

Компенсация реактивной мощности в трехфазных сетях

ИНЬКОВ Ю.М., САВОСЬКИН А.Н., КУЛИНИЧ Ю.М., КОЛОБОВ В.В.

Рассмотрен метод активной компенсации реактивной мощности и других видов асимметрии нагрузки трехфазных сетей. Метод основан на понятии идеальной нагрузки в точке общего подключения. В этой точке рассчитываются значения напряжения прямой последовательности основной гармоники и заданный ток источника в случае идеальной нагрузки. Ток компенсатора формируется как разность заданного значения сетевого тока и тока нагрузки. Для реализации такого алгоритма в структуре компенсатора используется модуль фазовой автоподстройки (ASRF). Выполнено математическое моделирование работы такого компенсатора в среде Matlab-Simulink для различных режимов и видов асимметрии нагрузки.

Ключевые слова: трехфазная сеть, компенсатор реактивной мощности, активный фильтр, обобщенный вектор, точка общего подключения, модуль фазовой автоподстройки

Проблема компенсации реактивной электрической мощности возникла одновременно с применением на практике систем переменного однофазного и трехфазного токов. При включении в электрическую цепь индуктивной или емкостной нагрузки (электрические двигатели, промышленные электрические печи, высоковольтные линии электропередачи) между электроустановкой и источником электрической энергии возникает обмен потоками энергии. При этом появляются дополнительные потери активной энергии, потери напряжения, а также снижается пропускная способность электрических сетей. Работа потребителей электрической энергии с несинусоидальными токами приводит к искажению формы питающего напряжения и к значительному потреблению электрической энергии, обусловленному протеканием высших гармоник тока (мощность искажения). В трёхфазной электрической цепи может наблюдаться также асимметрия нагрузки, причиной которой является потребитель с неравномерной по фазам токовой нагрузкой.

Традиционно для решения проблем компенсации реактивной мощности используются различные устройства на основе статических компенсаторов [1]. Широкое развитие силовой и вычислительной техники позволило по-новому решать вопросы компенсации реактивной мощности и различных видов асимметрии. С помощью полностью управляемых силовых IGBT-транзисторов и высокопроизводительных микроконтроллеров становится возможной реализация новых алгоритмов управления компенсирующими устройствами [2–4].

Рассмотрим схему, состоящую из источника напряжения V_S , нагрузки $Load$ и активного компенсатора (АК), подключенного параллельно нагрузке (рис. 1). Резистор R_s и индуктивность L_s определяют внутренние параметры источника напряжения V_S .

В основу предлагаемого метода компенсации положено понятие об идеальной нагрузке [5]. В случае полной компенсации реактивной мощности нагрузки напряжение в точке общего подключения P (рис. 1) совпадает по фазе с током, протекаю-

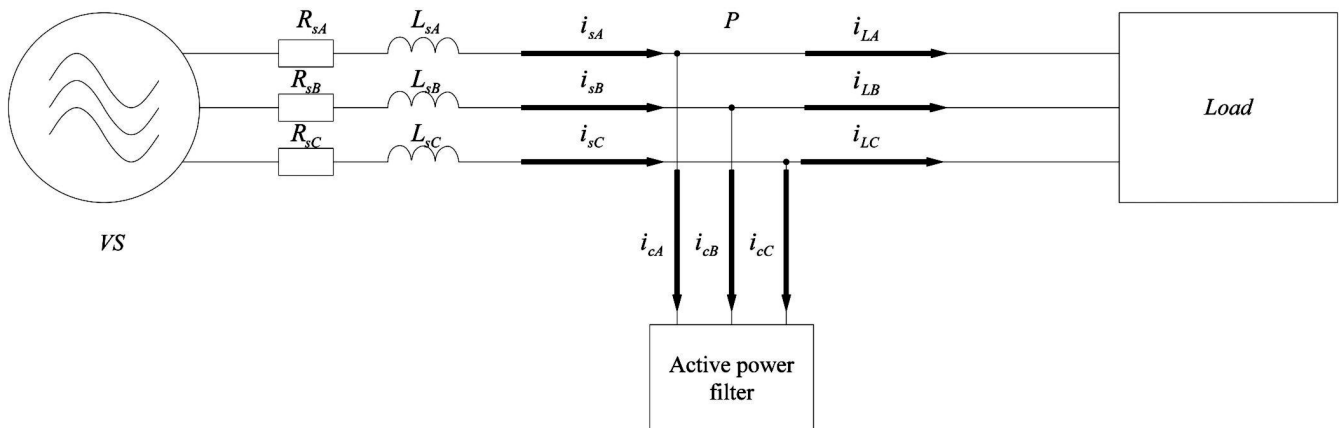


Рис. 1. Схема подключения компенсатора

шим от источника напряжения (сетевым током), который является синусоидальным. Значение сетевого тока определяется только активной мощностью, потребляемой нагрузкой, и значением напряжения в точке общего подключения.

Поскольку алгебраическая сумма токов в узле P схемы

$$i_s - i_C - i_L = 0, \tag{1}$$

определим такой ток компенсатора i_C , который в сумме с током нагрузки i_L формирует сетевой ток i_s , соответствующий идеальной нагрузке. Например, для фазы A схемы по уравнению (1) в узле P выражение сетевого тока примет вид:

$$i_{sA} = i_{CA} + i_{LA}, \tag{2}$$

т.е. для получения синусоидальной формы сетевого тока в фазе A необходимо создать такой ток компенсатора i_{CA} , который в сумме с током нагрузки i_{LA} образует синусоидальный по форме ток сети i_{sA} , не имеющий сдвига фаз относительно напряжения в точке общего подключения (рис. 2).

Таким образом, для решения задачи компенсации необходимо определить первую (основную) гармонику напряжения u_P^+ прямой последовательности в точке общего подключения P , затем определить заданное значение сетевого тока i_{sref} , фаза которого совпадает с фазой основной гармоники напряжения u_P^+ , а его значение определяется активной мощностью нагрузки.

