

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**ВОЙТЮК ЮРІЙ ПЕТРОВИЧ**

УДК 621.316.1

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ  
ПОТУЖНОСТІ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З  
РІЗКОЗМІННИМИ НЕСИМЕТРИЧНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2017

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті, Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор  
**Бурбело Михайло Йосипович**,  
Вінницький національний технічний університет,  
завідувач кафедри електротехнічних систем  
електроспоживання та енергетичного  
менеджменту.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Гриб Олег Герасимович**,  
Національний технічний університет  
„Харківський політехнічний інститут”,  
завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки  
енергосистем;

кандидат технічних наук, доцент  
**Соломчак Олег Володимирович**,  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу,  
доцент кафедри електропостачання та  
електрообладнання промислових підприємств.

Захист відбудеться “08” грудня 2017 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

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

Автореферат розісланий “6” листопада 2017 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

О. Б. Бурикін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Одним з основних і найбільш ефективних заходів зниження втрат та підвищення якості електричної енергії в розподільних мережах споживачів є компенсація реактивної потужності (КРП). Зокрема, досить часто використовують компенсаційні симетрувальні пристрої (СП) з пофазним керуванням, які забезпечують компенсацію реактивної потужності та симетрування навантажень.

Наявність на промислових підприємствах споживачів з різкозмінними несиметричними навантаженнями спричинює певні проблеми з їх електромагнітною сумісністю. Це пов'язано з тим, що такі споживачі створюють в електричних мережах коливання та динамічну несиметрію напруг. До таких споживачів відносять електротехнологічні установки (дугові печі, електрозварювальні установки), електропривод коливного руху (барабанні млини різного призначення, бурові установки, верстати качалки нафти, прокатні стани), тягові підстанції залізниць тощо.

За таких умов дотримання норм якості напруг в більшості випадків є неможливим без пристроїв динамічної КРП, призначених для зменшення коливань напруги, симетрування навантажень, особливо, – різкозмінних, які створюють коливання напруги в розподільній мережі в діапазоні частот 0,1,...,25 Гц. Для підвищення якості електроенергії використовують статичні тиристорні компенсатори. Точність та швидкодія їх роботи залежить від урахування статичних характеристик вузлів навантажень. Однак в наукових роботах, присвячених питанням керування пристроями динамічної КРП, задача врахування статичних характеристик вузлів навантажень недостатньо досліджена і залишається не вирішеною.

Тому науково-прикладне завдання, яке полягає у вдосконаленні процесу керування пристроями динамічної КРП за різкозмінних навантажень з урахуванням статичних характеристик вузлів навантажень, є актуальним.

Дисертаційне дослідження спрямоване на підвищення ефективності компенсаційних симетрувальних пристроїв, покращення рівня компенсації реактивної потужності та зменшення несиметрії різкозмінних навантажень.

**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 рамках фінансування держбюджетної науково-дослідної роботи № 22 Д 320 „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 пропускну здатності”, № державної

реєстрації 0109U004177, господарсько-договірної теми №2206 „Розробка рекомендацій з установки симетрувально-компенсуючих пристроїв в електричних мережах ВАТ „АК „Вінницяобленерго” з метою зниження втрат електроенергії та поліпшення якості електроенергії”. Автор брав участь у виконанні науково-дослідних робіт як виконавець.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення ефективності компенсації реактивної потужності в розподільних мережах з різкозмінними несиметричними навантаженнями.

Для досягнення цієї мети необхідно розв’язати такі задачі:

1. Проаналізувати методи та засоби підвищення ефективності компенсації реактивної потужності споживачів з різкозмінними несиметричними навантаженнями та систематизувати відомі теоретичні підходи;
2. Розробити методи підвищення ефективності компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень з урахуванням статичних характеристик вузлів навантажень;
3. Виконати моделювання систем керування пристроями динамічної компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень;
4. Розробити методи оцінювання ефективності компенсації реактивної потужності споживачів з несиметричними навантаженнями;
5. Практично реалізувати адаптивні системи керування компенсаційними симетрувальними пристроями з урахуванням статичних характеристик навантажень.

*Об’єкт дослідження.* Процес компенсації реактивної потужності в розподільних мережах з різкозмінними несиметричними навантаженнями.

*Предмет дослідження.* Методи та засоби підвищення ефективності компенсації реактивної потужності в розподільних мережах з різкозмінними несиметричними навантаженнями.

**Методи дослідження.** Під час роботи над дисертацією використовувались методи досліджень, які базувалися: на теорії електротехніки – при отриманні аналітичних виразів критеріїв та умов компенсації реактивної потужності; на теорії лінійної алгебри – при побудові математичних моделей керування симетрувальними пристроями; на методах математичного моделювання – при аналізі помилок симетрування навантажень з використанням отриманих математичних моделей симетрувальних пристроїв; на теорії математичної статистики – при проведенні статистичної обробки результатів експериментальних досліджень.

**Наукова новизна одержаних результатів і положень,** що виносяться на захист, полягає у вдосконаленні процесу керування пристроями компенсації реактивної потужності, що забезпечує підвищення ефективності розподільних мереж з різкозмінними несиметричними навантаженнями.

В роботі отримано такі наукові результати:

1. Вперше створено метод керування компенсаційно-симетрувальними пристроями з адаптацією інформативних параметрів за характером статичних характеристик вузлів навантажень, що забезпечує підвищення ефективності компенсації реактивної потужності споживачів з різкозмінними несиметричними

ми навантаженнями.

2. Удосконалено метод керування пристроями динамічної компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень за багатократної несиметрії навантажень та несиметрії напруги джерела живлення, який відрізняється адаптивним вибором інформативного параметра під час симетрування напруги, що забезпечує підвищення ефективності використання компенсаційно-симетрувальних пристроїв.

3. Дістав подальшого розвитку метод оцінювання ефективності компенсації реактивної потужності споживачів, який за рахунок використання двомодального бета-розподілу різкозмінних навантажень, враховує нерівномірності графіків навантажень, що дозволяє значно покращити обґрунтованість прийняття рішень.

**Практичне значення одержаних результатів** роботи полягає у розробці алгоритмів адаптивного керування компенсаційними симетрувальними пристроями. Їх впровадження сприятиме покращенню рівня компенсації реактивної потужності та зменшенню несиметрії напруги в розподільних мережах.

Одержані наукові результати а саме: систему керування регулятором реактивної потужності та алгоритм вимірювання інформативних параметрів впроваджено в ПП „Промавтоматика”, що підтверджено актом про впровадження від 7.11.2016 р. Результати роботи також використовуються у ВНТУ на кафедрі “Електротехнічні системи електроспоживання та енергетичний менеджмент” для підготовки фахівців за спеціальністю 141 – “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”, довідка про впровадження від 7.02.2017 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 такий: [1, 2] – обґрунтовано метод керування компенсаційними та симетрувальними установками з урахуванням статичних характеристик вузлів навантажень; [3–5, 11] – обґрунтовано метод керування симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії навантажень та несиметрії напруги джерела живлення; [6] – розроблено Matlab-модель для системи автоматичного керування СТК; [7] – отримано умови симетрування навантажень за допомогою СТАТКОМ; [12] – дістав подальшого розвитку метод оцінювання ефективності компенсації реактивної потужності споживачів; [8, 13] – проаналізовано методи стимулювання та контролю за електроспоживанням; [9, 14] – проаналізовано моделі втрат потужності для споживачів з різко змінним графіком навантажень; [10, 15, 16] – розроблено алгоритми керування компенсувальними пристроями.

**Апробація результатів дисертації.** Викладені в дисертації результати досліджень були апробовані на таких наукових конференціях: Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2011, 2013)» (м. Вінниця, 2011, 2013 рр.), Міжнародній науково-технічній конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2003, 2012)» (м. Вінниця - 2003, 2012 рр.).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковано в 16 наукових працях, в тому числі в 10 статтях в наукових фахових виданнях України, з них 7 входять

до наукометричних баз даних, 5 тезах науково-технічних конференцій. Отримано патент України на корисну модель.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації 167 сторінок, з яких основний зміст викладений на 111 сторінках друкованого тексту, містить 47 рисунки, 6 таблиць. Список використаних джерел складається з 108 найменувань. Додатки містять акти впровадження результатів роботи, програми розрахунків, список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів.

## 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, що виносяться на захист. Розглянуто практичне значення та впровадження одержаних результатів. Наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи і публікації.

**Перший розділ** дисертації присвячений огляду існуючих засобів КРП. Огляд методів та засобів КРП дозволяє зробити такі висновки:

1. Компенсація реактивної потужності вирішує дві взаємозв'язані задачі: підвищення економічності розподільних мереж та покращення якості електроенергії, яка поставляється споживачам. До таких показників в першу чергу відносяться відхилення, коливання та несиметрія напруг.

2. Встановлення засобів динамічної компенсації для стабілізації та симетрування напруги може підвищити статичну стійкість вузла навантаження.

3. В умовах різкозмінних навантажень для компенсації реактивної потужності доцільним є застосування СТК, однак їх швидкодія в багатьох випадках є недостатньою.

