

УДК 621.316.7

М. Й. Бурбело, д. т. н.; О. М. Кравець, к. т. н.; Ю. П. Войтюк; Ю. В. Лобода

КЕРУВАННЯ УСТАНОВКАМИ ДИНАМІЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЗА НЕСИМЕТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Несиметрія навантажень електротехнологічних установок призводить до виникнення несиметрії напруг у трифазній мережі, що негативно впливає на роботу суміжних споживачів. Для таких установок передбачені пристрої динамічної компенсації реактивної потужності на базі статичних тиристорних компенсаторів. Розглянуто питання підвищення точності та швидкодії динамічної компенсації реактивної потужності із симетруванням навантажень споживачів. Описано математичні моделі та алгоритми для визначення параметрів несиметричних навантажень на основі класичної теорії потужностей. Описано структурну схему пристрою динамічної компенсації реактивної потужності із симетруванням навантажень, що містить один контур регулювання. За результатами моделювання в середовищі Simulink пакету прикладних програм Matlab, зроблено висновок, що час запізнення пристрою динамічної компенсації реактивної потужності не перевищує 0,05...0,08 с.

Ключові слова: компенсація реактивної потужності, симетрування навантажень, умовна потужність зворотної послідовності.

Вступ

Установки динамічної компенсації реактивної потужності на базі статичних тиристорних компенсаторів (СТК) забезпечують одночасну оптимізацію таких параметрів якості електроенергії, як відхилення, коливання та несиметрія напруг [1, 2]. Однією з проблем компенсації впливу швидкозмінних навантажень на мережу є забезпечення бажаної швидкодії компенсатора. Особливо актуальним це стає у випадку таких навантажень, як дугові сталеплавильні печі, електрозварювальні установки, гірничі електротехнічні комплекси з різкозмінним навантаженням.

В основу систем автоматичного керування СТК провідних світових виробників покладено метод керування з використанням обертової системи dq -координат. Миттєві складники струму прямої та зворотної послідовностей в обертовій системі dq -координат [3]

$$i_d = i_\alpha \cos(\omega t - \pi/2) + i_\beta \sin(\omega t - \pi/2); \quad i_q = i_\alpha \sin(\omega t - \pi/2) - i_\beta \cos(\omega t - \pi/2); \quad (1)$$

$$i_{d2} = i_\alpha \cos(\omega t - \pi/2) - i_\beta \sin(\omega t - \pi/2); \quad i_{q2} = i_\alpha \sin(\omega t - \pi/2) + i_\beta \cos(\omega t - \pi/2), \quad (2)$$

де i_d, i_q – миттєві струми прямої послідовності в системі dq -координат; i_{d2}, i_{q2} – миттєві струми зворотної послідовності в системі dq -координат; i_α, i_β – миттєві струми в системі $\alpha\beta$ -координат.

Система керування СТК, яка найчастіше трапляється в сучасних компенсаторах, є комбінованою і складається з прямого і зворотного каналів [4]. У прямому каналі розраховують ортогональні d - q складники струму навантаження для прямої і зворотної послідовностей, на основі яких за допомогою перетворення Штейнметца формуються провідності (потужності) фаз.

Ортогональні складники прямих і зворотних послідовностей струмів і напруг розраховують у блоках перетворення координат, для коректної роботи яких в умовах зміни фази і спотворення форми напруги на збірних шинах використовують блоки фазового автопідстроювання частоти. Вихідні сигнали потім проходять через цифрові фільтри змінного середнього, частота налаштування яких дорівнює 50 Гц.

Завдання на генерування додаткової реактивної потужності реалізовано в каналі

зворотного зв'язку, де формується коригувальний сигнал за різницею фактичної та заданої реактивних потужностей. Завдяки каналу зворотного зв'язку з пропорційно інтегровальним регулятором є можливість змінювати задане значення реактивної потужності на вторинній стороні силових трансформаторів як у бік споживання реактивної потужності з мережі, так і в бік її генерування.

Сигнали сумарних реактивних провідностей B проходять через блоки обмеження максимальної провідності тиристорно-реакторної групи (ТРГ) СТК і надходять на входи блоків нелінійностей, у яких реалізована зворотна регульовальна характеристика ТРГ $\alpha=f(B)$. Сигнали завдання на кути відкриття тиристорів передаються в систему імпульсно-фазового керування (СІФК), що виконана на основі вертикального принципу. На виході СІФК формуються імпульси, які подають на тиристорні ключі ТРГ.

