

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Вінницький національний технічний університет

**ЧЕРВІНСЬКА ТЕТЯНА МИКОЛАЇВНА**

УДК 621.316.13

**ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ РЕАКТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ  
В УМОВАХ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ**

Спеціальність 05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2012

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент  
**Терешкевич Леонід Борисович**,  
Вінницький національний технічний університет,  
в.о. завідувача кафедри електротехнічних систем  
електроспоживання та енергетичного  
менеджменту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Варецький Юрій Омелянович**,  
Національний університет «Львівська  
політехніка»,  
професор кафедри електричних систем і мереж

кандидат технічних наук, доцент  
**Довгалоюк Оксана Миколаївна**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
доцент кафедри передачі електричної енергії

Захист відбудеться “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2012 р. о \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2012 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В. В. Кулик

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Використання керованих батарей статичних конденсаторів (БСК) для компенсації реактивних навантажень є одним з високоефективних засобів, який дозволяє зменшити втрати активної потужності, знизити плату постачальнику за спожиту електроенергію та підвищити її якість.

Існуючі системи керування створені для випадків, коли напруга в вузлах під'єднання БСК симетрична. Але результати багаточисельних експериментальних досліджень, які проводились в мережах енергопостачальних компаній та окремих споживачів електроенергії, свідчать про несиметрію напруг, що зумовлена наявністю електроприймачів однофазного виконання. Нехтування цією обставиною може призвести до технічно недопустимих результатів керування, наприклад, таких, як порушення вимог ГОСТ 13109-97 за показниками, які регламентують якість електроенергії.

Впливи несиметрії напруги на конденсаторні установки вивчалися багатьма дослідниками, але як за таких умов самі БСК впливають на електричну мережу залишається вивченим недостатньо, що не дозволяє реалізувати на практиці ефективне керування реактивним навантаженням.

Тому наукові роботи, спрямовані на поглиблення знань про впливи БСК на електричний режим, на розробку спеціального математичного забезпечення систем прийняття рішення в умовах несиметрії напруг, які дозволять уникнути технічно недопустимих керуючих впливів і тим самим підвищити ефективність кінцевих результатів, варто визнати актуальними.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились відповідно до наукового напрямку кафедри „Електротехнічні системи електроспоживання та енергетичний менеджмент” Вінницького національного технічного університету (ВНТУ). Дисертаційна робота виконувалася відповідно до „Програми наукових досліджень і розробок Міністерства освіти і науки України за пріоритетними напрямками розвитку науки та техніки” у межах фінансування держбюджетної науково-дослідної роботи „Розробка методів та пристроїв динамічної компенсації реактивної потужності”, № державної реєстрації 0110U002166, господарсько-договірної теми №2205 „Розробка рекомендацій по підвищенню ефективності використання симетрувально-компенсуючих пристроїв в електричних мережах ВАТ АК “Вінницяобленерго” з метою зниження втрат електричної енергії та збільшення їх пропускної здатності”, № державної реєстрації 0109U004177. Автор брала участь у виконанні держбюджетної науково-дослідної і господарсько-договірної роботи як виконавець.

**Метою роботи** є підвищення ефективності керування реактивним навантаженням за допомогою БСК в умовах несиметрії режиму, що дозволить знизити втрати активної потужності в мережах, не порушуючи стан якості електроенергії за показниками, якими нормується несиметрія та відхилення напруги, шляхом реалізації в системах керування розроблених математичних моделей.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язуються такі основні задачі:

- аналіз існуючих методів і способів керування реактивною потужністю за допомогою БСК в розподільних мережах 0,4 кВ;
- доведення необхідності врахування за деяких обставин несиметрії напруг у вузлі під'єднання БСК;
- обґрунтування параметрів для оцінювання негативного впливу БСК на електричний режим в зазначених умовах;
- розробка математичних моделей керування реактивною потужністю за допомогою БСК різних схемних виконань в умовах несиметрії напруг та обчислювального методу для розрахунку оптимального вектора управління;
- дослідження ефективності впровадження отриманих результатів в умовах реальних мереж шляхом комп'ютерного моделювання систем керування реактивним навантаженням.

**Об'єкт дослідження** – процес керування реактивним навантаженням за допомогою БСК в системах електропостачання.

**Предмет дослідження** – математичні моделі керування реактивним навантаженням за допомогою БСК в промислових електричних мережах.

**Методи дослідження.** Для аналізу роботи БСК при їх під'єднанні до несиметричної напруги застосовувався метод симетричних складових. Для розв'язання задачі керування реактивним навантаженням за допомогою БСК використані методи математичного програмування, зокрема, метод та обчислювальна процедура динамічного програмування. При проведенні статистичної обробки результатів експериментальних досліджень використовувались методи теорії математичної статистики.

**Наукова новизна одержаних результатів і положень,** що виносяться на захист, полягає в подальшому розвитку систем керування реактивним навантаженням в умовах несиметрії режиму за допомогою БСК, не порушуючи стан якості електроенергії за показниками, що нормують несиметрію та відхилення напруги.

В роботі отримано такі наукові результати:

1. Вперше доведена необхідність врахування несиметрії напруг у вузлі під'єднання БСК в процесі керування реактивним навантаженням та визначені умови, коли даний фактор необхідно брати до уваги, що виключить технічно недопустимі впливи БСК на електричний режим.

2. Дістало подальший розвиток оптимальне керування реактивним навантаженням в умовах несиметрії напруг, яке полягає в розв'язанні послідовності задач математичного програмування з можливістю використовувати ті або інші моделі керування в залежності від режиму, який встановився в системі електропостачання, що дозволяє здійснювати керування в реальному масштабі часу та не позначається на якості електроенергії.

3. Удосконалено моделі керування реактивним навантаженням, застосування яких в умовах несиметрії напруг мережі забезпечує оптимальне управління з урахуванням впливу БСК на рівні несиметрії та відхилення напруги.

**Практичне значення одержаних результатів** роботи полягає у зменшенні втрат активної потужності в електричних мережах, виконанні вимог з компенсації

реактивних навантажень, а також забезпеченні стану якості електроенергії за показниками, що нормують несиметрію та відхилення напруги.

На основі наукових положень створено:

- обчислювальний метод розрахунку оптимального вектора керування реактивним навантаженням в умовах несиметрії напруг;
- комп'ютерну модель системи керування реактивним навантаженням.

Отримані наукові результати, а саме: метод оцінки зміни параметрів несиметрії і відхилення напруги та додаткових втрат активної потужності в результаті реалізації компенсації реактивної потужності в умовах несиметрії напруги; рекомендації щодо вибору математичної моделі розрахунку оптимального вектора керування реактивною потужністю батарей статичних конденсаторів, впроваджено в ПАТ АК „Вінницяобленерго”, що підтверджено відповідним актом впровадження від 07 вересня 2011 р. Розроблені математичні моделі керування реактивним навантаженням в умовах несиметрії напруг і алгоритми їх аналізу використовуються на кафедрі “Електротехнічні системи електроспоживання та енергетичний менеджмент” ВНТУ для підготовки фахівців за спеціальністю 7.05070103 “Електротехнічні системи електроспоживання”, акт впровадження від 12 вересня 2011 р.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові положення та результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем одноособово. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих в співавторстві таких: [1, 10] – проведено дослідження показників для оцінювання впливу БСК на несиметрію режиму; [2 – 4, 7] – запропоновано математичні моделі керування реактивним навантаженням за допомогою БСК в умовах несиметрії напруг електричних мереж; [5, 11] – запропоновано метод визначення граничних значень напруги зворотної послідовності з умови допустимого нагріву асинхронного двигуна (АД); [6, 8] – проведено дослідження впливу БСК на додаткові втрати активної потужності від несиметрії режиму; [9] – проведено аналіз впливу БСК, під'єднаної до вузла навантаження із несиметричною системою напруг, на показники несиметрії та втрати активної потужності в електричних мережах.

