

Sliding Mode Control Based Shunt Active Power Filter

Skuriatin Y.V., Belousov A.V., Denysevych N.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Belgorod, Russian Federation

Abstract. Currently the shunt active power filter (APF) is an effective means of reducing inactive components of the power consumed from the network. At the same time, the shunt APF being a nonlinear element is itself a source of higher harmonics, the suppression of which is imposed on the interface filter. When using a passive three-phase L-filter in this capacity, the higher voltage harmonics appear at the connection points to the network and the amplitude of these higher voltage harmonics depends on the ratio of the filter inductance and the network inductance. In this case, it is not always possible to ensure the proper quality of the voltage at the connection points to the network. In order to assess the efficiency of compensation for the inactive power components and the form of voltage at the points of connection to the network, this work considers the shunt APF with an interface three-phase LC-filter of the second order and with a sliding mode control. The synthesis of current loop control of the APF has been shown as well. A system with the shunt APF was simulated under the nonlinear unbalanced load conditions in Matlab software package. The simulation results presented in this work demonstrate the ability of the above-mentioned APF to provide radically high quality of voltage at the points of connection to the network and suppression of all inactive components of the power consumed from the network. In addition, the shunt APF has the property of slow response to disturbances from the load side.

Keywords: active power filter, sliding mode, control, higher harmonics, semiconductor converter, inactive components of the power.

DOI: 10.5281/zenodo.1343408

Filtru activ de putere paralel cu comandă la regimuri de alunecare

Scureatin Iu.V., Belousov A.V., Denisevici N.A.

Universitatea tehnologică de Stat din Belgorod V.G. Shuhov.

or. Belgorod, Federația Rusă

Rezumat. FAP paralel, fiind un element neliniar, este însăși sursă de armonici superioare, amorsarea cărora rămâne pentru a fi efectuată de către filtrul de interfață. La utilizarea în acest scop a L-filtrului pasiv trifazat în punctele de comutare la rețea sunt prezente armonici superioare, amplitudinea cărora depinde de raportul dintre inductanța filtrului și inductanța rețelei. În acest caz asigurarea bunei calități a tensiunii în punctele de comutare la rețea nu întotdeauna este posibilă. Ca variantă de soluționare a problemei este utilizarea LC-filtrului trifazat. Însă ridicarea ordinului filtrului duce la apariția fenomenelor de rezonanță, necesitatea lichidării cărora condiționează înaintarea rigorilor adiționale față de sistemul de comandă. Pentru soluționarea problemei menționate, de perspectivă este comanda întreruptă în regimuri de alunecare, avantajele căreia sunt cunoscute pe larg. Astfel, în lucrare este examinat FAP paralel cu LC-filtru de interfață de ordinul doi trifazat și comandă în regimuri de alunecare cu scopul estimării eficienței compensării componentelor neactive de putere și a formei tensiunii în punctele de comutare la rețea. Este arătată sinteza de comandă prin intermediul conturului de curent FAP. În setul de softuri aplicative Matlab/Simulink este realizată modelarea sistemului cu FAP paralel în cazul funcționării la sarcină neliniară asimetrică. Rezultatele simulărilor demonstrează abilitatea FAP menționat de a asigura o calitate considerabil de înaltă a tensiunii în punctele de comutare la rețea și înlăturarea tuturor componentelor negative a puterii consumate din rețea. Astfel, elementul de comandă în regimuri de alunecare oferă sistemului proprietatea unei sensibilități joase la alterările din partea sarcinii.

Cuvinte-cheie: filtru activ de putere paralel, regim de alunecare, armonici superioare, compatibilitatea electromagnetică, componentele neactive ale puterii.

Параллельный силовой активный фильтр с управлением на скользящих режимах

Скuryтин Ю.В., Белоусов А.В., Денисевич Н.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова

Белгород, Российская Федерация

Аннотация. В настоящее время параллельные силовые активные фильтры (САФ) являются эффективным средством снижения неактивных составляющих потребляемой из сети мощности, обусловленных несимметрией напряжений, реактивной составляющей, эмиссией высших гармоник токов при работе на нелинейную несимметричную активно-реактивную нагрузку. Вместе с тем, параллельный САФ, будучи нелинейным элементом, сам является источником высших гармоник,

подавление которых возлагается на интерфейсный фильтр. При использовании в этом качестве пассивного трехфазного L -фильтра в точках подключения к сети присутствуют высшие гармоники напряжения, амплитуда которых зависит от соотношения индуктивности фильтра и индуктивности сети. В этом случае обеспечение надлежащего качества напряжения в точках подключения к сети не всегда представляется возможным. Вариантом решения данной проблемы является использование трехфазного LC -фильтра. Однако повышение порядка фильтра приводит к возникновению резонансных явлений, необходимость устранения которых обуславливает предъявление дополнительных требований к системе управления. Для решения указанной задачи наиболее перспективным представляется разрывное управление на скользящих режимах, достоинства которых широко известны. Таким образом, в статье рассмотрен параллельный САФ с интерфейсным трехфазным LC -фильтром второго порядка и управлением на скользящих режимах с целью оценки эффективности компенсации неактивных составляющих мощности и оценки формы напряжения в точках подключения к сети. Приведен синтез управления токовым контуром САФ. В пакете прикладных программ Matlab/Simulink выполнено моделирование системы с параллельным САФ при работе на нелинейную несимметричную нагрузку. Результаты имитационного моделирования демонстрируют способность указанного выше САФ обеспечивать радикально высокое качество напряжения в точках подключения к сети и исключение всех неактивных составляющих потребляемой из сети мощности. При этом управление на скользящих режимах придает системе свойство низкой чувствительности к возмущениям со стороны нагрузки.

Ключевые слова: параллельный силовой активный фильтр, скользящий режим, высшие гармоники, электромагнитная совместимость, неактивные составляющие мощности.

Введение

В настоящее время, в силу насыщенности сетей электроснабжения нелинейными и несимметричными электроприемниками, потребляемая из сети мощность содержит значительную долю неактивных составляющих, что обуславливает повышение потерь мощности в сети, снижение качества электроэнергии в точках подключения и, соответственно, приводит к негативному влиянию на работу других потребителей, подключенных к этой же сети [1]. Вместе с тем, потребность в электроэнергии растет и в условиях ограниченных возможностей по вводу в эксплуатацию новых генерирующих мощностей вопросы, связанные со снижением технологических потерь электроэнергии, с повышением качества электроэнергии в системах электроснабжения, работающих на нелинейную, несимметричную нагрузку, приобретают чрезвычайную актуальность.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одним из наиболее эффективных методов снижения неактивных составляющих потребляемой из сети мощности является использование параллельных силовых активных фильтров (САФ).

