

Обзорные статьи

УДК 621.314 + 681.51.01

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОФАЗНЫХ ОБРАТИМЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

М.М. Дудкин

Снижение потерь и повышение качества электрической энергии в электрических сетях является одной из важнейших задач при решении проблемы ресурсосбережения, в частности, энергосбережения в промышленных технологических системах и комплексах. Одним из возможных вариантов решения данной проблемы является применение обратимых преобразователей напряжения (ОПН).

В статье приведены результаты экспериментальных исследований однофазного ОПН, работающего в режимах активного фильтра высших гармоник и компенсации реактивной мощности, а также впервые предложенного однофазного нагрузочно-питающего устройства, предназначенного для испытания и исследования преобразователей электрической энергии и другого электротехнического оборудования как на постоянном, так и переменном токе. Рассмотренные устройства обеспечивают снижение энергопотребления и улучшение качества электрической энергии. Высокая эксплуатационная надежность и помехоустойчивость системы управления, а также улучшение массогабаритных показателей ОПН достигаются за счет применения интегрирующих развертывающих преобразователей и однополярной модуляции при переключении силовых вентиляей. Результаты работы используются в автоматизированном лабораторном комплексе «Энергосберегающая энергетическая электроника».

Ключевые слова: обратимый преобразователь напряжения, активный фильтр, компенсатор реактивной мощности, нагрузочно-питающее устройство, интегрирующий развертывающий преобразователь, тиристорный преобразователь, преобразователь частоты.

Введение

Снижение потерь и повышение качества электрической энергии в электрических сетях является одной из важнейших задач при решении проблемы ресурсосбережения, в частности, энергосбережения в промышленных технологических системах и комплексах [1–2]. Одним из возможных вариантов решения данной проблемы является применение обратимых преобразователей напряжения (ОПН).

Обратимые преобразователи напряжения (активные выпрямители) за последнее время получили широкое применение в таких областях как регулируемый электропривод постоянного и переменного тока [3–6], активные фильтры и компенсаторы реактивной мощности [7], комбинированные системы электроснабжения [1]. ОПН обеспечивают режим энергосбережения за счет рекуперации энергии в сеть при торможении исполнительного механизма, улучшают гармонический состав тока, потребляемого преобразователем из сети или возвращаемого в сеть, а также дают возможность получить желаемое значение коэффициента мощности*.

Ниже рассматривается применение однофазных обратимых преобразователей напряжения в испытательных стендах.

Функциональная схема обратимого преобразователя напряжения (фильтр-компенсатор)

Обратимый преобразователь напряжения, работающий в режимах активного фильтра высших гармоник и компенсации реактивной мощности, часто называют фильтром-компенсатором [8]. В его основе (рис. 1) лежит ОПН [9], подключаемый параллельно источнику напряжения сети. Силовой блок (СБ) ОПН представляет собой однофазный транзисторный мост $T1 - T4$, шунтированный обратными диодами $D1 - D4$, с дросселем $L1$ на входе и емкостным накопителем C_d на выходе. Методами модуляции, в частности, широтно-импульсной (ШИМ), на зажимах моста a, b с помощью ключей $T1 - T4$ формируются импульсы напряжения u_{ab} в соответствии с требуемым законом регулирования. После фильтрации этого напряжения дросселем $L1$ в сеть переменного напряжения u_1 поступает компенсирующий ток i_k , мгновенное значение которого изменяется в соответствии с функцией модуляции напряжения U_d , которое на выходе преобразователя поддерживается постоянным за счет его системы управления. Изменяя функцию модуляции, можно получить компенсирующий ток с различными мгновенными значениями во времени.

*Госзадание Регистрационный номер: 7.3552.2011 23.35.2011. Исследование и создание новых ресурсосберегающих электродвигателей и силовых вентиляльных преобразователей для промышленных технологических комплексов, объектов ЖКХ и сельского хозяйства.

