{UB} | 6.88 | 0.00 | | 42.81 | 0.01 | | 95.11 | 0.02 | | 8.00 |
| K _{U_{Hb}} | 7.11 | | 0.00 | 44.97 | | 0.01 | 100.00 | | 0.02 | 12.00 |
| Похибка вимірювань | | | | | | | | | | |
| Позначення | | | Результат | | | Нормативне значення | | | | |
| Δ_{Ku} | | | ± 5.0 | | | ± 10.0 | | | | |

Умови відповідності вимогам ДСТУ:

$$K_{UB} \leq K_{UB}^{(норм)}, K_{UHb} \leq K_{UHb}^{(норм)}, T_1 \leq 5\%, T_2 = 0$$

Таблиця А.3 – Результати випробувань електричної енергії за коефіцієнтом несиметрії напруг по зворотній послідовності (у %).

| Вимірювальна характеристика | Результат вимірювань | Нормативне значення | T ₁ | T ₂ |
|------------------------------|----------------------|---------------------|----------------|----------------|
| K _{2U_B} | 59.49 | 2.0 | 0.02 | |
| K _{2U_{нб}} | 62.62 | 4.0 | | 0.02 |
| Похибка вимірювань | | | | |
| Позначення | Результат | Нормативне значення | | |
| Δ _{K_{2u}} | ±0.20 | 0.30 | | |

Умови відповідності вимогам ДСТУ:

$$K_{2U_B} \leq K_{2U_B}^{(норм)}, K_{2U_{нб}} \leq K_{2U_{нб}}^{(норм)}, T_1 \leq 5\%, T_2 = 0$$

Таблиця А.4 – Результати випробувань електричної енергії за коефіцієнтом несиметрії напруги за нульовою послідовністю (у %).

| Вимірювальна характеристика | Результат вимірювань | Нормативне значення | T ₁ | T ₂ |
|------------------------------|----------------------|---------------------|----------------|----------------|
| K _{0U_B} | 4.74 | 2.0 | 42.66 | |
| K _{0U_{нб}} | 64.88 | 4.0 | | 0.68 |
| Похибки вимірювань | | | | |
| Позначення | Результат | Нормативне значення | | |
| Δ _{K_{0u}} | ±0.20 | 0.50 | | |

Умови відповідності вимогам ДСТУ:

$$K_{0U_B} \leq K_{0U_B}^{(норм)}, K_{0U_{нб}} \leq K_{0U_{нб}}^{(норм)}, T_1 \leq 5\%, T_2 = 0$$

Таблиця А.5 – Результати випробувань електричної енергії щодо відхилення частоти (в Гц).

| Вимірювальна характеристика | Результат вимірювань | Нормативне значення | T ₁ | T ₂ |
|-----------------------------|----------------------|---------------------|----------------|----------------|
| Δf _н | -0.04 | -0.2 | 0.00 | |
| Δf _в | 0.03 | +0.2 | | |
| Δf _{нм} | -0.05 | -0.4 | | 0.00 |
| Δf _{нб} | 0.04 | +0.4 | | |
| Похибки вимірювань | | | | |
| Позначення | Результат | Нормативне значення | | |
| Δ _{Δf} | ±0.02 | 0.03 | | |

Умови відповідності вимогам ДСТУ:

$$\Delta f_n \geq \Delta f_n^{(норм)}, \Delta f_v \leq \Delta f_v^{(норм)}, \Delta f_{нм} \geq \Delta f_{нм}^{(норм)}, \Delta f_{нб} \leq \Delta f_{нб}^{(норм)}, T_1 \leq 5\%, T_2 = 0$$

Таблиця А.6 – Результати випробувань електричної енергії за коефіцієнтом n -ої гармонійної складової напруги (y %).