Параллельный силовой активный фильтр представляет собой источник, подключенный к узлам питающей сети параллельно нагрузке и выполняющий компенсацию обусловленных нагрузкой неактивных

составляющих потребляемой из сети мощности.

Типовая схема силовой части САФ (рис.1) состоит из вентильного блока (ВБ), интерфейсного фильтра (ИФ) и емкостного накопителя электроэнергии (ЕН). Вентильный блок представляет собой автономный инвертор напряжения, который подключается к сети со стороны переменного тока через интерфейсный фильтр, представляющий собой пассивный фильтр нижних частот. Емкостный накопитель подключается к вентильному блоку со стороны постоянного тока.

С момента появления в открытой печати первых трудов по силовым активным фильтрам, силовая часть последних не претерпела существенных изменений. А основные усилия исследователей были направлены на преодоление трудностей управления, в результате чего сформировались различные подходы в построении систем управления САФ.

В основе стратегии управления САФ лежит определение составляющих мощности, потребляемой нагрузкой. Согласно одного варианта, на основе информации о неактивных составляющих мощности нагрузки вычисляют сигналы задания компенсирующих токов САФ i_{pa} , i_{pb} , i_{pc} , обработку которых выполняет ВБ с использованием различных методов импульсной модуляции (широтно-импульсная модуляция, релейное управление и др.) [2-4].

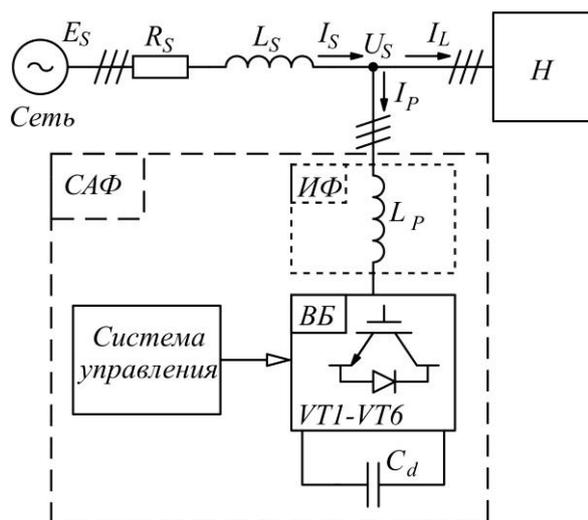


Рис. 1. Схема САФ.

Другой вариант предполагает определение активной составляющей мощности, по которой вычисляются сигналы задания токов сети i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} , имеющие гармоническую форму, обработку которых также выполняет вентильный блок [5].

К основным методам определения составляющих мощности можно отнести теорию мощности по Фризе [6, 7], p-q-теорию мгновенной мощности и ее вариации [8-15], d-q-метод [15, 16] и др.

Отдельного внимания заслуживает вариант построения управления САФ, согласно которому сигналы задания потребляемых из сети токов вычисляются исходя из выполнения баланса мощностей – равенства потребляемой из сети мощности сумме активной мощности нагрузки и мощности потерь в преобразователе. Нарушение баланса определяют по изменению энергии, накопленной в конденсаторе САФ [17-21, 5].

Топология силовой части в сочетании с алгоритмом управления определяет предельные возможности САФ в части эффективности компенсации высших гармоник тока. Действительно, даже при условии абсолютной (т.е. полной) компенсации всех неактивных составляющих тока нагрузки, САФ, работая в импульсном режиме на частотах модуляции, которые составляют единицы – десятки кГц, генерирует в сеть высшие гармоники тока и напряжения с частотами близкими частоте модуляции и кратными последней. Подавление этих составляющих возложено на интерфейсный фильтр. При использовании в

качестве интерфейсного фильтра трехфазного дросселя удается существенно снизить амплитуду модуляционной составляющей тока. Однако переменная составляющая генерируемого активным фильтром напряжения обуславливает появление высокочастотной модуляционной составляющей напряжения в точках подключения САФ к сети, амплитуда которой определяется в соответствии с выражением

$$U_m = \frac{2}{3} U_d \frac{L_S}{L_S + L_P},$$

где U_d – напряжение на конденсаторе звена постоянного тока САФ; L_S – индуктивность сети; L_P – индуктивность интерфейсного фильтра. Причем ключевым параметром, которым можно влиять на размах пульсации модуляционной составляющей напряжения в точках подключения САФ к сети, является индуктивность САФ. Увеличение L_P позволяет снизить U_m , но при этом уменьшается номер наивысшей гармоники токов нагрузки, которую САФ способен компенсировать, также ухудшается динамика САФ и достижение компромисса при этом не всегда является возможным или приемлемым.

Решение данной проблемы может быть достигнуто посредством установки в качестве интерфейсного фильтра САФ трехфазного LC-фильтра или LCL-фильтра [22, 23], что позволяет улучшить подавление гармоник на частоте модуляции. Однако повышение порядка интерфейсного фильтра снижает эффективность компенсации высших гармоник токов нагрузки, приводит к появлению колебаний на резонансных частотах. Успех преодоления указанных выше трудностей во многом определяется выбором метода управления. Наиболее перспективным для решения данной задачи представляется разрывное управление на скользящих режимах, позволяющее придать системе свойство низкой чувствительности к различного рода возмущениям, возможность создавать оптимальные траектории движений в переходных режимах и др. [24]. Один из примеров эффективного использования скользящих режимов при решении задачи формирования токов в объекте управления 3-го порядка приведен в [25].

Целью работы является оценка предельных возможностей САФ с

интерфейсным фильтром второго порядка и управлением на скользящих режимах в части компенсации неактивных составляющих мощности нагрузки и влияния на форму напряжения в точках подключения к сети.

II. УПРАВЛЕНИЕ ТОКОВЫМ КОНТУРОМ САФ НА СКОльзяЩИХ РЕЖИМАХ

Схема системы с САФ, представленная на рис. 2, содержит вентильный блок, собранный на транзисторах VT1-VT6, пассивный трехфазный LC-фильтр, емкостный фильтр (накопитель) в цепи постоянного тока C_d .