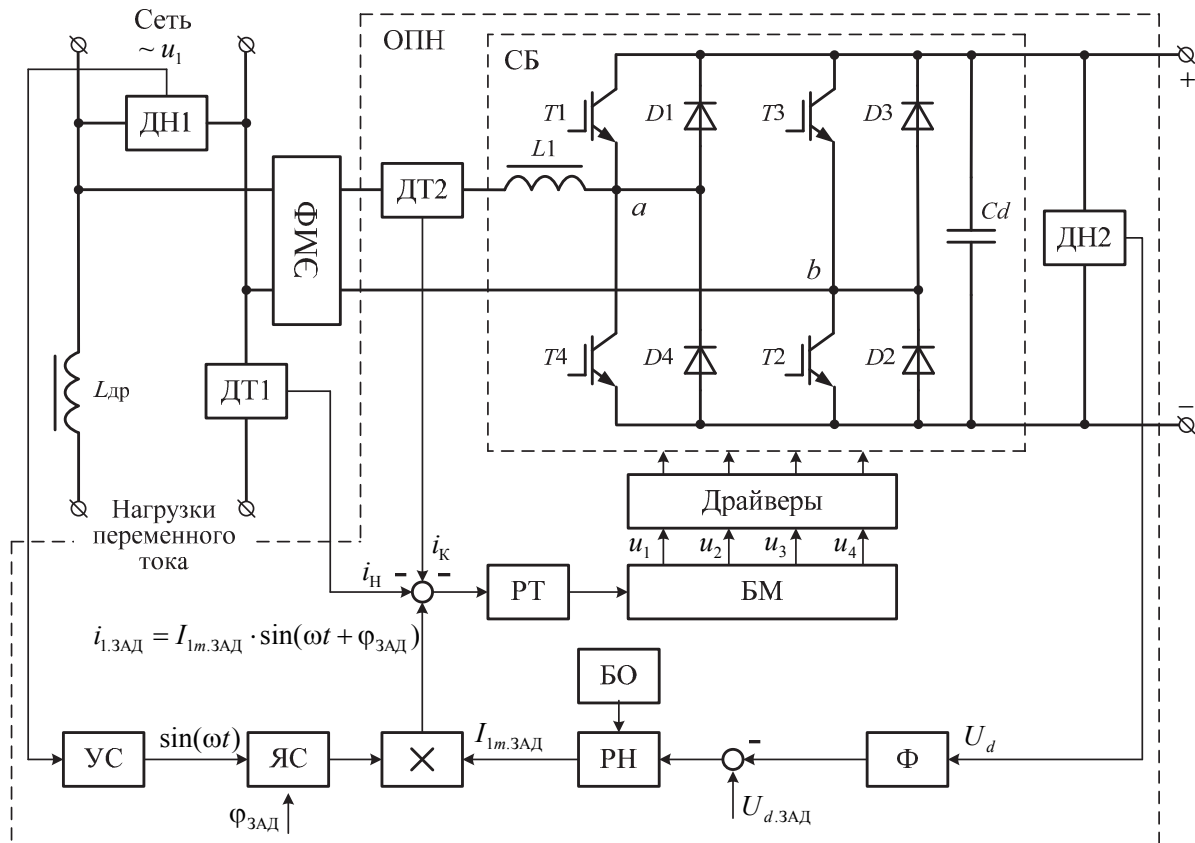


Рис. 1. Функциональная схема однофазного обратимого преобразователя напряжения, работающего в режиме активного фильтра высших гармоник и компенсации реактивной мощности

На входе ОПН установлен электромагнитный (сетевой) фильтр (ЭМФ), предназначенный для предотвращения проникновения в сеть высокочастотных гармоник, соответствующих частотному спектру ШИМ.

Для синхронизации преобразователя с сетью в системе управления используется датчик напряжения ДН1 и устройство синхронизации (УС), на выходе которого формируется опорный единичный синусоидальный сигнал $\sin(\omega t)$. В ячейке ЯС осуществляется фазовый сдвиг синусоидального воздействия на заданный угол $\varphi_{зад}$, что обеспечивает требуемый $\cos\varphi$ на входе преобразователя. С целью достижения наиболее высоких энергетических показателей в системе рекомендуется задавать $\varphi_{зад} = 0$.

Для стабилизации выпрямленного напряжения U_d на конденсаторе C_d и расчета амплитуды заданного тока $I_{1m.зад}$ в системе управления введен внешний контур напряжения, состоящий из датчика напряжения ДН2, сглаживающего фильтра Ф, источника сигнала задания $U_{d.зад}$ и ПИ-регулятора напряжения РН с блоком ограничения БО, ограничивающим амплитуду потребляемого тока $I_{1m.зад}$. При помощи умножителя формируется мгновенное значение заданного тока $i_{1зад} = I_{1m.зад} \cdot \sin(\omega t + \varphi_{зад})$. Закон изменения компенсирующего тока i_k обеспечивается внутренним контуром регулирова-

ния, состоящим из дросселя $L1$, датчика тока ДТ2 и ПИ-регулятора тока РТ.

Блок модуляции (БМ) осуществляет переключение силовых транзисторов $T1 - T4$ (рис. 1) в режиме ШИМ по несимметричному закону управления (однополярная модуляция) с удвоением частоты импульсов на выходе преобразователя [8, 10]. Драйверы в системе управления обеспечивают потенциальную развязку и усиление управляющих импульсов.

Для устранения искажений токов, создаваемых нелинейной нагрузкой, в систему управления ОПН введен датчик тока ДТ1 (рис. 1), выходная координата которого предназначена для расчета компенсирующего тока i_k преобразователя в соответствии с выражением $i_k = i_1 - i_n$, где i_1 – мгновенное значение синусоидального тока, потребляемого из сети; i_n – ток, потребляемый нелинейными нагрузками.