Решение задачи компенсации осуществляется за счет включения в структуру компенсатора модуля фазовой автоподстройки или *Autoadjustable Synchronous Reference Frame (ASRF)* [6], генерирующего синусоидальный сигнал, амплитуда и фаза

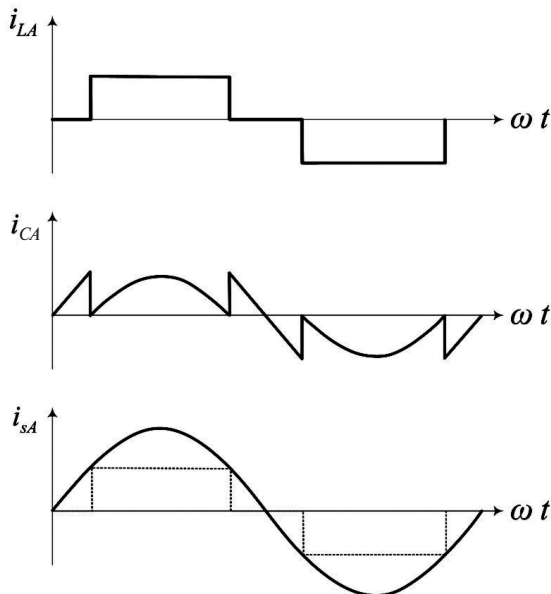


Рис. 2. Форма тока нагрузки i_{LA} , компенсатора i_{CA} и сети i_{sA}

которого соответствуют основной гармонике входного сигнала.

Принцип работы модуля *ASRF* основан на понятии обобщенного пространственного вектора и вращающейся системы координат, которая подстраивается до достижения синхронизации с этим вектором [7, 8]. Обобщенный вектор – это вектор, проекции которого на оси фазных обмоток в любой момент времени равны мгновенным значениям фазных величин, представленных этим вектором.

Значение обобщенного вектора напряжения в точке общего подключения определяется следующим образом [9]:

$$\mathbf{u}_P = \frac{2}{3}(\mathbf{u}_{Pa} + \mathbf{u}_{Pb} + \mathbf{u}_{Pc}) = \frac{2}{3}(\mathbf{u}_{Pa} + \mathbf{u}_{Pb}a + \mathbf{u}_{Pc}a^2), \tag{3}$$

где $\mathbf{u}_{Pa}, \mathbf{u}_{Pb}, \mathbf{u}_{Pc}$ – векторы фазных напряжений в точке общего подключения; u_{Pa}, u_{Pb}, u_{Pc} – их мгновенные значения; $a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ – оператор трехфазной системы.

Обобщенный вектор напряжения \mathbf{u}_P можно представить в системе координат dq , вращающейся с угловой скоростью ω_{dq} относительно неподвижной системы $\alpha\beta$ (рис. 3).

С помощью прямого преобразования Парка [9] определим уравнения проекций обобщенного вектора напряжения \mathbf{u}_P на вращающиеся оси координат dq для несимметричной нагрузки:

$$\begin{aligned} u_{Pd} &= U_P^+ \sin(\omega t + \varphi_u^+ - \theta) + U_P^- \sin(\omega t + \varphi_u^- + \theta); \\ u_{Pq} &= -U_P^+ \cos(\omega t + \varphi_u^+ - \theta) + U_P^- \cos(\omega t + \varphi_u^- + \theta), \end{aligned} \tag{4}$$

где U_P^+, U_P^- – амплитуды напряжений прямой и обратной последовательности; φ_u^+, φ_u^- – фазы напряжений прямой и обратной последовательности; $\theta = \omega_{dq}t$ – угол между вращающейся dq и неподвижной $\alpha\beta$ системами координат.

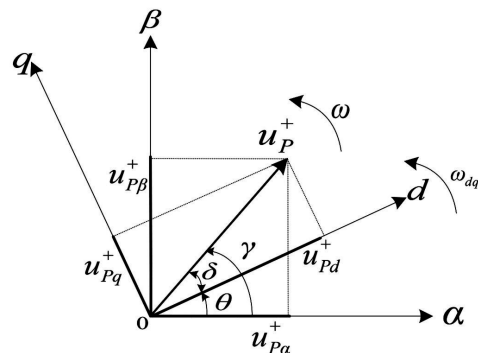


Рис. 3. Обобщенный вектор напряжения \mathbf{u}_P^+ в проекциях на неподвижную $\alpha\beta$ и вращающуюся dq системы координат

Если вращающиеся оси dq имеют угловую скорость $\omega_{dq} = \omega$, то выражение (4) примет вид:

$$\begin{aligned} u_{Pd} &= U_P^+ \sin(\varphi_u^+) + U_P^- \sin(2\omega t + \varphi_u^-); \\ u_{Pq} &= -U_P^+ \cos(\varphi_u^+) + U_P^- \cos(2\omega t + \varphi_u^-). \end{aligned} \quad (5)$$

Аналогично системе уравнений (4) получаем следующие выражения для проекций обобщенного вектора напряжения u_{PCC} на вращающиеся оси для нелинейной нагрузки:

$$\begin{aligned} u_{Pd} &= U_P^+ \sin(\omega t + \varphi_u^+ - \theta) + \\ &+ \sum_{k=3,5,7\dots} U_{Pk}^+ \sin(k\omega t + \varphi_{uk}^+ - \theta); \\ u_{Pq} &= -U_P^+ \cos(\omega t + \varphi_u^+ - \theta) + \\ &+ \sum_{k=3,5,7\dots} U_{Pk}^+ \cos(k\omega t + \varphi_{uk}^+ - \theta), \end{aligned} \quad (6)$$

где U_P^+ и φ_u^+ – амплитуда и фаза основной гармоники; U_{Pk}^+ и φ_{uk}^+ – амплитуда и фаза k -гармоники.

В том случае, если вращающиеся оси dq имеют угловую скорость $\omega_{dq} = \omega$, имеем:

$$\begin{aligned} u_{Pd} &= U_P^+ \sin(\varphi_u^+) + \sum_{k=3,5,7\dots} U_{Pk}^+ \sin((k-1)\omega t + \varphi_{uk}^+); \\ u_{Pq} &= -U_P^+ \cos(\varphi_u^+) + \sum_{k=3,5,7\dots} U_{Pk}^+ \cos((k-1)\omega t + \varphi_{uk}^+). \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, при любом виде асимметрии нагрузки проекция обобщенного вектора напряжения в точке общего подключения на вращающиеся оси dq имеют две составляющие: постоянную \bar{u}_P и переменную \tilde{u}_P :

$$\begin{aligned} u_{Pd} &= \bar{u}_{Pd} + \tilde{u}_{Pd}; \\ u_{Pq} &= \bar{u}_{Pq} + \tilde{u}_{Pq}. \end{aligned} \quad (8)$$

В случае симметричной синусоидальной нагрузки проекции обобщенного вектора на вращающиеся оси u_{Pd} и u_{Pq} содержат только постоянную составляющую. При этом постоянная составляющая \bar{u}_P этих проекций соответствует прямой положительной последовательности компоненты напряжения в точке общего подключения.