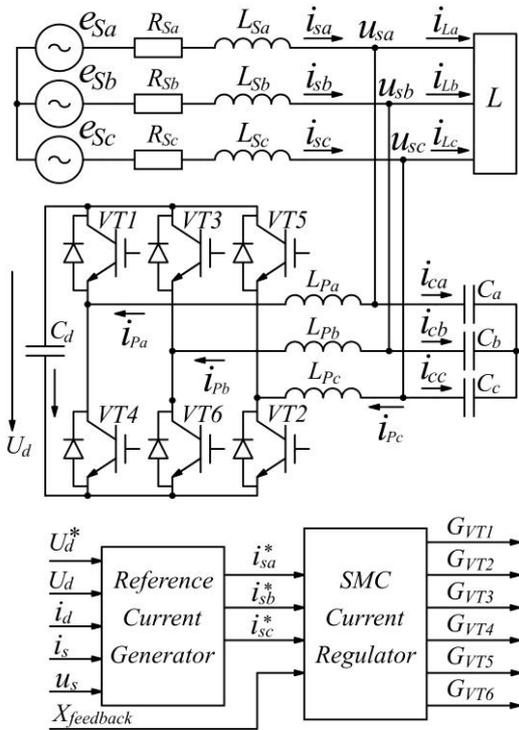


Рис. 2. Функциональная схема системы с параллельным САФ.

Питание осуществляется от трехфазной симметричной сети 380В, 50Гц с активно-индуктивным внутренним сопротивлением. Нагрузка в общем случае нелинейная и несимметричная. Генератор сигналов задания токов сети (Reference Current Generator) на основе информации о токе i_d , напряжении на конденсаторе звена постоянного тока U_d и его задании U_d^* , токах и напряжениях сети i_s , u_s формирует сигналы задания токов сети i_{sa}^* , i_{sb}^* , i_{sc}^* . Сигналы задания сетевых токов и вектор обратной связи $X_{feedback}$ поступают на вход регулятора токов на скользящих

режимах (*SMC Current Regulator*), который формирует импульсы управления вентилями.

Пусть для системы с параллельным САФ (рис.2) индуктивности и емкости интерфейсного фильтра равны $L_{Pa} = L_{Pb} = L_{Pc} = L_P$, $C_a = C_b = C_c = C$, активные сопротивления и индуктивности сети равны $R_{Sa} = R_{Sb} = R_{Sc} = R_s$, $L_{Sa} = L_{Sb} = L_{Sc} = L_s$. Тогда математическое описание системы (рис.2) имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dI_s}{dt} &= \frac{U_{Ls}}{L_s} = -\frac{R_s}{L_s} \cdot I_s + \frac{1}{L_s} K \cdot E_s - \frac{1}{L_s} K \cdot U_c \\ \frac{dU_c}{dt} &= C^{-1} \cdot I_c = C^{-1} \cdot (I_s - I_p - I_L) \\ \frac{dI_p}{dt} &= -\frac{R_p}{L_p} \cdot I_p + \frac{1}{L_p} K \cdot U_c + \frac{1}{L_p} U_y \end{aligned} \right\} (1)$$

где I_s – вектор столбец токов, потребляемых из сети, $I_s = [i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}]^T$; E_s – вектор столбец ЭДС трехфазного источника, $E_s = [e_{sa}, e_{sb}, e_{sc}]^T$; I_c – вектор столбец токов конденсаторов фильтра, $I_c = [i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}]^T$; I_p – вектор столбец токов вентильного блока, $I_p = [i_{pa}, i_{pb}, i_{pc}]^T$; I_L – вектор столбец токов нагрузки, $I_L = [i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}]^T$; U_c – вектор столбец напряжений на конденсаторах фильтра, $U_c = [u_{ca}, u_{cb}, u_{cc}]^T$; U_{Ls} – вектор столбец напряжений на индуктивностях сети, $U_{Ls} = [u_{Lsa}, u_{Lsb}, u_{Lsc}]^T$; K – матрица коэффициентов размерности (3×3)

$$K = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{pmatrix};$$

U_y – вектор управления, $U_y = [u_{ya}, u_{yb}, u_{yc}]^T$, каждая компонента которого претерпевает разрывы как по своей поверхности, заданной уравнением $s_i(x)=0$, так и по пересечению поверхностей; x – вектор-столбец переменных состояния системы.

В качестве поверхностей разрыва по каждой фазе выберем линейную комбинацию сигнала ошибки фазного тока и ее первой и второй производных:

$$S = \eta + K_1 \frac{d\eta}{dt} + K_2 \frac{d^2\eta}{dt^2} = 0, \quad (2)$$

где S – вектор-столбец поверхностей разрыва, $S = [s_1, s_2, s_3]^T$; η – вектор-столбец ошибок фазных токов, $\eta = [\eta_1, \eta_2, \eta_3]^T$; $\eta_1 = i_{sa}^* - i_{sa}$ – ошибка величины тока фазы A ; $\eta_2 = i_{sb}^* - i_{sb}$ – ошибка величины тока фазы B ; $\eta_3 = i_{sc}^* - i_{sc}$ – ошибка величины тока фазы C ; $i_{sa}^*, i_{sb}^*, i_{sc}^*$ – сигналы задания токов, потребляемых из сети; K_1, K_2 – коэффициенты.

В выражении (2) заменим вектор ошибок фазных токов на разность вектора токов задания и вектора фактических токов сети $\eta = I_s^* - I_s$, тогда выражение (2) с учетом (1) примет вид:

$$S = I_s^* + K_1 \frac{dI_s^*}{dt} + K_2 \frac{d^2 I_s^*}{dt^2} - I_s - \frac{K_1}{L_s} U_{Ls} - K_2 \left(-\frac{R_s}{L_s^2} U_{Ls} + \frac{1}{L_s} K \frac{dE_s}{dt} - \frac{1}{L_s C} K \cdot I_c \right) = 0. \quad (3)$$

Разрывное управление будет иметь вид:

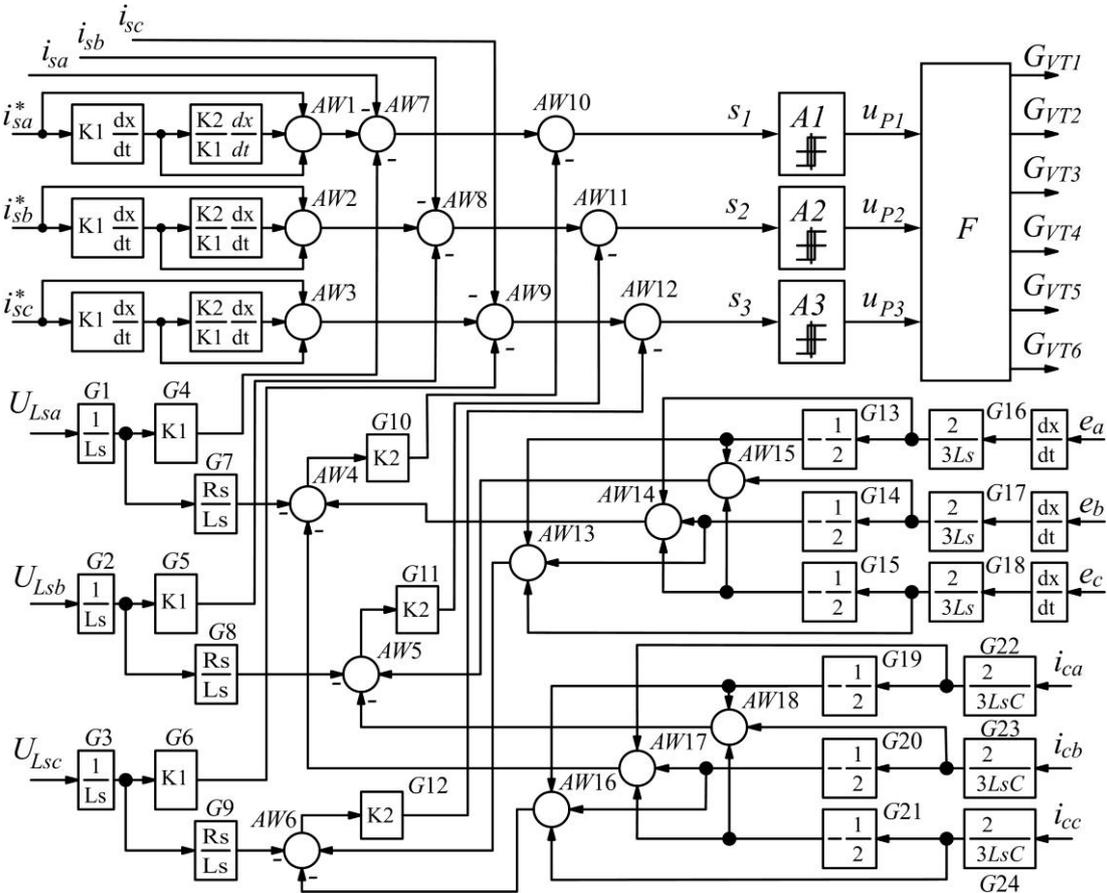


Рис. 3. Блок схема регулятора токов.

Функциональная схема регулятора токов (рис. 3) содержит дифференциаторы dx/dt ,

умноженные на соответствующие коэффициенты, сумматоры $AW1 - AW18$,

$$U_y = U_d \cdot K \cdot U_p \quad (4)$$

где U_d – напряжение на конденсаторе звена постоянного тока САФ; U_p – вектор состояния системы, компоненты которого определяются положением изображающей точки относительно поверхностей разрыва, $U_p = [u_{p1}, u_{p2}, u_{p3}]^T$;

$$u_{pi} = \begin{cases} 1 & npi \begin{cases} s_i(\eta_i) > 0, \\ -a \leq s_i(\eta_i) \leq a & \& \frac{ds_i(\eta_i)}{dt} < 0, \end{cases} \\ 0 & npi \begin{cases} s_i(\eta_i) < 0, \\ -a \leq s_i(\eta_i) \leq a & \& \frac{ds_i(\eta_i)}{dt} > 0, \end{cases} \end{cases} \quad (i=1, 2, 3),$$

a – ширина петли гистерезиса релейного элемента.

усилители $G1 - G24$, релейные элементы $A1 - A3$, блок логики F . Сигналы задания токов сети i_{sa}^* , i_{sb}^* , i_{sc}^* , их первые и вторые производные, умноженные на соответствующие коэффициенты, суммируются в блоках $AW1 - AW3$, выходы которых подключены к суммирующим входам $AW7 - AW9$, соответственно. Фактические токи сети i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} и их первые производные, определяемые блоками $G1 - G6$, поступают на вычитающие входы сумматоров $AW7 - AW9$, выходы которых подключены к соответствующим суммирующим входам блоков $AW10 - AW12$. На вычитающие входы блоков $AW10 - AW12$ поступают сигналы второй производной фактических токов сети, вычисленные посредством блоков $G1 - G3$, $G7 - G24$, $AW4 - AW6$, $AW13 - AW18$ и дифференциаторов. В результате с выходов сумматоров $AW10 - AW12$ компоненты вектора S , вычисленные в соответствии с выражением (3), поступают на входы релейных элементов $A1 - A3$, на выходах которых формируется вектор состояния системы U_P . Компоненты вектора U_P поступают на входы блока логики F , в котором каждой комбинации состояний компонент вектора U_P ставится в соответствие определенная комбинация импульсов управления вентилями (табл. 1).

Таблица 1.

Таблица истинности

№	u_{P1}	u_{P2}	u_{P3}	$VT1$	$VT2$	$VT3$	$VT4$	$VT5$	$VT6$
1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
2	0	0	1	1	1	1	0	0	0
3	0	1	0	1	0	0	0	1	1
4	0	1	1	1	1	0	0	0	1
5	1	0	0	0	0	1	1	1	0
6	1	0	1	0	1	1	1	0	0
7	1	1	0	0	0	0	1	1	1
8	1	1	1	0	1	0	1	0	1

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование работы системы с САФ, содержащим интерфейсный LC-фильтр, и использующим управление на скользящих режимах, выполним посредством пакета прикладных программ Matlab-Simulink.

Примем допущения: сеть образует трехфазную симметричную систему ЭДС; пассивные элементы цепи линейны, их параметры не зависят от времени; вентили

идеальные; конденсатор фильтра C_d предварительно заряжен до номинального напряжения; переменные величины (токи и напряжения на элементах) входящие в (3) доступны для измерения. Во всех режимах генератор сигналов задания фазных токов формирует симметричную трехфазную последовательность синусоидальных сигналов задания синфазных напряжениям источника и с амплитудой, которая соответствует балансу активной мощности источника и нагрузки, если иное дополнительно не оговорено.