БМ состоит из двух интегрирующих развертывающих преобразователей РП1 и РП2 с широтно-импульсной модуляцией второго рода (ШИМ-2) [10–11], генератора пилообразного напряжения (ГПН), общего для РП1 и РП2, инвертора Ин., формирующего взаимно инверсные сигналы управления $X_{вх}$ и $-X_{вх}$, и распределителя импульсов РИ (рис. 2, а).

РП1 и РП2 с ШИМ-2 представляют собой замкнутые системы, состоящие из сумматоров $\Sigma 1 - \Sigma 4$, интеграторов И1, И2 с постоянной времени $T_{И2}$ и релейных элементов РЭ1, РЭ2 с безгистерезисной и симметричной относительно нуля характеристиками (рис. 2, а).

Перевод РП1 и РП2 в режим вынужденных переключений производится от генератора пилообразного напряжения ГПН, формирующего сигнал ведущей развертывающей функции $Y_{И}(t)$ с линейно нарастающим и спадающим фронтами (рис. 2, в). ГПН представляет собой замкнутую автоколебательную систему, состоящую из интегратора И и релейного элемента РЭ с симметричными порогами переключения $\pm b$ (рис. 2, а). Несущая частота ГПН $f_0 = 1/(4\bar{b}T_{И1})$, где $\bar{b} = |b/A|$ – нормированное значение порогов переключения РЭ; $T_{И1}$ – постоянная времени интегрирования интегратора в ГПН, причем $T_{И1} < 2T_{И2}$.

Ведомые развертки $Y_{И1}(t), Y_{И2}(t)$ в РП1 и РП2 формируются в результате интегрирования суммы или разности выходных импульсов $Y_1(t), Y_2(t)$ релейных элементов РЭ1, РЭ2 и входных воздействий $\pm X_{ВХ}$ (рис. 2, б – д). Переключение ключей $T1 - T4$ в стойках моста ОПН происходит в моменты равенства ведомых $Y_{И1}(t), Y_{И2}(t)$ и ведущей $Y_{И}(t)$ разверток (рис. 2, в). Статическая функция преобразования РП определяется из выражения $\gamma = t_{2n}/T_0 = 0,5 \cdot (1 + \bar{X}_{ВХ})$, где γ – коэффициент заполнения импульсов силовых ключей; t_{2n} – интервал времени включенного состояния ключей $T2, T4$ (рис. 2, г, д); $T_0 = 1/f_0$ – период ШИМ; f_0 – несущая частота ГПН; $\bar{X}_{ВХ} = |X_{ВХ}/A|$ – нормированное значение сигнала управления, $\pm A$ – амплитуда импульсов на выходе РЭ1, РЭ2 (рис. 2, г, д).

Выходные инверторы Ин.1, Ин.2 (рис. 2, а) служат для преобразования биполярных выходных импульсов $Y_1(t), Y_2(t)$ релейных элементов РЭ1, РЭ2