Основним недоліком такої системи керування є необхідність використання блока фазової автопідстройки частоти, реалізація якого є досить складним завданням.

Інший підхід ґрунтується на використанні теорії миттєвої потужності. Однак реалізація таких систем керування пов'язана з проблемою зменшення коливань реактивної потужності фаз СТК, оскільки потрібно здійснювати керування за відхиленням одночасно трьох параметрами.

Ще один підхід ґрунтується на побудові систем автоматичного пофазового керування СТК за збуренням із використанням потужностей, визначених інтегруванням на половині періоду напруги живлення. У [5] для керування потужностями фаз ТРГ використані потужності, отримані з інтегральних виразів:

$$\begin{aligned} Q_{AB} &= \frac{2}{\sqrt{3}T} \int_{t_n}^{t_n+T/2} (u_{BC}i_A + u_{CA}i_B - u_{AB}i_C) dt; \\ Q_{BC} &= \frac{2}{\sqrt{3}T} \int_{t_n+T/6}^{t_n+2T/3} (u_{CA}i_B + u_{AB}i_C - u_{BC}i_A) dt; \\ Q_{CA} &= \frac{2}{\sqrt{3}T} \int_{t_n+T/3}^{t_n+5T/6} (u_{AB}i_C + u_{BC}i_A - u_{CA}i_B) dt, \end{aligned} \quad (3)$$

де t_n – момент максимуму півхвилі лінійної напруги u_{AB} ; i_A , i_B , i_C – миттєві струми фаз навантаження або мережі.

Недоліком цього методу керування є недостатньо висока швидкодія та точність, оскільки вимірювання проводять один раз на періоді напруги живлення.

У [6] розроблено систему автоматичного керування СТК, яка складається з двох контурів: компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень. В основу роботи першого контуру керування за збуренням покладено алгоритм поточного керування реактивною потужністю фаз СТК відповідно до формул

$$\begin{aligned} Q_{AB}(t) &= \frac{1}{3} [Q(t) + Q_2(t) + \sqrt{3}P_2(t)]; \\ Q_{BC}(t) &= \frac{1}{3} [Q(t) - 2Q_2(t)]; \\ Q_{CA}(t) &= \frac{1}{3} [Q(t) + Q_2(t) - \sqrt{3}P_2(t)], \end{aligned} \quad (4)$$

де $Q(t)$, $P_2(t)$, $Q_2(t)$ – поточні значення реактивної потужності, дійсного і уявного

складників умовної потужності зворотної послідовності навантаження відповідно.

Другий контур керування за відхиленням ґрунтується на процедурі корекції реактивної потужності ΔQ з мережі.

Отримання поточних значень активної та реактивної потужностей, дійсного й уявного складників умовної потужності зворотної послідовності навантаження здійснюється на ковзному інтервалі часу тривалістю, що дорівнює половині періоду ($T/2$), із застосуванням ортогональної системи $\alpha\beta$ -координат

$$P(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^t (u_{\alpha} i_{\alpha} + u_{\beta} i_{\beta}) dt; \quad Q(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^t (u_{\beta} i_{\alpha} - u_{\alpha} i_{\beta}) dt; \quad (5)$$

$$P_2(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^t (u_{\alpha} i_{\alpha} - u_{\beta} i_{\beta}) dt; \quad Q_2(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^t (u_{\beta} i_{\alpha} + u_{\alpha} i_{\beta}) dt, \quad (6)$$

де u_{α}, u_{β} – миттєві напруги в системі $\alpha\beta$ -координат.

У [7] виконано дослідження швидкодії контуру системи автоматичного керування СТК у разі симетрування навантажень за умовами

$$Q_{AB}(t) = \frac{1}{3} [Q_2(t) + \sqrt{3}P_2(t)]; \quad Q_{BC}(t) = \frac{1}{3} [-2Q_2(t)]; \quad Q_{CA}(t) = \frac{1}{3} [Q_2(t) - \sqrt{3}P_2(t)] \quad (7)$$

і окремо компенсації реактивної потужності з використанням ПІ-регулятора в контурі керування за відхиленням.

Роздільне дослідження симетрування й компенсації не дає повного уявлення про ефективність системи автоматичного керування СТК. Недоліком також є використання потужностей (5), (6), які в багатьох випадках не забезпечують достатню точність процесу симетрування.

Мета роботи полягає в дослідженні можливості підвищення точності та швидкодії компенсації реактивної потужності і симетрування навантажень за допомогою СТК одночасно.