Параметры источника: линейное напряжение 380 В, частота 50 Гц, внутреннее сопротивление $R_s = 0.1$ Ом, $L_s = 0.3$ мГн. Параметры САФ: индуктивности и емкости интерфейсного фильтра соответственно равны $L_a=L_b=L_c= 0.3$ мГн, $C_a=C_b=C_c= 10$ мкФ, емкость конденсатора звена постоянного тока $C_d = 2$ мФ, номинальное напряжение на конденсаторе $U_d = 800$ В, ширина гистерезиса $a = 1$, коэффициенты $K_1 = 0.0003$, $K_2 = 6 \cdot 10^{-9}$.

A. Работа системы на нелинейную нагрузку.

В качестве нагрузки выступает неуправляемый выпрямитель, в цепь постоянного тока которого включено активно-индуктивное сопротивление с параметрами $R_d=10$ Ом, $L_d=30$ мГн. В цепи переменного тока выпрямителя установлены реакторы с параметрами $R = 0.1$ Ом, $L=1$ мГн.

Временные диаграммы работы системы на нелинейную нагрузку представлены на рис. 4. В момент времени $t=0.005$ с. нагрузка подключается к сети. При этом возникает переходный процесс включения, длительность которого составляет 15 мс. На всем интервале наблюдения токи нагрузки имеют существенно несинусоидальную форму. Коэффициент гармоник токов нагрузки, измеренный на интервале времени от 0.02 с до 0.04 с, что соответствует установившемуся режиму, составляет $THD_{IL} = 23.6$ %. Одновременно с нагрузкой к сети подключается САФ, при этом скачком с амплитудой $I_{s\ m}^*=52$ А устанавливаются сигналы задания линейных токов сети, обработку которых в соответствии с (4) выполняет регулятор тока на скользящих режимах (рис.3). Длительность переходного процесса установления заданных значений линейных токов сети составляет не более 1 мс. Напряжения в точках подключения САФ к сети устанавливаются за время не более 100

мкс. При этом переходный процесс установления и токов, и напряжений протекает без колебаний и перерегулирований. В установившемся режиме токи, потребляемые из сети, представляют собой трехфазную симметричную последовательность с амплитудой первой гармоники 52.17 А и коэффициентом гармоник $THD_{I_s} < 0.095\%$. Отклонение амплитуды первой гармоники тока от задания равно 0.33%, что соответствует достаточно высокой точности обработки сигнала задания. Фазовый сдвиг между последовательностью токов и соответствующих им напряжений источника по первым гармоникам пренебрежимо мал ($\varphi_{I_s(1)} < 0.0154^\circ$).

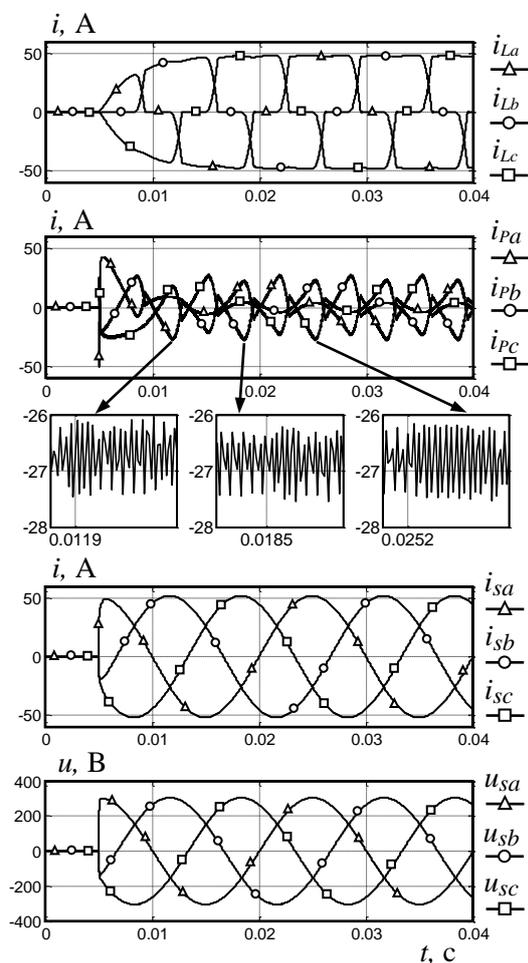


Рис.4. Временные диаграммы работы системы на нелинейную нагрузку.

Напряжения в точках подключения к сети образуют симметричную трехфазную систему с амплитудой первой гармоники 304.77 В и коэффициентом гармоник

$THD_{U_s} < 0.031\%$. Коэффициент мощности по первым гармоникам токов сети и напряжений в точках подключения к сети, определяемый с учетом фазовых сдвигов между указанными выше величинами и ЭДС источника, равен $\cos \varphi_{(1)} = 0.99987$.

В. Работа системы на линейную активно-индуктивную симметричную нагрузку.

Активно-индуктивная симметричная нагрузка, соединенная звездой без нейтрального провода, имеет параметры: $R_H=8$ Ом, $L_H=20$ мГн, коэффициент мощности составляет $\cos \varphi_H=0.78$. Амплитуда сигналов задания линейных токов сети равна $I_{sm}^*=23.5$ А. Как следует из временных диаграмм (рис.5.) при работе на активно-индуктивную нагрузку САФ компенсирует

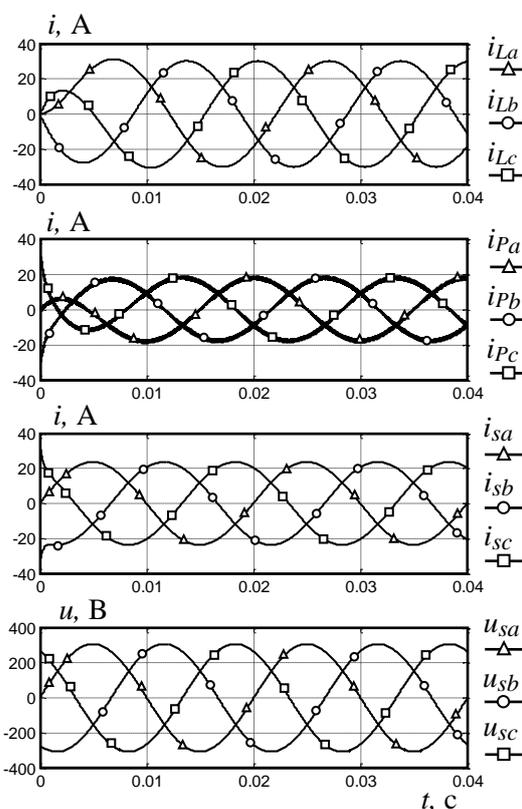


Рис.5. Временные диаграммы работы системы на линейную активно-индуктивную нагрузку.

