

УДК 621.316.7

М. И. Бурбело, д. т. н.; А. Н. Кравец, к. т. н.; Ю. П. Войтюк; Ю. В. Лобода

УПРАВЛЕНИЕ УСТАНОВКАМИ ДИНАМИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ НАГРУЗКАХ

Несимметрия нагрузок электротехнологических установок вызывает возникновение несимметрии напряжений в трехфазной сети, что отрицательно влияет на работу других потребителей. Для таких установок предусмотрены устройства динамической компенсации реактивной мощности на базе статических тиристорных компенсаторов. Рассмотрены вопросы повышения точности и быстродействия динамической компенсации реактивной мощности при симметрировании нагрузок потребителей. Описаны математические модели и алгоритмы для определения параметров несимметричных нагрузок на основе классической теории мощностей. Описана структурная схема устройства динамической компенсации реактивной мощности и симметрирования нагрузок, содержащая один контур регулирования. По результатам моделирования в среде Simulink пакета прикладных программ Matlab, сделан вывод, что время опоздания устройства динамической компенсации реактивной мощности не превышает 0,05 ... 0,08 с.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, симметрирование нагрузок, условная мощность обратной последовательности.

Введение

Установки динамической компенсации реактивной мощности на базе статических тиристорных компенсаторов (СТК) обеспечивают одновременную оптимизацию таких параметров качества электроэнергии, как отклонение, колебания и несимметрию напряжений [1, 2]. Одной из проблем компенсации влияния быстроизменяющихся нагрузок на сеть является обеспечение желаемого быстродействия компенсатора. Особенно актуальным это становится в случае таких нагрузок, как дуговые сталеплавильные печи, электросварочные установки, горные электротехнические комплексы с резкопеременной нагрузкой.

В основу систем автоматического управления СТК ведущих мировых производителей положен метод управления с использованием вращающейся системы dq -координат. Мгновенные составляющие тока прямой и обратной последовательностей во вращающейся системе dq -координат [3]

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

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

где i_d, i_q – мгновенные токи прямой последовательности в системе dq -координат; i_{d2}, i_{q2} – мгновенные токи обратной последовательности в системе dq -координат; i_α, i_β – мгновенные токи в системе $\alpha\beta$ -координат.

Система управления СТК, наиболее часто встречающаяся в действующих компенсаторах, является комбинированной и включает в себя прямой и обратный каналы [4]. В прямом канале рассчитывают ортогональные d - q составляющие тока нагрузки для прямой и обратной последовательностей, на основе которых с помощью преобразования Штейнметца формируются проводимости (мощности) фаз.

Ортогональные составляющие прямых и обратных последовательностей токов и напряжений рассчитывают в блоках преобразования координат, для корректной работы которых в условиях изменения фазы и искажения формы напряжения на сборных шинах

используют блоки фазовой автоподстройки частоты. Выходные сигналы затем проходят через цифровые фильтры скользящего среднего, частота настройки которых равна 50 Гц.

Задание на генерирование дополнительной реактивной мощности реализовано в канале обратной связи, где формируется корректирующий сигнал по разности фактической и заданной реактивных мощностей. Благодаря каналу обратной связи с пропорционально интегрирующим регулятором есть возможность изменять заданное значение реактивной мощности на вторичной стороне силовых трансформаторов как в сторону потребления реактивной мощности из сети, так и в сторону ее генерирования.

Сигналы суммарных реактивных проводимостей B проходят через блоки ограничения максимальной проводимости тиристорно-реакторной группы (ТРГ) СТК и поступают на входы блоков нелинейностей, в которых реализована обратная регулировочная характеристика ТРГ $\alpha = f(B)$. Сигналы задания на углы открытия тиристорных передаточных элементов передаются в систему импульсно-фазового управления (СИФУ), выполненную на основе вертикального принципа. На выходе СИФУ формируются импульсы, которые подают на тиристорные ключи ТРГ.

Основным недостатком такой системы управления является необходимость использования блока фазовой автоподстройки частоты, реализация которого является достаточно сложной задачей.

Другой подход базируется на использовании теории мгновенной мощности. Однако реализация таких систем управления связана с проблемой уменьшения колебаний реактивной мощности фаз СТК, поскольку нужно осуществлять управление по отклонению одновременно тремя параметрами.

Еще один подход основан на построении систем автоматического пофазового управления СТК по возмущению с использованием мощностей, определенных интегрированием на половине периода напряжения питания. В [5] для управления мощностями фаз ТРГ использованы мощности, полученные из интегральных выражений:

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

где t_n – момент максимума полуволны линейного напряжения u_{AB} ; i_A , i_B , i_C – мгновенные токи фаз нагрузки или сети.