| n | Результат вимірювань | | | | | | | | | | | | Нормативн е значення | |
|----|----------------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|--------------|
| | Фаза «А» | | | | Фаза «В» | | | | Фаза «С» | | | | | |
| | $K_{U(n)B}$ | $K_{U(n)H}$ | T_1 | T_2 | $K_{U(n)B}$ | $K_{U(n)H}$ | T_1 | T_2 | $K_{U(n)B}$ | $K_{U(n)H}$ | T_1 | T_2 | $K_{U(n)H}$ | $K_{U(n)ПД}$ |
| 2 | 1.29 | 1.29 | 0.00 | 0.00 | 1.90 | 4.94 | 0.00 | 0.00 | 1.90 | 10.83 | 0.01 | 0.01 | 2.00 | 3.00 |
| 3 | 4.75 | 4.94 | 0.00 | 0.00 | 4.75 | 14.20 | 0.00 | 0.00 | 4.75 | 37.17 | 0.01 | 0.01 | 5.00 | 7.50 |
| 4 | 0.73 | 0.73 | 0.00 | 0.00 | 0.95 | 4.69 | 0.00 | 0.00 | 0.95 | 10.03 | 0.01 | 0.01 | 1.00 | 1.50 |
| 5 | 5.70 | 5.76 | 0.00 | 0.00 | 5.70 | 14.06 | 0.00 | 0.00 | 5.70 | 35.19 | 0.01 | 0.01 | 6.00 | 9.00 |
| 6 | 0.25 | 0.25 | 0.00 | 0.00 | 0.47 | 5.78 | 0.00 | 0.00 | 0.47 | 265.2 | 0.01 | 0.01 | 0.50 | 0.75 |
| 7 | 2.02 | 2.02 | 0.00 | 0.00 | 4.75 | 15.40 | 0.00 | 0.00 | 4.75 | 31.48 | 0.01 | 0.01 | 5.00 | 7.50 |
| 8 | 0.30 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.47 | 5.86 | 0.00 | 0.00 | 0.47 | 11.08 | 0.01 | 0.01 | 0.50 | 0.75 |
| 9 | 1.43 | 1.58 | 0.03 | 0.00 | 1.43 | 15.92 | 0.00 | 0.00 | 1.43 | 38.96 | 0.01 | 0.01 | 1.50 | 2.25 |
| 10 | 0.30 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.47 | 7.05 | 0.00 | 0.00 | 0.47 | 12.00 | 0.01 | 0.01 | 0.50 | 0.75 |
| 11 | 1.44 | 1.44 | 0.00 | 0.00 | 3.33 | 22.24 | 0.00 | 0.00 | 3.33 | 116.1 | 0.01 | 0.01 | 3.50 | 5.25 |
| 12 | 0.16 | 0.16 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 15.61 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 141.7 | 0.01 | 0.01 | 0.20 | 0.30 |
| 13 | 1.02 | 1.02 | 0.00 | 0.00 | 2.85 | 8.29 | 0.00 | 0.00 | 2.85 | 92.35 | 0.01 | 0.01 | 3.00 | 4.50 |
| 14 | 0.06 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 7.52 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 12.99 | 0.01 | 0.01 | 0.20 | 0.30 |
| 15 | 0.59 | 0.80 | 40.85 | 13.91 | -19.74 | 24.56 | 1.50 | 0.00 | 36.70 | 73.70 | 33.67 | 19.59 | 0.30 | 0.45 |
| 16 | 0.08 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 5.66 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 10.89 | 0.01 | 0.01 | 0.20 | 0.30 |
| 17 | 0.60 | 0.60 | 0.00 | 0.00 | 1.90 | 20.21 | 0.00 | 0.00 | 1.90 | 61.57 | 0.01 | 0.01 | 2.00 | 3.00 |
| 18 | 0.19 | 0.19 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 5.08 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 10.83 | 0.01 | 0.01 | 0.20 | 0.30 |
| 19 | 0.49 | 0.49 | 0.00 | 0.00 | 1.43 | 14.22 | 0.00 | 0.00 | 1.43 | 47.75 | 0.01 | 0.01 | 1.50 | 2.25 |
| 20 | -0.16 | 0.52 | 1.09 | 0.41 | 0.19 | 2.90 | 0.16 | 0.00 | 0.19 | 12.88 | 0.01 | 0.01 | 0.20 | 0.30 |
| 21 | 0.41 | 0.57 | 28.01 | 13.59 | 0.21 | 11.78 | 5.66 | 0.02 | 0.21 | 29.96 | 5.81 | 0.69 | 0.20 | 0.30 |
| 22 | 0.18 | 0.18 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 9.25 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 21.37 | 0.01 | 0.01 | 0.20 | 0.30 |
| 23 | 0.17 | 0.17 | 0.00 | 0.00 | 1.43 | 13.78 | 0.00 | 0.00 | 1.43 | 24.42 | 0.01 | 0.01 | 1.50 | 2.25 |
| 24 | 0.03 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 3.70 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 24.19 | 0.01 | 0.01 | 0.20 | 0.30 |
| 25 | 0.17 | 0.17 | 0.00 | 0.00 | 1.43 | 10.43 | 0.00 | 0.00 | 1.43 | 15.78 | 0.01 | 0.01 | 1.50 | 2.25 |
| 26 | 0.03 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 7.69 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 8.26 | 0.01 | 0.01 | 0.20 | 0.30 |
| 27 | 0.10 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 7.82 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 19.26 | 0.01 | 0.01 | 0.20 | 0.30 |
| 28 | 0.03 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 6.83 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 10.62 | 0.01 | 0.01 | 0.20 | 0.30 |
| 29 | 0.08 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 1.25 | 3.53 | 0.00 | 0.00 | 1.25 | 16.37 | 0.01 | 0.01 | 1.32 | 1.98 |