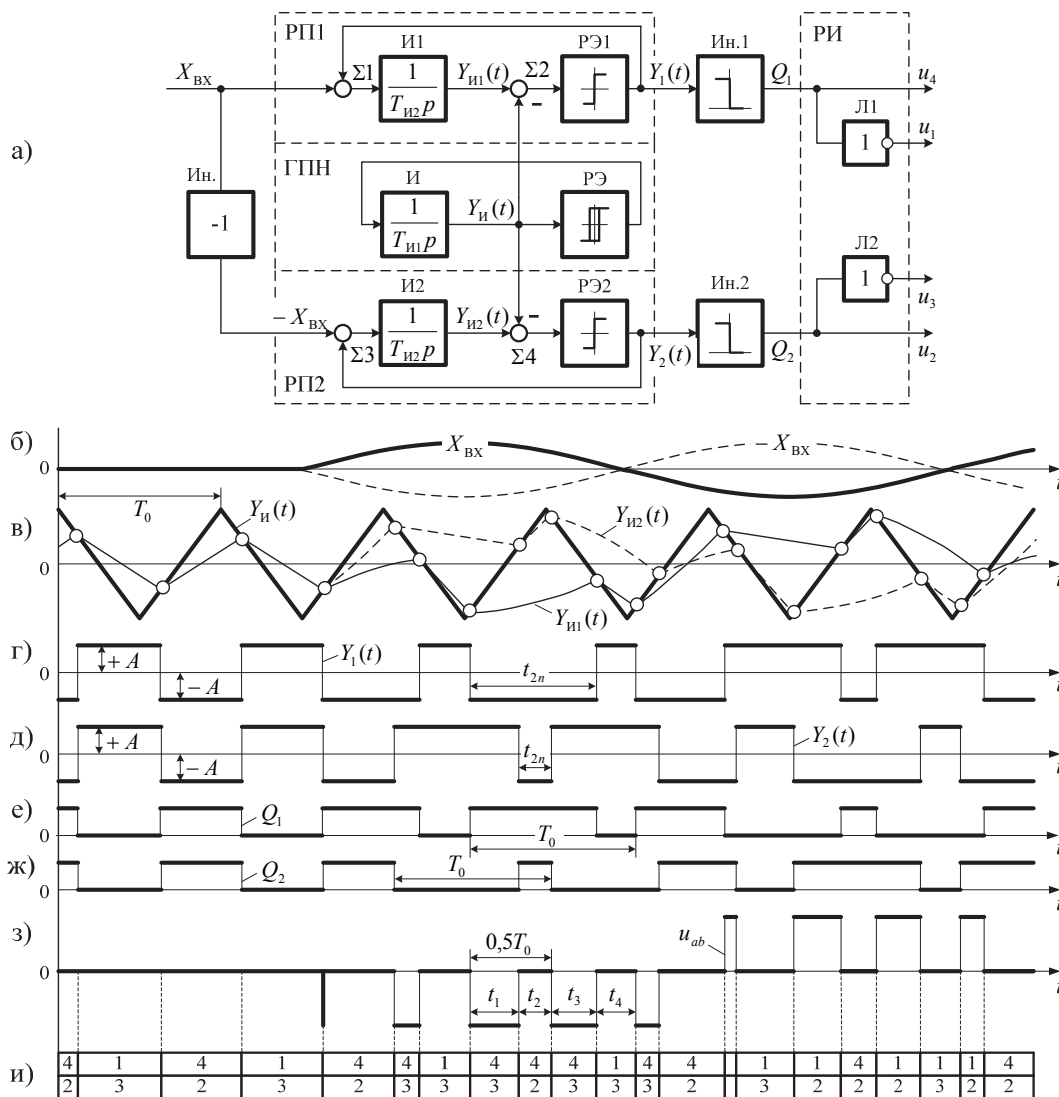


Рис. 2. Структурная схема блока модуляции ОПН (а) и временные диаграммы его сигналов (б – и)

(рис. 2 г, д) в однополярные сигналы Q_1 , Q_2 (рис. 2, е, ж), что необходимо для подключения к распределителю импульсов управления РИ (рис. 2, а).

Импульсами Q_1 осуществляется управление ключами T_1 , T_4 первой стойки моста, а импульсами Q_2 – ключами T_2 , T_3 второй стойки моста (рис. 1, 2, е, ж). Логические инверторы Л1 и Л2 в РИ (рис. 2, а) обеспечивают противофазное переключение силовых ключей в стойках моста.

При $X_{ВХ} = 0$ РП1 и РП2 формируют два одинаковых сигнала Q_1 и Q_2 (рис. 2 е, ж), в результате чего в проводящем состоянии одновременно находятся либо ключи T_1 , T_3 , либо – T_2 , T_4 (рис. 2, и). Напряжение на зажимах стойки моста $u_{ab} = 0$ (рис. 2 з).

При $X_{ВХ} > 0$ происходит увеличение продолжительности включения ключа T_4 при одновременном сокращении длительности открытого состояния T_2 (рис. 2, е, ж). В результате на интервалах времени t_1 и t_3 в проводящем состоянии оказываются ключи T_3 , T_4 , расположенные по диагонали моста (рис. 2, з, и), и напряжение $u_{ab} = -U_d$ (рис. 2, з), где U_d – постоянное напряжение на выходе ОПН. В интервалах t_2 и t_4 всегда открыты либо ключи T_2 , T_4 , либо T_1 , T_3 (рис. 2, з, и). Тогда напряжение $u_{ab} = 0$ (рис. 2, з). При $X_{ВХ} < 0$ происходит изменение знака напряжения на выходе преобразователя $u_{ab} > 0$ (рис. 2, з) за счет срабатывания ключей T_1 , T_2 , расположенных в противоположной диагонали моста.

Поскольку две стойки моста управляются независимо, частота импульсов на выходе преобразователя равна удвоенному значению несущей частоты ШИМ f_0 системы управления (рис. 2, е – з). Это дает соответствующее улучшение гармонического спектра выходного напряжения ОПН [9]. Переход к однополярной модуляции обеспечивает также меньший уровень пульсаций тока дросселя $L1$ ОПН по сравнению с двухполярной модуляцией [8, 12], а удвоение частоты импульсов на выходе ОПН позволяет в два раза повысить помехоустойчивость системы управления за счет увеличения эквивалентной постоянной времени РП1 и РП2 $T_э \approx 0,27 \cdot \bar{T}_{И2} \cdot T_0$ [10]. Здесь $\bar{T}_{И2} = T_{И2} / T_{И1}$ – относительная постоянная времени интегратора в РП1 и РП2, выбираемая в диапазоне $2,1 \leq \bar{T}_{И2} \leq 3,0$, когда разрешается компромисс между помехоустойчивостью и быстродействием РП.