Недостатком этого метода управления являются недостаточно высокое быстродействие и точность, поскольку измерения проводят один раз на периоде напряжения питания.

В [6] разработана система автоматического управления СТК, состоящая из двух контуров: компенсации реактивной мощности и симметрирования нагрузок. В основе работы первого контура управления по возмущению положен алгоритм текущего управления реактивной мощностью фаз СТК в соответствии с формулами

$$Q_{AB}(t) = \frac{1}{3} [Q(t) + Q_2(t) + \sqrt{3}P_2(t)];$$

$$Q_{BC}(t) = \frac{1}{3}[Q(t) - 2Q_2(t)]; \quad (4)$$

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

где $Q(t)$, $P_2(t)$, $Q_2(t)$ – текущие значения реактивной мощности, вещественной и мнимой составляющих условной мощности обратной последовательности загрузки соответственно.

Второй контур управления по отклонению базируется на процедуре коррекции реактивной мощности ΔQ , потребляемой из сети.

Получение текущих значений активной и реактивной мощностей, вещественной и мнимой составляющих условной мощности обратной последовательности нагрузки осуществляется на скользящем интервале времени длительностью, равной половине периода ($T/2$), с применением ортогональной системы $\alpha\beta$ -координат

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

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

где u_α, u_β – мгновенные напряжения в системе $\alpha\beta$ -координат.

В [7] выполнено исследование быстродействия контура системы автоматического управления СТК в случае симметрирования нагрузок по условиям

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

и отдельно компенсации реактивной мощности с использованием ПИ-регулятора в контуре управления по отклонению.

Раздельное исследование симметрирования и компенсации не дает полного представления об эффективности системы автоматического управления СТК. Недостатком также является использование мощностей (5), (6), которые во многих случаях не обеспечивают достаточную точность процесса симметрирования.

Цель работы заключается в исследовании возможности повышения точности и быстродействия компенсации реактивной мощности и симметрирования нагрузок с помощью СТК одновременно.

Обоснование результатов исследования

С целью повышения точности и быстродействия целесообразно применение информативных параметров, определенных на основе классической теории мощностей. Согласно классической теории мощностей [8] трехфазную систему с несимметричной нагрузкой можно характеризовать активной и реактивной мощностями и условными мощностями обратной последовательности [9]:

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

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

где штрихом обозначено операцию фазового сдвига на -90 эл. градусов. Такой подход несколько усложняет реализацию измерительных преобразователей мощности, однако уменьшает колебания на выходе преобразователей составляющих реактивной и комплексной условной мощностей, что может обеспечить повышение быстродействия системы благодаря возможности увеличения коэффициента интегрирования ПИ-регулятора.

Для определения быстродействия и анализа устойчивости процесса компенсации реактивной мощности и одновременно симметрирования нагрузок с помощью СТК выполнено моделирование системы управления в среде *Simulink* пакета прикладных программ *Matlab*. Модель для исследования несимметричных режимов узла нагрузки представлена на рис. 1. Модель состоит из источника питания 1, нагрузки 2, системы автоматического управления 3, содержащей блок измерительного преобразования мощностей, блок ПИ-регуляторов, систему импульсно-фазового управления, а также из силового блока установки 4.