4. Статичні синхронні компенсатори СТАТКОМ значно підвищують швидкодію компенсації реактивної потужності, однак їх застосування в розподільних мережах є недостатнім.

Проведений аналіз літературних джерел вказує на необхідність розроблення критеріїв КРП з урахуванням впливу статичних характеристик вузлів навантажень.

У другому розділі обґрунтовано метод керування компенсаційними пристроями (КП), в основу якого покладено вибір інформативного параметра, який контролюється у вузлі навантаження мережі, з урахуванням статичних характеристик його реактивного навантаження  $Q = Q_H (U/U_H)^{k_Q}$ , тут  $Q, Q_H$  – фактичне та номінальне значення потужності навантаження;  $U, U_H$  – фактичне та номінальне значення напруги мережі;  $k_Q$  – характеристичний коефіцієнт реактивної потужності навантаження.

Для статичних характеристик реактивної потужності навантаження нульового степеня ( $k_Q = 0$ ) найкращим є використання реактивної потужності як інформативного параметра. Процес керування за відхиленням полягає у визна-

ченні необхідної провідності чи потужності КП, увімкнення якої забезпечує наперед задане значення вхідної реактивної потужності:

$$b = b^{(0)} + \frac{k_1}{U_H^2} (Q - Q_{\text{ВХ}}), \quad (1)$$

де  $b^{(0)}$  – початкове значення суми провідностей фаз КП на кроці ітераційного процесу керування;

$Q_{\text{ВХ}}$  – задане значення вхідної реактивної потужності після компенсації реактивної потужності ( $Q_{\text{ВХ}} = P \operatorname{tg} \varphi_{\text{ВХ}}$ , тут  $P$  – активна потужність навантаження,  $\operatorname{tg} \varphi_{\text{ВХ}}$  – задане значення коефіцієнта реактивної потужності);

$k_1$  – коефіцієнт корегування провідності фази КП за фактичним значенням напруги.

У разі статичних характеристик реактивної потужності навантаження першого степеня ( $k_Q = 1$ ) найкращим є використання реактивного струму навантаження як інформативного параметра. Тоді провідність КП:

$$b = b^{(0)} + \frac{3 \cdot k_1}{U_H} (\operatorname{Im} \dot{I}_1 - \operatorname{Im} \dot{I}_{1\text{ВХ}}), \quad (2)$$

де  $\dot{I}_1$  – комплексний струм прямої послідовності навантаження;

$\operatorname{Im} \dot{I}_1$  – реактивний струм прямої послідовності;

$\operatorname{Im} \dot{I}_{1\text{ВХ}}$  – задане значення вхідного реактивного струму прямої послідовності після компенсації реактивної потужності.

У разі статичних характеристик реактивної потужності навантаження другого степеня ( $k_Q = 2$ ) найкращим є використання реактивної провідності навантаження як інформативного параметра. Тоді провідність КП визначається за формулою:

$$b = b^{(0)} + k_1 (b_1 - b_{\text{ВХ}}), \quad (3)$$

де  $b_{\text{ВХ}} = g_1 \operatorname{tg} \varphi_{\text{ВХ}}$  – задане значення вхідної реактивної провідності після компенсації реактивної потужності,

$g_1 = \operatorname{Re}(\underline{Y}_1)$ ;  $b_1 = -\operatorname{Im}(\underline{Y}_1)$  – активна та реактивна провідності прямої послідовності навантаження  $\underline{Y}_1 = \dot{I}_1 / \dot{U}_1$ .

Застосування будь-якої із умов (1), (2) або (3) під час ітераційного процесу у разі керування за відхиленням приводить до повної компенсації реактивної потужності. Однак збіжність ітераційного процесу залежить від вибору інформативного параметра і статичних характеристик вузла навантаження.

Якщо статичні характеристики вузла навантаження відрізняються від вибраних інформативних параметрів виконується коректування прийнятих значень провідності за допомогою коефіцієнта  $k_1$  в діапазоні  $0,8 \dots 1,2$ .

Обґрунтовано метод керування симетрувальними пристроями (СП), в основу якого покладено вибір інформативного параметра, який контролюється у

вузлі навантаження мережі, з урахуванням статичних характеристик його реактивного навантаження. У разі  $K_Q = 0$  вектор провідностей фаз СП формується з використанням умовної потужності зворотної послідовності у вигляді:

$$\begin{aligned} b_{BC} &= \frac{k_1}{3 \cdot U_H^2} [(Q - Q_{ex}) - 2 \operatorname{Im} \underline{S}_2], \\ b_{CA} &= \frac{k_1}{3 \cdot U_H^2} [(Q - Q_{ex}) + \operatorname{Im} \underline{S}_2 - \sqrt{3} \operatorname{Re} \underline{S}_2], \\ b_{AB} &= \frac{k_1}{3 \cdot U_H^2} [(Q - Q_{ex}) + \operatorname{Im} \underline{S}_2 + \sqrt{3} \operatorname{Re} \underline{S}_2], \end{aligned} \quad (4)$$

де  $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2 = 3\dot{U}_1 \hat{I}_2$  – комплексна умовна потужність зворотної послідовності навантаження.

У разі  $k_Q = 1$  вектор провідностей фаз СП формується з використанням інформативного струму зворотної послідовності у такому вигляді (для зручності запису знак уявної частини струмів прямої та зворотної послідовностей береться протилежним):

$$\begin{aligned} b_{BC} &= \frac{k_1}{U_{\text{НОМ}}} [(\operatorname{Im} \dot{I}_1 - \operatorname{Im} \dot{I}_{1ex}) - 2 \operatorname{Im} \dot{I}_2], \\ b_{CA} &= \frac{k_1}{U_{\text{НОМ}}} [(\operatorname{Im} \dot{I}_1 - \operatorname{Im} \dot{I}_{1ex}) + \operatorname{Im} \dot{I}_2 - \sqrt{3} \operatorname{Re} \dot{I}_2], \\ b_{AB} &= \frac{k_1}{U_{\text{НОМ}}} [(\operatorname{Im} \dot{I}_1 - \operatorname{Im} \dot{I}_{1ex}) + \operatorname{Im} \dot{I}_2 + \sqrt{3} \operatorname{Re} \dot{I}_2], \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\operatorname{Im} \dot{I}_1, \operatorname{Im} \dot{I}_{1ex}$  – уявна частина струму прямої послідовності навантаження та її задане вхідне значення;

$\dot{I}_2$  – комплексний струм зворотної послідовності навантаження.

У разі  $k_Q = 1$  вектор провідностей фаз СП формується з використанням умовної провідності зворотної послідовності навантаження у такому вигляді:

$$\begin{aligned} b_{BC} &= \frac{k_1}{3} [(b_1 - b_{ex}) - 2b_2], \\ b_{BC} &= \frac{k_1}{3} [(b_1 - b_{ex}) + b_2 - \sqrt{3}g_2], \\ b_{BC} &= \frac{k_1}{3} [(b_1 - b_{ex}) + b_2 + \sqrt{3}g_2], \end{aligned} \quad (6)$$

де  $g_1 = \operatorname{Re}(\underline{Y}_1)$ ;  $b_1 = -\operatorname{Im}(\underline{Y}_1)$  – активна та реактивна провідності прямої послідовності навантаження  $\underline{Y}_1 = g_1 - jb_1 = \dot{I}_1 / \dot{U}_1$ ;

$g_2 = \operatorname{Re}(\underline{Y}_2)$ ;  $b_2 = -\operatorname{Im}(\underline{Y}_2)$  – активна та реактивна умовні провідності зворотної послідовності навантаження  $\underline{Y}_2 = g_2 - jb_2 = \dot{I}_2 / \dot{U}_1$ ;



$b_{\text{ex}} = g_1 \operatorname{tg} \varphi_{\text{ex}}$  – задане значення вхідної реактивної провідності після симетрування.

В табл. 1 наведено значення потужностей фаз СП по кроках регулювання за різних алгоритмів керування для навантаження характеристичні коефіцієнти якого  $k_P=0,6$ ,  $k_Q=2,3$ . Коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю  $K_{2U} = 2,9\%$ . Відхилення напруги  $\delta U = -9\%$ . Для всіх алгоритмів достатнім виявилось три кроки.