Таким образом, по сравнению с симметричным алгоритмом переключения силовых вентилях [8, 12] несимметричный алгоритм переключения силовых ключей с удвоением частоты импульсов на выходе преобразователя позволяет при сохранении амплитуды пульсаций тока дросселя $L1$, несущей частоты ШИМ f_0 системы управления и напряжения на выходе преобразователя U_d в четыре раза снизить индуктивность дросселей $L1$ на входе ОПН и $L_{др}$ на входе подключения нагрузок переменного тока (рис. 1). Это значительно

уменьшает массогабаритные показатели ОПН и повышает его быстродействие.

Кроме того, применение интегрирующих РП1 и РП2 с ШИМ-2 в блоке модуляции обеспечивает высокую помехоустойчивость системы управления ОПН по отношению к сигналам внешних помех с частотным спектром, близким или превышающим частоту несущих колебаний f_0 РП [10–11].

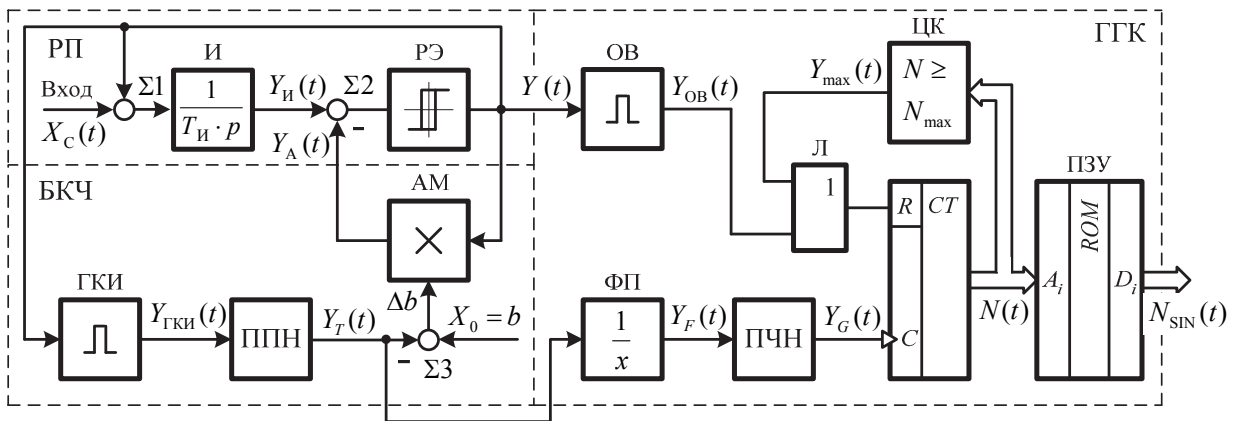
Одним из наиболее уязвимых с позиций помехоустойчивости каналов системы управления ОПН является устройство синхронизации УС (рис. 1), которое в большинстве практических случаев включает в себя сглаживающий фильтр Φ и релейный элемент РЭ с симметричными относительно нулевого уровня порогами переключения [13]. Недостаток такого устройства очевиден – при изменениях амплитуды и/или частоты напряжения сети заданный угол синхронизации существенно меняется [14], что неизбежно приводит к ухудшению энергетических показателей ОПН, например, коэффициента мощности χ и $\cos\phi$.

Применение методов интегрирующего развертывающего преобразования для синхронизации системы управления ОПН является одним из эффективных способов повышения ее помехоустойчивости, статической и динамической точности [14–15].

В основе адаптивного УС лежит интегрирующий РП (рис. 3, а), содержащий сумматоры $\Sigma 1$, $\Sigma 2$, интегратор И и релейный элемент РЭ с симметричной относительно «нуля» петлей гистерезиса. При этом РП работает в режиме внешней синхронизации с частотой напряжения сети [14–15].

При воздействии гармонического синхронизирующего сигнала (напряжения сети) $X_C(t)$ (рис. 3, б) на выходе РП устанавливаются вынужденные колебания, при которых импульсы на выходе РЭ $Y(t)$ сдвинуты относительно напряжения сети $X_C(t)$ на угол $\alpha_C = -90$ эл. град (рис. 3, б, в) при условии выполнения равенства $T_C = T_0$, где T_C – период напряжения сети; $T_0 = 4\bar{b}T_{И}$ – период собственных автоколебаний РП; $\bar{b} = |b/A|$ – нормированное значение порогов переключения РЭ; $T_{И}$ – постоянная времени интегратора РП.