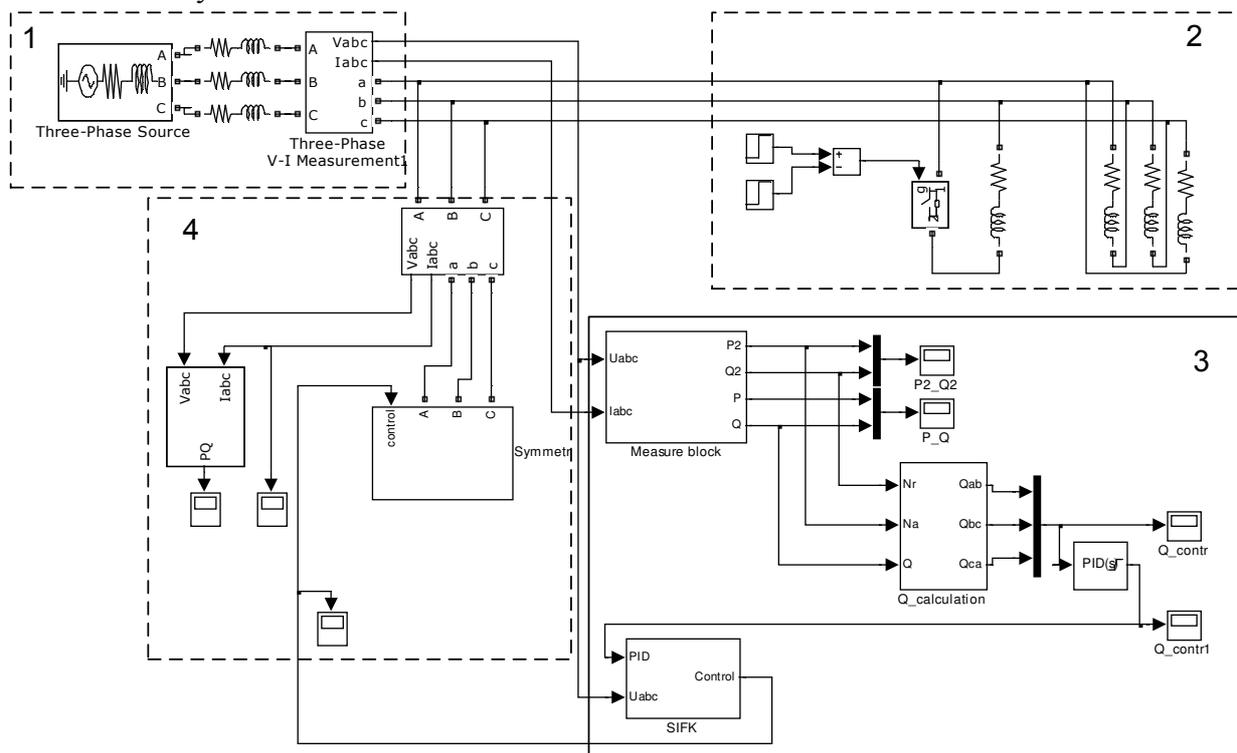


Рис. 1. Модель для исследования установки динамической компенсации реактивной мощности

Зависимости активной и реактивной мощностей в узле нагрузки при компенсации и симметрирования в случае использования ПИ-регулятора после его настройки приведены на рис. 2. Зависимости составляющих комплексной условной мощности изображены на рис. 3. Зависимости мощностей фаз СТК изображены на рис. 4. Моделирование проводили для случая включения трехфазной несимметричной нагрузки в момент времени $t = 0$, наброса дополнительной однофазной нагрузки в момент времени $t = 0,15$ с и сброса в момент времени $t = 0,25$ с.

Критерием регулирования является минимум реактивной мощности и минимум условной мощности обратной последовательности. В этом случае условия компенсации реактивной мощности и симметрирования нагрузок имеют вид (4).

Комплексные мощности фаз трехфазной несимметричной нагрузки: $\underline{S}_{AB} = 100 + j50 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; $\underline{S}_{BC} = 120 + j60 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; $\underline{S}_{CA} = 120 + j60 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, дополнительной однофазной нагрузки $\underline{S}_{AB} = 30 + j30 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ (параметры нагрузки приведены к напряжению 10,0 кВ). Статические характеристики нагрузки в данном случае имеют квадратичную зависимость мощностей от

напряжения в узле сети (активная и реактивная нагрузки в модели представлены сопротивлениями).

На первом и третьем участках временных зависимостей (рис. 4) компенсацию реактивной мощности и симметрирование нагрузок в установившемся режиме обеспечивают следующие значения мощностей фаз СТК: $Q_{AB} = 47,3$ квар; $Q_{BC} = 45,2$ квар; $Q_{CA} = 68,2$ квар, на втором участке необходимые значения мощностей фаз СТК в установившемся режиме следующие: $Q_{AB} = 75,8$ квар; $Q_{BC} = 62,3$ квар; $Q_{CA} = 50,4$ квар. Относительные значения мощностей фаз СТК на рис. 4 определены относительно суммарной мощности СТК 300 квар.