Обґрунтування результатів дослідження

Із метою підвищення точності та швидкодії доцільним є застосування інформативних параметрів, визначених на основі класичної теорії потужностей. Згідно з класичною теорією потужностей [8] трифазну систему з несиметричним навантаженням можна характеризувати активною та реактивною потужностями й умовними потужностями зворотної послідовності [9]:

$$P(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^t (u_{\alpha} i_{\alpha} + u_{\beta} i_{\beta}) dt; \quad Q(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^t (u_{\alpha} i'_{\alpha} + u_{\beta} i'_{\beta}) dt; \quad (8)$$

$$P_2(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^t (u_{\alpha} i_{\alpha} - u_{\beta} i'_{\beta}) dt; \quad Q_2(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^t (u'_{\alpha} i_{\alpha} + u_{\beta} i'_{\beta}) dt, \quad (9)$$

де штрихом позначено операцію фазового зсуву на -90 ел. градусів. Такий підхід дещо ускладнює реалізацію вимірювальних перетворювачів потужності, однак зменшує коливання на виході перетворювачів складників реактивної та комплексної умовної потужностей, що може забезпечити підвищення швидкодії системи завдяки можливості збільшення коефіцієнта інтегрування ПІ-регулятора.

Для визначення швидкодії та аналізу стійкості процесу компенсації реактивної потужності і одночасно симетрування навантажень за допомогою СТК виконано моделювання системи

керування в середовищі *Simulink* пакету прикладних програм *Matlab*. Модель для дослідження несиметричних режимів вузла навантаження подано на рис. 1. Модель складається з джерела живлення 1, навантаження 2, системи автоматичного керування 3, яка містить блок вимірювального перетворення потужностей, блок ПІ-регуляторів, систему імпульсно-фазового керування, а також із силового блока установки 4.

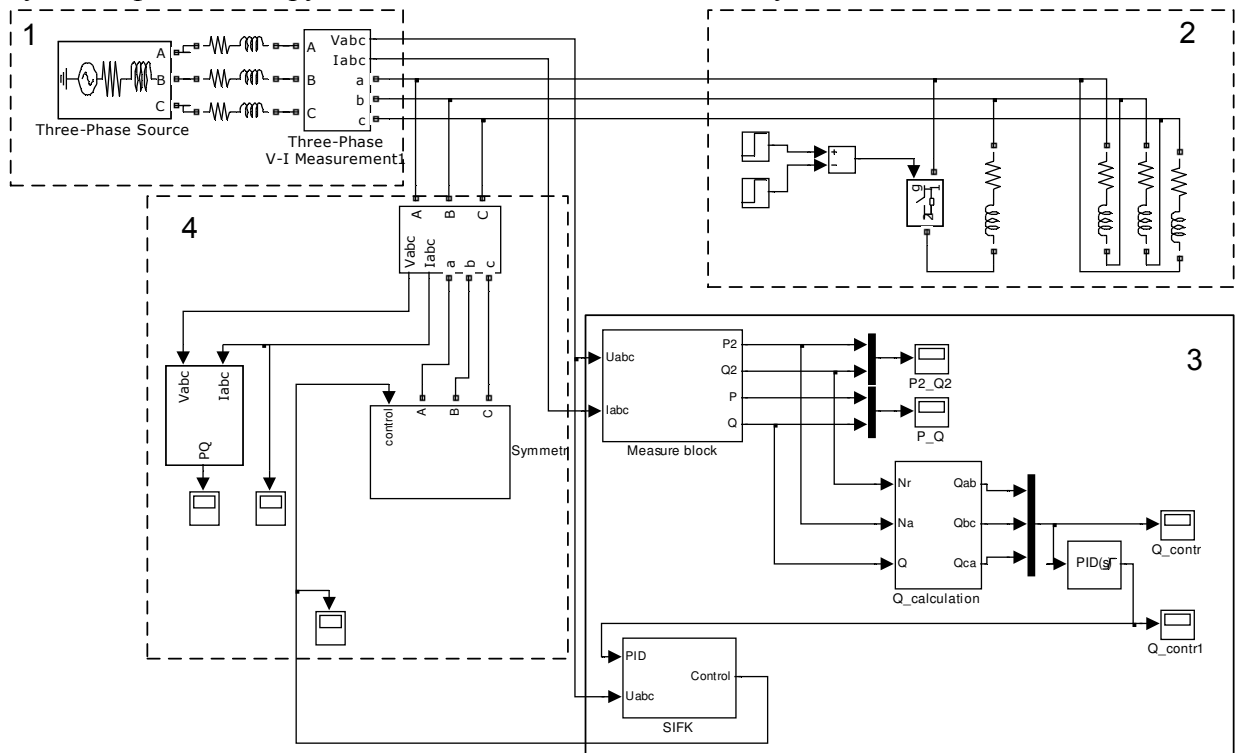


Рис. 1. Модель для дослідження установки динамічної компенсації реактивної потужності