В работе [14] показано, что интегрирующий РП, синхронизированный гармоническим внешним воздействием, полностью адаптируется к неустойчивости амплитуды напряжения сети в пределах $\pm 50\%$, когда в установившемся режиме работы угол синхронизации α_C сохраняется равным -90 эл. град, а оптимальным уровнем глубины синхронизации $\bar{A}_C = |A_C/A|$ следует считать диапазон $\pi/2 \leq \bar{A}_C \leq 4,0$, когда разрешается компромисс между помехоустойчивостью и быстродействием РП. Здесь A_C – амплитуда напряжения сети; $\pm A$ – амплитуда выходных импульсов РЭ.



а)

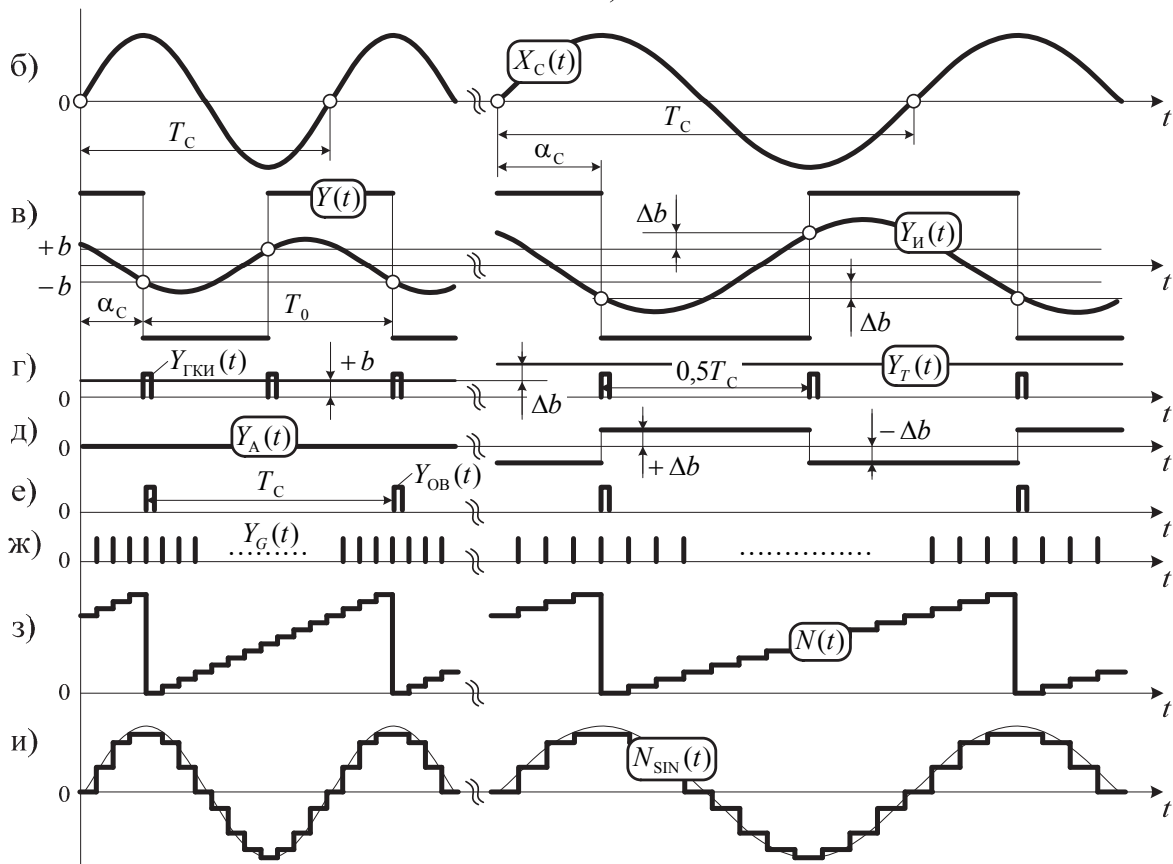


Рис. 3. Структурная схема (а) и временные диаграммы сигналов (б – и) адаптивного устройства синхронизации для ОПН

Для адаптации РП к частоте питающего напряжения в УС введен блок коррекции частоты БКЧ (рис. 3, а), состоящий из амплитудного модулятора АМ, сумматора $\Sigma 3$, преобразователя периода (интервала времени) в напряжение ППН и генератора коротких импульсов ГКИ, запускаемого по переднему и заднему фронтам импульса с выхода РП (рис. 3, в, г).

При номинальной частоте напряжения сети сигнал на выходе ППН $Y_T(t)$ равен по модулю порогу переключения b релейного элемента РЭ (рис. 3 г), поэтому $Y_A(t)$ на выходе АМ равен нулю (рис. 3 д).