Принцип работы модуля *ASRF* состоит в использовании метода вращающейся системы координат, скорость вращения которой должна автоматически подстраиваться до достижения синхронизации с обобщенным вектором входного сигнала и в выделении из него постоянной составляющей. При этом вращающаяся система координат dq синхронизируется с вектором основной гармоники

входного сигнала (вектором u_P^+ так, чтобы выполнялось условие $\omega_{dq} = \omega$, а постоянная составляющая проекции на ось q равнялась нулю. Тогда согласно выражениям (5) и (7) значение постоянной составляющей на ось d будет равно модулю основной (первой) гармоники напряжения прямой последовательности в точке общего подключения:

$$\begin{cases} u_{Pq}^+ = -U_P^+ \cos(\varphi_u^+) = 0 \rightarrow \varphi_u^+ = 90 \\ u_{Pd}^+ = U_P^+ \sin(\varphi_u^+) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} u_{Pq}^+ = 0; \\ u_{Pd}^+ = U_P^+. \end{cases} \quad (9)$$

Выражение (9) соответствует случаю, когда напряжения в точке общего подключения являются симметричными и содержат только составляющие прямой последовательности. Если воспользоваться обратным преобразованием Парка для системы (9), то для каждой фазы получим сигнал, совпадающий с напряжением в точке общего подключения в случае симметричной синусоидальной нагрузки:

$$\begin{aligned} u_{Pa}^+ &= U_{Pa}^+ \sin(\omega t + \varphi_u^+); \\ u_{Pb}^+ &= U_{Pb}^+ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_u^+); \\ u_{Pc}^+ &= U_{Pc}^+ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_u^+). \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом, модуль фазовой автоподстройки позволяет по измеренным значениям напряжения u_P в точке общего подключения рассчитать мгновенные значения обобщенного вектора напряжения u_P^+ , его проекции на вращающиеся оси d и q , а также угол θ , образованный вращающейся системой координат dq относительно неподвижной $\alpha\beta$.

Для работы компенсатора используется два модуля. Модуль *ASRFU* позволяет получить сигнал, амплитуда и фаза которого определяются напряжением u_P^+ и фазой $\varphi_u^+ = \theta$ прямой последовательности (рис. 4). Модуль *ASRFI* позволяет получить сигнал, амплитуда которого определяется активной составляющей тока нагрузки (или активной мощностью нагрузки), а фаза совпадает с фазой напряжения положительной последовательности в точке общего подключения (угол θ).

На вход модуля *ASRFI* подается сигнал трехфазного тока нагрузки, но вместо фазовой автоподстройки используется значение угла θ , соответствующего начальной фазе напряжения прямой последовательности в точке общего подключения (рис. 4). В этом случае между обобщенным вектором тока нагрузки i_L и вращающейся осью d образуется угол $\varphi^+ = \varphi_u^+ - \varphi_i^+$ (рис. 5), соответствующий разности фаз между током i_L^+ и напряжением u_P^+ ,

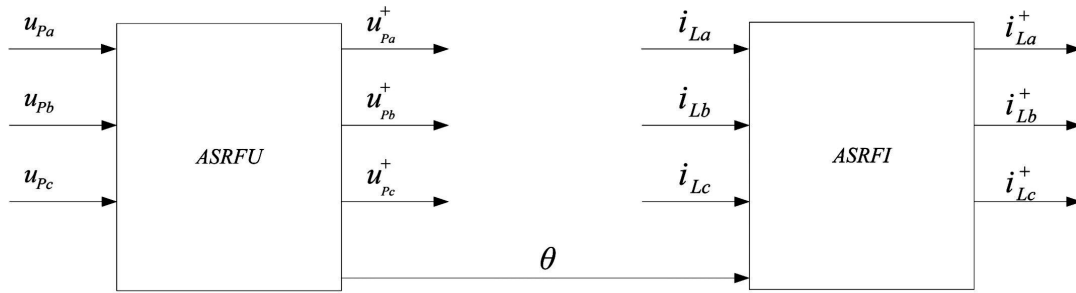


Рис. 4. Блок-схема, поясняющая формирование заданного значения сетевого тока

поскольку вращающаяся ось d синхронизирована с обобщенным вектором напряжения u_p^+ .

Проекция обобщенного вектора тока i_L^+ на оси d и q будут соответствовать активной (*active*) и реактивной (*reactive*) составляющей тока нагрузки соответственно:

$$\begin{cases} i_d^+ = i_L^+ \cos(\varphi^+) = i_{Lac}^+; \\ i_q^+ = i_L^+ \sin(\varphi^+) = i_{Lrs}^+. \end{cases}$$

Используя обратное преобразование Парка только для активной составляющей тока ($i_q^+ = 0$), получим следующие выражения для трехфазных токов нагрузки:

$$\begin{aligned} i_{La}^+ &= I_{La}^+ \sin(\omega t + \varphi_u^+); \\ i_{Lb}^+ &= I_{La}^+ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_u^+); \\ i_{Lc}^+ &= I_{La}^+ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_u^+). \end{aligned} \quad (11)$$

Полученные значения фазных токов совпадают по фазе с напряжениями прямой последовательности для каждой соответствующей фазы. Амплитуда токов i_{La}^+ , i_{Lb}^+ , i_{Lc}^+ определяется только активной составляющей тока нагрузки i_L , что соответствует значению сетевого тока i_s в случае симметричной

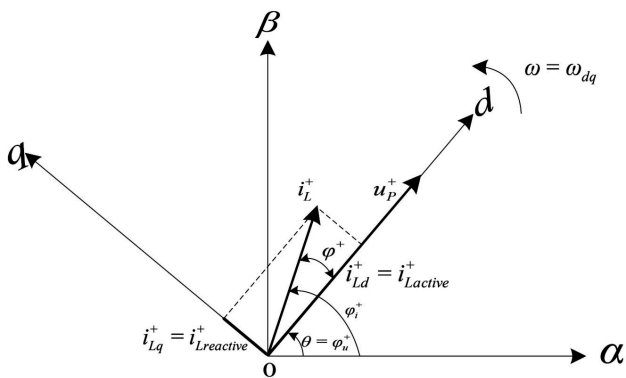


Рис. 5. Пространственные векторы прямой последовательности тока нагрузки i_L^+ и напряжения u_p^+ при ASRF-синхронизации

синусоидальной нагрузки (или в случае полной компенсации реактивной мощности).