реактивную составляющую токов нагрузки, обеспечивая формирование трехфазной симметричной последовательности линейных токов сети с практически нулевым фазовым сдвигом относительно соответствующих напряжений источника ($\varphi_{I_s(1)} < 0.055^\circ$). Амплитуда первой гармоники токов сети равна 23.69 А. Отклонение амплитуды первой

гармоники токов сети от задания 0.84%. Коэффициент гармоник токов сети составляет $THD_{I_s} < 0.22\%$.

Напряжения в точках подключения к сети образуют трехфазную симметричную последовательность с амплитудой первой гармоники 307.61 В и $THD_{U_s} < 0.03\%$. Коэффициент мощности по первым гармоникам тока и напряжения в точках подключения составляет $\cos \varphi_{(1)} = 0.99998$.

C. Работа системы на линейную активно-индуктивную несимметричную нагрузку.

Активно-индуктивная несимметричная нагрузка, соединенная звездой без нейтрального провода, имеет параметры: $R_{Ha} = 2.5$ Ом, $L_{Ha} = 25$ мГн, $R_{Hb} = 5$ Ом, $L_{Hb} = 50$ мГн, $R_{Hc} = 10$ Ом, $L_{Hc} = 10$ мГн, коэффициенты мощности составляют $\cos \varphi_{Ha} = 0.3$, $\cos \varphi_{Hb} = 0.3$, $\cos \varphi_{Hc} = 0.95$. Амплитуда сигналов задания линейных токов сети равна $I_{s^*m} = 18$ А.

При работе на несимметричную нагрузку САФ обеспечивает формирование трехфазной симметричной последовательности линейных токов сети (рис.6). Коэффициент гармоник токов сети для этого случая составляет $THD_{I_s} < 0.31\%$, а фазовый сдвиг последовательности линейных токов относительно напряжений источника, определяемый по первым гармоникам, имеет значение, которым можно пренебречь ($\varphi_{I_s(1)} < 0.074^\circ$).

Напряжения в точках подключения к сети имеют гармоническую форму ($THD_{U_s} < 0.03\%$) и образуют прямую последовательность с амплитудой первой гармоники 308.16 В. Коэффициент мощности по первым гармоникам тока и напряжения в точках подключения составляет $\cos \varphi_{(1)} = 0.99999$.

D. Работа системы на несимметричную нелинейную активно-индуктивную нагрузку.

В качестве нагрузки выступает параллельное соединение нагрузок, рассмотренных в предыдущих случаях: неуправляемый выпрямитель, трехфазная симметричная активно-индуктивная нагрузка и трехфазная несимметричная активно-индуктивная нагрузка. Амплитуда сигналов задания линейных токов сети для данного случая равна $I_{s^*m} = 90$ А.

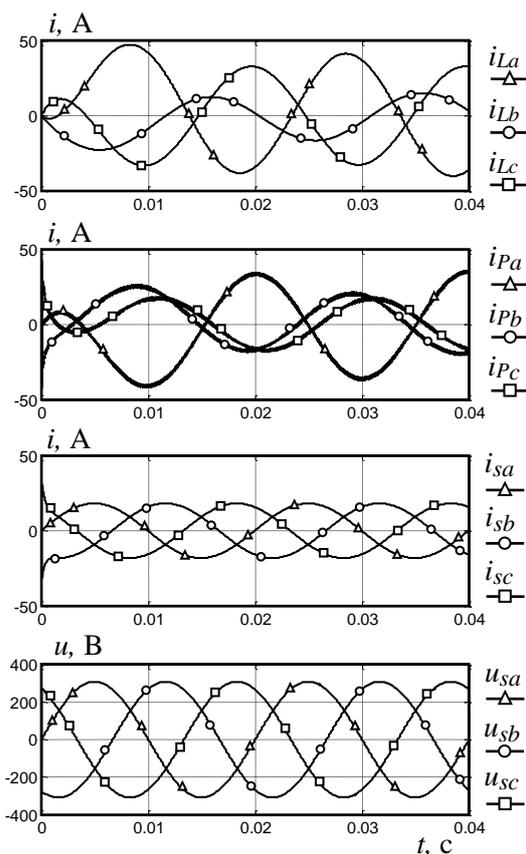


Рис.6. Временные диаграммы работы системы на линейную активно-индуктивную несимметричную нагрузку.

Токи нагрузки имеют существенно несинусоидальную форму (рис. 7). Коэффициенты гармоник токов составляют: $THD_{I_{La}} = 10.94\%$, $THD_{I_{Lb}} = 13.68\%$, $THD_{I_{Lc}} = 11.01\%$. Первые гармоники токов нагрузки образуют несимметричную систему с амплитудами прямой и обратной последовательности 104.668 А и 14.159 А соответственно.

Как следует из временных диаграмм (рис.7), САФ компенсирует все неактивные составляющие токов нагрузки, тем самым обеспечивает формирование трехфазной симметричной последовательности линейных токов сети с нулевым фазовым сдвигом относительно соответствующих напряжений источника ($\varphi_{I_s(1)} < 0.012^\circ$) и гармонической формой ($THD_{I_s} < 0.054\%$). Амплитуда первой гармоники линейных токов сети равна 90.17 А. Отклонение амплитуды первой гармоники токов сети от задания составляет не более 0.2%.

Напряжения в точках подключения к сети также имеют гармоническую форму ($THD_{U_s} < 0.03\%$), образуют трехфазную симметричную

последовательность с амплитудой первой гармоники 308.16 В. Коэффициент мощности по первым гармоникам тока и напряжения в точках подключения составляет $\cos \varphi_{(1)} = 0.9996$.

