

УДК 621.316.761.2

**КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЯМИ ДИНАМІЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЗА НЕСИМЕТРИЧНИХ ШВИДКОЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ****М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, М. В. Никитенко, Ю. В. Лобода**

Вінницький національний технічний університет

вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна. E-mail: burbelom@ukr.net

Несиметрія навантажень електротехнологічних установок, яка має динамічний випадковий характер зміни, спричинює виникнення несиметрії напруг у трифазній мережі, що негативно відображається на роботі суміжних споживачів. Для таких установок передбачаються пристрої динамічної компенсації реактивної потужності на базі статичних тиристорних компенсаторів. Розглянуто питання підвищення швидкодії динамічної компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень споживачів. Описано математичні моделі та алгоритми для визначення параметрів несиметричних навантажень на основі теорії миттєвої потужності. Описано структурну схему пристрою динамічної компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень, що містить два контури регулювання. Виконано моделювання в середовищі Simulink пакету прикладних програм Matlab, за результатами якого зроблено висновок, що час запізнення пристрою динамічної компенсації реактивної потужності для контуру симетрування не перевищує 60 мс.

**Ключові слова:** симетрування навантажень, умовна потужність зворотної послідовності.

**УПРАВЛЕНИЕ УСТРОЙСТВАМИ ДИНАМИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ БЫСТРОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ****М. И. Бурбело, А. М. Кравец, М. В. Никитенко, Ю. В. Лобода**

Винницкий национальный технический университет

ул. Хмельницкое шоссе, 95, г. Винница, 21021, Украина. E-mail: burbelom@ukr.net

Несимметрия нагрузок электротехнологических установок, имеющая динамический случайный характер изменений, вызывает возникновение несимметрии напряжений в трехфазной сети, что отрицательно сказывается на работе смежных потребителей. Для таких установок предусматриваются устройства динамической компенсации реактивной мощности на базе статических тиристорных компенсаторов. Рассмотрены вопросы повышения быстродействия динамической компенсации реактивной мощности и симметрирования нагрузок потребителей. Описаны математические модели и алгоритмы для определения параметров несимметричных нагрузок на основе теории мгновенной мощности. Описана структурная схема устройства динамической компенсации реактивной мощности и симметрирования нагрузок, содержащая два контура регулирования. Разработанное устройство промоделировано в среде Simulink пакета прикладных программ Matlab, по результатам моделирования сделан вывод, что время запаздывания устройства динамической компенсации реактивной мощности по контуру симметрирования не превышает 60 мс.

**Ключевые слова:** симметрирование нагрузок, условная мощность обратной последовательности.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Установки динамічної компенсації реактивної потужності на базі статичних тиристорних компенсаторів (СТК) забезпечують одночасну оптимізацію низки параметрів якості електроенергії (відхилення, коливання та несиметрії напруги). Однією з проблем компенсації впливу швидкозмінних навантажень на мережу є забезпечення бажаної швидкодії СТК.

Розробці систем керування установками динамічної компенсації реактивної потужності присвячено багато наукових праць [1–5], в яких увага акцентується на необхідності підвищення їх швидкодії. Особливо складним є створення систем керування установками динамічної компенсації реактивної потужності із симетруванням навантажень.

Надзвичайно актуальним це є у випадку таких навантажень, як дугові сталеплавильні печі, установки контактного електрозварювання, що характеризуються значними швидкостями зміни параметрів режиму, а також таких джерел електричної енергії, як фотоелектричні станції, видача електроенергії яких здійснюється через уведені мережею інвертори, тому дослідження з підвищення точності й швидкодії систем керування установками динамічної компенсації реактивної потужності із симетруван-

ням навантажень є актуальними.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** У несиметричних режимах трифазні врівноважені навантаження характеризують комплексними повною потужністю та умовною потужністю зворотної послідовності, відповідно:

$$\underline{S} = P + jQ = 3\dot{U}_1 \dot{I}_1 + 3\dot{U}_2 \dot{I}_2; \quad (1)$$

$$\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2 = 3\dot{U}_1 \dot{I}_2 + 3\dot{U}_2 \dot{I}_1,$$

де  $\dot{U}_1$ ,  $\dot{U}_2$ ,  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$  – комплексні напруги та струми, відповідно, прямої та зворотної послідовностей;

$\dot{I}_1^*$ ,  $\dot{I}_2^*$  – комплексні спряжені струми відповідних послідовностей;  $P$ ,  $Q$  – активна та реактивна потужності;  $P_2$ ,  $Q_2$  – дійсна та умовна складові умовної потужності зворотної послідовності навантаження.