Таблиця 1 – Значення потужностей фаз СП по кроках регулювання

Алгоритм керування	Крок	Потужності фаз СП			Параметри	
		$Q_{BC}$ , квар	$Q_{CA}$ , квар	$Q_{AB}$ , квар	$\delta U$ , % -9,0	$K_{2U}$ , % 2,9
Потужність (4)	1 крок	288,7	375,2	135,1	-2,3	0,85
	2 крок	388,2	438,7	156,9	-0,6	0,13
	3 крок	398,8	444,1	155,2	-0,5	0,02
Струм (5)	1 крок	329,1	421,9	129,5	-1,6	0,47
	2 крок	396,6	445,1	150,8	-0,5	0,03
	3 крок	399,4	444,8	153,9	-0,5	0,003
Провідність (6)	1 крок	374,8	474,3	121,4	-0,7	0,59
	2 крок	400,8	443,0	150,5	-0,5	0,05
	3 крок	399,4	444,6	154,4	-0,5	0,004

За несиметрії напруг та багатократної несиметрії навантажень вектор провідностей фаз компенсаційних СП формується у такому вигляді:

$$b_{BC} = \frac{1}{3}[(b_1 - b_{\text{ex}}) - 2k_2 b_2],$$

$$b_{CA} = \frac{1}{3}[(b_1 - b_{\text{ex}}) + k_2 b_2 - \sqrt{3}k_2 g_2],$$

$$b_{AB} = \frac{1}{3}[(b_1 - b_{\text{ex}}) + k_2 b_2 + \sqrt{3}k_2 g_2],$$
(7)

де  $k_2$  – коефіцієнт, що характеризує ступінь симетрування навантажень.

Пропонується симетрування здійснювати в два етапи. На першому етапі як критерій використовується мінімум струму зворотної послідовності ( $k_2=1$ ),

На другому етапі в умови (7) вводиться додаткова провідність  $\Delta Y_2$

$$\underline{Y}'_2 = \underline{Y}_2 - \Delta Y_2 = \underline{Y}_2 - \frac{\dot{U}_{2B}^{(0)} / \dot{U}_{1B}^{(0)}}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_B},$$
(8)

На рис. 1 зображено залежності напруги і струму зворотної послідовності на другому етапі, відповідно, за несиметрії напруги джерела живлення ( $K_{2U}=0,6\%$ ) в процесі регулювання коефіцієнта  $k_2$  в умовах (7). Вигляд залежностей на другому етапі не змінюється за однакового та протилежного характерів несиметрії навантажень. Мінімум напруги зворотної послідовності досяга-

ється при  $k_2 \approx 1$ . При цьому струм зворотної послідовності дещо зростає. На другому етапі можливим є вибір компромісного значення коефіцієнта  $k_2$ , наприклад, в діапазоні  $k_2 = 0,5 \dots 0,8$  з метою зменшення втрат та необхідності дотримання вимог якості електроенергії.

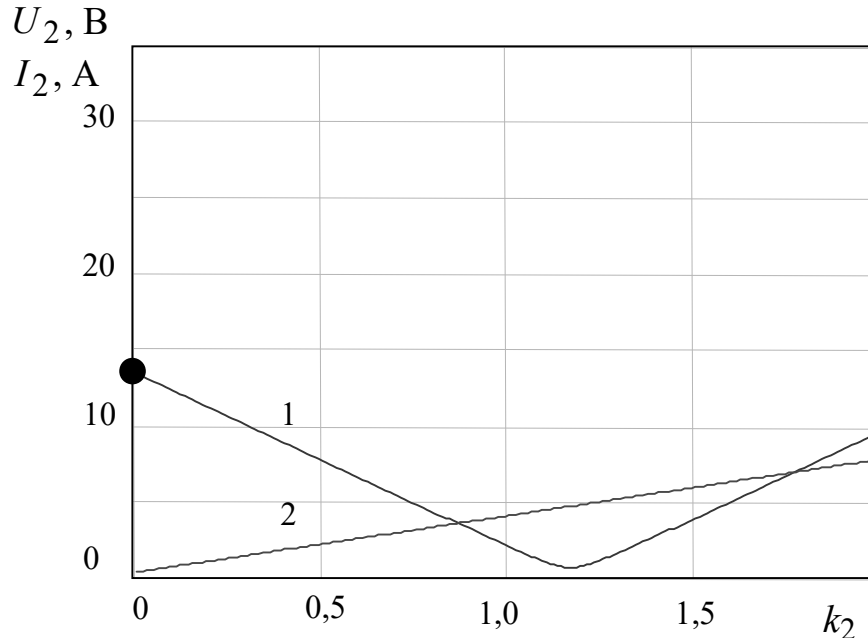


Рисунок 1 – Залежності напруги і струму зворотної послідовності за несиметрії напруги джерела та навантаження

Необхідно відмітити, що коректування інформативної провідності  $\underline{Y}'_2$  здійснюється за значенням коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності у вузлі встановлення СП з урахуванням комплексного опору ліній живлення вузла.

У третьому розділі для перевірки швидкодії та стійкості процесу компенсації реактивної потужності і одночасно симетрування навантажень за допомогою СТК виконано моделювання системи керування за відхиленням у середовищі Simulink пакету прикладних програм Matlab (рис. 2). Модель складається з джерела живлення 1, навантаження 2, системи автоматичного керування 3, яка містить блок вимірювального перетворення потужностей, блок ПІ-регулятора, систему імпульсно-фазового керування, а також з силового блоку установки 4. Основу системи автоматичного керування складає багатоканальний вимірювальний перетворювач потужностей (рис. 3). Для його реалізації використано підпрограму визначення ковзного інтеграла.

Залежності складників комплексної умовної потужності у разі керування за відхиленням наведено на рис. 4. З наведених залежностей видно, що керування за відхиленням забезпечує швидкодію регулювання із запізненням приблизно  $0,05 \dots 0,08$  с.

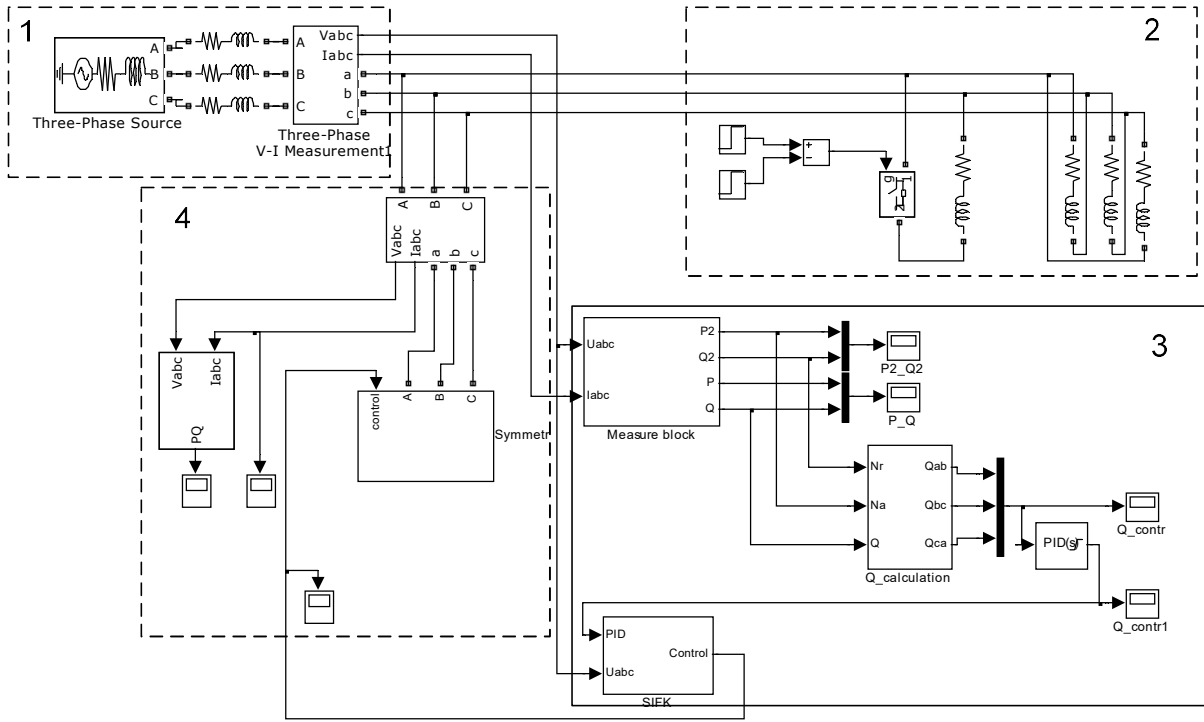


Рисунок 2 – Модель для дослідження установки динамічної компенсації реактивної потужності