Таким образом, с помощью модуля *ASRFI* получаем выражения заданного значения сетевого тока:

$$\begin{aligned} i_{sa_ref} &= i_{La}^+; \\ i_{sb_ref} &= i_{Lb}^+; \\ i_{sc_ref} &= i_{Lc}^+. \end{aligned} \quad (12)$$

Зная заданное значение сетевого тока, по формуле (1) можно определить заданное значение тока компенсатора:

$$\begin{aligned} i_{Ca_ref} &= i_{sa_ref} - i_{La}; \\ i_{Cb_ref} &= i_{sb_ref} - i_{Lb}; \\ i_{Cc_ref} &= i_{sc_ref} - i_{Lc}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для формирования тока компенсатора используется метод δ -модуляции, при котором фактическое значение тока компенсатора i_C формируется около его заданного значения i_{C_ref} и не отличается более чем на значение δ [10]. Ток компенсатора протекает под действием выходного напряжения инвертора *VSI (Voltage Source Inverter)*. Назначение системы управления инвертором сводится к сравнению заданного значения i_{Ca_ref} и фактического i_{Ca} значения токов компенсатора. При совпадении заданного и фактического значений токов компенсатора происходит полная компенсация реактивной мощности нагрузки.

Предлагаемая структура компенсатора представлена на рис. 6. Модуль *ASRFU* формирует сигнал угла θ , поступающий на вход модуля *ASRFI*. На выходе модуля *ASRFI* образуется сигнал вектора тока i_L^+ , соответствующий 1-й гармонике тока нагрузки. В соответствии с (12) этот сигнал является заданным сетевым током i_{s_ref} . Элемент сравнения ЭС1 осуществляет сравнение токов в соответствии с формулой (13) и формирует сигнал i_{C_ref} , поступающий на вход системы управления инвертором. Она формирует ток компенсатора i_C , отличающийся

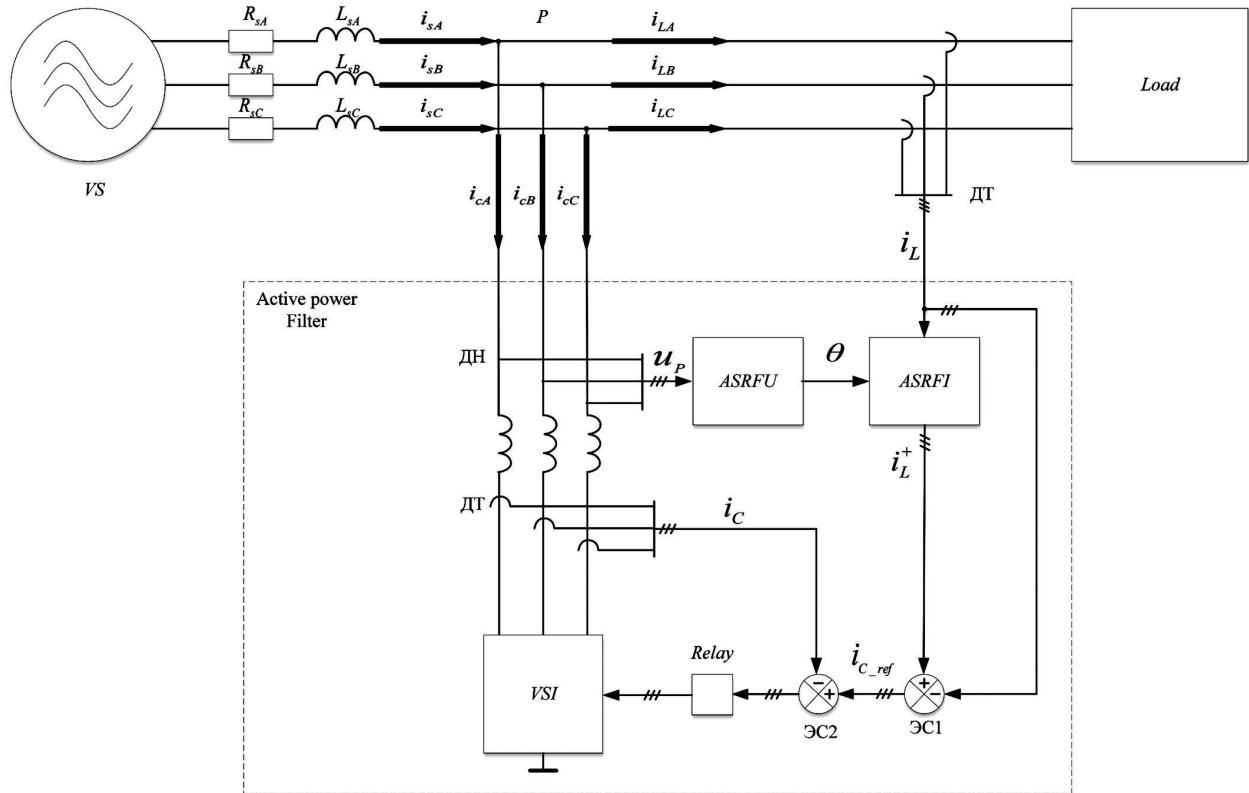


Рис. 6. Структурная схема компенсатора

ся от заданного тока i_{C_ref} не более чем на δ . Для измерения текущих значений токов нагрузки i_L и компенсатора i_C используются датчики тока (ДТ).

Модель структуры компенсатора, выполненная в пакете прикладных программ MATLAB-Simulink, позволила исследовать работу компенсатора при различных видах нагрузки. Рассмотрим результаты такого моделирования для трёх видов нагрузки: симметричная нагрузка с потреблением реактивной мощности; несимметричная нагрузка с потреблением реактивной энергии и нелинейная нагрузка.