Трифазну систему із несиметричним навантаженням можна характеризувати миттєвими активною та реактивною потужностями, записаними із застосуванням ортогональної системи координат

$$\begin{aligned} p(t) &= 1,5(u_\alpha(t)i_\alpha(t) + u_\beta(t)i_\beta(t)); \\ q(t) &= 1,5(u_\alpha'(t)i_\alpha(t) + u_\beta'(t)i_\beta(t)), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $u_\alpha$ ,  $u_\beta$ ,  $i_\alpha$ ,  $i_\beta$  – ортогональні складові напруги та струму в системі координат Кларка:

$$\begin{aligned} u_\alpha(t) &= \frac{1}{3}(u_{AB}(t) - u_{CA}(t)); \quad u_\beta(t) = \frac{1}{\sqrt{3}}u_{BC}(t); \\ i_\alpha(t) &= i_A(t); \quad i_\beta(t) = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_B(t) - i_C(t)), \end{aligned}$$

штрихом позначено перетворення Гільберта ортогональної складової. З метою виключення перетворення Гільберта, яке забезпечує фазовий зсув усіх гармонічних складових на 90 електричних градусів і є складним за технічною реалізацією, може бути використано інтегральне перетворення.

Несиметричність трифазного навантаження доцільно характеризувати дійсною та уявною складовими миттєвої умовної потужності зворотної послідовності:

$$\begin{aligned} p_2(t) &= 1,5(u_\alpha(t)i_\alpha(t) - u_\beta(t)i_\beta(t)); \\ q_2(t) &= 1,5(u_\alpha'(t)i_\alpha(t) - u_\beta'(t)i_\beta(t)). \end{aligned} \quad (3)$$

Такий підхід відповідає теорії реактивної потужності С. Budeanu.

Для отримання складових потужностей можна також використати наявний фазовий зсув на 90 електричних градусів, який існує між ортогональними складовими напруги та струму:

$$p(t) = 1,5(u_\alpha(t)i_\alpha(t) + u_\beta(t)i_\beta(t)); \quad (4)$$

$$q(t) = 1,5(u_\beta(t)i_\alpha(t) - u_\alpha(t)i_\beta(t));$$

$$p_2(t) = 1,5(u_\alpha(t)i_\alpha(t) - u_\beta(t)i_\beta(t)); \quad (5)$$

$$q_2(t) = 1,5(u_\beta(t)i_\alpha(t) + u_\alpha(t)i_\beta(t)).$$

Такий підхід відповідає теорії С. Фрізе. Він включає необхідність застосування подвійного інтегрального перетворення, що істотно спрощує реалізацію швидкодіючих вимірювальних каналів.

Коливання складових миттєвої умовної потужності зворотної послідовності за умов несиметрії струму навантаження відбувається з частотою 100 Гц (рис. 1), однак кожна з них має постійну складову, яка й є інформативним параметром.

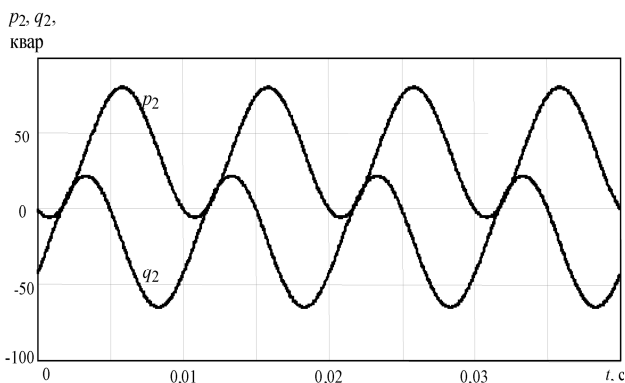


Рисунок 1 – Залежності складових пульсуючої потужності  $p_2(t)$ ,  $q_2(t)$

Для отримання інформації про активну та реактивну потужності, дійсну та уявну складові умовної потужності зворотної послідовності в [6, 7] застосовано підхід, що оснований на використанні інтегрування ортогональних миттєвих потужностей на ковзному інтервалі часу тривалістю півперіоду ( $T/2$ ):

$$P(t) = \frac{1,5}{T/2} \int_{t-T/2}^t p(t)dt; \quad (6)$$

$$Q(t) = \frac{1,5}{T/2} \int_{t-T/2}^t q(t)dt;$$

$$P_2(t) = \frac{1,5}{T/2} \int_{t-T/2}^t p_2(t)dt; \quad (7)$$

$$Q_2(t) = \frac{1,5}{T/2} \int_{t-T/2}^t q_2(t)dt,$$

де  $T$  – період напруги живлення.