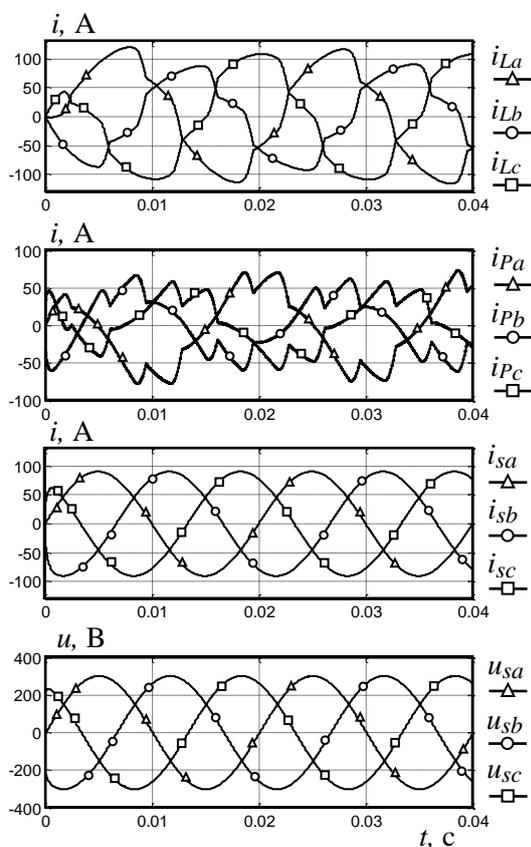


Рис.7. Временные диаграммы работы системы на нелинейную несимметричную активно-индуктивную нагрузку.

Е. Работа системы в режиме сброса / набора нагрузки.

В качестве постоянной нагрузки выступает неуправляемый выпрямитель, параллельно которому подключается трехфазная симметричная и трехфазная несимметричная активно-индуктивные нагрузки. В момент времени $t = 0.005$ с к сети одновременно с САФ подключается выпрямитель (рис.8). Амплитуда сигналов задания токов сети соответствует $I_{s^*m} = 52$ А. В момент времени $t = 0.03$ с к сети подключаются активно-индуктивная симметричная и активно-индуктивная несимметричная трехфазные нагрузки, отключение которых происходит в моменты времени $t = 0.05$ с и $t = 0.055$ с, соответственно.

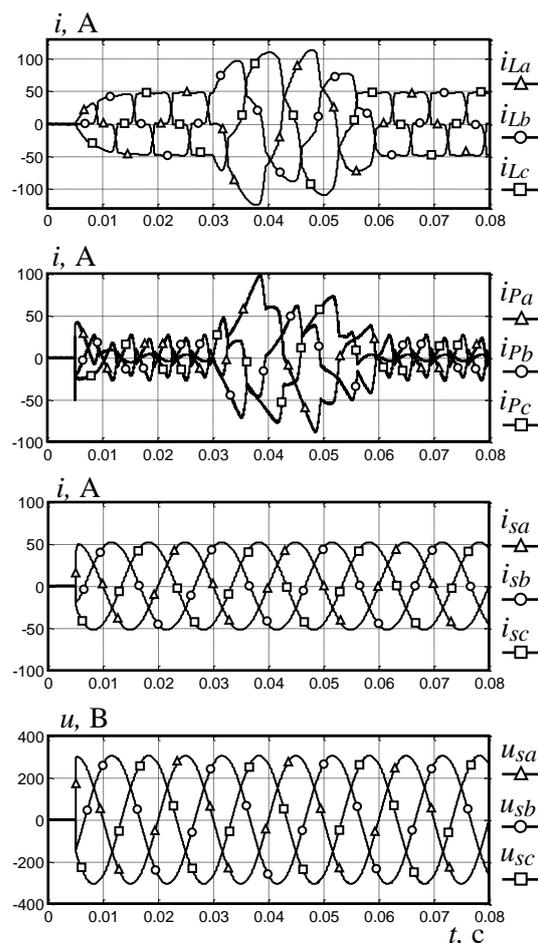


Рис.8. Временные диаграммы работы системы в режиме сброса / набора нагрузки.

Как следует из диаграмм (рис.8), на протяжении всего интервала наблюдения САФ обеспечивает формирование трехфазной симметричной последовательности линейных токов, потребляемых из сети, и напряжений в точках подключения к сети. Коэффициенты гармоник токов и напряжений для данного режима соответственно составляют $\text{THD}_{I_s} < 0.1\%$, $\text{THD}_{U_s} < 0.03\%$. Точность отработки первой гармоники токов сети составляет 0.37%. Амплитуда первой гармоники напряжения в точках подключения к сети 304.76 В. Коэффициент мощности по первым гармоникам тока и напряжения в точках подключения составляет $\cos \varphi_{(1)} = 0.9998$.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

1. Показано, что управление на скользящих режимах САФ с интерфейсным LC-фильтром позволяет обеспечить практически идеально синусоидальную

форму потребляемых из сети токов практически с нулевым фазовым сдвигом относительно соответствующих напряжений источника при работе на нелинейную, несимметричную, активно-индуктивную нагрузку. Переходный процесс установления тока протекает без перерегулирований и колебаний. Погрешность обработки контуром токов задания по первой гармонике тока не превышает 1%.

2. Форма напряжений в точках подключения к сети гармоническая. Отклонение амплитуды первой гармоники напряжений от требуемого значения не превышает допустимых 5%. Переходный процесс установления напряжения протекает без перерегулирований и колебаний. Время переходного процесса достаточно мало (составляет не более 100 мкс).

3. Система обладает низкой чувствительностью к возмущениям со стороны нагрузки, такие как сброс / наброс нагрузки, переходный процесс в нагрузке.

4. Таким образом, использование рассмотренной системы является перспективным. В качестве дальнейших исследований целесообразно определение области существования скользящих режимов, оценка точности обработки токов и энергетических показателей САФ и т.п.