**Апробація результатів дисертації.** Викладені в дисертації результати досліджень були апробовані на конференціях: II Міжнародній науково-технічній конференції “Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах” (м. Луцьк, 2008 р.); науковому семінарі „Проблеми та перспективи енергозбереження комунального господарства і промислових підприємств” (м. Луцьк, 2009 р.); XII Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика” (м. Кременчук, 2010 р.); III Міжнародній науково-технічній конференції “Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах” (м. Луцьк, 2010 р.); X Міжнародній конференції “Контроль і управління в складних системах” (КУСС – 2010, м. Вінниця); I Міжнародній науково-технічній конференції „Оптимальне керування електроустановками” (ОКЕУ-2011, м. Вінниця); на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету (м. Вінниця, 2008–2011 рр.).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковано в 6 статтях у наукових фахових виданнях, що входять до переліку ДАК МОНмолодьспорту України, 5 статтях у науково-технічних журналах і збірниках праць науково-технічних конференцій.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, списку використаних джерел і додатків, загальний обсяг дисертації 165 сторінок, з яких основний зміст викладений на 115 сторінках друкованого тексту, містить 34 рисунків, 16 таблиць, список використаних джерел із 118 найменувань.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Вказано мету та задачі дослідження. Сформульовано наукову новизну та положення, які виносяться на захист. Розглянуто практичне значення та впровадження отриманих результатів. Наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи і публікації.

**В першому розділі** дисертації проведено аналіз наукових публікацій з питань керування реактивним навантаженням за допомогою БСК, спрямований на виявлення можливостей підвищення ефективності передачі електроенергії за рахунок удосконалення методів керування реактивним навантаженням.

Достатньо вивченими є багатофункціональні властивості конденсаторних установок, що зумовлює їх широке використання для компенсації реактивної потужності, місцевого регулювання напруги, її симетрування та фільтрації вищих гармонік. Ефективність роботи БСК забезпечується системами керування і в цілому визначається їх довершеністю. Проте стан сучасних мереж характеризується несиметрією та відхиленням напруг від номінальної. Характеристики БСК за таких умов змінюються і, як наслідок, їх вплив на живильні мережі також буде іншим.

Аналіз наукової літератури засвідчив, що впливи, які здійснюються БСК при їх під'єднанні до несиметричної напруги вивчені не достатньо, відсутні їх кількісні оцінки і, як результат, керування реактивною потужністю за допомогою БСК здійснюється без врахування зазначених обставин.

В розділі сформульовані недостатньо вивчені наукові задачі, що стосуються особливостей керування реактивним навантаженням при під'єднанні БСК до несиметричної напруги, основні з яких:

- доведення необхідності врахування за деяких обставин несиметрії напруг у вузлі під'єднання БСК;
- розробка математичних моделей керування реактивним навантаженням в умовах несиметрії напруг;
- дослідження ефективності впровадження отриманих результатів в умовах реальних мереж.

**В другому розділі** розглядається взаємопов'язаний комплекс наукових задач з питань використання БСК в умовах несиметрії напруг:

- кількісної оцінки впливів, які здійснюються БСК, на електричні режими в трифазній мережі;

– встановлення допустимих значень на деякі параметри електричного режиму, що мають бути забезпечені в процесі керування;

– обґрунтування критерію ефективності, за яким має виконуватись оптимальне керування реактивним навантаженням із врахуванням сукупності всіх найбільш суттєвих впливів БСК на електричний режим.

Дослідженнями охоплені випадки з'єднань БСК за схемами трикутника та зірки з нулем. Отримані результати дослідження схеми зірки з нулем використані для оцінки впливів БСК, секції яких перемикаються із схеми трикутника в зірку з нулем, а далі для розробки відповідних математичних моделей керування.

Отримані результати поширюються лише на мережі 0,4 кВ енергопостачальних компаній та споживачів електроенергії, в яких справедливими є такі припущення.

1. В дослідженнях навантаження представлені незмінними опорами, що відповідає квадратичним статичним характеристикам вузлів навантаження.

2. Режим генерації реактивної потужності БСК в мережі живлення не передбачаються.

Виконані розрахунки, за результатами яких побудовані залежності значень фазних напруг зворотної та нульової послідовностей після ввімкнення БСК різних потужностей –  $U_{2\text{після}}$ ,  $U_{0\text{після}}$  від їх значень до ввімкнення –  $U_{2\text{до}}$ ,  $U_{0\text{до}}$ .

Наприклад, залежності  $U_{2\text{після}}$  ( $U_{2\text{до}}$ ) подані на рис. 1.

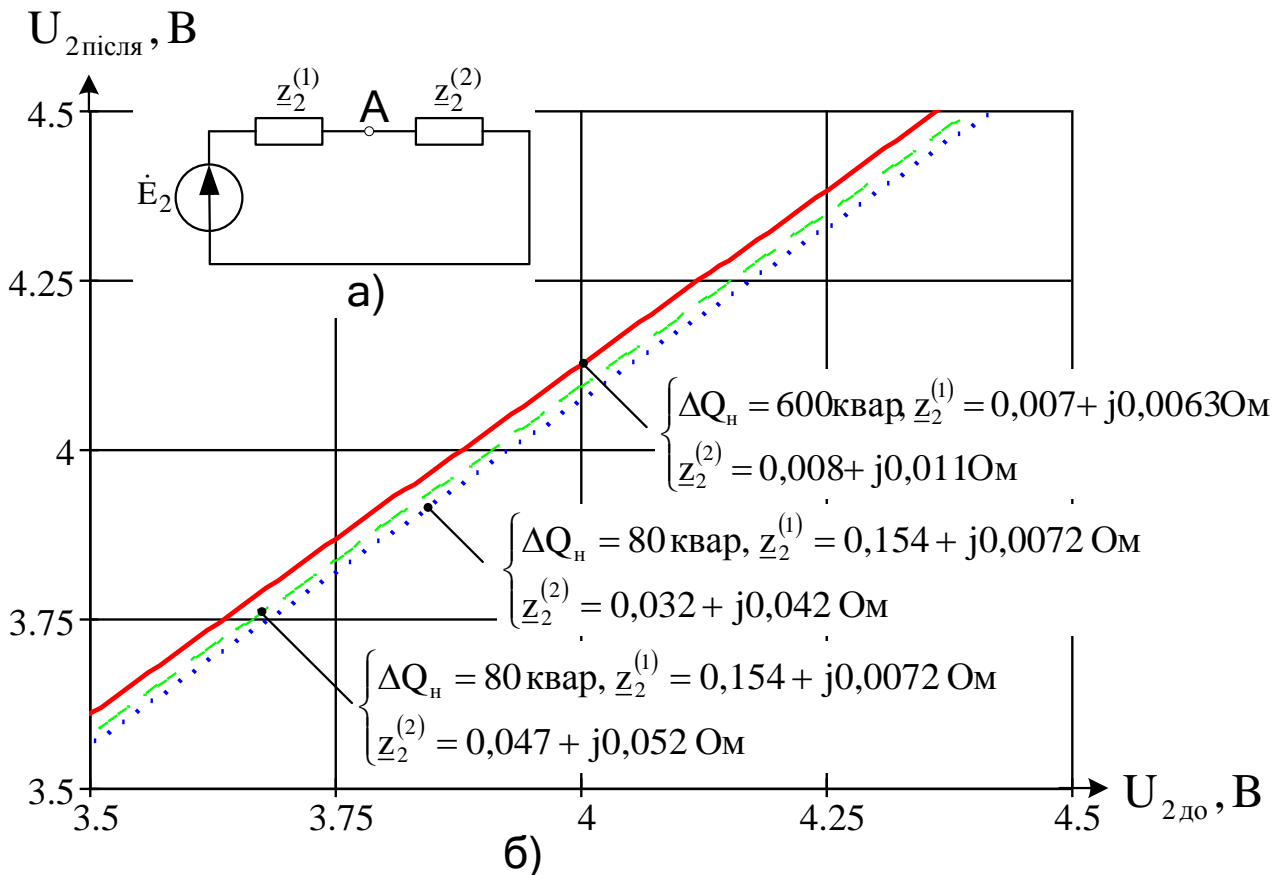


Рисунок 1 – Вплив БСК на електричний режим при її під'єднанні до несиметричної напруги: а) заступна схема для струмів зворотної послідовності, що досліджувалась; б) графіки  $U_{2\text{після}}$  ( $U_{2\text{до}}$ )

На рис. 1  $\dot{E}_2$  – еквівалентна е.р.с. зворотної послідовності однофазних електроприймачів, під'єднаних до мереж споживача;  $\underline{z}_2^{(1)}$  – опір струмам зворотної послідовності лінії, яка живить групу однофазних електроприймачів;  $\underline{z}_2^{(2)}$  – еквівалентний опір мереж споживача із симетричним навантаженням та елементів мережі енергопостачальної компанії;  $\Delta Q_H$  – потужність БСК. Вузол А – вузол під'єднання БСК, що досліджується.