При снижении частоты питающего напряжения (рис. 3, б) возрастает сигнал $Y_T(t)$ на выходе ППН до уровня $b + \Delta b$ (рис. 3 г), вследствие чего увеличивается и порог переключения РЭ на величину Δb (рис. 3, в) при сохранении равенства $T_C = T_0 = 4bT_{и}$. В результате этого в установившемся режиме работы угол синхронизации α_C между напряжением сети $X_C(t)$ и выходными импульсами РП сохраняется равным -90 эл. град (рис. 3, б, в).

В состав адаптивного УС также входит цифровой генератор гармонических колебаний ГГК

(рис. 3, а), включающий в себя двоичный суммирующий счетчик СТ, постоянное запоминающее устройство ПЗУ, преобразователь напряжения в частоту импульсов ПНЧ, функциональный преобразователь ФП математической функции $(1/x)$, одновибратор ОВ, цифровой компаратор ЦК и логический элемент Л типа «2ИЛИ».

Синхронизация ГТК с напряжением сети $X_C(t)$ осуществляется импульсами $Y_{ОВ}(t)$ (рис. 3 е) с выхода ОВ, которые через логический элемент Л типа «2ИЛИ» устанавливают в счетчике СТ начальный нулевой код (рис. 3 з). Запуск ОВ происходит по заднему фронту сигнала с выхода РП (рис. 3, в, е).

ФП выделяет сигнал $Y_F(t)$, прямо пропорциональный удвоенному значению частоты напряжения сети $(0,5T_C)^{-1}$ (рис. 3, г), который затем преобразуется с помощью ПНЧ в импульсы $Y_G(t)$ с частотой $(T_G)^{-1}$ (рис. 3, ж). Для достижения повышенной временной и температурной стабильности характеристик и помехоустойчивости в адаптивном УС (рис. 3, а) целесообразно использовать интегрирующий ПНЧ с синфазной амплитудно-частотно-импульсной модуляцией [16–17].

Счетчик СТ формирует адресную развертывающую функцию $N(t)$ (рис. 3, з), где каждое значение кода N_i является кодом адреса соответствующей ячейки памяти в ПЗУ, в которой хранится значение кода $N_{\text{SIN}}(t)$ (рис. 3 и), аппроксимирующего функцию $\sin(\omega t + 90^\circ)$, так как выходные импульсы РП отстают по фазе от напряжения сети $X_C(t)$ на угол $\alpha_C = -90$ эл. град (рис. 3, б, в).

Цифровой компаратор ЦК формирует импульс сброса $Y_{\text{max}}(t)$ в случае возникновения на выходе счетчика СТ кода $N \geq N_{\text{max}}$, предотвращая тем самым обращение к ПЗУ по несуществующему адресу. Данная ситуация возникает в переходном режиме УС при резком изменении как амплитуды, так и частоты напряжения сети.

Результаты исследований показали, что адаптивное УС (рис. 3, а) обеспечивает автоподстройку своих характеристик в установившемся режиме при нестабильности амплитуды и частоты напряжения сети до $\pm 50\%$ и выше. В динамических режимах допустимая скорость изменения амплитуды за один период напряжения сети и частоты за 1 с составляет $\pm 12\%$ и ± 10 Гц/с соответственно при условии, что отклонение угла синхронизации в РП $\Delta\alpha_C$ не превышает ± 2 эл. град, а глубина синхронизации выбирается из условия $\pi/2 \leq \bar{A}_C \leq 8,0$.

Адаптивное УС (рис. 3, а) обладает также высокой помехоустойчивостью к сигналам внешних помех, наводимым со стороны напряжения сети вследствие работы силовых ВП, в том числе и ОПН. Повышенная помехоустойчивость достигается за счет замкнутого характера структуры РП и наличия интегратора в прямом канале регулирования (рис. 3, а).

В тех случаях, когда сеть имеет стабильные параметры по частоте, в УС (рис. 3, а) необходимо

исключить блок коррекции частоты БКЧ, а преобразователь напряжения в частоту импульсов ПНЧ заменить на генератор импульсов со стабильной частотой, что существенно позволяет упростить и удешевить схему синхронизации.

Однофазный ОПН в режиме активного фильтра высших гармоник

Экспериментальные исследования активного фильтра высших гармоник (рис. 1) совместно с преобразователем частоты (ПЧ) были проведены на основе однофазного ОПН, разработанного на кафедре электропривода ЮУрГУ и изготовленного в ООО НПП «Учтех-Профи». В качестве нагрузки был задействован однофазный двухзвенный преобразователь частоты (ПЧ) с неуправляемым выпрямителем на входе и емкостным фильтром, а также с трехфазным автономным инвертором напряжения (АИН) на выходе, нагруженным на трехфазную активно-индуктивную нагрузку ($R_H = 100$ Ом; $L_H = 0,32$ Гн).