Розглянуті вимірювальні перетворення покладено в основу системи керування розробленого у [8] пристрою динамічної компенсації реактивної потужності на базі СТК.

Пристрій динамічної компенсації реактивної потужності (рис. 2) складається з компенсатора (К), який містить приєднані до мережі паралельно трифазному навантаженню трифазні силові фільтри (ТСФ), кожен з яких виконаний із послідовно з'єднаних конденсаторів і фільтрових реакторів, увімкнених у зірку, та тиристорно-реакторну групу (ТРГ), яка складається з послідовно з'єднаних компенсуючих реакторів та зустрічно-паралельно ввімкнених тиристорів, з'єднаних у трикутник, а також із регулятора (Р), який складається з трьох датчиків напруги мережі (трансформатори напруги ТН), трьох датчиків струму мережі (трансформатори струму ТС1), трьох датчиків струму навантаження (ТС2), блока суматорів (БС), до складу якого входять три суматори (С), чотирьох перетворювачів потужності (ПП), датчика зони керування (ДЗК), блока корекції (БКор) та блока керування (БКер), у кожен із трьох каналів якого входить синхронізатор (СР), що виконує функцію фазового підлаштування частоти, генератор функцій (ГФ), схема порівняння (СП) задає для фази тиристорно-реакторної групи зону керування, за якої діапазон зміни сигналу відповідає діапазону зміни потужності тиристорно-реакторної групи, розподільник імпульсів (РІ) та два вихідних каскади (ВК), мікроконтролера (МК).

Система містить два контури керування. В основу роботи першого контуру керування за збуренням покладено безітераційний алгоритм керування реактивною потужністю фаз відповідно до виразів