Аналізуючи графіки  $U_{2\text{після}}(U_{2\text{до}})$  та  $U_{0\text{після}}(U_{0\text{до}})$ , можна відмітити, що:

– ввімкнення секцій БСК симетричного виконання в умовах несиметрії напруг призводить до зростання напруг зворотної –  $U_2$  та нульової –  $U_0$  послідовностей, які за певних умов можуть перевищувати допустимі значення за умовами роботи окремого електрообладнання;

– рівень несиметрії електричного режиму потребує контролю в процесі керування реактивними навантаженнями у випадках, коли  $U_{2\text{до}}$  та  $U_{0\text{до}}$  наближаються до допустимих значень.

При несиметрії напруг потужність кожного плеча БСК буде різною і, як результат, буде різною добавка напруги, що ним створюється. У фазі, де вихідне значення напруги найбільше, добавка напруги буде найбільшою. Зважаючи на наявність в системі електропостачання електроприймачів однофазного виконання, зростання відхилення напруги, яке може мати місце при керуванні реактивною потужністю, потрібно обмежувати, виходячи із умов роботи саме таких навантажень. Тобто, обмежувати відхилення напруги –  $\delta U_y$  в тій фазі, де вихідне значення напруги (до реалізації керуючого рішення) найбільше.

Оптимальне керування може здійснюватись при наявності показника ефективності. Проведені дослідження з метою обґрунтування такого показника для даної задачі. Природно, що реалізація будь-яких технічних рішень, які зменшують (або збільшують) збитки від несиметрії електричного режиму, повинна відповідно позначатись на зміні значення показника, що використовується для оцінювання.

Розглянуто як змінюються показники, якими прийнято оцінювати впливи на несиметрію режиму, при ввімкненні БСК у вузлі мережі з несиметричною напругою для ряду характерних випадків:

– БСК під'єднується до шин 0,4 кВ трансформаторної підстанції (несиметрія режиму зумовлена несиметричними навантаженнями як в мережах живлення, так і в мережах споживача);

– БСК під'єднана до шин 10 кВ трансформаторної підстанції (несиметрія режиму зумовлена однофазним навантаженням в мережах живлення);

– БСК під'єднана до шин 0,4 кВ трансформаторної підстанції (несиметрія режиму зумовлена навантаженнями споживача).

Серед таких показників:

– напруги зворотної та нульової послідовностей у вузлі під'єднання БСК –  $U_2, U_0$ ;



– коефіцієнти несиметрії напруг по зворотній та нульовій послідовності ( $k'_{2U}$  та  $k'_{0U}$  – як такі, що визначені як відношення відповідної напруги до напруги прямої послідовності –  $U_1$ ;  $k'_{2U}$  та  $k'_{0U}$  – як такі, що визначені як відношення відповідної напруги до номінальної напруги мережі);

– додаткові втрати активної потужності в електричних мережах, зумовлені несиметрією режиму –  $\Delta P$ .

Досліджувались відносні значення перелічених показників, які визначались як відношення даного показника після та до ввімкнення БСК, в функції від потужності БСК. Зміна зазначених показників порівнювалась із характером зміни відносного значення збитків від несиметрії напруг при ввімкненні БСК (враховувались лише складові збитків від додаткових втрат активної потужності та скорочення терміну служби ізоляції) в електричних мережах та електроприводі.

Із розглянутих показників лише  $k'_{2U}$ ;  $k'_{0U}$  та  $U_2$ ;  $U_0$  найкраще відображають тенденції зміни збитків від несиметрії режиму.

Іноді допустимі впливи БСК на несиметрію напруг доцільно встановлювати, виходячи із допустимих умов роботи технологічного або електрообладнання, наприклад, для недовантаженого або перевантаженого АД.

Для потреб керування електричними режимами, в результаті чого відбувається зміна параметрів несиметрії, можна скористатись інформацією про допустимі напруги зворотної послідовності  $U_{2\text{доп}}$  на затискачах, наприклад, АД, як найбільш вразливого від несиметрії напруг.  $U_{2\text{доп}}$  вважається таке його значення, якому в сукупності з іншими параметрами, що склалися на момент прийняття рішення та які визначають умови експлуатації АД, відповідає допустимий нагрів електричної машини. Розроблено метод розрахунку  $U_{2\text{доп}}$  на основі відомого методу еквівалентних гріючих втрат.

Метод еквівалентних гріючих втрат призначений для розрахунку температури двигуна при його роботі від симетричної напруги. Даним методом можна скористатись для визначення  $U_{2\text{доп}}$ , якщо розрахувати нагрів двигуна від фіктивної симетричної трифазної системи струмів. Кожний її фазний струм дорівнює максимальному струму реальної несиметричної системи. Отримані результати розрахунку температури будуть завжди завищеними, а  $U_{2\text{доп}}$  – заниженого значення.

Розроблений метод дозволяє також отримати  $U_{2\text{доп}}$  із врахуванням відносного аргументу між струмами прямої і зворотної послідовностей, який, як відомо, впливає на результуючий тепловий ефект.

Метод можна використати для оперативного визначення  $U_{2\text{доп}}$ , що необхідно у зв'язку із можливими змінами умов роботи АД.

**У третьому розділі** синтезовані математичні моделі керування реактивною потужністю для випадків:

– секції БСК з'єднані за схемою трикутника;

– коли кожна секція БСК може працювати за схемою трикутника та зірки з нулем.

Моделі забезпечують врахування можливих впливів БСК на електричний режим, а також допустимі значення параметрів несиметрії та відхилення напруги.

Розроблені математичні моделі можуть використовуватись системою прийняття рішень як самостійно, так і в комплексі з іншими математичними моделями. Алгоритм роботи такої системи прийняття рішення передбачає попередньо за певними ознаками оцінити електричний режим, що склався на момент прийняття керуючого рішення, і провести розрахунки за відповідною математичною моделлю, яка забезпечує врахування необхідного переліку впливових факторів. Тим самим, оптимальне керування реактивним навантаженням зводиться до вирішення послідовності для деяких дискретних моментів часу задач математичного програмування з подальшою реалізацією розрахованих векторів керування.