Симметричная нагрузка с потреблением реактивной энергии. Результаты моделирования напряжения в точке общего подключения u_p и токов, протекающих от источника i_s (сетевой ток), а также токов в цепи нагрузки i_L для этого варианта показывают, что при отключённом компенсирующем устройстве (рис. 7,а) токи нагрузок каждой фазы i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} и токи, протекающие от источника напряжения i_{sA}, i_{sB}, i_{sC} , соответственно равны между собой и отстают от напряжений в точке общего подключения u_{Pa}, u_{Pb}, u_{Pc} на некоторый угол φ (на рис. 7,а показан угол сдвига фаз между напряжением и током для фазы А). Это свидетельствует о потреблении нагрузкой от источника реактивной энергии. На рис. 7,а показаны также годографы обобщенных векторов напряжения u_p и тока i_s в виде их проекций на неподвижные оси α и β . Как следует из рис. 7,а, в случае потребления только

реактивной энергии годографы незначительно отличаются от окружности.

При включении компенсатора на интервале времени t от 0 до 0,05 с происходит переходный процесс (рис. 7, б), после окончания которого угол сдвига фаз φ_A между напряжением фазы А в точке общего подключения u_{PA} и сетевым током фазы А i_{sA} равен нулю ($\varphi_A = 0$). Аналогично для фаз В и С получено, что $\varphi_B = 0$ и $\varphi_C = 0$. Это указывает на то, что при включении компенсатора реактивная энергия от источника напряжения не потребляется. При этом амплитуда и фаза токов i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} , протекающих через цепь нагрузки, остались неизменными.

Годограф обобщенного вектора напряжения в точке общего подключения u_p представляет собой спираль (рис. 7,б). Внешняя её часть соответствует переходному процессу, а внутренняя - установившемуся режиму, причём в установившемся режиме годограф вектора напряжения u_p представляет собой окружность, что совпадает с работой системы при идеальной нагрузке. Окружность имеет больший радиус по сравнению с годографом обобщенного вектора напряжения без компенсатора (рис. 7,а). Следовательно, при компенсации реактивной мощности увеличивается значение напряжения в точке общего подключения.

Годограф обобщенного вектора тока i_s , так же как и годограф обобщенного вектора напряжения в

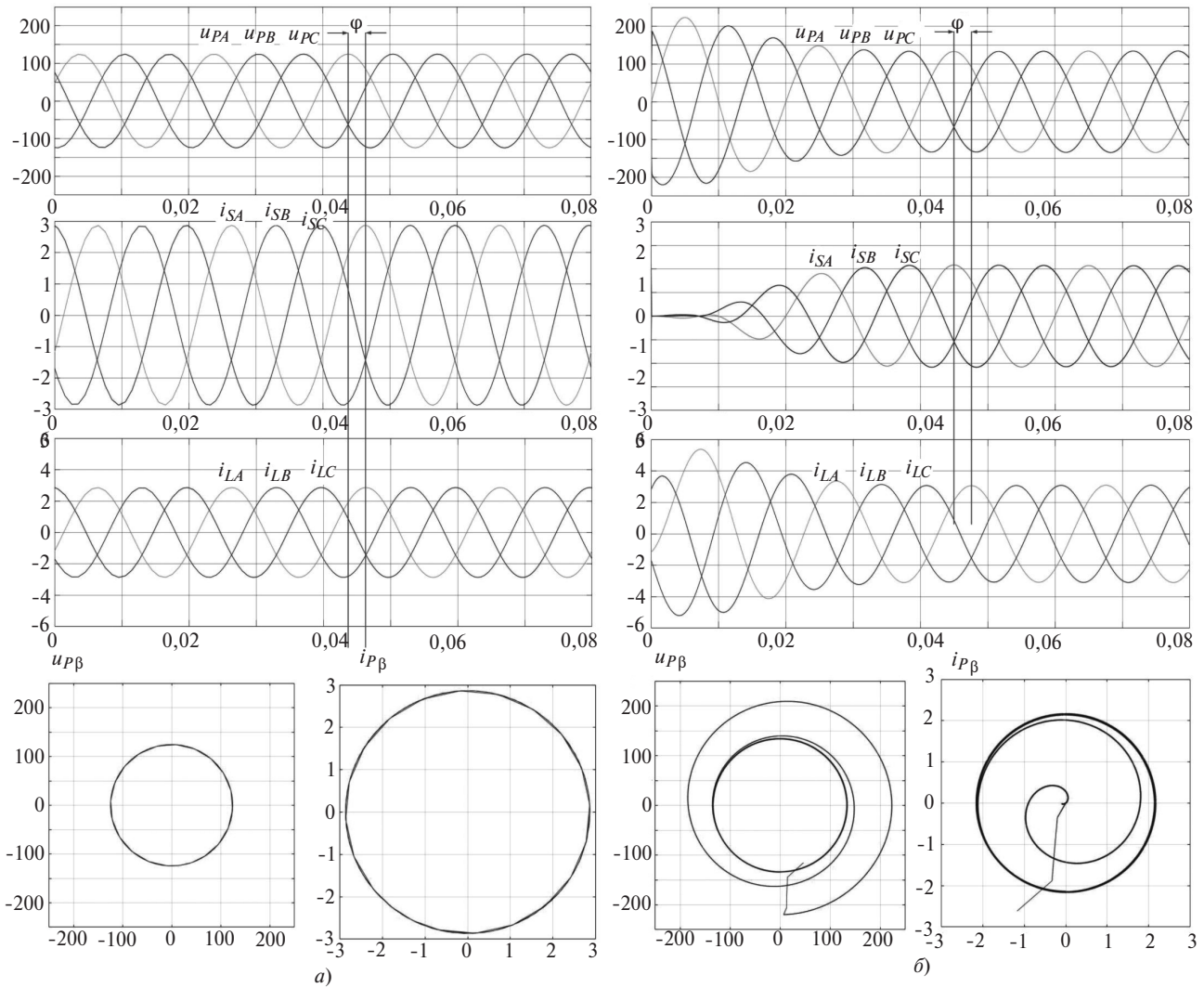


Рис. 7. Результаты моделирования для симметричной синусоидальной нагрузки с потреблением реактивной мощности: а – без компенсатора; б – при работе с компенсатором

точке общего подключения u_p , представляет собой спираль, внутренняя часть которой соответствует переходному процессу, а внешняя – установившемуся режиму. Как следует из рис. 7,б, в установившемся режиме годограф обобщенного вектора тока i_s является окружностью. Это значит, что система работает так же, как и в случае подключения к ней идеальной нагрузки. Окружность имеет больший радиус по сравнению с годографом обобщенного вектора тока без компенсатора (рис. 7,а). Это указывает на то, что за счет компенсации реактивной составляющей сетевого тока i_s значение тока i_s уменьшилось.