$$Q_{BC} = \frac{1}{3}[Q - 2Q_2];$$

$$Q_{CA} = \frac{1}{3}[Q + Q_2 - \sqrt{3}P_2]; \quad (8)$$

$$Q_{AB} = \frac{1}{3}[Q + Q_2 + \sqrt{3}P_2].$$

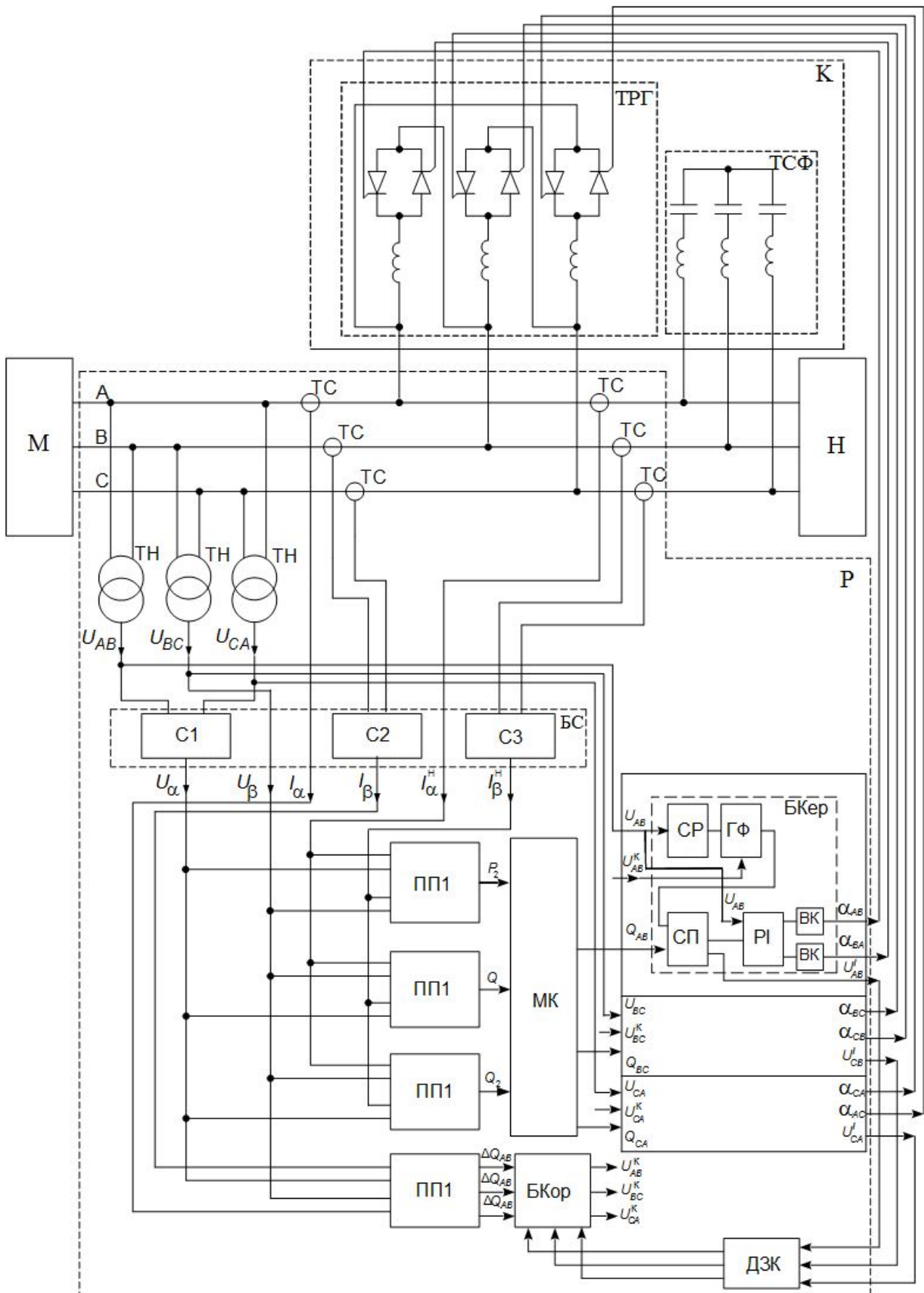


Рисунок 2 – Структурна схема пристрою динамічної компенсації реактивної потужності трифазного несиметричного навантаження

Другий контур керування за відхиленням базується на ітераційній процедурі корекції реактивної потужності з використанням значень  $\Delta Q_{AB}$ ,  $\Delta Q_{BC}$ ,  $\Delta Q_{CA}$ .

Ортогональні напруги та струми формуються з використанням трьох датчиків напруги мережі ТН, трьох датчиків струму мережі ТС1, першого та другого суматорів.

Пристрій працює таким чином. Із використанням трьох датчиків напруги мережі ТН, трьох датчиків струму мережі ТС1, трьох датчиків струму навантаження ТС2 та блока суматорів БС формуються ортогональні напруги та струми

$$u_{\alpha}(t) = \frac{1}{\sqrt{3}}(u_{AB}(t) - u_{CA}(t)); u_{\beta}(t) = u_{BC}(t);$$

$$i_{\alpha}(t) = i_A(t); i_{\beta}(t) = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_B(t) - i_C(t));$$

$$i_{\alpha}^H(t) = i_A^H(t); i_{\beta}^H(t) = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_B^H(t) - i_C^H(t)),$$

де  $u_{AB}(t)$ ,  $u_{BC}(t)$ ,  $u_{CA}(t)$  – лінійні напруги мережі, які вимірюють за допомогою датчиків напруги мережі ТН;  $i_A(t)$ ,  $i_B(t)$ ,  $i_C(t)$  – струми мережі, які вимірюють за допомогою датчиків струму мережі ТС1;  $i_A^H(t)$ ,  $i_B^H(t)$ ,  $i_C^H(t)$  – струми навантаження, які вимірюють за допомогою датчиків струму навантаження ТС2.

Керування пристроєм здійснюється згідно з інтегральними виразами реактивної потужності прямої послідовності навантаження та мережі, активної та реактивної умовних потужностей зворотної послідовності навантаження, які формуються на ковзному інтервалі часу тривалістю півперіоду напруги живлення. Формування активної та реактивної потужностей прямої послідовності, активної та реактивної умовних потужностей зворотної послідовності на ковзному інтервалі часу тривалістю півперіоду напруги живлення здійснюється перетворювачами потужності з використанням напруг і струмів ортогональної системи координат

$$P(t) = \frac{\sqrt{3}}{T} \int_{t-T/2}^t (u_{\alpha} i_{\alpha} + u_{\beta} i_{\beta}) dt;$$

$$Q(t) = \frac{\sqrt{3}}{T} \int_{t-T/2}^t (u_{\beta} i_{\alpha} - u_{\alpha} i_{\beta}) dt;$$

$$P_2(t) = \frac{\sqrt{3}}{T} \int_{t-T/2}^t (u_{\alpha} i_{\alpha} - u_{\beta} i_{\beta}) dt;$$

$$Q_2(t) = \frac{\sqrt{3}}{T} \int_{t-T/2}^t (u_{\beta} i_{\alpha} + u_{\alpha} i_{\beta}) dt.$$