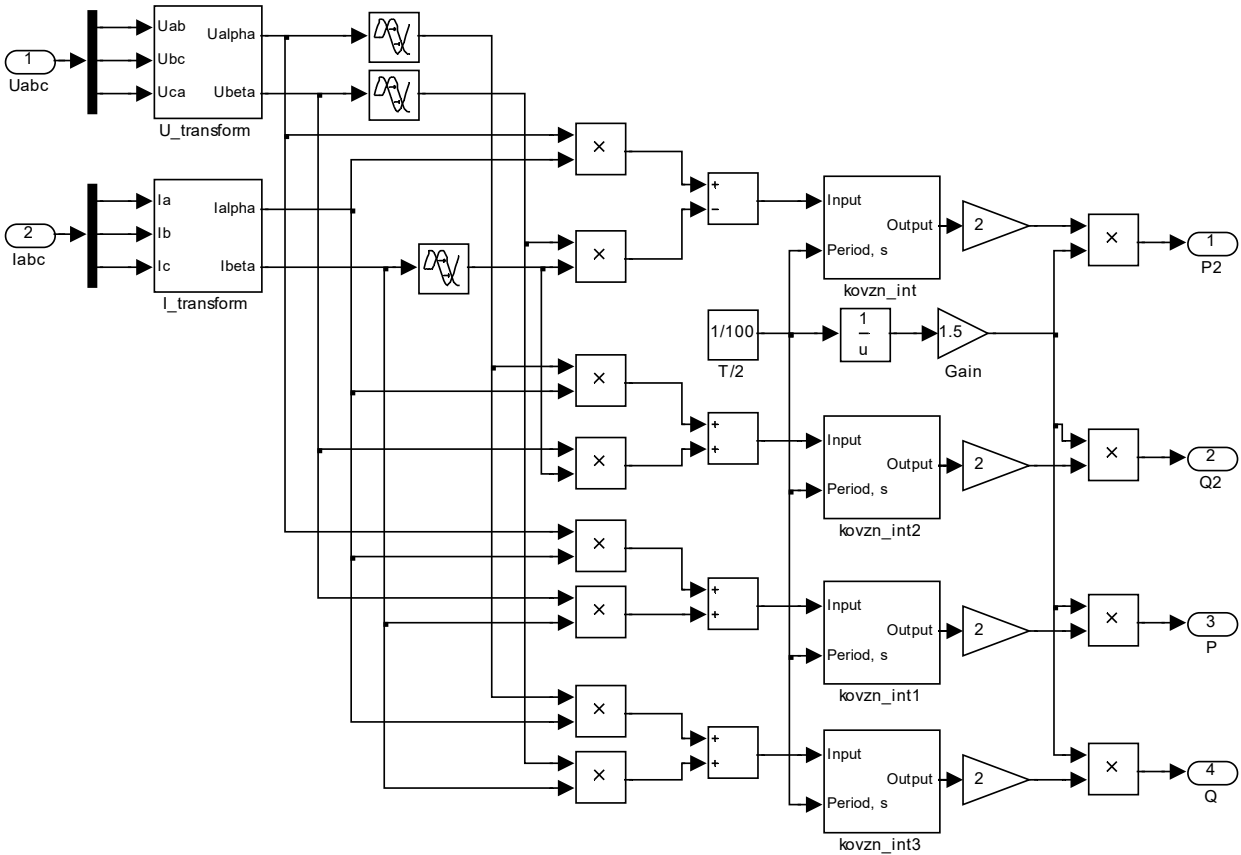


Рисунок 3 – Модель багатоканального вимірювального перетворювача потужностей

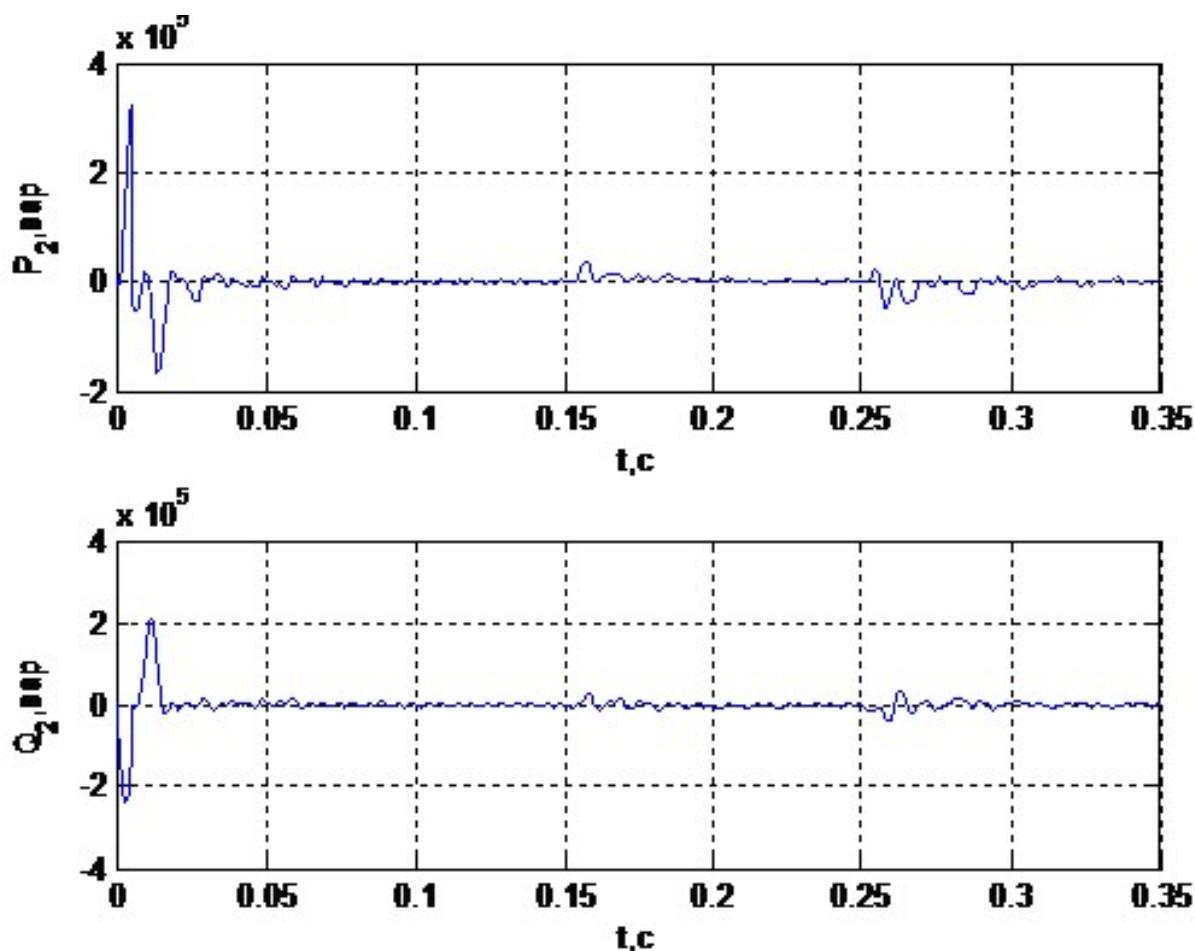


Рисунок 4 – Залежності складників комплексної умовної потужності зворотної послідовності

Однією з переваг СТАТКОМ є здатність генерувати струм будь-якої фази відносно напруги мережі за рахунок зміни величини і знаку реактивної потужності, яку спожито або видано в мережу, тобто він є швидкодіючим джерелом реактивної потужності індуктивного або ємнісного характеру.

Умови симетрування струмів за допомогою СТАТКОМ отримують з критеріїв повної або часткової компенсації реактивної складової струму прямої послідовності  $\dot{I}_1$  та обох складових струмів зворотної  $\dot{I}_2$  та нульової  $\dot{I}_0$  послідовностей навантаження:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -jk \operatorname{Im} \dot{I}_1 \\ -\dot{I}_2 \\ -\dot{I}_0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де комплексні струми фаз компенсатора  $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$  для зручності інтерпретації результатів орієнтовані відносно відповідних фазних напруг, матриця перетворення з метою орієнтації комплексних фазних струмів відносно напруг отримана з використанням матриці Фортеск'ю, другий рядок якої домножено на  $a$ , а третій – на  $a^2$ ;  $a = e^{j120^\circ}$  – фазовий оператор;  $k$  – ступінь компенсації реакти-

вної потужності.

В табл. 2 наведено результати розрахунку несиметричного режиму за наявності навантажень на двох фазах  $BC$  і  $CA$  і відсутності навантаження на фазі  $AB$ , а також значення компенсаційних струмів фаз, які повинні бути сформовані СТАТКОМ для симетрування навантажень за  $k=1$  та  $k=0$ .

Таблиця 2 – Струми навантаження і компенсаційні струми СТАТКОМ

Струми фаз	Струми навантаження, А	Розрахункові струми СТАТКОМ ( $k=1$ ), А	Розрахункові струми СТАТКОМ ( $k=0$ ), А
Струм фази $A$	$10,5-j63,3$	$34,4+j63,3$	$34,4+j4,9$
Струм фази $B$	$58,0-j26,1$	$-13,0+j26,1$	$-13,0-j32,3$
Струм фази $C$	$66,4-j85,8$	$-21,4+j85,8$	$-21,4+j27,4$

За  $k=1$  СТАТКОМ пофазно повністю компенсує реактивні складові струмів з одночасним вирівнюванням активних складових струмів навантаження. За  $k=0$  активні та реактивні складові струмів вирівнюються шляхом перерозподілення їх між фазами. В наведеному випадку СТАТКОМ споживає активну потужність з фази  $A$  і віддає в фази  $B$  та  $C$ . За  $k=0$  реактивна потужність споживається фазою  $B$  і віддається в фази  $A$  та  $C$ .