Несимметричная нагрузка с потреблением реактивной энергии. В случае несимметричной формы нагрузки сигналы напряжения u_p и сетевого тока i_s в точке общего подключения являются синусоидальными, но различаются по амплитуде (рис. 8,а). Ток i_s отстает от напряжения u_p , что соответствует потреблению нагрузкой реактивной энергии от источника напряжения. При этом годографы

обобщенных векторов напряжения u_p и сетевого тока i_s в виде проекций на неподвижные оси α и β представляют собой эллипсы, соотношение осей которых определяет степень асимметрии. Большая полуось соответствует наибольшей амплитуде сигналов из трех фаз, соответственно наименьшая полуось определяется наименьшей амплитудой этих сигналов. Наклон эллипса зависит от того, в каком порядке следуют сигналы фаз с наименьшей и наибольшей амплитудой. Если вначале следует сигнал с наименьшей амплитудой, а затем с наибольшей, то в форме годографа появится сначала наименьшая полуось, а затем (если двигаться против часовой стрелки) наибольшая.

Так, например, для годографа обобщенного вектора напряжения в точке общего подключения u_p первой следует положительная амплитуда сигнала фазы A u_{pA+} , которая является наименьшей из трех фаз, после этого появляется положительная амплитуда сигнала фазы B u_{pB+} которая является наибольшей. На следующем интервале времени по-

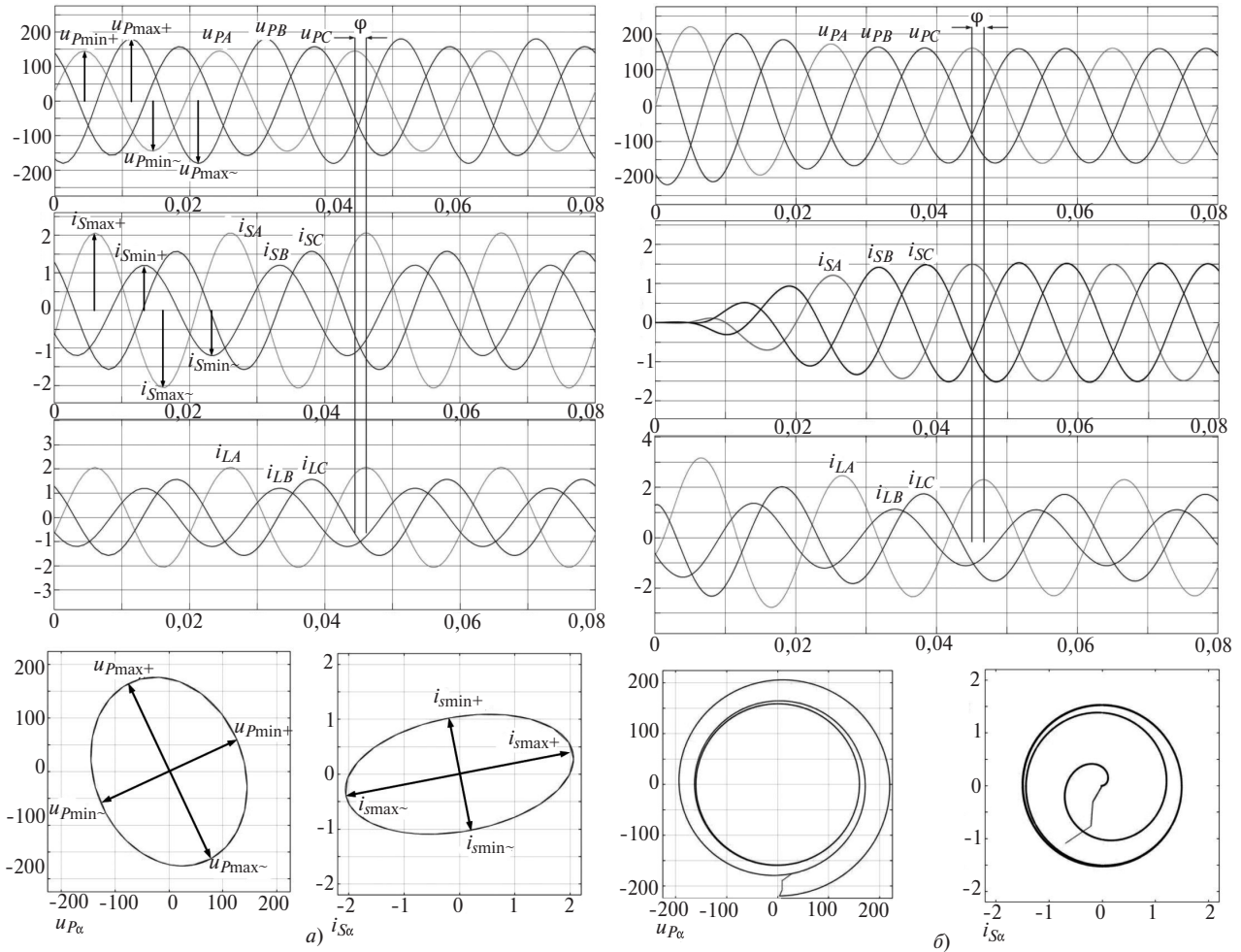


Рис. 8. Результаты моделирования работы схемы при несимметричной нагрузке по фазам: а – без компенсатора; б – при работе с компенсатором

является наименьшая отрицательная амплитуда фазы A u_{PA-} , а за ней следом – наибольшая отрицательная амплитуда фазы B u_{PB-} . В результате этого на годографе обобщённого вектора напряжения u_P имеем полуоси, расположенные против часовой стрелки: u_{PA+} , u_{PB+} , u_{PA-} , u_{PB-} . Аналогично для годографа обобщенного сетевого тока i_S получено: $i_{SA+} \rightarrow i_{SB+} \rightarrow i_{SA-} \rightarrow i_{SB-}$.