Сигнал із трансформаторів напруги мережі ТН також надходить на синхронізатор СР та на перший вхід розподільника імпульсів РІ кожного з трьох каналів блока керування БКер. Вихід синхронізато-

ра СР з'єднаний із першим входом генератора функцій ГФ, на другий вхід якого подається сигнал із блока корекції БКор, вихід генератора функцій ГФ з'єднаний із першим входом схеми порівняння СП, сигнал із першого виходу якої подається на другий вхід розподільника імпульсів РІ, який через вихідні каскади ВК з'єднаний із відповідними керуючими електродами зустрічно-паралельно ввімкнених тиристорів тиристорно-реакторної групи ТРГ, сигнал із другого виходу схеми порівняння СП подається на датчик зони керування ДЗК, з якого надходить на другі входи блока корекції БКор, перші входи якого з'єднані з виходами перетворювача потужності ПП мережі.

Кожний силовий фільтр ТСФ компенсатора К шунтує струми вищих гармонік зі спектру навантаження й тиристорно-реакторного кола ТРГ тієї частоти, на яку він налагоджений. Водночас здійснюється генерування реактивної потужності основної гармоніки  $Q_{FKU}$ .

У компенсаторі К на компенсуючий реактор кожної фази тиристорно-реакторної групи ТРГ подається відповідна лінійна напруга при вмиканні відповідних тиристорів.

Реактивна потужність компенсатора залежить від кута керування  $\alpha$  тиристорів. Аналітична залежність амплітудних значень першої гармоніки струму має такий вигляд:

$$I_{1m}(\gamma) \approx \frac{I_m(0)}{\pi} \cdot [(\pi - 2\alpha) - \sin(\pi - 2\alpha)].$$

Регульовальна характеристика реактивної потужності може бути надана у вигляді:

$$Q_K(\alpha) = Q_{FKU} - \frac{Q(\alpha = 0)}{\pi} [(\pi - 2\alpha) - \sin(\pi - 2\alpha)].$$

З метою перевірки стійкості виконано моделювання другого контуру системи керування у середовищі Simulink пакету прикладних програм Matlab. Модель для дослідження несиметричних режимів вузла навантаження подано на рис. 3. Модель складається з джерела живлення мережі (М), навантаження (Н), регулятора (Р), який складається з вимірювальних перетворювачів напруги та струму, блоку багатоканального вимірювального перетворення потужностей, блоку формування потужностей фаз, блоку ПІ-регуляторів, системи імпульсно-фазового керування, компенсатора (К), виконаного на основі тиристорно-регульованого силового блоку установки.

Графіки перехідних процесів активної та реактивної потужностей, дійсної та уявної складових умовної потужності зворотної послідовності у разі використання ПІ-регуляторів після їх налаштування зображено на рис. 4, 5. Графіки перехідних процесів потужностей фаз симетричного пристрою на виході й вході ПІ-регуляторів наведено на рис. 6.