Якщо за попередньо зробленими оцінками контролювати відхилення напруги немає необхідності, а рівень несиметрії може сягнути недопустимих значень, то для визначення вектора керування можна скористатись математичною моделлю:

$$\begin{cases} Q' - \mathbf{X}^T \cdot \Delta Q(U) \rightarrow \min \\ Q' - \mathbf{X}^T \cdot \Delta Q(U) \geq Q_{\text{доп}} \\ \left| \dot{U}'_2 + \mathbf{X}^T \cdot \Delta \dot{U}_2 \right| \leq U_{2\text{доп}} \\ \mathbf{X} + \bar{\mathbf{X}} = \mathbf{n} \\ x_i, \bar{x}_i \in \{1, 0\}; \end{cases} \quad (1)$$

де  $Q'$  – природне (в припущенні, що всі секції БСК вимкнені) споживання реактивної потужності;  $\Delta Q(U)$  – матриця потужностей керованих секцій БСК, які функціонально залежать від реальних міжфазних напруг, вимірністю  $(m \times 1)$ , де  $m$  – кількість секцій БСК;  $\mathbf{X}$  – вектор керування вимірністю  $(m \times 1)$ , кожна компонента якого описує стан комутаційного апарату, яким здійснюється комутація відповідної секції БСК; якщо  $x_i = 1$ , то секція  $i$  має бути ввімкнена, а якщо  $x_i = 0$ , то навпаки;  $Q_{\text{доп}}$  – допустиме значення реактивної потужності;  $\dot{U}'_2$  – вектор напруги зворотної послідовності у вузлі під'єднання БСК (до реалізації керуючого рішення);  $\Delta \dot{U}_2$  – матриця добавок напруги зворотної послідовності, що має місце внаслідок ввімкнення відповідних секцій БСК, вимірністю  $(m \times 1)$ ;  $U_{2\text{доп}}$  – допустиме значення напруги зворотної послідовності, яке, наприклад, визначено, виходячи із умов роботи електрообладнання;  $\bar{\mathbf{X}}$  – фіктивний вектор вимірністю  $(m \times 1)$ , кожна компонента якого  $\bar{x}_i$  пов'язана зі змінною  $x_i$  вектора  $\mathbf{X}$  так, що коли  $\bar{x}_i = 1$ , то  $x_i = 0$ , і навпаки;  $\mathbf{n}$  – одинична стовпцева матриця вимірністю  $(m \times 1)$ .

Математична модель (1) дискретна, що зумовлено конструктивними особливостями БСК. Цільова функція математичної моделі описує величину реактивної потужності в лінії живлення. Перше з обмежень контролює значення реактивної потужності, що буде мати місце в результаті реалізації вектора

керування. Друге обмеження математичної моделі (1) забезпечує значення напруги зворотної послідовності менше за допустиме. Останнє обмеження вказує, що для отримання ефекту в мережі кожна із секцій БСК може бути ввімкненою або вимкненою.

Якщо для деякого моменту часу прийняття керуючого рішення актуальною стає потреба контролю відхилення напруги у одній із фаз, то система прийняття рішення розраховує вектор керування за математичною моделлю:

$$\begin{cases} Q' - \mathbf{X}^T \cdot \Delta Q(U) \rightarrow \min \\ Q' - \mathbf{X}^T \cdot \Delta Q(U) \geq Q_{\text{доп}} \\ \left| \dot{U}'_2 + \mathbf{X}^T \cdot \Delta \dot{U}_2 \right| \leq U_{2\text{доп}} \\ \left| \dot{U}_s + \mathbf{X}^T \cdot \Delta \dot{U}_s(\dot{U}_s) \right| \leq U_{\text{макс.доп}} \\ \mathbf{X} + \bar{\mathbf{X}} = \mathbf{n} \\ x_i, \bar{x}_i \in \{1, 0\}; \end{cases} \quad (2)$$

де  $\dot{U}_s$  – напруга на шинах трансформаторної підстанції у фазі з найбільшим її значенням в припущенні, що всі БСК вимкнені;  $s$  – індекс, який визначає фазу з найбільшим вихідним значенням напруги;  $\Delta \dot{U}_s(\dot{U}_s)$  – матриця добавок напруги у фазі  $s$ , що мають місце внаслідок ввімкнення відповідних секцій БСК, вимірністю  $(m \times 1)$ ;  $U_{\text{макс.доп}}$  – напруга, яка відповідає максимально допустимому її відхиленню.

Допустиме відхилення напруги для однієї із фаз забезпечується третім обмеженням в математичній моделі (2).

Для розв'язання задач, які описані математичними моделями (1) – (2), не можна скористатись жодним із класичних методів оптимізації. Причиною є те, що математичні моделі містять обмеження, які описуються не скалярною функцією дійсного змінного (обмеження на значення  $U_2$  і відхилення напруги в одній із фаз), а коефіцієнти цільової функції змінюються в залежності від прийнятого на попередній ітерації рішення. Тому виникає необхідність розробки обчислювального методу для розрахунку оптимального вектора керування реактивним навантаженням із врахуванням рівня несиметрії напруг.

Розроблений обчислювальний метод для розв'язання задачі, базується на ідеях методу динамічного програмування. Технічні обмеження, що записані у вигляді нерівностей, забезпечуються формуванням на кожному етапі  $k$  масиву допустимих до ввімкнення секцій БСК –  $D^k$ , які одночасно задовольняють всі обмеження задачі. Кожний елемент цієї множини  $Q^k \in D^k$ ,  $1 \leq k \leq R^k$  – реактивна потужність секції БСК із числа тих, що залишились не ввімкненими на попередніх  $(k-1)$  етапах розв'язку задачі;  $R^k$  – загальна кількість елементів множини  $D^k$ .

Розв'язування задачі КРП з врахуванням рівня несиметрії напруг у відповідності до математичних моделей (1) – (2), користуючись методом динамічного програмування, можна виконувати за таким алгоритмом:

Крок 1. Розраховуються потужності секцій БСК, які відповідають реальним напругам в мережі. Виконується перебір секцій БСК, по яких не прийнято рішення, і відбираються ті, що задовольняють обмеження моделі. Потужності відібраних секцій формують масив  $D^k$ .

Якщо  $D^k$  пустий, то оптимальний розв'язок досягнуто на етапі  $(k-1)$ . Вектор керування реалізується.

Крок 2. Перебираються всі потужності секцій масиву  $D^k$  і визначається та, що забезпечує максимальний від'ємний приріст цільової функції. Розрахунки виконуються згідно з рекурентними співвідношеннями:

$$\begin{cases} f^I = \min_{1 \leq r \leq R^I} \{ Q - \Delta Q_r^I(U) \} \\ \dots \\ f^k = \min_{1 \leq r \leq R^k} \{ f^{k-I} - \Delta Q_r^k(U) \}, \quad k = II, III, \dots, n, \end{cases}$$

де  $f^k$  – оцінка стану системи на  $k$ -му етапі – реактивна потужність на вводі, якщо реалізувати всі рішення, що прийняті на попередніх етапах, включаючи даний;  $\Delta Q_r^k(U)$  – елемент множини  $D^k$ .

Крок 3. Виконується розрахунок для уточнення потужності, відібраної до ввімкнення секції, вважаючи, що ввімкнені секції, по яким прийнято рішення на всіх  $k$  етапах.

Перевіряються на виконання умови, описані обмеженнями моделі. Якщо будь-яке обмеження не виконується, то потужність даної секції вилучається з масиву  $D^k$  та з подальшого розгляду, а розрахунки виконуються починаючи з кроку 2.

Крок 4. Відповідна компонента вектора керування прирівнюється до одиниці,  $k=k+1$ , та здійснюється перехід до кроку 1.

**В четвертому розділі** роботи змодельовано систему оптимального керування реактивним навантаженням за допомогою БСК, які працюють в умовах несиметрії напруг, що реалізує розроблені в дисертації математичні моделі та обчислювальні методи.

На рис. 2 представлена модель системи оптимального керування реактивним навантаженням за допомогою секцій БСК, що мають схему з'єднань трикутником, відтворена в системі Matlab Simulink, яка складається з наступних блоків:

- блок вихідних даних;
- блок розрахунку початкових умов (Subsystem1);
- блок прийняття керуючого рішення (Subsystem2).

До вихідних даних системи прийняття рішення належать модулі та аргументи фазних напруг, реактивна потужність навантаження, опори струмам прямої і зворотної послідовностей, потужності секцій БСК, які відповідають номінальній напрузі, допустимі значення реактивної потужності, фазної напруги та напруги зворотної послідовності.