Результаты моделирования разработанной схемы, дополненной компенсатором, показали, что на интервале времени от 0 до $t \approx 0,05$ происходит переходный процесс, в течение которого сетевой ток изменяется от нуля до номинального значения, при этом ток нагрузки i_L также отличается от номинального (рис. 8,б). В установившемся режиме работы ток нагрузки i_L сравнивается с его номинальным значением, сетевой ток i_S становится синусоидальным и симметричным по фазам, так же как и напряжение в точке общего подключения u_P . Сетевой ток i_S совпадает по фазе с напряжением u_P , что соответствует компенсации реактивной мощности от источника напряжения. При этом годографы обобщенных векторов напряжения u_P и

тока i_S представляют собой спирали, аналогичные спиралям, приведенным на рис. 7,б, которые в установившемся режиме работы стремятся к форме окружности. Радиусы окружностей годографов обобщенных векторов напряжения u_P и тока i_S в установившемся режиме работы соответственно равны амплитудам сигналов u_{PA} и i_{SA} . Это значит, что при работе компенсатора схема работает в режиме идеальной нагрузки.

Нелинейная нагрузка. Результаты моделирования работы схемы в случае нелинейной нагрузки показывают, что формы сигналов напряжения в точке общего подключения u_P и сетевого тока i_S имеют ярко выраженный несинусоидальный характер (рис. 9,а) и из-за несинусоидального напряжения u_P кривые токов нагрузки i_L имеют характерное искажение. Годографы обобщенного вектора сетевого тока i_S и обобщенного вектора напряжения в точке общего подключения u_P представляют собой шестиугольники, каждый угол которых соответствует характерной точке кривой напряжения u_P и сетевого тока i_S , а половина диагонали равна значению сигнала в соответствующей точке.

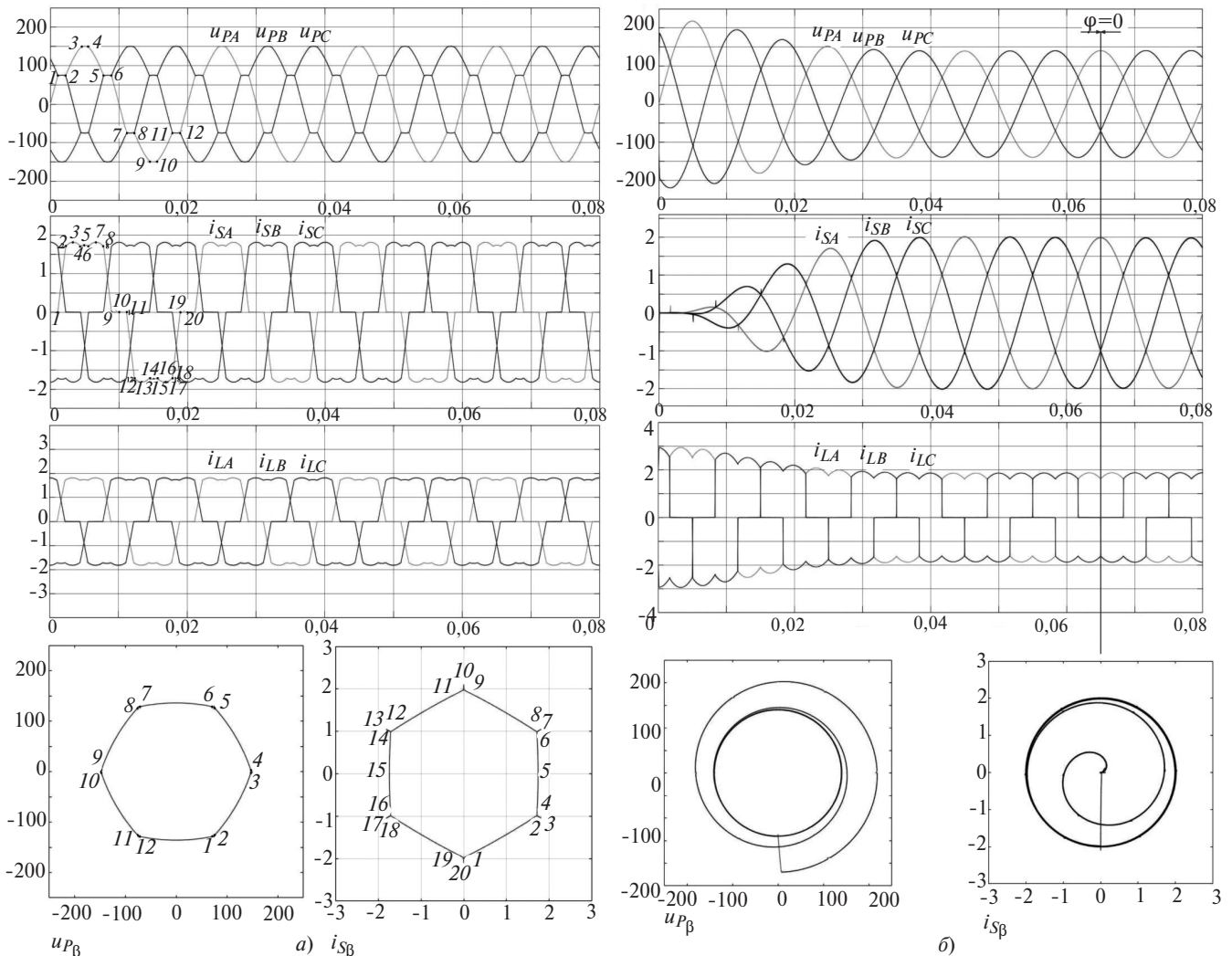


Рис. 9. Результаты моделирования работы схемы при нелинейной нагрузке: а – без компенсатора; б – при работе с компенсатором

При подключении компенсатора кривые сетевого тока i_s и напряжения u_p становятся синусоидальными, при этом сетевой ток i_s совпадает по фазе с напряжением u_p , а кривая тока нагрузки i_L «улучшает» свою форму (рис. 9,б). Годографы обобщенных векторов напряжения u_p и сетевого тока i_s в установившемся режиме принимают формы окружностей, радиусы которых равны амплитудам соответствующих сигналов. Это соответствует тому, что в установившемся режиме система работает так же, как и при идеальной нагрузке.

Таким образом, в результате выполненного анализа показано, что благодаря алгоритму компенсации реактивной мощности достигается практически полная компенсация реактивной мощности тока нагрузки i_L при различных режимах работы трехфазной сети, устраняются несимметрия по фазам сетевого тока i_s , а также его искажения, связанные с нелинейной нагрузкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akagi H. Active harmonic filters. – IEEE Trans. on IA, Dec. 2005, iss. 12, vol. 93, pp. 2128–2141.