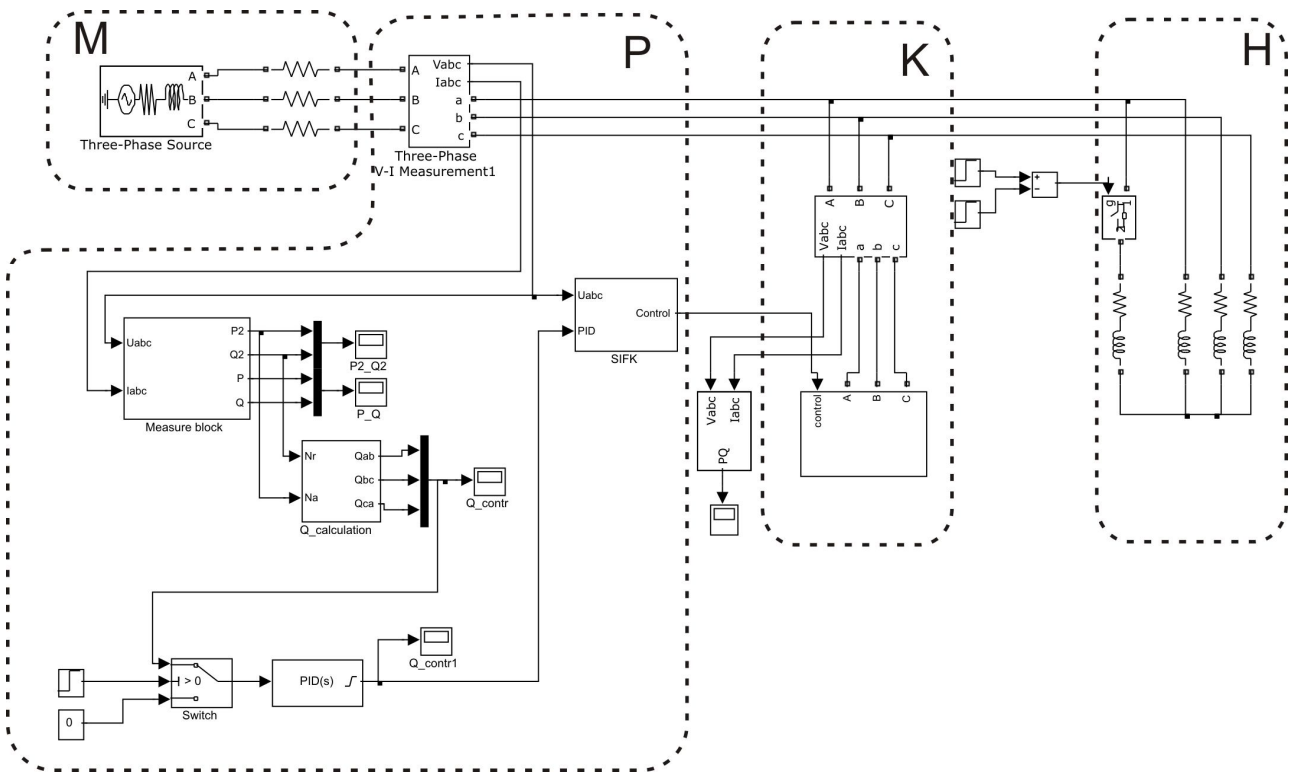


Рисунок 3 – Модель для дослідження несиметричних режимів

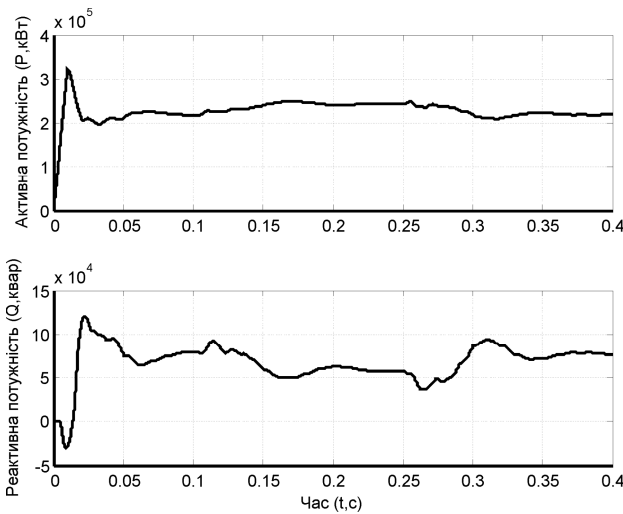


Рисунок 4 – Графіки перехідних процесів активної та реактивної потужностей під час симетрування навантаження з використанням ПІ-регуляторів

Моделювання проводились при накиді трифазного несиметричного навантаження в момент часу  $t=0$ , додатковому накиді однофазного навантаження в момент часу  $t=0,1$  с, скиді однофазного навантаження в момент часу  $t=0,25$  с.

Критерієм регулювання є мінімум умовної потужності зворотної послідовності  $S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2}$ .

Графіки перехідних процесів активної та реактивної потужностей у разі використання ПІ-регулятора для регулювання реактивної потужності за відхиленням наведено на рис. 7. Моделювання проводились при накиді трифазного навантаження