Структура блоку прийняття керуючого рішення наведена на рис. 3. Вона складається з таких підсистем: Subsystem21 – блок вибору оптимальної до ввімкнення секції на  $k$ -му етапі; Subsystem22 – блок присвоєння «1» відповідній

компоненті вектора  $X$  та вилучення цієї ж секції із множини допустимих до ввімкнення; Subsystem23 – блок розрахунку добавок напруги прямої, зворотної послідовностей, що відповідають вихідному стану системи; Subsystem24 – блок трансформації, в якому 3 стовпцеві матриці потужності секцій та добавок напруги прямої, зворотної послідовностей перетворюються в рядкові за кількістю, що відповідає кількості секцій; Subsystem25 – блок суми, в якому знаходяться сумарні значення потужності секцій і добавок напруги прямої, зворотної послідовностей в результаті реалізації вектора  $X$  на  $k$ -му етапі та всіх попередніх; Subsystem26 – блок розрахунку фазних напруг та напруги зворотної послідовності; Subsystem27 – блок розрахунку післядії (повторює роботу Subsystem23-26); Subsystem28 – блок перевірки виконання умов математичної моделі; Subsystem29 – блок присвоєння «0» відповідній компоненті вектора  $X$ , що була вибрана до ввімкнення на  $k$ -му етапі у випадку невиконання умов математичної моделі; Subsystem210 – блок запам'ятовування, що зберігає і передає на  $(k+1)$  етап вектор  $X$  та множини допустимих до ввімкнення секцій БСК.

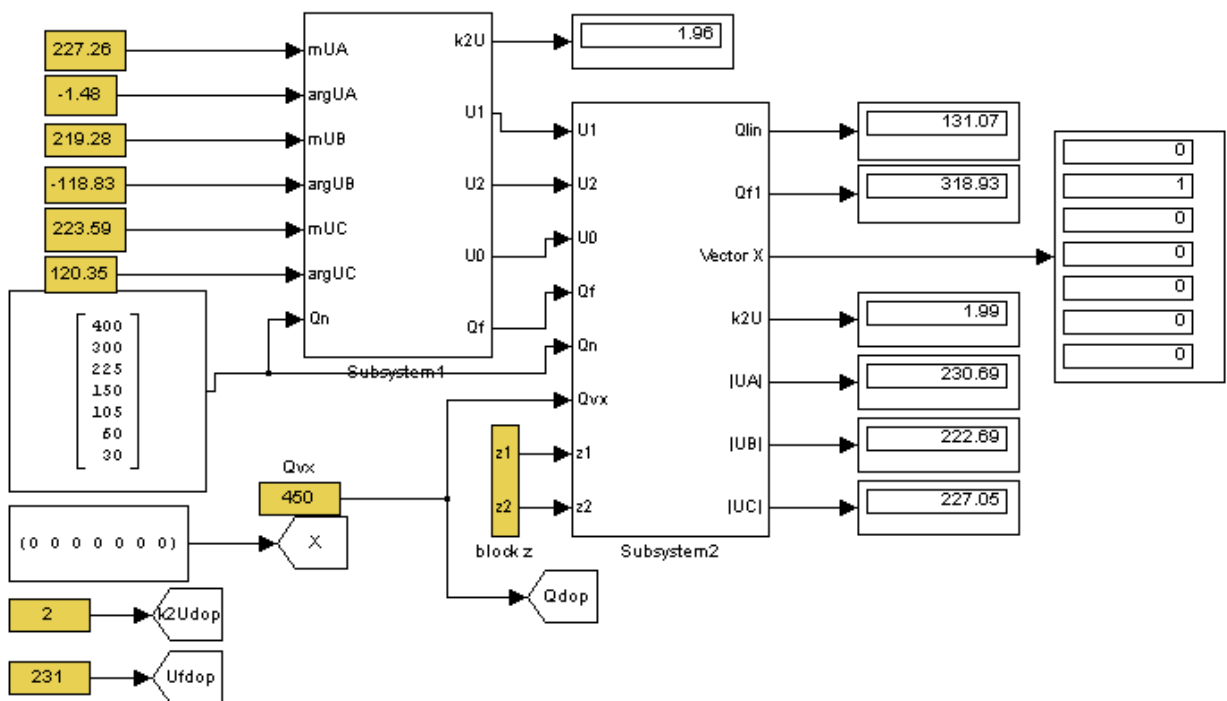


Рисунок 2 – Комп'ютерна модель оптимального керування реактивним навантаженням для Matlab Simulink

Для отримання залежностей від часу керуаних параметрів стану електричної мережі, як вихідні дані, використані матеріали експериментальних досліджень, проведених за допомогою сучасного атестованого приладу Memobox 300 Smart A на одній із трансформаторних підстанцій (ТП) Бершадських РЕМ ПАТ АК «Вінницяобленерго». На основі проведеного комп'ютерного моделювання зроблено порівняльний аналіз результатів керування реактивним навантаженням за розробленою моделлю (1) та за відомою моделлю, що не враховує обмеження на значення показників несиметрії і відхилення напруги, а також проведено їх статистичний аналіз на відповідність вимогам ГОСТ 13109-97.

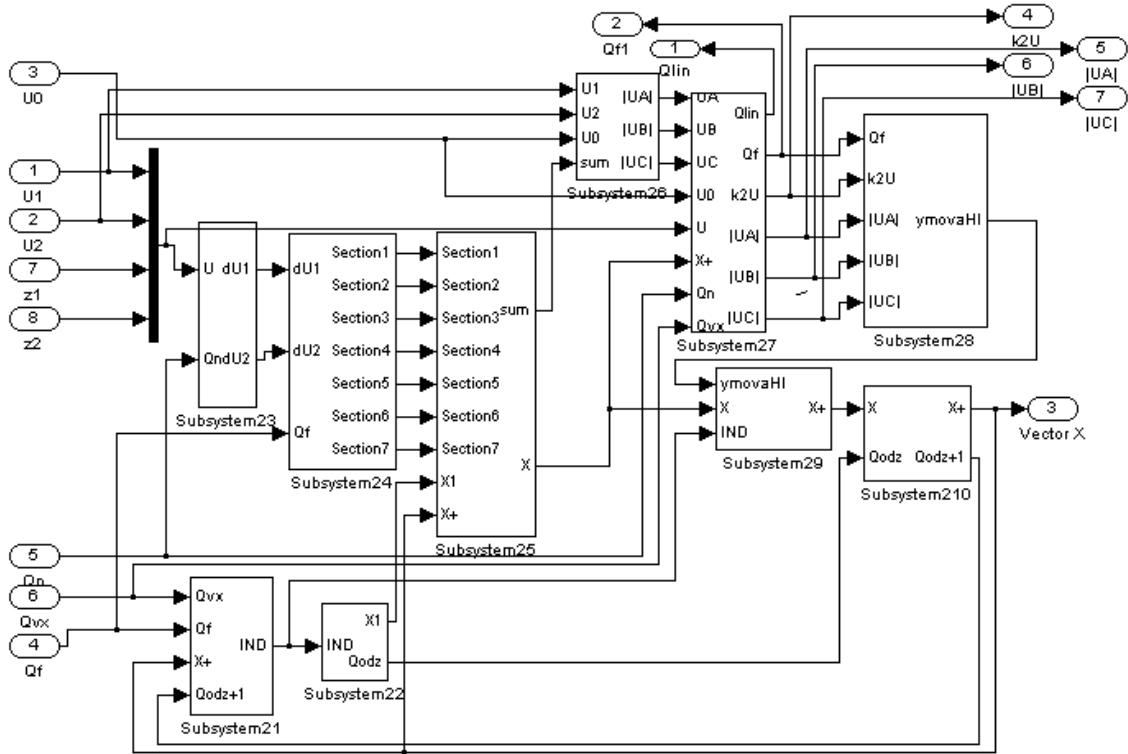


Рисунок 3 – Блок прийняття керуючого рішення для Matlab Simulink

На рис. 4 зображені графіки реактивної потужності навантаження, під'єданого до шин ТП, і реактивної потужності, що генерується БСК, при реалізації вектора керування для випадків, коли не враховується (випадок 1) та враховується (випадок 2) вплив БСК на несиметрію і відхилення напруги.