Алгоритми симетрування навантажень можна отримати з умов повної або часткової компенсації реактивної складової струму прямої послідовності  $I_1$  та обох складових струму зворотної послідовності  $I_2$  навантаження (за рівності нулю струму нульової послідовності компенсатора). У разі застосування трансформатора  $Y_0/Y-12$  для дійсної та уявної складових фазних струмів вторинної обмотки, які приведені до первинної обмотки, дістанемо:

$$\begin{aligned} I'_a &= -\operatorname{Re} \dot{I}_2 ; I''_a = -k \operatorname{Im} \dot{I}_1 - \operatorname{Im} \dot{I}_2, \\ I'_b &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \dot{I}_2 - \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Im} \dot{I}_2 ; I''_b = -k \operatorname{Im} \dot{I}_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Re} \dot{I}_2 + \frac{1}{2} \operatorname{Im} \dot{I}_2, \\ I'_c &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \dot{I}_2 + \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Im} \dot{I}_2 ; I''_c = -k \operatorname{Im} \dot{I}_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Re} \dot{I}_2 + \frac{1}{2} \operatorname{Im} \dot{I}_2, \end{aligned} \quad (10)$$

де  $k$  – ступінь компенсації реактивної потужності.

У разі застосування трансформатора  $Y_0/\Delta-11$  дійсна та уявна складові фазних струмів вторинної обмотки, які приведені до первинної обмотки, будуть:

$$\begin{aligned} I'_a &= -\frac{1}{2} \operatorname{Re} \dot{I}_2 - \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Im} \dot{I}_2 ; I''_a = -k \operatorname{Im} \dot{I}_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Re} \dot{I}_2 - \frac{1}{2} \operatorname{Im} \dot{I}_2, \\ I'_b &= \operatorname{Re} \dot{I}_2 ; I''_b = -k \operatorname{Im} \dot{I}_1 + \operatorname{Im} \dot{I}_2, \\ I'_c &= -\frac{1}{2} \operatorname{Re} \dot{I}_2 + \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Im} \dot{I}_2 ; I''_c = -k \operatorname{Im} \dot{I}_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Re} \dot{I}_2 - \frac{1}{2} \operatorname{Im} \dot{I}_2. \end{aligned} \quad (11)$$

В табл. 3 і табл. 4 наведено результати розрахунку несиметричного режиму за наявності навантажень на двох фазах  $BC$  і  $CA$  і відсутності навантаження на фазі  $CA$  ( $K_{2I} \approx 47\%$ ), а також значення компенсаційних струмів фаз, які по-

винні бути сформовані СТАТКОМ на вторинних обмотках трансформаторів  $Y_0/Y-12$  та  $Y_0/\Delta-11$  для симетрування навантажень і повної компенсації реактивної потужності, які розраховані відповідно за струмом  $\dot{I}_2$  і провідністю  $\underline{Y}_{21}$  за відносного опору мережі 0,02.

Таблиця 3 – Струми навантаження і компенсаційні струми СТАТКОМ, що розраховані за  $\dot{I}_2$

Фаза	Струми фаз не-симетричного навантаження, А	Струми фаз СТАТКОМ з трансформатором $Y_0/Y-12$ , А	Струми фаз СТАТКОМ з трансформатором $Y_0/\Delta-11$ , А
$A (a)$	10,5-j63,3	34,4+j63,3	21,4+j31,0
$B (b)$	58,0-j26,1	-13,0+j26,1	-34,4+j53,5
$C (c)$	66,4-j85,8	-21,4+j85,8	13,0+j90,7

Таблиця 4 – Струми навантаження і компенсаційні струми СТАТКОМ, що розраховані за  $\underline{Y}_{21}$

Фаза	Струми фаз не-симетричного навантаження, А	Струми фаз СТАТКОМ з трансформатором $Y_0/Y-12$ , А	Струми фаз СТАТКОМ з трансформатором $Y_0/\Delta-11$ , А
$A (a)$	10,5-j63,3	37,2+j62,2	22,5+j27,7
$B (b)$	58,0-j26,1	-14,7+j23,2	-37,2+j53,1
$C (c)$	66,4-j85,8	-22,5+j87,6	14,7+j92,1

З наведених таблиць випливає, що значення струмів фаз, що розраховані за різними умовами симетрування, в цілому зберігаючи характер, відрізняються. Це приводить до різної точності симетрування навантажень з використанням керування за збуренням. Причому точність симетрування залежить від характеру статичних характеристик вузлів навантажень.

Для споживачів, які характеризуються лінійними статичними характеристиками, кращим є алгоритм з використанням  $\dot{I}_2$ , за якого коефіцієнт зворотної послідовності струму  $K_{2I} \approx 0$ . Однак за квадратичних характеристик застосування цієї умови приводить до істотних помилок  $K_{2I} \approx 9\%$ . Алгоритм з використанням  $\underline{Y}_{21}$  забезпечує помилку  $K_{2I} \approx 4\%$  за квадратичних статичних характеристик навантаження.

У разі часткової компенсації реактивної потужності помилки симетрування, що зумовлені впливом статичних характеристик навантажень, зменшуються. Наприклад, якщо задати  $b_{ex} = 0,5 \cdot b_1$ , то застосування алгоритму з використанням  $\underline{Y}_{21}$  за квадратичних статичних характеристик навантаження з керуванням за збуренням забезпечує помилку  $K_{2I} \approx 1,5\%$ .

У четвертому розділі аналізуються показники ефективності КРП. Ефективність компенсації реактивної потужності (КРП) в даний час оцінюється за різними показниками. Необхідність в уточненні методики оцінювання ефективності компенсації і похибки розрахунків КРП викликана змінами в нормативних документах і в підходах до розрахунку КРП і керування БСК.

Річний економічний ефект від впровадження оптимальної КРП (включаючи керування БСК) для мереж підсистеми пропонується визначити за формулою:

$$E_p = (\dot{Q}_B)^t \cdot \dot{R}_B \cdot \dot{C} \cdot \dot{Q}_B (\Psi_\Phi^2 - \Psi_{\text{опт}}^2 \cdot \lambda_k) - (\dot{Q}_H)^t \cdot \dot{Z}_k \cdot (1 - \Psi_{\text{опт}}) + \Delta Z, \quad (12)$$

де  $\dot{Q}_B$  – вектор реактивних навантажень віток, Мвар;

$\dot{R}_B = \text{diag}(R_1 \dots R_n)$  – діагональна матриця активних опорів віток схеми заміщення мереж підсистеми, Ом;

$\dot{C} = \text{diag}(C_{01} / (K_0 \cdot U_1^2) \dots C_{0n} / (K_0 \cdot U_n^2))$  – діагональна матриця коефіцієнтів  $C_{0i} / (K_0 \cdot U_i^2)$ , тут  $C_{0i}$  – питома приведена вартість втрат активної потужності в  $i$ -й вітці схеми заміщення мереж підсистеми, грн./кВт;  $K_0$  – питома вартість БСК, грн./кВт;  $U_i^2$  – квадрат напруги  $i$ -го вузла, в.о.

$\Psi_\Phi$  – фактичне значення вхідної реактивної потужності в мережах підсистеми до компенсації (або до додаткової компенсації), у в. о.;

$\Psi_{\text{опт}}$  – те ж, оптимальне значення;

$\lambda_k$  – коефіцієнт, який враховує зменшення вартості втрат за рахунок зміни конфігурації графіка реактивного навантаження підсистеми після установки БСК, у в. о.

$\dot{Q}_H = (Q_{H1} \dots Q_{Hm})^t$  – вектор реактивних навантажень вузлів мереж підсистеми, Мвар;

$\dot{Z}_k = (Z_{k1} \dots Z_{kn})^t$  – вектор питомих витрат на встановлення БСК для генерування реактивної потужності джерелами у вузлах мережі підсистеми, тис. грн./Мвар;

$\Delta Z$  – економія зведених витрат при зменшенні навантаження трансформаторів і ЛЕП.

Відповідно питомий економічний ефект від впровадження КРП потужністю  $Q_k$  становитиме:  $\delta E_p = E_p / Q_k$ :

$$\delta E_p = \left[ (\dot{Q}_B)^t \cdot \dot{R}_B \cdot \dot{C} \cdot \dot{Q}_B (\Psi_\Phi^2 - \Psi_{\text{опт}}^2 \cdot \lambda_k) - (\dot{Q}_H)^t \cdot \dot{Z}_k \cdot (1 - \Psi_{\text{опт}}) + \Delta Z \right] / Q_k. \quad (13)$$

Питоме зниження втрат активної потужності (кВт/квар) або економічний еквівалент реактивної потужності:  $\delta P = \Delta P / Q_k$  після впровадження оптимальної компенсації в мережах підсистеми в розрахунковому режимі:

$$\delta P = \frac{10^{-3}}{U^2} \cdot (\dot{Q}_H)^t \cdot \dot{R} \cdot \dot{Q}_H \cdot (\Psi_\Phi^2 - \Psi_{\text{опт}}^2 \cdot \lambda_k) / Q_k, \quad (14)$$

де  $\dot{R}$  – матриця вузлових опорів мереж підсистеми.