ACKNOWLEDGMENT

Статья подготовлена в рамках программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

Литература (References)

- [1] Shidlovskiy A.K. Zharkin A.F. *Vysshie garmoniki v nizkovol'tnykh elektricheskikh setyakh* [Higher harmonics in low-voltage electrical networks.]. Kiev, Naukova dumka, 2005.
- [2] Dixon J. W., Garcia J. J., Moran L. Control System for Three-Phase Active Power Filter Which Simultaneously Compensates Power Factor and Unbalanced Loads. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1995, vol. 42, no. 6, pp. 636-641.
- [3] Ghamri A., Benchouia M.T., Golea A. Sliding-mode Control Based Three-phase Shunt Active Power Filter: Simulation and Experimentation, *Electric Power Components and Systems*, 2012, vol. 40, no. 4, pp. 383-398. DOI:10.1080/15325008.2011.639127.
- [4] Belaidi R., Haddouche A., Guendouz H. Fuzzy Logic Controller Based Three-Phase Shunt Active Power Filter for Compensating Harmonics and Reactive Power under Unbalanced Mains Voltages, *Energy Procedia*, 2012, vol. 18, pp. 560-570. doi:10.1016/j.egypro.2012.05.068.
- [5] Rahman N.F.A., Radzi M.A.M. , Soh A.C., Mariun N. and Rahim N.A. Adaptive Hybrid Fuzzy-Proportional Plus Crisp-Integral Current Control Algorithm for Shunt Active Power Filter Operation, *Energies*, 2016, vol. 9, no. 9, Article 737, 18 pages. doi:10.3390/en9090737.
- [6] Frize S. Active and Apparent power in non-sinusoidal systems. *Przeglad Elektrot.*, 1931, no. 7, pp. 193-203, (In Polish).
- [7] Lokhov S.M. Energeticheskie sostavlyayushchie moshchnosti ventil'nykh preobrazovateley [Energy components for power rectifier converters]. Chelyabinsk, South Ural State University Publ., 1999, 106 p.
- [8] Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three phase circuits". IPES' 83 – Int. Power Electronics Conf., Tokyo, Japan, 1983, pp. 1375 – 1386.
- [9] Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components". *IEEE Trans. Ind. Applications.*, vol. 20, pp. 625-630, May/June, 1984.
- [10] Kim H.S., Akagi H. "The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames". In Proc. IEEE/PEDS'99 Conf., Hong Kong, July, 1999, pp. 422-427.
- [11] Akagi H., Ogasawara S., Kim H., The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems: A comprehensive approach, *proc. of Industry Application Conf. 34th IAS Annual Meeting*, vol. 1, pp. 431-439, 1999.
- [12] Watanabe E.H., Aredes M., Akagi H. The p-q theory for active filter control: some problems and solutions. *Sba Controle & Automação*, 2004, vol. 15, no. 1, pp. 78-84. doi:10.1590/S010317592004000100010.
- [13] Afonso J., Couto C., Martins J. Active Filters with Control Based on the p-q Theory, *IEEE Industrial Electronics Society Newsletter*, vol. 47, no. 3, pp. 5-10.
- [14] Kapgate R.A., Sahu N.T. Basic of p-q Theory for Shunt and Series Compensation, *IJAIS Proceedings on 2nd National Conference on Innovative Paradigms in Engineering and Technology (NCIPET 2013)* no. 3, pp 5-9, November 2013.
- [15] Chen D., Xie S. Review of the Control Strategies Applied to Active Power Filters, *IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies*, 2004, vol. 2, pp. 666-670.

- [16] Moleykutty G., Kartik P. B. Performance Comparison of Three-Phase Shunt Active Power Filter Algorithms, *American Journal of Applied Sciences*, 2008. vol. 5, no. 11, pp. 1424-1428.
- [17] Jain S.K., Agarwal P. Design Simulation and Experimental Investigation, on a Shunt Active Power Filter for Harmonics, and Reactive Power Compensation. *Electric Power Components and Systems*, 2003, vol. 31, no. 7, pp. 671-692. doi: 10.1080/15325000390203674.
- [18] Adel M., Zaid S., Mahgoub O. Improved Active Power Filter Performance Based on an Indirect Current Control Technique. *Journal of Power Electronics*, 2011, vol. 11, no. 6, pp. 931-937.
- [19] Juntao Fei, Tianhua Li, Feng Wang, and Wanru Juan, "A Novel Sliding Mode Control Technique for Indirect Current Controlled Active Power Filter," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2012, Article ID 549782, 18 pages, 2012. doi:10.1155/2012/549782.
- [20] Chaoui A., Gaubert J.P., Krim F., Champenois G. PI Controlled Three-phase Shunt Active Power Filter for Power Quality Improvement, *Electric Power Components and Systems*, 2007, vol. 35 no. 12, pp. 1331-1344. doi:10.1080/15325000701426062.
- [21] Skuriatin Yu. V., Belousov A. V. Povyshenie effektivnosti aktivnoy fil'tratcii. Pryamoe upravlenie potrebyaemoy moshchnost'yu [Improving the Active Filtering Efficiency. Direct Control of Power Consumption]. *Izv. vuzov. Elektromekhanika*, 2016, no. 1, pp. 71-77. (In Russian). doi: 10.17213/0136-3360-2016-1-71-77.
- [22] Hou R., Wu J., Liu Y., Xu D. Generalized Design of Shunt Active Power Filter with Output LCL Filter, *ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA*, 2014, VOL. 20, NO. 5, pp. 65-71
- [23] Zhao G., Liu J. Han M. Design of Input Filters Considering the Stability of STATCOM Systems, *Journal of Power Electronics*, vol. 11, no. 6, pp. 904-913.
- [24] Utkin V.I. *Sliding modes and their application in variable structure systems.* / Translated from the Russian by A. Parnakh. Moscow, Mir Publ., 1978. 257 p. (Russ. ed.: Utkin V.I. *Skol'zyashchie rezhimy i ikh primeneniye v sistemakh s peremennoy strukturoy.* Moscow, Nauka, 1974).
- [25] Skuriatin Yu.V., Denisevich N.A. Increase of electromagnetic compatibility of converter of frequency of current with the load, *Technical Electrodynamics*, 2012, no. 2, pp. 65-66. (In Russian).

Сведения об авторах.



Скuryaтин Юрий Васильевич
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, кафедра электроэнергетики и автоматизации, кандидат технических наук, доцент. Область научных интересов связана с разработкой систем преобразования параметров электроэнергии.
E-mail: yvs-work@mail.ru



Белoусов Александр Владимирович
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, кандидат технических наук, доцент, директор института энергетики, информационных технологий и управляющих систем. Область научных интересов связана с разработкой систем диспетчеризации распределенных энергетических объектов.
E-mail: ntk@intbel.ru



Денисевич Наталья Анатольевна
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Область научных интересов связана с разработкой систем преобразования параметров электроэнергии.
E-mail: natalibgtu@mail.ru