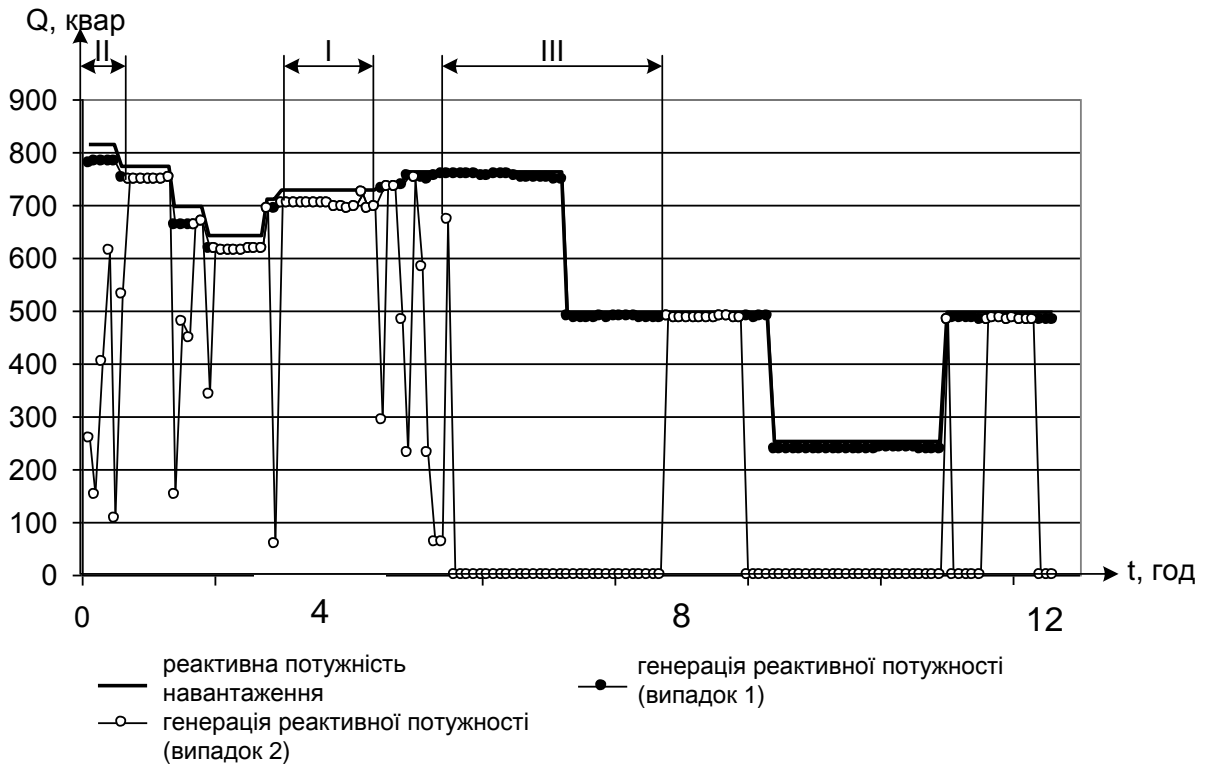


Рисунок 4 – Графіки споживання та генерації реактивної потужності

Керування за першим випадком забезпечує графік генерації реактивної потужності, що наближається до графіка її споживання. Реалізація цього варіанту керування супроводжується зростанням кількості спостережень, коли порушуються норми якості електроенергії по  $k_{2U}$  та  $\delta U_y$ .

Наведені графіки демонструють можливі наслідки керування реактивним навантаженням в умовах несиметрії напруг. На рис. 4 позначені характерні інтервали часу:

I – керування у випадках 1 та 2 співпадають, контрольовані параметри  $k_{2U}$  та  $\delta U_y$  знаходяться в допустимих за ГОСТ 13109-97 межах;

II – потужність ввімкнених БСК обмежена в порівнянні із випадком 1, оскільки подальше їх ввімкнення буде супроводжуватись порушенням норм стандарту по показниках  $k_{2U}$  та  $\delta U_y$ ;

III – для вихідного стану характерне відхилення від норм ГОСТ 13109-97 показників  $k_{2U}$  та  $\delta U_y$ ; секції БСК залишаються вимкненими у випадку 2.

В цілому отримані результати з керування реактивним навантаженням можна оцінити так:

– в 60% (88 із 146 спостережень) вектор керування необхідно приймати із врахуванням впливу на несиметрію та відхилення напруги;

– в 38% (55 із 146 спостережень) вектор керування співпадає з отриманим при керуванні, яке не враховує вплив на якість електроенергії.

Результати впливу БСК в процесі керування реактивною потужністю на відхилення напруги у фазі С (вихідне значення відхилення напруги найбільше) та на параметри несиметрії напруг для випадків, що розглядаються, представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати статистичної обробки для варіантів, що розглядаються

Варіанти керування, що розглядалися	Контрольовані показники якості електроенергії			
	$\delta U_y$ у фазі С		$k_{2U}$	
	Кількість спостережень, %			
	Нормально допустимі межі	Межі, що перевищують гранично допустимі	Нормально допустимі межі	Межі, що перевищують гранично допустимі
Вихідний режим	99	0	52	0
Випадок 1	58	0	40	0
Випадок 2	99	0	52	0

Як видно з табл. 1, керування реактивним навантаженням за однією із розроблених математичних моделей (випадок 2) не змінює відсоток спостережень по контрольованим параметрам в межах, визначених ГОСТ 13109-97 (нормально допустимих та в межах, що перевищують гранично допустимі). Це дає підставу

зробити висновок, що таке керування не погіршує стан якості електроенергії по несиметрії та відхиленню напруги.

В цілому результати комп'ютерного моделювання можливих варіантів керування реактивним навантаженням за допомогою БСК з однаковими міжфазними ємностями, представлені на рис. 4, свідчать про необхідність врахування такого фактору як несиметрія напруг у вузлі під'єднання БСК.

В дисертаційній роботі запропоновано сукупність технічних заходів, які забезпечать ефективне керування реактивним навантаженням для типових вихідних умов. Серед таких технічних заходів перемикання регульовального відгалуження трансформатора, впровадження заходів внутрішнього симетрування навантажень або під'єднання некерованої БСК несиметричного виконання, використання БСК, які мають керовані секції з однаковими міжфазними ємностями та симетрувальні секції. В залежності від вихідних умов ці технічні засоби використовуються в певній їх комбінації та в певній послідовності. В складі заходів, що використовуються в усіх варіантах, це керування реактивним навантаженням за допомогою БСК із врахуванням несиметрії напруг в мережі за розробленими математичними моделями, яке виконується за алгоритмом.

Крок 1. За допомогою математичної моделі (1) або (2) прийняти рішення по секціях БСК з однаковими міжфазними ємностями.

Крок 2. Якщо  $k_{2U}$  досягнув допустимого значення, то подальше керування реактивним навантаженням виконувати за допомогою симетрувальних секцій БСК, одночасно забезпечуючи симетрування напруг.

Проведені дослідження ефективності керування реактивними навантаженнями за розробленими математичними моделями для випадку, коли відповідними заходами забезпечені допустимі за ГОСТ 13109-97  $k_{2U}$  та  $\delta U_y$  для вихідного режиму.

Для прийняття керуючих рішень по секціях БСК із однаковими міжфазними ємностями використана розроблена модель системи керування, а рішення по симетрувальним секціям розраховувались за допомогою математичного пакету MathCad.

Результати такого керування представлені на рис. 5, де в одних осях суміщені графіки споживання та генерації реактивної потужності для режиму, що забезпечується реалізацією вектора керування по секціях БСК з однаковими міжфазними ємностями (розрахованого за моделлю (1)), а також графіки, що забезпечуються за умови реалізації додатково рішення по симетрувальних секціях.

Як видно із графіків, рис. 5, в процесі оптимального керування реактивним навантаженням забезпечена ефективна компенсація реактивної потужності (графіки споживання та генерації реактивної потужності майже збігаються). Одночасно забезпечено нормоване  $k_{2U}$ .