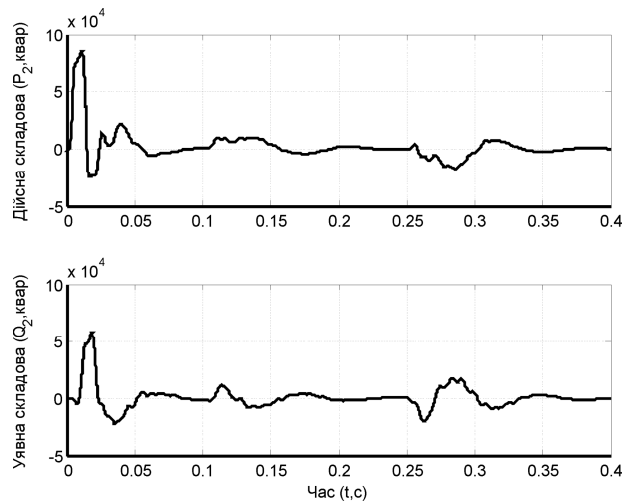


Рисунок 5 – Графіки перехідних процесів складових умовної потужності зворотної послідовності під час симетрування навантаження з використанням ПІ-регуляторів

в момент часу  $t=0$ , накиді додаткового трифазного навантаження в момент часу  $t=0,1$  с, скиді додаткового навантаження в момент часу  $t=0,25$  с. Критерієм регулювання є мінімум реактивної потужності.

З графіків видно, що застосування ПІ-регуляторів забезпечує достатньо високу швидкість регулювання. Однак наявність коливних процесів свідчить про необхідність блокування другого контуру системи керування на півперіоду напруги живлення при коротких замиканнях, різких накидах навантажень. Застосування такого блокування забезпечує процес регулювання із затримкою,

яка незначно перевищує півперіоду напруги живлення.

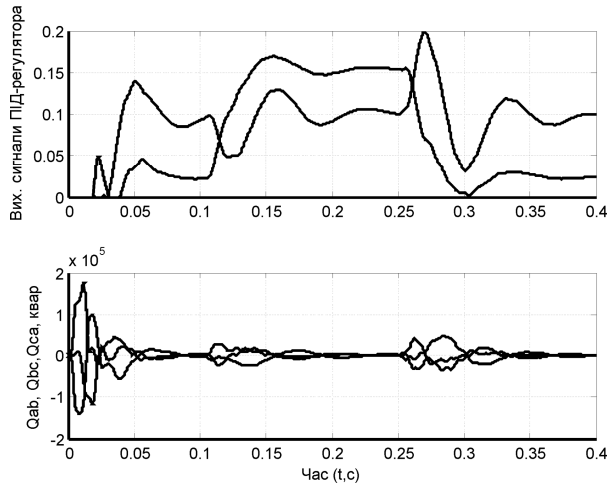


Рисунок 6 – Графіки перехідних процесів потужностей фаз симетрувального пристрою на виході й вході ПІД-регуляторів

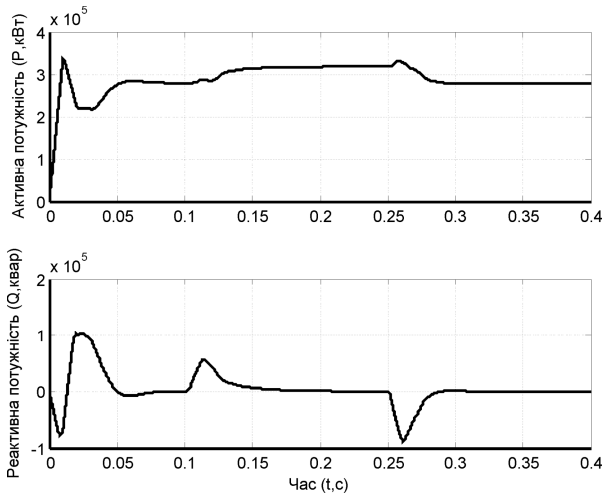


Рисунок 7 – Графіки перехідних процесів під час регулювання реактивної потужності за відхиленням з використанням ПІД-регулятора

Як видно з наведених рисунків, час запізнення установок динамічної компенсації реактивної потужності для контурів симетрування та регулювання реактивної потужності за відхиленням становить приблизно 60 мс.