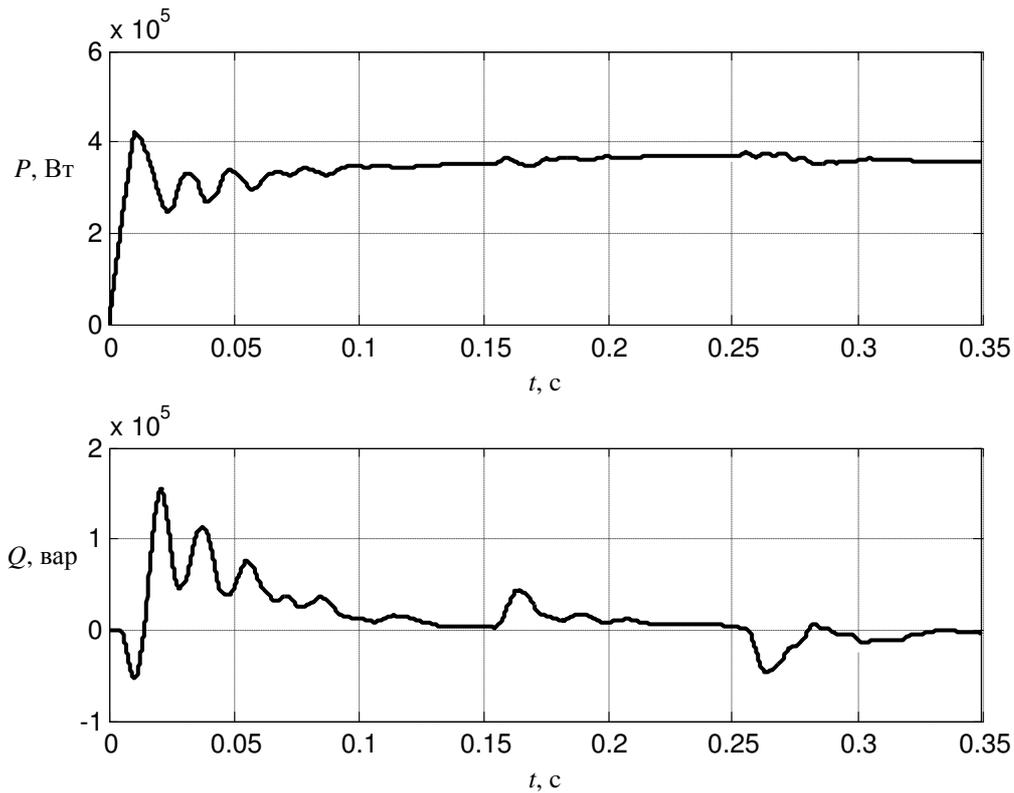


Рис. 2. Зависимости активной и реактивной мощностей

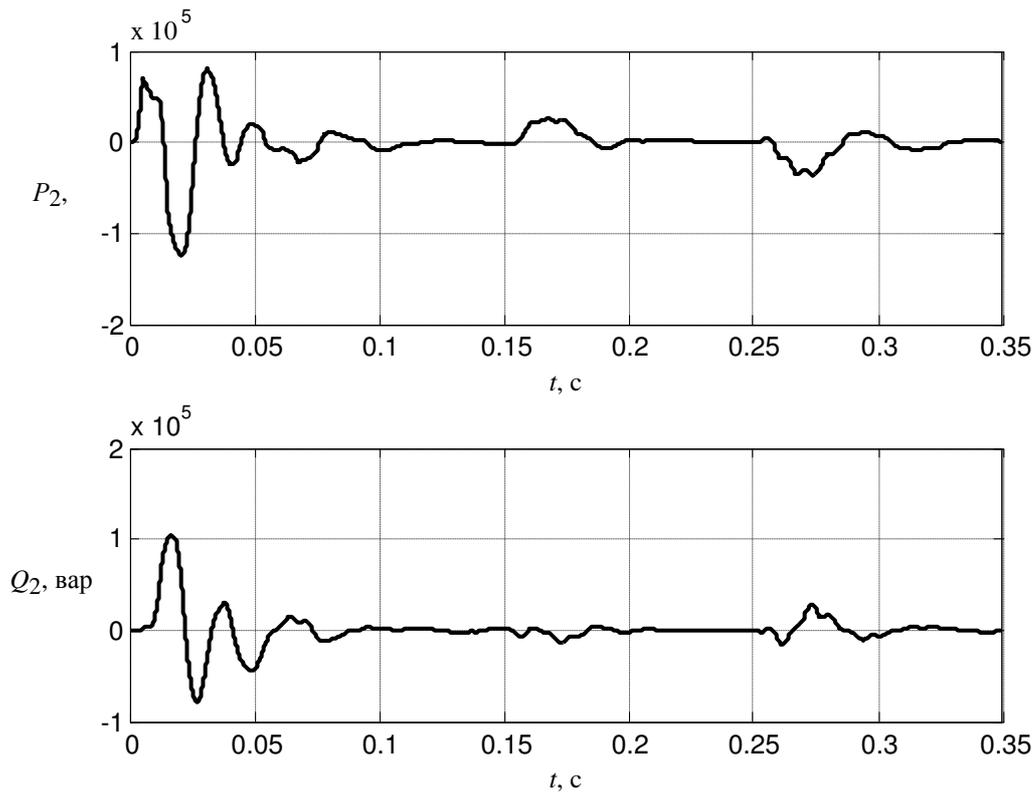


Рис. 3. Зависимости составляющих комплексной условной мощности обратной последовательности