2. Akagi H., Kanazawa Y. and Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. – IEEE Trans. on IA, IA-20, 1984, No. 3, pp. 625–630.

3. Verdelho P. and Marques G.D. An Active Power Filter and Unbalanced Current Compensator. – IEEE Trans. Ind. Electron., 1997, 44, (3), pp. 321–328.

4. Савоськин А.Н., Кулинич Ю.М., Духовников В.К. Управляемый компенсатор реактивной мощности электровоза. – Электричество, 2014, № 2, с. 25–29.

5. Patricio Salmeron, Salvador P. Litran. A control Strategy for Hybrid Power Filter to Compensate FourWires Three-Phase Systems. – IEEE Trans. on Power Electronics, July 2010, vol. 25, No. 7, pp. 1923–1931.

6. Milanés-Montero M.I., Romero-Cadaval E., Rico de Marcos A., Minambres-Macros V.M., Barrero Gonzalez F. Novel Method for Synchronization to Disturbed Three-Phase and Single-Phase Systems. Industrial Electronics, 2007, ISIE 2007. – IEEE International Symposium on 4–7 June 2007, pp. 860–865.

7. Akira Nabae, Toshihiro Tanaka. A new definition of instantaneous active-reactive current and power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three-phase circuits. – IEEE Transaction on Power Electronics, July 1996, vol. 11, No. 3, pp. 1238–1243.

8. Akagi H. and Nabae A. The p - q theory in three-phase systems under non-sinusoidal conditions. – Europ. Trans. on Electrical Power (ETEP), 1993, vol. 3, No. 1, January/February, pp. 27–31.

9. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронным двигателем: Учеб. пособие. — СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, 2006, 94 с.

10. Кулинич Ю.М. Адаптивная система автоматического управления гибридного компенсатора реактивной мощности электровоза с плавным регулированием напряжения: Монография. — Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2001, 153 с.

[12.12.2017]

А в т о р ы: **Иньков Юрий Моисеевич** окончил Московский институт инженеров железнодорожного транспорта (МИИТ) в 1959 г. Защитил докторскую диссертацию в 1978 г. Профессор Российского университета транспорта (МИИТ).

Савоськин Анатолий Николаевич окончил МИИТ в 1957 г. В 1974 г. защитил докторскую диссертацию «Прогнозирование показателей надёжности рам тележек электроподвижного состава». Профессор Российского университета транспорта (МИИТ).

Кулинич Юрий Михайлович окончил Хабаровский институт инженеров железнодорожного транспорта в 1977 г. В 2002 г. защитил докторскую диссертацию «Повышение качества электроэнергии, потребляемой электровозом однофазно-постоянного тока, на основе применения гибридного компенсатора реактивной мощности». Профессор Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС).

Колобов Виктор Валерьевич окончил ДВГУПС в 2015 г. Аспирант ДВГУПС.

Elektrichestvo (Electricity), 2018, No. 3, pp. 18–26

DOI:10.24160/0013-5380-2018-3-18-26

A Reactive Power Compensation in Three-Phase Networks

IN'KOV Yurii M. (*Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia*) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

SAVOS'KIN Anatolii M. (*Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia*) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

KULINICH Yurii M. (*Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia*) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

KOLOBOV Victor V. (*FESTU, Khabarovsk, Russia*) — Graduate Student

The article considers a method for active compensation of reactive power and other kinds of load imbalance in three-phase networks, which is based on the notion of ideal load at the common connection point. The fundamental harmonic of positive-sequence voltage component and the specified source current in the case of ideal load are calculated at this point. The compensator current is shaped as the difference between the specified network current and the load current. For implementing such algorithm, a phase-locked loop module (ASFR) is used in the compensator structure. The operation of such compensator was mathematically simulated in the Matlab-Simulink environment for different operation modes and load imbalance kinds.

Key words: *three-phase network, reactive power compensator, active filter, generalized vector, common connection point, phase-locked loop module (ASRF)*

REFERENCES

1. Akagi H. Active harmonic filters. — IEEE Trans. on IA, Dec. 2005, iss. 12, vol. 93, pp. 2128 — 2141.

2. Akagi H., Kanazawa Y. and A. Nabae. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. — IEEE Trans. on IA, IA-20, 1984, No. 3, pp. 625–630.

3. Verdelho P. and Marques G.D. An Active Power Filter and Unbalanced Current Compensator. — IEEE Trans. Ind. Electron., 1997, 44, (3), pp. 321–328.

4. Savos'kin A.N., Kulnich Yu.M., Dukhovnikov V.K. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 2, pp. 25–29.

5. Patricio Salmeron, Salvador P. Litran. A control Strategy for Hybrid Power Filter to Compensate FourWires Three-Phase Susters. — IEEE Trans. on Power Electronics, July 2010, vol. 25, No. 7, pp. 1923–1931.

6. Milanes-Montero M.I., Romero-Cadaval E., Rico de Marcos A., Minambres-Macros V.M., Barrero Gonzalez F. Novel Method for Synchronization to Disturbed Three-Phase and Single-Phase Systems. *Industrial Electronics, 2007, ISIE 2007.* — IEEE International Symposium on 4–7 June 2007, pp. 860–865.

7. Akira Nabae, Toshihiro Tanaka. A new definition of instantaneous active-reactive current and power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three-phase circuits. — IEEE Transaction on Power Electronics, July 1996, vol. 11, No. 3, pp. 1238–1243.

8. Akagi H. and Nabae A. The p - q theory in three-phase systems under non-sinusoidal conditions. — Europ. Trans. on Electrical Power (ETEP), 1993, vol. 3, No. 1, January/February, pp. 27–31.

9. Usol'tsev A.A. *Chastotnoye upravleniye asinkhronnym dvigatelem: Uchebnoye posobiye.* (Frequency control of asynchronous motor: a tutorial). St. Petersburg. Publ. St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2006, 94 p.

10. Kulnich Yu.M. *Adaptivnaya sistema avtomaticheskogo upravleniya gibridnogo kompensatora reaktivnoi moshchnosti elektrovoza s pлавным регулиrovaniyem napryazheniya: Monographiya* (Adaptive automatic control system of the hybrid reactive power compensator of an electric locomotive with a smooth voltage regulation: Monograph. Khabarovsk, Publ. Far Eastern State Transport University, 2001, 153 p.

[12.12.2017]