**ВИСНОВКИ.** Розглянуто системи керування установками динамічної компенсації реактивної потужності. Проаналізовано вимірювальні канали сис-

тем керування для визначення складових умовної потужності зворотної послідовності. Показано, що оптимальне за швидкодією керування установками динамічної компенсації реактивної потужності можна здійснювати з використанням ПІД-регулятора з блокуванням другого контуру системи керування на півперіоду напруги живлення при коротких замиканнях, різких накидах навантажень. Час запізнення установок динамічної компенсації реактивної потужності з регулюванням за відхиленням становить приблизно 60 мс.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Матур Р.М. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 155 с.
2. Пономарёв В.А., Шитов А.Л., Черевань С.Н. Результаты внедрения тиристорного компенсатора реактивной мощности в систему электроснабжения металлургического предприятия // Промышленная энергетика. – 1987. – № 4. – С. 51–54.
3. Жураховский А.В., Перхач В.С., Стряпан В.Н. и др. Повышение экономичности электроснабжения угольных шахт при помощи статических тиристорных компенсаторов // Промышленная энергетика. 1987. – № 8. – С. 34–35.
4. Варецкий Ю.О. Компенсация несимметрии статическими компенсаторами в сетях живлення змінних навантажень // Технічна електродинаміка. – 1998. – № 2. – С. 66–70.
5. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г., Сокол Е.И. Перспективы применения полупроводниковых компенсаторов реактивной мощности в сетях электроснабжения // Технічна електродинаміка. – 2002. – № 1. – С. 37–42.
6. Бурбело М.Й., Мельничук С.М., Никитенко М.В. Вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 2. – С. 54–56.
7. Бурбело М.Й., Бабенко О.В., Никитенко М.В. Вимірювальні канали для установок динамічної компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень // Вісник НУ “Львівська політехніка” Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2010. – № 666. – С. 14–18.
8. Патент України 94181 МПК H02J 3/00. Пристрій для компенсації реактивної потужності трифазного навантаження / Бурбело М.Й., Никитенко М.В.; заявл. 19.02.10, опубл. 11.04.11, Бюл. № 7.

### CONTROL OF DEVICES DYNAMIC REACTIVE POWER COMPENSATION AT ASYMMETRICAL QUICK-CHANGE LOAD

**M. Burbelo, O. Kravets, M. Nykytenko, Yu. Loboda**

Vinnitsia National Technical University

vul. Khmelnytske shose, 95, Vinnitsya, 21021, Ukraine. E-mail: burbelom@ukr.net

Unbalance loads of electro-technological installations which has dynamic random character of change it cause unbalance voltages in three-phase network. This is negative impact on work of adjoining electrical customers. For these installations are provide for devices of dynamic reactive power compensation on the basis statical thyristor compensators. The paper addressed issues improve the performance of dynamic reactive power compensation and balancing of customers loads. The mathematical models and algorithms for determining the parameters of unbalanced loads on the

basis of the theory of instantaneous power are described. Also structural diagram of the device of dynamic reactive power compensation and balancing loads which has two loops control are described. This device are simulated in Simulink environment. As a result simulate come to conclusion what time delay of device of dynamic reactive power compensation not over 60 ms.

**Key words:** load balancing, conventional reverse sequence power.

## REFERENCES

1. Matur, R.M. (1987), *Sticheskie kompensatory dlya regulirovaniya reaktivnoy moshchnosti* [Statical compensators for control reactive power], Energoatomizdat, Moscow, Russia. [in Russian]
2. Ponomarev, V.A., Shilov, A.L. and Cherevan, S.N. (1987), "The results of introduction thyristor reactive power compensators to electrical system of metallurgical plant", *Promyshlennaya energetika*, no. 4. pp. 51–54. [in Russian]
3. Gurachovsky, A.V., Perhach, V.S., Stryapan, V.N. and oth. (1987), "Increased efficiency of power supply of coal mines with static thyristor compensators", *Promyshlennaya energetika*, no. 8, pp. 34–35. [in Russian]
4. Varetskyi, Yu.O. (1998), "Compensation by static compensators asymmetry in the variable load networks", *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 2, pp. 66–70. (in Ukrainian)
5. Domnin, I.F., Gemerov, G.G. and Sokol, E.I. (2002), "Prospects of application semiconductor reactive power compensators in power networks", *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 1, pp. 37–42. [in Russian]
6. Burbelo, M.J., Melnichuk, S.M. and Nykytenko, M.V. (2011), "Measurement of parameters of fast-change three-phase unbalanced load" *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 2, pp.54–56. (in Ukrainian)
7. Burbelo, M.J., Babenko, O.V. and Nykytenko, M.V. (2010), "Measuring channels for installations dynamic reactive power compensation and load balancing", *Visnyk NU "Lvivs'ka politehnika" Elektroenergetychni ta elektromehanichni systemy*, no. 666, pp.14–18. (in Ukrainian)
8. Burbelo, M.J. and Nykytenko, M.V. (2010), Device for compensation of reactive power of three-phase loads, Ukrainian Patent UA 94181. (in Ukrainian)