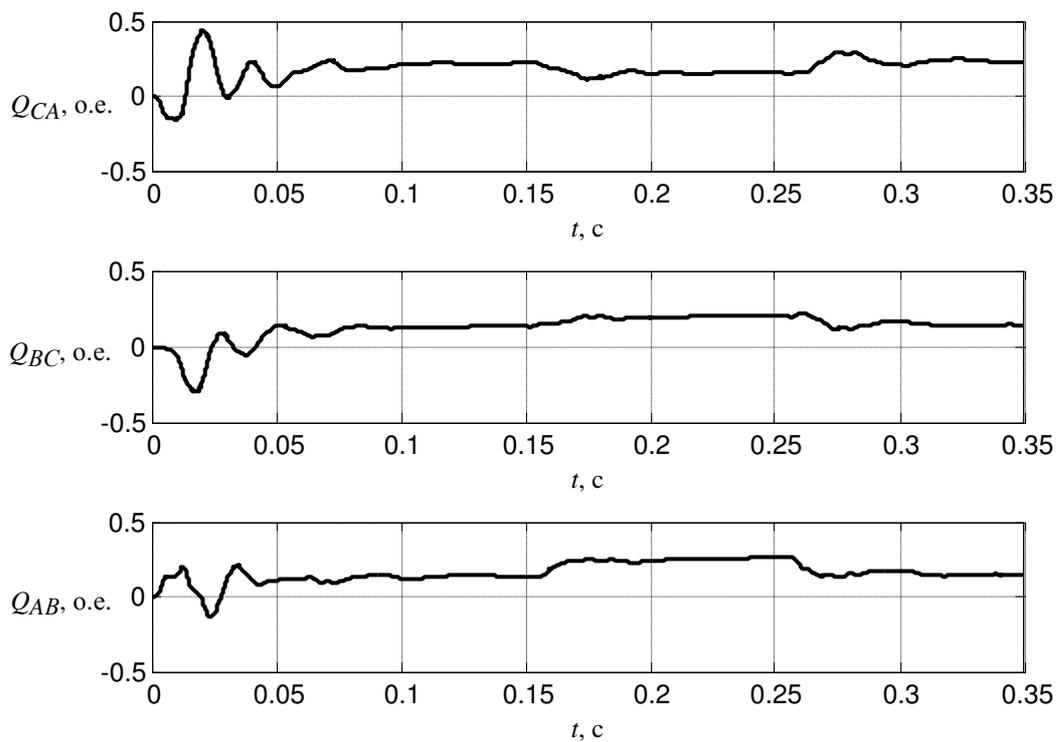


Рис. 4. Зависимости фазных мощностей СТК

Из приведенных зависимостей следует, что объединение контуров компенсации реактивной мощности и симметрирования нагрузки обеспечивает быстрое действие регулирования с опозданием примерно 0,05 ... 0,08 с.

Выводы

Рассмотрена возможность повышения точности и быстрого действия динамической компенсации реактивной мощности с симметрированием нагрузок потребителей. Исследованы математические модели и алгоритмы для определения параметров несимметричных нагрузок на основе классической теории мощностей. Разработана структурная схема устройства динамической компенсации реактивной мощности с симметрированием нагрузок, содержащая один контур регулирования. Показано, что управление установками динамической компенсации реактивной мощности можно осуществлять путем объединения контуров компенсации реактивной мощности и симметрирования нагрузки. Время опоздания устройства динамической компенсации реактивной мощности не превышает 0,05 ... 0,08 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 внутриводского 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 Михаил Иосифович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой электротехнических систем электроснабжения и энергетического менеджмента, e-mail: burbelomj@gmail.com.

Кравец Александр Николаевич – к. т. н., доцент кафедры электротехнических систем электроснабжения и энергетического менеджмента, e-mail: omkravets@gmail.com.

Войтюк Юрий Петрович – заведующий лабораториями кафедры электротехнических систем электроснабжения и энергетического менеджмента.

Лобода Юрий Васильевич – аспирант, ассистент кафедры электротехнических систем электроснабжения и энергетического менеджмента.

Винницкий национальный технический университет.