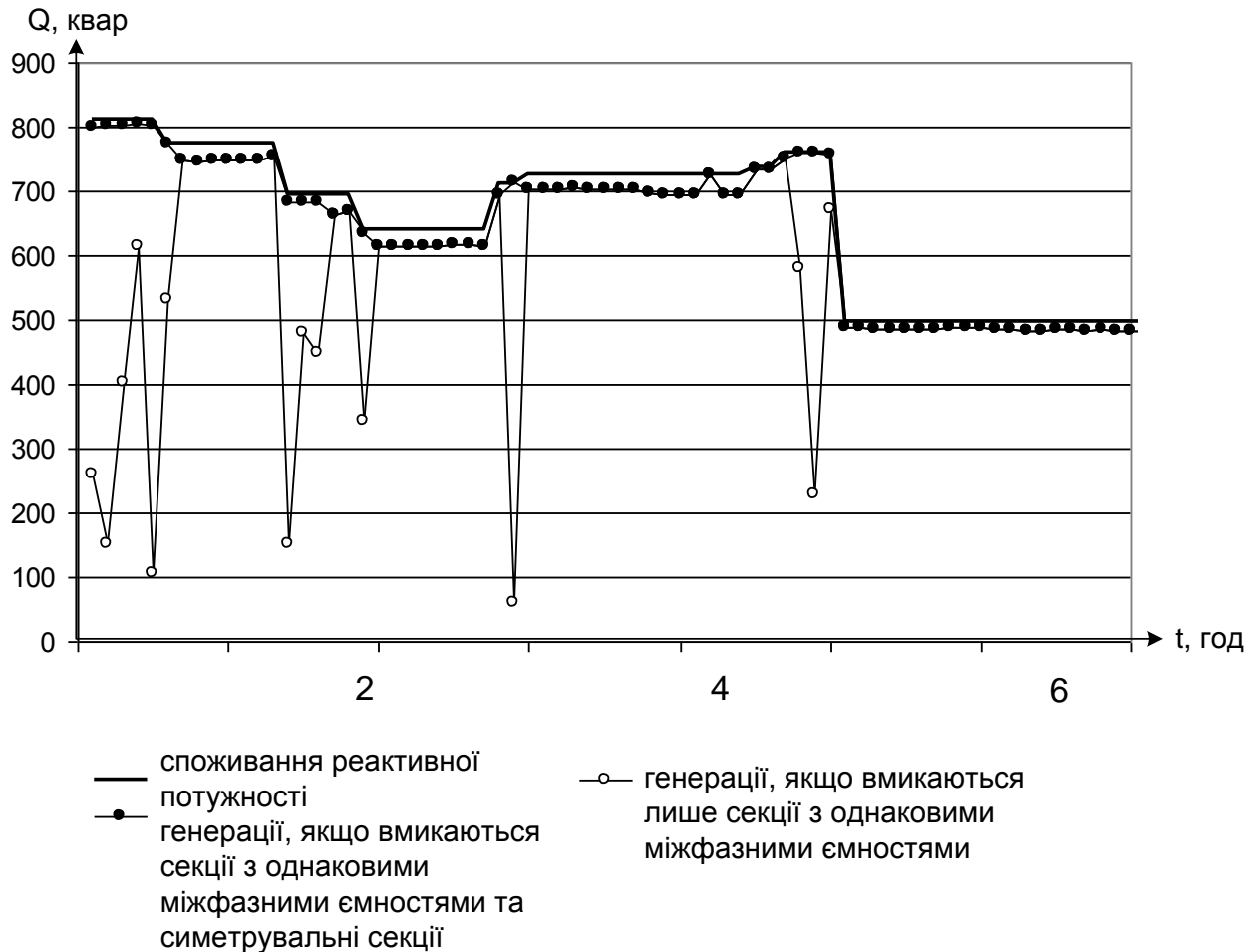


Рисунок 5 – Графіки споживання та генерації реактивної потужності

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено задачу оптимального керування реактивним навантаженням за допомогою БСК в умовах несиметрії режиму, що дозволить знизити втрати активної потужності в мережах, не погіршуючи стан якості електроенергії за показниками, якими нормується несиметрія та відхилення напруги.

1. Існуючі методи і способи керування реактивною потужністю за допомогою БСК здійснюють керування, забезпечуючи мінімум активних втрат в мережі або необхідні рівні напруги, не враховуючи рівень несиметрії напруг в вузлі електричної мережі.

2. Зростання показників несиметрії та відхилення напруг, яке має місце при ввімкненні БСК, може досягнути значень недопустимих за ГОСТ 13109-97 або за умов експлуатації технологічного або електротехнічного обладнання. Такий вплив БСК на електричний режим потрібно враховувати в залежності від вихідного значення відхилення напруги, напруги зворотної та нульової послідовностей у вузлі під'єднання БСК, їх потужності і опору мережі.

3. Оптимальне керування реактивним навантаженням в умовах несиметрії напруг доцільно виконувати, використовуючи як критерії ефективності коефіцієнти несиметрії напруг по зворотній та нульовій послідовності (визначені як відношення відповідних напруг до напруги номінальної) або напруги зворотної та нульової

послідовності, які найкраще відображають тенденції зміни збитків від несиметрії режиму.

4. Розроблено метод, за яким можуть визначатися обмеження на граничні значення параметрів, якими оцінюється несиметрія напруг, виходячи із умови допустимого нагрівання асинхронного двигуна.

5. Синтезовано цілочислові математичні моделі, які забезпечують знаходження оптимального вектора керування реактивною потужністю в умовах несиметрії напруг мережі з урахуванням впливу БСК на електричний режим.

6. Розроблено числовий метод розрахунку оптимального вектора керування, в основі якого модифікований метод динамічного програмування, який дозволяє враховувати як обмеження математичної моделі, так і післядію. Рекурентні співвідношення, за якими проводяться розрахунки, не можуть бути використані для випадків, коли необхідно забезпечити генерацію реактивної потужності в живильну мережу.

7. Практична реалізація виконаних наукових розробок дозволить зменшити втрати активної потужності, виконати вимоги з компенсації реактивних навантажень, не порушуючи стан якості електроенергії за такими показниками як несиметрія та відхилення напруги.

8. Отримані наукові результати знайшли підтвердження при комп'ютерному моделюванні роботи системи оптимального керування реактивним навантаженням.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Червінська Т.М. Аналіз впливу батарей статичних конденсаторів на роботу системи електропостачання з несиметричною напругою / Л.Б. Терешкевич, Т.М. Червінська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – №2. – С. 39–43.

2. Червінська Т.М. Про показники для оцінювання впливу БСК на несиметрію режиму електричної мережі / В. Г. Аввакумов, Л. Б. Терешкевич, Т. М. Червінська // Вісник національного університету «Львівська політехніка» Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2010. – №.666 – С. 3–8.

3. Червінська Т.М. Математична модель керування реактивною потужністю в електричних мережах з несиметричною напругою / Л. Б. Терешкевич, Т.М. Червінська // Вісник Кременчуцького Державного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – №3(62) Частина 1. – С. 161 – 164.

4. Червінська Т.М. Математичні моделі керування реактивною потужністю та несиметрією напруги в електричній мережі / Л. Б. Терешкевич, Т. М. Червінська, М. В. Кузьменко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2010. – № 32. –С. 406 – 415.

5. Червінська Т.М. Визначення граничних значень параметрів несиметрії електричного режиму із умови допустимого нагріву асинхронного двигуна / Л.Б.Терешкевич, Т.М.Червінська // Наукові праці Вінницького національного технічного університету.. – 2011. – №3. – Режим доступу: [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2011\\_3/2011-3.htm](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2011_3/2011-3.htm).

6. Червінська Т.М. Дослідження впливу компенсувальних установок на

додаткові втрати активної потужності від несиметрії режиму / Л. Б. Терешкевич, Т. М. Червінська, І. О. Бандура // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 4. – С. 50–54.

7. Червінська Т.М. Керування реактивною потужністю в умовах несиметрії напруги мережі / Л.Б. Терешкевич, Т.М. Червінська // Промислова енергетика та електротехніка (Промелектро). – 2008. – №5. – С. 16–20.

8. Червінська Т.М. Математичне моделювання керування реактивною потужністю та несиметрією режиму в електричній мережі / Л.Б. Терешкевич, В.В. Захаров, Т.М.Червінська // Матеріали II міжнародної науково-технічної конференції “Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах”. – Луцьк: Луцький національний технічний університет. – 2008. – С. 172–175.