Залежності активної та реактивної потужностей у вузлі навантаження під час компенсації та симетрування в разі використання ПІ-регулятора після його налаштування наведено на рис. 2. Залежності складників комплексної умовної потужності зображено на рис. 3. Залежності потужностей фаз СТК зображено на рис. 4. Моделювання проводили для випадку ввімкнення трифазного несиметричного навантаження в момент часу $t=0$, накиду додаткового однофазного навантаження в момент часу $t=0,15$ с та його скиданні в момент часу $t=0,25$ с.

Критерієм регулювання є мінімум реактивної потужності та мінімум умовної потужності зворотної послідовності. У цьому випадку умови компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень мають вигляд (4).

Комплексні потужності фаз трифазного несиметричного навантаження: $\underline{S}_{AB} = 100 + j50$ кВ·А; $\underline{S}_{BC} = 120 + j60$ кВ·А; $\underline{S}_{CA} = 120 + j60$ кВ·А, додаткове однофазне навантаження $\underline{S}_{AB} = 30 + j30$ кВ·А (параметри навантаження зведені до напруги 10,0 кВ). Статичні характеристики навантаження в цьому випадку мають квадратичну залежність потужностей від напруги у вузлі мережі (активне і реактивне навантаження в моделі подані опорамі).

На першій і третій ділянках часових залежностей (рис. 4) компенсацію реактивної потужності та симетрування навантажень в усталеному режимі забезпечують такі значення потужностей фаз СТК: $Q_{AB} = 47,3$ квар; $Q_{BC} = 45,2$ квар; $Q_{CA} = 68,2$ квар, на другій ділянці необхідні значення потужностей фаз СТК в усталеному режимі такі: $Q_{AB} = 75,8$ квар;

$Q_{BC} = 62,3$ квар; $Q_{CA} = 50,4$ квар. Відносні значення потужностей фаз СТК на рис. 4 визначені відносно сумарної потужності СТК 300 квар.