| n | Результат вимірювань | | | | | | | | | | | | Нормативн е значення | |
|----|----------------------|-------------|-------|-------|-------------|-------------|-------|-------------|-------------|--------------|-------|-------------|-------------------------|--------------|
| | Фаза «А» | | | | Фаза «В» | | | | Фаза «С» | | | | | |
| | $K_{U(n)B}$ | $K_{U(n)H}$ | T_1 | T_2 | $K_{U(n)B}$ | $K_{U(n)H}$ | T_1 | T_2 | $K_{U(n)B}$ | $K_{U(n)H}$ | T_1 | T_2 | $K_{U(n)H}$ | $K_{U(n)пд}$ |
| 30 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 6.95 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 13.24 | 0.01 | 0.01 | 0.20 | 0.30 |
| 31 | 0.07 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 1.19 | 5.66 | 0.00 | 0.00 | 1.19 | 13.68 | 0.01 | 0.01 | 1.23 | 1.85 |
| 32 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 4.42 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 10.75 | 0.01 | 0.01 | 0.20 | 0.30 |
| 33 | 0.05 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 6.75 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 11.14 | 0.01 | 0.01 | 0.20 | 0.30 |
| 34 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 3.91 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 10.10 | 0.01 | 0.01 | 0.20 | 0.30 |
| 35 | 0.04 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 1.07 | 4.72 | 0.00 | 0.00 | 1.07 | 9.40 | 0.01 | 0.01 | 1.09 | 1.64 |
| 36 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 5.47 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 10.38 | 0.01 | 0.01 | 0.20 | 0.30 |
| 37 | 0.04 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 1.02 | 5.75 | 0.00 | 0.00 | 1.02 | 11.84 | 0.01 | 0.01 | 1.03 | 1.55 |
| 38 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 2.16 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 8.90 | 0.01 | 0.01 | 0.20 | 0.30 |
| 39 | 0.03 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 7.99 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 11.08 | 0.01 | 0.01 | 0.20 | 0.30 |
| 40 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 5.08 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 9.47 | 0.01 | 0.01 | 0.20 | 0.30 |