Питоме зниження втрат активної електроенергії для мереж підсистеми (кВт·год./квар):  $\delta W_a = \Delta W_a / Q_k$  за рік після впровадження оптимальної КРП в мережах підсистеми:

$$\delta W_a = \frac{10^{-3} \cdot \tau_{\text{мр}}}{U^2} \cdot (\dot{Q}_H)^t \cdot \dot{R} \cdot \dot{Q}_H \cdot (\Psi_{\text{ф}}^2 - \Psi_{\text{опт}}^2 \cdot \lambda_k) / Q_k, \quad (15)$$

де  $\tau_{\text{мр}}$  – кількість годин максимальних втрат за реактивною потужністю, (величина  $\tau_{\text{мр}}$  визначається з графіка реактивного навантаження після встановлення КП).

Питоме зниження втрат активної електроенергії в мережі живлення за рік пропонується визначити за формулою:

$$\delta W'_a = \frac{10^{-3} \cdot Q_M^2 \cdot R_e \cdot \tau_{\text{мр}}}{U^2} \cdot (\Psi_{\text{ф}}^2 - \Psi_{\text{опт}}^2 \cdot \lambda_k) / Q_k, \quad (16)$$

де  $Q_M$  - максимальне реактивне навантаження, квар;

$R_e$  - еквівалентний активний опір мережі, Ом.

Термін окупності капітальних вкладень в БСК (років)

$$T_{\text{ок}} = \frac{E_p}{3_k \cdot Q_M \cdot (1 - \Psi_{\text{опт}})}. \quad (17)$$

Похибки розрахунків, як відомо, можуть бути розділені на дві групи – методичні та інформаційні. Перші зумовлені застосуванням неточних методів розрахунку, інші – неточністю вихідної інформації. У зв'язку з неможливістю точного визначення величин, що розраховуються, в [106] пропонується результат будь-якого інженерного розрахунку представляти в інтервальній формі (у вигляді мінімальних і максимальних можливих значень). Розрахунок і аналіз інтервалів невизначеності економічного ефекту від впровадження тих чи інших заходів дозволяє планувати до першочергової реалізації ті з них, які дають гарантований ефект в умовах невизначеності вихідної інформації.

Однак з огляду на відсутність, як правило, необхідної інформації і складності цих обчислень, пропонується похибку нових методів розрахунку КРП визначати по відношенню до базового (нормативного) методу, яким повинні користуватись проектні та експлуатаційні організації. Умовою зіставлення є сам об'єкт проектування з його вихідними даними.

Похибку нового методу (%) відносно нормативного пропонується визначити за формулами:

$$\gamma_{E_p} = \frac{E_{p.\text{пр}} - E_{p.\text{норм}}}{E_{p.\text{норм}}} \cdot 100; \quad \gamma_{\Delta P} = \frac{\Delta P_{\text{пр}} - \Delta P_{\text{норм}}}{\Delta P_{\text{норм}}} \cdot 100, \quad (18)$$

де  $E_{p.\text{пр}}$  – річний економічний ефект, який отриманий при розрахунку КРП для даного об'єкту методом, що пропонується;

$E_{p.\text{норм}}$  – теж, нормативним методом;



$\Delta P_{\text{пр}}$  – зниження втрат потужності в режимі максимальних навантажень при розрахунку КРП методом, що пропонується;

$\Delta P_{\text{норм}}$  – теж, нормативним методом.

Запропонований підхід може служити механізмом удосконалення нормативних методів розрахунку ефективності КРП розподільних мереж споживачів.

Для оцінювання втрат електроенергії для розподільних мереж, від яких живляться споживачі з різкозмінним навантаженням, пропонується модель графіків навантажень електротехнічних комплексів як випадкової величини, що має двомодальний бета-розподіл

$$f(P) = \frac{(\gamma + \eta + 1)! (P - P_{\min})^\gamma (P_{\max} - P)^\eta}{2 \cdot \gamma! \eta! (P_{\max} - P_{\min})^{\gamma + \eta + 1}} + \frac{(\gamma + \eta + 1)! (P - P_{\min})^\eta (P_{\max} - P)^\gamma}{2 \cdot \gamma! \eta! (P_{\max} - P_{\min})^{\gamma + \eta + 1}}. \quad (19)$$

На рис. 5 зображені функція щільності (крива 1) та інтегральна функція (крива 2) двомодального бета-розподілу при  $\gamma = 1$ ,  $\eta = 5$  ( $K_{\phi.a}^2 = 1,333$ ).

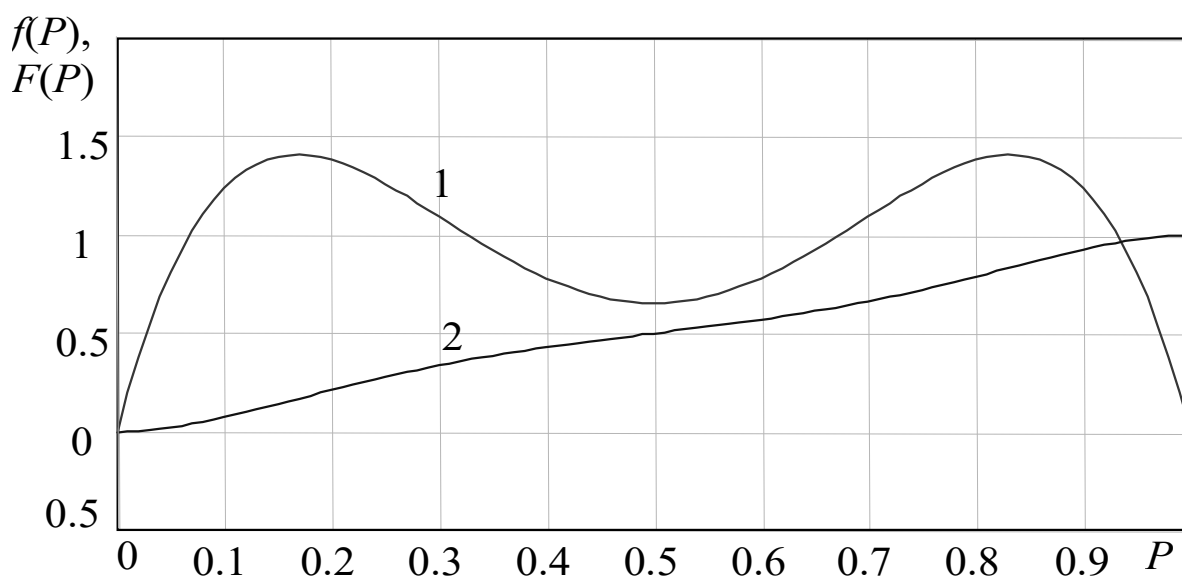


Рисунок 5 – Функції двомодального бета-розподілу

Виконано моделювання графіків навантаження з використанням двомодального бета-розподілу навантаження. Змінюючи значення параметрів бета-розподілу  $\gamma$ ,  $\eta$ , можна більш точно підібрати моделі річних графіків навантажень, а отже, і більш точно визначити втрати електроенергії.

Проаналізовано умови пуску двигунів, які визначаються параметрами електродвигунів (номінальною потужністю, кратністю пускового струму і кратністю пускового моменту), моментом інерції приводного механізму і двигуна, моментом навантаження на валу машини, параметрами живлячої мережі.

Запропоновано для оцінювання ефективності компенсації реактивної потужності враховувати втрати електроенергії в розподільних мережах, які зумовлені пусковими струмами двигунів і зниженням рівнів напруг.

У п'ятому розділі розроблено регулятор реактивної потужності, що призначений для мереж обленерго, де встановлені компенсуючі установки, забезпечуючи за допомогою автоматичного перемикача параметрів управління в зоні пік підтримку оптимального значення вхідної реактивної потужності у вузлах електричної мережі, а в зоні нічних провалів – підтримку рівня напруги у вузлах в заданих межах.

Практично реалізовано мікропроцесорний регулятор реактивної потужності РРПм-12. Регулятор оснащений точними вимірювальними перетворювачами струму і напруги з цифровою обробкою вимірюваних величин. У них досягнута висока точність визначення ефективного значення напруги, струму і коефіцієнта потужності. Прилад забезпечує обчислення основної гармонічної складової активного і реактивного струму за алгоритмом FFT. Подібним способом обчислюється і основна гармоніка напруги, чим забезпечується точність вимірювання і регулювання і в умовах істотного спотворення вищими гармоніками. При вимірюванні обчислюються значення гармонічних складових напруги і струму до 19 порядку. З цих величин обчислюється коефіцієнт нелінійних спотворень (THD) і коефіцієнт навантаження конденсаторів вищими гармоніками (CHL), які можна побачити на дисплеї. При цьому можна встановити допустимі рівні цих коефіцієнтів, при перевищенні яких регулятор відключить всі компенсуючі ступені і тим самим зможе запобігти їх пошкодженню. Крім того, найгірші значення зазначених величин записуються в пам'яті приладу для подальшого аналізу.