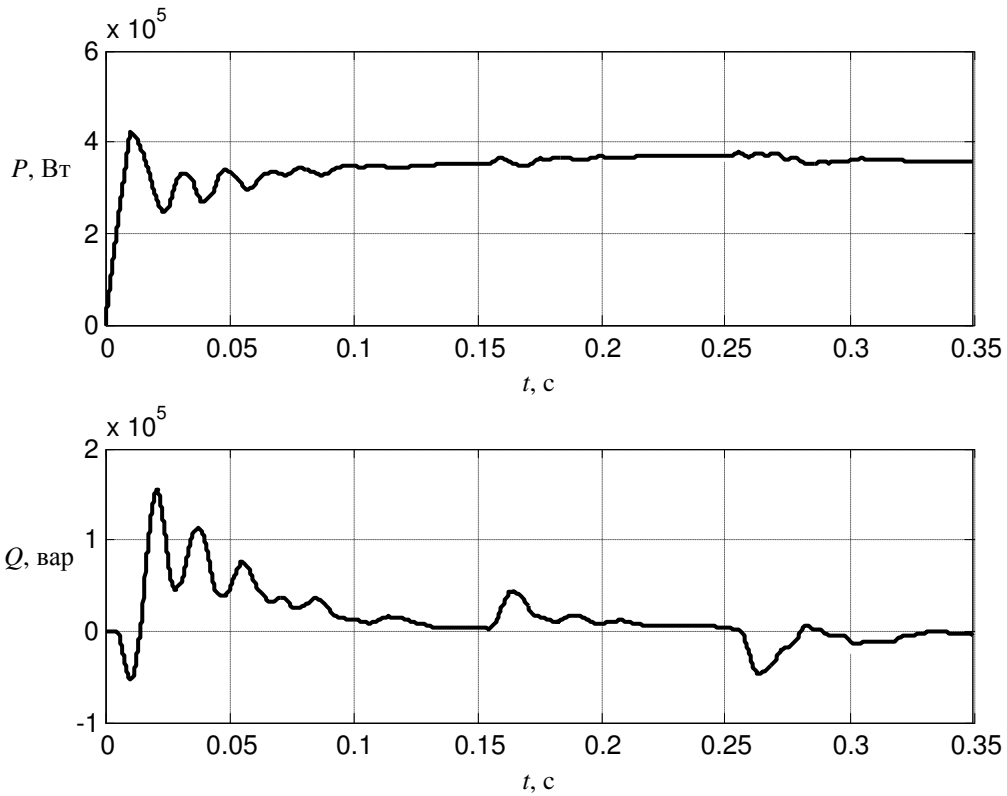


Рис. 2. Залежності активної та реактивної потужностей

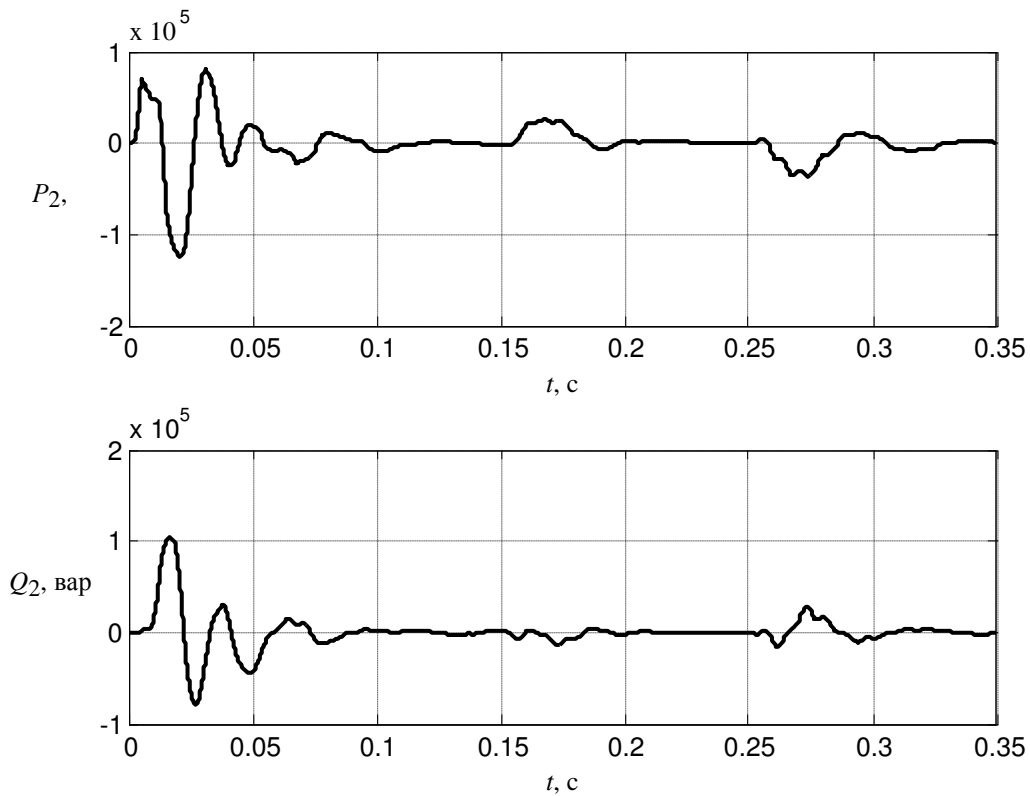


Рис. 3. Залежності складників комплексної умовної потужності зворотної послідовності