9. Червінська Т.М. Керуючі впливи батареї статичних конденсаторів при її під'єднанні до вузла мережі з несиметричною напругою/ Л.Б.Терешкевич, Т.М.Червінська, Н.В. Терешкевич // Матеріали наукового семінару “ Проблеми та перспективи енергозбереження комунального господарства і промислових підприємств ”. – Луцьк: Луцький національний технічний університет. – 2009. – С. 48–150.

10.Червінська Т.М. Впливи, що здійснюються БСК на режими в системах електроспоживання / В. Г. Аввакумов, Л. Б. Терешкевич, Т. М. Червінська // Матеріали III міжнародної науково-технічної конференції “Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах”. – Луцьк: Луцький національний технічний університет. – 2010. – С. 11–13.

11.Червінська Т.М. Дослідження роботи асинхронного двигуна при під'єднанні його до несиметричної напруги / Н. В. Терешкевич, Т. М. Червінська, С. В. Сорокун // Матеріали III міжнародної науково-технічної конференції “Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах”. – Луцьк: Луцький національний технічний університет. – 2010. – С. 187–190.

## АНОТАЦІЇ

**Червінська Т. М. Оптимальне керування реактивним навантаженням в умовах несиметрії напруг електричних мереж. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи. – Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, 2012.

Дисертацію присвячено розв'язанню наукової задачі оптимального керування реактивним навантаженням в умовах несиметрії напруг електричних мереж.

Проведено аналіз відомих наукових робіт, направлений на виявлення можливостей підвищення ефективності передавання електроенергії за рахунок удосконалення методів керування реактивним навантаженням. Показано, що ввімкнення БСК при керуванні реактивною потужністю, призводить до збільшення значення коефіцієнтів несиметрії напруг по зворотній і нульовій послідовностях та відхилення напруги, а в деяких випадках може супроводжуватись порушенням

вимог ГОСТ 13109-97 за відповідними параметрами.

Розроблено математичні моделі, які дозволяють визначити вектор керування реактивною потужністю за допомогою БСК, коли має місце несиметрія напруг. Моделі забезпечують допустимі значення коефіцієнтів несиметрії напруг та контролюють відхилення напруги в одній із фаз. Розроблено комп'ютерну модель системи керування реактивним навантаженням, що реалізує розроблені в дисертації математичні моделі та обчислювальні методи їх аналізу.

Ключові слова: реактивне навантаження, несиметрія напруг, батареї статичних конденсаторів, напруга зворотної послідовності, напруга нульової послідовності, втрати активної потужності.

**Chervinska T. Optimal reactive load control in voltage unbalance conditions of electric grid. – A manuscript.**

Thesis on reception scientific degree candidate of the technical sciences for profession 05.14.02 – Electric stations, grid and systems. – Vinnitsa National Technical University, Vinnytsia, 2012.

The Thesis is devoted to the scientific task decision of optimal reactive load control in voltage unbalance conditions of electric grid.

Research activities analysis for detection of effectiveness increase possibility at the expense of control modes by reactive load is developed. The magnitudes increase of voltage unbalance factors and voltage fluctuation when battery of static condensers were turned on for reactive load control is shown.

The mathematical models which allow to obtain solution vector for reactive power control by static condensers battery which is joined by star with zero scheme and is connected to node with asymmetric voltage and numerical method of its analysis are developed. The model of control system by reactive load which realize mathematical models and computing method of analysis are developed.

Keywords: reactive load, voltage unbalance, battery of static condensers, negative-sequence voltage, zero-sequence voltage, watt loss.

**Червинская Т. Н. Оптимальное управление реактивной нагрузкой в условиях несимметрии напряжений электрических сетей. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции, сети и системы. – Винницкий национальный технический университет, г. Винница, 2012.

Диссертация посвящена решению научной задачи оптимального управления реактивной нагрузкой в условиях несимметрии напряжений электрической сети.

Проведен анализ известных научных работ, направленный на выявление возможностей повышения эффективности передачи электроэнергии за счет усовершенствования методов управления реактивной нагрузкой и установлено, что действующие системы управления работают без учета такого распространенного в настоящее время явления, как несимметрия напряжения в электрических сетях.

Показано, что напряжения обратной и нулевой последовательности при оптимальном управлении реактивной нагрузкой с помощью БСК могут достичь

недопустимых значений. При этом возможны нарушения требований ГОСТ 13109-97 по отклонению напряжения, контролировать которое необходимо в одной из фаз. Сформулированы условия, при которых такие влияния БСК на электрический режим необходимо учитывать.

С целью обоснования критерия эффективности для задачи оптимального управления реактивной нагрузкой исследованы показатели, которыми принято оценивать несимметрию напряжений, при включении БСК для ряда характерных случаев. Из рассмотренных показателей только коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям (вычисляемые как отношение соответствующего напряжения к напряжению номинальному) и напряжения обратной и нулевой последовательностей отображают тенденцию изменения ущерба от несимметрии напряжений.

Предложено обосновывать максимальные уровни несимметрии напряжений, что необходимо для формирования соответствующих ограничений модели управления, по условию допустимого нагрева, например, асинхронного двигателя с учетом всех влияющих факторов. Это может потребоваться, например, для недогруженных либо перегруженных двигателей. Оперативное определение допустимого уровня напряжения обратной последовательности в реальном масштабе времени, с учетом относительного угла сдвига между токами прямой и обратной последовательностей, можно осуществить по разработанной методике, базирующейся на известном методе эквивалентных греющих потерь.

Оптимальное управление предполагается выполнять путем решения через определенные интервалы времени последовательности задач математического программирования с последующей реализацией полученных векторов управления. Такая реализация оптимального управления позволяет для принятия решения воспользоваться математической моделью, учитывающей наиболее весомые факторы, характерные для электрического режима, установившегося для данного момента времени. Для такого управления разработаны математические модели, позволяющие определить вектор управления реактивной мощностью при помощи БСК в случаях, если секции БСК соединены по схеме треугольника либо по схеме, обеспечивающей возможность переключения со схемы треугольника на звезду с нулем. Модели учитывают несимметрию напряжений в узле подсоединения БСК, позволяют обеспечивать нормированные значения коэффициентов несимметрии напряжений, а также контролировать отклонение напряжения по одной из фаз.

Разработан алгоритм расчета оптимального вектора управления, который позволяет учитывать как ограничения математической модели так и последствие. Алгоритм основан на методе динамического программирования с использованием рекуррентных соотношений Р. Беллмана.

Смоделирована система управления реактивной нагрузкой при помощи БСК, реализующая разработанные математические модели и вычислительные методы расчета вектора управления. Проведено компьютерное моделирование с использованием результатов экспериментального исследования. Компьютерное моделирование проведено как для случая, когда исходный режим характеризуется нарушением норм ГОСТ 13109-97 по показателям несимметрии и отклонения напряжения, так и случая, когда все параметры находятся в допустимых пределах.

Сделан сравнительный анализ результатов управления реактивной нагрузкой по разработанным моделям с учетом и без учета ограничений на значения показателей несимметрии и отклонения напряжения, а также проведен статистический анализ на соответствие требованиям ГОСТ 13109-97 обозначенных показателей. Получено экспериментальное подтверждение эффективности использования разработанных математических моделей для принятия управляющих решений, когда несимметрия либо отклонение напряжений приближаются к допустимым значениям. Показано, что эффективность оптимального управления реактивной мощностью возрастает при совместном использовании секций БСК с одинаковыми междуфазными емкостями и симметрирующих секций.

Сформулированы технические решения, обеспечивающее необходимый уровень компенсации реактивных нагрузок для наиболее характерных вариантов.

Ключевые слова: реактивная нагрузка, несимметрия напряжений, батареи статических конденсаторов, напряжение обратной последовательности, напряжение нулевой последовательности, потери активной мощности.

Підписано до друку 05.10.2011 р. Формат 29,7 x 421/4.

Наклад 100 прим. Зам. № 2009-169.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.

Вінницького національного технічного університету

м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-39