Частота напруги може лежати в межах від 43 до 67 Гц. Вимірювальний контур струму є універсальним для номінальних значень вторинного струму вимірювальних трансформаторів струму 1А або 5А

Спрощено багатоканальний вимірювальний перетворювач потужності без використання ковзного інтегрування. Виконано його моделювання і показано можливість його застосування в регуляторі реактивної потужності.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу вдосконалення процесу керування пристроями динамічної КРП за різкозмінних несиметричних навантажень, під час якого, на відміну від відомих методів, враховано статичні характеристики вузлів навантажень що забезпечує підвищення ефективності використання компенсаційно-симетрувальних пристроїв споживачів з різкозмінними несиметричними навантаженнями.

Основні теоретичні та експериментальні дослідження, які виконані в дисертаційній роботі, можуть бути узагальнені такими висновками:

1. Для керування БСК рекомендується використовувати реактивну потужність, реактивний струм або реактивну провідність навантаження, відповідно,

якщо статичні характеристики реактивної потужності навантаження мають характеристичний коефіцієнт нульового, першого або другого степеня.

2. Керування компенсаційними СП доцільно здійснювати з одночасним регулюванням симетричної та несиметричної частин СП, виключивши перекомпенсацію реактивної потужності, яка може виникнути після ввімкнення або збільшення потужності СП. Для коректування ступеня компенсації реактивної потужності пропонується використовувати квадрат відношення фактичної напруги до номінальної напруги.

3. За багатократної несиметрії навантажень та несиметрії напруги живлення керування компенсаційними СП доцільно здійснювати в два етапи за провідністю зворотної послідовності навантаження з адаптивним корегуванням провідності за значенням напруги зворотної послідовності в момент досягнення симетрії навантаження даного вузла за струмом зворотної послідовності.

4. Отримано умови керування СТАТКОМ з використанням комплексних струму та провідностей зворотної послідовності навантаження. Для керування СТАТКОМ можна використати різні умови керування за збуренням. Вибір тієї чи іншої умови залежить від статичних характеристик вузлів навантажень.

5. Удосконалено методику оцінювання ефективності впровадження КРП, в основу якої покладено визначення питомого економічного ефекту від впровадження БСК, питомого зниження втрат активної потужності (кВт/квар) або економічного еквіваленту реактивної потужності, питомого зниження втрат активної електроенергії для мереж підсистеми за рік після впровадження оптимальної КРП в мережах підсистеми.

6. Для врахування нерівномірності графіка навантаження під час теоретичних досліджень пропонується використовувати двомодальний бета-розподіл.

7. Розроблено та впроваджено систему керування регулятором реактивної потужності та алгоритм вимірювання інформативних параметрів. Результати роботи також використовуються у навчальному процесі ВНТУ на кафедрі “Електротехнічні системи електроспоживання та енергетичний менеджмент”.

Достовірність результатів теоретичного та експериментального дослідження є достатньо високою, оскільки теоретичне дослідження було проведено методом структурно-імітаційного моделювання шляхом автоматизованої цифрової обробки інформації у програмному комплексі «MATLAB».

Результати теоретичного дослідження підтверджуються отриманими результатами експериментального дослідження в межах допустимої розбіжності.

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

1. Бурбело М. Й. Оптимальне за швидкодією керування компенсуючими пристроями за різкого зниження напруги живлення [Текст]/ М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 4. – С. 115–118. – ISSN 1997-9266.

2. Бурбело М. Й. Оптимальне за швидкодією керування компенсаційними симетрувальними пристроями [Текст]/ М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк // Гірнична

електромеханіка та автоматика: Наук. - техн. зб. Дніпропетровськ НГУ. – 2012. – Вип. 88. – С. 3–5. – ISSN 0201-7814.

3. Бурбело М. Й. Керування симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії навантажень в розподільній мережі [електронний ресурс]/ М. Й. Бурбело, М. В. Девятко, Ю. П. Войтюк // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2012. – № 2. – Режим доступу:

[http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2012-2.files/12mjbden\\_ua.pdf](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2012-2.files/12mjbden_ua.pdf)

4. Бурбело М. Й. Алгоритм керування симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії в розподільних мережах [Текст]/ М. Й. Бурбело, М. В. Девятко, Ю. П. Войтюк // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 6. – С. 58–60. – ISSN 1607-7970.

5. Бурбело М. Й. Керування компенсаційно-симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії навантажень і несиметрії напруги джерела живлення [Текст]/ М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк, В. О. Кошкалда // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 1. – С. 67–70. – ISSN 1997-9266.

6. Керування установками динамічної компенсації реактивної потужності за несиметричних навантажень [Електронний ресурс]/ М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, Ю. П. Войтюк, Ю. В. Лобода // Наукові праці ВНТУ. – 2016. – № 4. – Режим доступу:

<https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/486/485>

7. Бурбело М. Й. Умови симетрування електричних навантажень розподільних мереж за допомогою СТАТКОМ [Текст]/ М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк, Ю. В. Лобода // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2. – С. 139–144. – ISSN – 1997-9266.

8. Рогальський Б. С. Системи і пристрої контролю електроспоживання та управління ним [Текст]/ Б. С. Рогальський, Ю. П. Войтюк // Вісник Харківського ДТУ сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2002.

9. Бурбело М. Й. Визначення втрат електроенергії в розподільних мережах енергопостачальних компаній / М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2011. – № 4. – С. 105–108.

10. Пристрій керування компенсувальними установками в електричних мережах АПК / Б. С. Рогальський, В. М. Непийвода, П. В. Сосенко, Ю. П. Войтюк // Вісник Харківського ДТУ сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2004. – Том 1.

11. Бурбело М. Керування компенсаційно-симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії навантажень і несиметрії напруги джерела живлення / М. Бурбело, Ю. Войтюк, В. Кошкалда // XI Міжнародна науково-технічна конференція „КУСС–2012”, 9 – 11 жовтня 2012 р., Вінниця, Україна: тези доп. / Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2012. – С. 143–144.

12. Рогальський, Б. С. Економічна ефективність оптимальної компенсації реактивної потужності в електричних мережах енергосистем та споживачів / Б. С. Рогальський, Ю. П. Войтюк, О. М. Нанака // Міжнародна науково-практична конференція „Динаміка наукових досліджень”, 28 жовтня – 4 листо-

пада 2002 р., Дніпропетровськ, Україна: тези доп. / Дніпропетровськ: Наука і освіта. - Дніпропетровськ, 2002. – С. 32-34.

13. Системи стимулювання енергозбереження і управління ним на промислових підприємствах / Б. С. Рогальський, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук, Ю. П. Войтюк // VII Міжнародна науково-технічна конференція «КУСС – 2003», 8 -11 жовтня 2003 р., Вінниця, Україна: тези доп./ Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2003.– С. 159-162.

14. Бурбело М. Й. Визначення втрат електроенергії в розподільних мережах споживачів / М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк, Л. М. Мельничук // I Міжнародна наукова конференція «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2011)», 25-27 жовтня 2011 року, Вінниця, Україна: тези доп./ Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2011. – С. 77.

15. Рогальський Б. С. Пристрій автоматичного управління компесувальними установками з врахуванням рівня напруги у вузлах мережі підприємства / Б. С. Рогальський, В. М. Непийвода, Ю. П. Войтюк // VII Міжнародна науково-технічна конференція «КУСС – 2003»,. 8 -11 жовтня 2003 р., Вінниця, Україна: тези доп./ Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2003.. – С. – 135–138.

16. Пат. 39727. Україна. МПК G 05 F 1/70. Регулятор реактивної потужності для мереж енергосистем [Текст]/ Б. С. Рогальський, Ю. П. Войтюк, Ю. В. Грицюк, Ю. А. Лисогор, І. П. Сосенко, (Україна). – № u200811788; Заявл. 03.10.20 08; Опубл. Бюл. № 5, 10.03.2009.

## АНОТАЦІЯ

*Войтюк Ю. П.* Підвищення ефективності компенсації реактивної потужності в розподільних електричних мережах з різкозмінними несиметричними навантаженнями. – 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. - Вінниця, 2017.

У дисертаційній роботі поставлена й вирішена актуальна задача підвищення ефективності компенсації реактивної потужності (КРП) шляхом удосконалення процесу керування пристроями динамічної КРП за різкозмінних навантажень з урахуванням статичних характеристик вузлів навантажень.

Обґрунтовано метод керування, в основу якого покладено вибір інформативного параметра з урахуванням статичних характеристик вузлів навантажень. Пропонується використання як інформативного параметра реактивної потужності навантаження, реактивного струму навантаження, реактивної провідності навантаження, відповідно, якщо статичні характеристики реактивної потужності навантаження мають характеристичний коефіцієнт нульового, першого або другого степеня.

За багатократної несиметрії навантажень та несиметрії напруги живлення пропонується керування компенсаційними симетрувальними пристроями здійснювати за комплексною умовною провідністю зворотної послідовності наван-

таження з корегуванням останньої за значенням напруги зворотної послідовності після симетрування навантаження даного вузла за струмом зворотної послідовності.

Для перевірки швидкодії та стійкості процесу компенсації реактивної потужності і одночасно симетрування навантажень за допомогою СТК виконано моделювання системи керування за відхиленням у середовищі Simulink пакету прикладних програм Matlab.