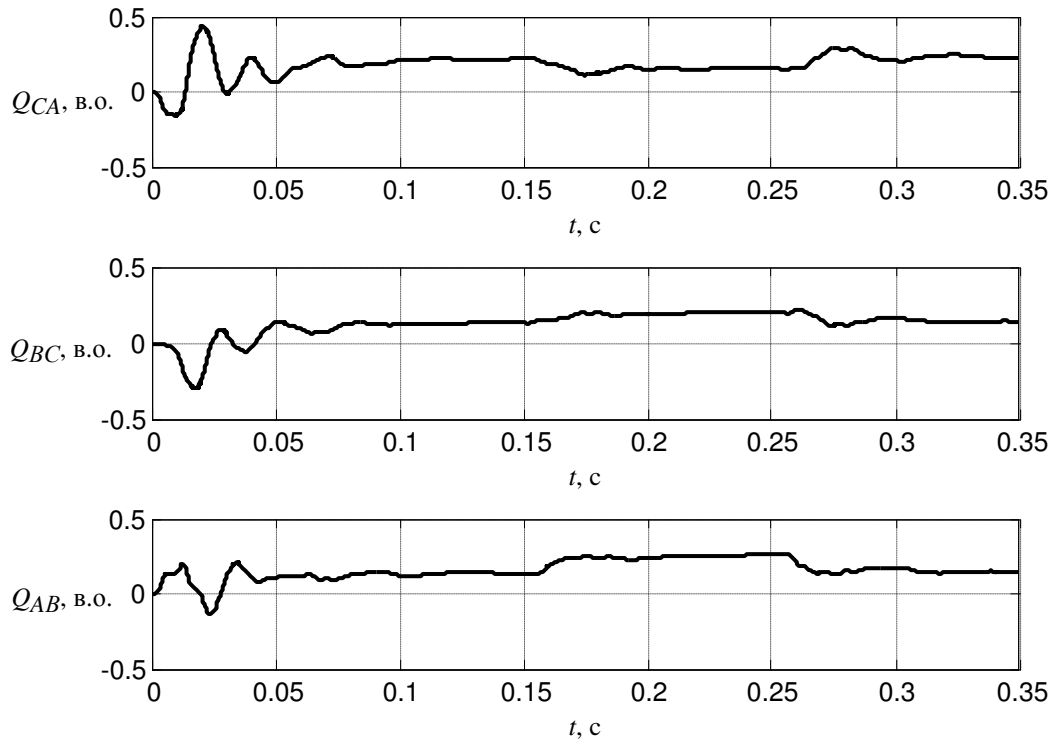


Рис. 4. Залежності фазних потужностей СТК

Із наведених залежностей випливає, що об'єднання контурів компенсації реактивної потужності та симетрування навантаження забезпечує швидкодію регулювання із запізненням приблизно 0,05...0,08 с.

Висновки

Розглянуто можливість підвищення точності та швидкодії динамічної компенсації реактивної потужності з симетруванням навантажень споживачів. Досліджено математичні моделі та алгоритми для визначення параметрів несиметричних навантажень на основі класичної теорії потужностей. Розроблено структурну схему пристрою динамічної компенсації реактивної потужності з симетруванням навантажень, що містить один контур регулювання. Показано, що керування установками динамічної компенсації реактивної потужності можна здійснювати шляхом об'єднання контурів компенсації реактивної потужності та симетрування навантаження. Час запізнення пристрою динамічної компенсації реактивної потужності не перевищує 0,05...0,08 с.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kundur R. Power System Stability and Control / R. Kundur. – New York etc., McGraw-Hill, 1994. – 1176 p.
2. Mathur R. M. Thyristor-based facts controllers for electrical transmission systems / R. M. Mathur, R. K. Varma. – IEEE Press, Piscataway, 2002. – 518 p.
3. Важнов А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А. И. Важнов. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.
4. Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутризаводского электроснабжения / А. А. Николаев, Г. П. Корнилов, В. С. Ивекеев [та ін.] // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал (Russian Internet Journal of Industrial Engineering). – 2014. – № 1. – С. 59 – 69.

5. А. с. 1347118 СССР, МКИ⁴ Н 02 J 3/18. Устройство для компенсации реактивной мощности / А. Л. Шитов, С. Н. Черевань (СССР). – № 4078485/24-07 ; заявл. 18.06.86 ; опубл. 23.10.87, Бюл. № 39.
6. Пат. 94181 Україна, МПК¹¹ Н 02 J 3/00. Пристрій для компенсації реактивної потужності трифазного навантаження / Бурбело М. Й., Никитенко М. В.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № а201001785 ; заявл. 19.02.10 ; опубл. 11.04.11, Бюл. № 7.
7. Керування пристроями динамічної компенсації реактивної потужності за несиметричних швидкозмінних навантажень / М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, М. В. Никитенко [та ін.] // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Науково-виробничий журнал Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2013. – Вип. 2. – С. 37 – 43.
8. Основы теории цепей [учебник для вузов] / [Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов]. – [5-е изд., перераб.]. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
9. Бурбело М. Й. Вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, М. В. Никитенко // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 2. – С. 54 – 56.

Бурбело Михайло Йосипович – д. т. н., професор, завідувач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: burbelomj@gmail.com.

Кравець Олександр Миколайович – к. т. н., доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: omkravets@gmail.com.

Войтюк Юрій Петрович – завідувач лабораторіями кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Лобода Юрій Васильович – аспірант, асистент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.
Вінницький національний технічний університет.