Проаналізовано умови симетрування струмів за допомогою СТАТКОМ з критеріїв повної або часткової компенсації реактивної складової струму прямої послідовності та обох складових струмів зворотної та нульової послідовностей навантаження. Значення струмів фаз, що розраховані за різними умовами симетрування, в цілому зберігаючи характер, відрізняються, що приводить до різної точності симетрування навантажень з використанням керування за збуренням. Причому точність симетрування залежить від характеру статичних характеристик вузлів навантажень.

Аналізуються показники ефективності КРП: річний та питомий економічний ефект, питома зниження втрат потужності та електроенергії в мережі підсистеми та мережі живлення, термін окупності пристроїв КРП. Запропоновано для оцінювання ефективності компенсації реактивної потужності різко змінних навантажень використовувати двомодальний бета-розподіл графіка навантаження (до компенсації). Запропоновано також для оцінювання ефективності компенсації реактивної потужності враховувати втрати електроенергії в розподільних мережах, які зумовлені пусковими струмами двигунів і зниженням рівнів напруг.

Розроблено регулятор реактивної потужності для мереж обленерго за алгоритмом: 1) в зоні «пік» – підтримання оптимального значення вхідної реактивної потужності у вузлах електричних мереж; 2) в зоні «нічного провалу» – підтримання рівня напруги у вузлах у заданих межах.

*Ключові слова:* компенсація реактивної потужності, несиметрія різкозмінних навантажень, розподільні електричні мережі, симетрувальні пристрої, критерії симетрування, статичні характеристики вузлів навантажень, статичні тиристорні компенсатори, статичні синхронні компенсатори.

## ABSTRACT

*Voitiuk Yu. P.* Efficiency improvement for reactive capacity in distributing electrical grid with abruptly variable non symmetric loadings. – The manuscript.

Thesis for PhD degree in technical sciences on the speciality 05.14.02 - electric power stations, networks and systems. – Vinnytsia National technical University. - Vinnytsia, 2017.

Thesis solves the urgent task of improvement the efficiency of compensation of reactive capacity by improving the process of controlling the devices of dynamic CRC at sharply variable loadings considering the statistic characteristics of load nodes.

There had been substantiated a method of control, based on choice of informative parameter, which is under control on the input of the network with the consideration of statistic characteristics of load nodes.

When using the reactive capacity of loading, reactive current of loading, reactive conductivity of loading as an informative parameter, the controlling process of deviation stipulates for the determination of the necessary conductivity of capacity of the capacity of compensational device, the switching of which ensures the optimal for the specific time interval zone of the day the value of the input reactive capacity, correspondingly, when the static characteristics of reactive capacity of loading have the characteristic coefficient of the zero, first or the second degree.

For all the algorithms three steps proved to be sufficient.

For multiple load asymmetry and voltage asymmetry, it is proposed to control compensating symmetrical devices to carry out the complex conditional conductivity of the inverse sequence of load with the correction of this conductivity by the value of the reverse sequence voltage at the moment of achieving the load balancing of this node by the current of the reciprocal sequence.

For the examination of the processing speed and stability of compensation process of reactive capacity and simultaneous symmetrising of loading by STC there had been made the simulation of the controlling system by deviation within the Simulink environment of Matlab.

There had been received the conditions for current symmetrising by STATKOM from the criteria of full or partial compensation of reactive partial of current of direct sequence and both partials of currents of reverse and zero sequence of loading.

The values of phase current, calculated as for the different conditions of symmetrising, preserving the character in general, are different. It leads to different accuracy of loading symmetrising with the use of control by excitation. The accuracy of symmetrising depends on character of static characteristics of load nodes.

The following factors of CRC efficiency are being analysed: annual and specific economic efficiency, specific decrease of discharge of capacity and electric energy in the network of subsystem and power supply network, the payback period of CRC. The determination of error in the suggested method relative to normative one may serve as a mechanism for improving the normative methods for CRP calculation.

There had been done the simulation of the annyal graph on persistency with the use of beta-distribution and two-modal beta-distribution of loading.

It is proposed to use the two-modal beta-distribution of load schedule (before compensate) for estimating the efficiency of compensation of reactive power of sharply varying loads.

To estimate the efficiency of reactive power compensation, it is proposed to take into account the losses of electricity in distribution networks, which are caused by starting currents of engines and reduction of voltage levels.

The reactive power regulator for the networks of oblenegos according is developed to the algorithm: 1) in the peak zone – maintaining the optimal value of the input reactive power at the nodes of the electric networks; 2) in the zone of night failures – support for the voltage level in the nodes in the specified limits.

Simplified multichannel measurement power converter without the use of sliding integration. The simulation is performed and the possibility of its application in the reactive power regulator is shown.

There had been developed a microprocessor regulator of reactive capacity. Regulator is equipped by the measuring current and voltage converters with digital processing of measuring values. They are of high accuracy in determining the efficient value of voltage, current and capacity factor. The device ensures for the calculation of the basic harmonic particle of active and reactive current by FFT algorithm. The alike method is used for the calculation of the main voltage harmonica, which ensures the accuracy in measuring and regulation even in conditions of significant transient distortion by higher harmonicas.

The obtained scientific results namely: the system of control of the reactive power regulator and the algorithm of measurement of informative parameters have been implemented in PE "Promavtomatika", which is confirmed by an act on implementation from 7.11.2016. The results of the work are also used in VNTU at the department "Electrotechnical systems of power consumption and energy management" for preparation of specialists in specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics", certificate of implementation from 7.02.2017.

*Key words:* compensation of reactive capacity, load unbalance, distributive electric networks, symmetrising devices, symmetrising criteria, static thyristor compensators, static synchronous compensators.

## АННОТАЦИЯ

*Войтюк Ю.П.* Повышение эффективности компенсации реактивной мощности в распределительных электрических сетях с резкопеременными несимметричными нагрузками. – На правах рукописи.

Диссертация на соискания научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 - электрические станции сети и системы. – Винницкий национальный технический университет. – Винница, 2017.

В диссертационной работе поставлена и решена актуальная задача повышения эффективности компенсации реактивной мощности (КРМ) путем усовершенствования процесса управления устройствами динамической КРМ при резкопеременных нагрузках с учетом статических характеристик узлов нагрузок.

Обоснован метод управления, в основу которого положен выбор информативного параметра, с учетом статических характеристик узлов нагрузки. Предлагается использование реактивной мощности нагрузки, реактивного тока нагрузки, реактивной проводимости нагрузки в качестве информативных параметров соответственно, если статические характеристики реактивной мощности нагрузки имеют характеристический коэффициент нулевой, первой или второй степени.

При многократной несимметрии нагрузок и несимметрии напряжения питания предлагается управление компенсационными симметрирующими устройствами выполнять по комплексной условной проводимости обратной последо-



вательности нагрузки с коррекцией последней по значению напряжения обратной последовательности после симметрирования нагрузки данного узла по току обратной последовательности.

Для проверки быстродействия и устойчивости процесса компенсации реактивной мощности и одновременного симметрирования нагрузок с помощью СТК выполнено моделирование системы управления по отклонению в среде Simulink пакета прикладных программ Matlab.

Проанализированы условия симметрирования токов при помощи СТАТКОМ по критериям полной или частичной компенсации реактивной составляющей тока прямой последовательности и обоих составляющих токов обратной и нулевой последовательности нагрузки. Значение токов фаз, которые рассчитаны по разным условиям симметрирования, сохраняя свой характер, отличаются друг от друга, что приводит к разной точности симметрирования нагрузок с использованием управления по возмущению. Причем точность симметрирования зависит от характера статических характеристик узлов нагрузок.

Анализируются показатели эффективности КРМ: годовой и удельный экономический эффект, удельное снижение потерь мощности и электроэнергии в сетях подсистем и питающих сетях, срок окупаемости устройств КРМ. Предложено для оценивания эффективности компенсации реактивной мощности резкопеременных нагрузок использовать двухмодальное бета-распределения графика нагрузок (до компенсации). Предложено так же для оценивания эффективности компенсации реактивной мощности учитывать потери электроэнергии в распределительных сетях, обусловленные пусковыми токами двигателей и снижением уровней напряжений.

Разработан регулятор реактивной мощности для сетей облэнерго по алгоритму: 1) в зоне «пик» поддержание оптимального значения входной реактивной мощности в узлах электрических сетей; 2) в зоне «ночного провала» – поддержание уровней напряжения в узлах в заданных пределах.

*Ключевые слова:* компенсация реактивной мощности, несимметрия резкопеременных нагрузок, распределительные электрические сети, симметрирующие устройства, критерии симметрирования, статические характеристики узлов нагрузок, статические тиристорные компенсаторы, статические синхронные компенсаторы.

Підписано до друку 02.11. 2017 р. Формат 29.7×42¼  
Наклад 100 прим. Зам. № 2017 – 387.  
Віддруковано в інформаційному редакційно – видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету.  
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.:59-87-38  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р