Однофазный неуправляемый выпрямитель с емкостным фильтром потребляет из сети импульсный ток i_H (рис. 4, в), разложение которого в ряд Фурье дает нечетные гармоники 3, 5, 7, 9 ... и т. д. (рис. 5, а). Это приводит к искажению формы напряжения сети в виде «среза» верхней части полуволны синусоидального напряжения (рис. 4, а). Поэтому коэффициент мощности неуправляемого выпрямителя с емкостным фильтром не превышает $\chi \approx 0,6 - 0,8$, а $\cos\varphi$ близок к единице (рис. 6, а) по причине равенства нулю фазового сдвига между первыми гармониками тока и напряжения сети.

На рис. 4 показано, каким должен быть компенсирующий ток i_K , чтобы подавить влияние высших гармоник тока, создаваемых преобразователем частоты (ток i_H), и одновременно обеспечить потребление из сети синусоидального тока i_1 , сдвинутого относительно напряжения сети u_1 на угол $\varphi = 0$. На интервалах времени $t_1 - t_2$ и $t_3 - t_4$ активный фильтр потребляет энергию из сети (рис. 4, г), запасая ее в емкостном накопителе C_d ОПН, а на интервалах $t_2 - t_3$ и $t_4 - t_5$, наоборот, возвращает ее в сеть так, чтобы поддержать синусоидальность тока i_1 .

Для выравнивания скорости нарастания компенсирующего тока i_K ОПН и тока нагрузки i_H (рис. 4, в, г) на входе преобразователя частоты установлен дроссель $L_{др}$ с индуктивностью, равной индуктивности дросселя L_1 ОПН (рис. 1). При отсутствии $L_{др}$ ОПН не успевал бы скомпенсировать ток i_H и в токе i_1 возникали бы существенные искажения (рис. 4, д), сводящие на нет целесообразность применения активного фильтра.

Таким образом, применение активного фильтра в системе электроснабжения позволяет улучшить не только спектральный состав тока, потребляемого из сети (рис. 5, б), но и снизить

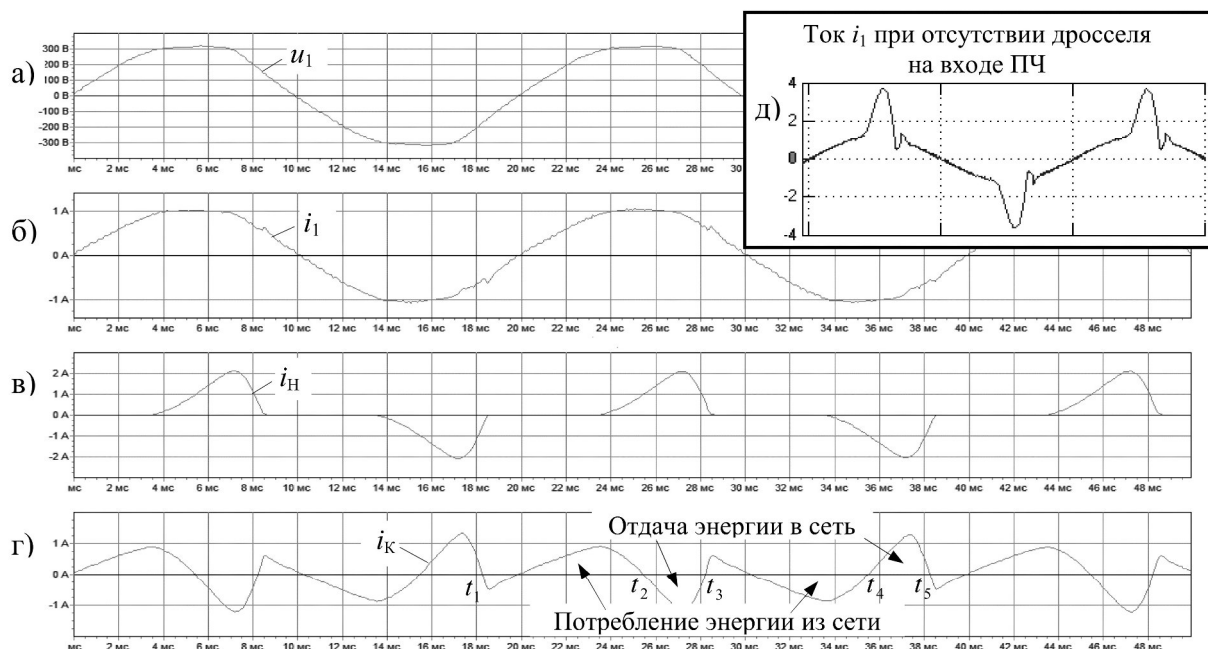


Рис. 4. Осциллограммы токов и напряжений однофазного ОПН, работающего в режиме активного фильтра, совместно с ПЧ (частота на выходе АИН $f = 50$ Гц)

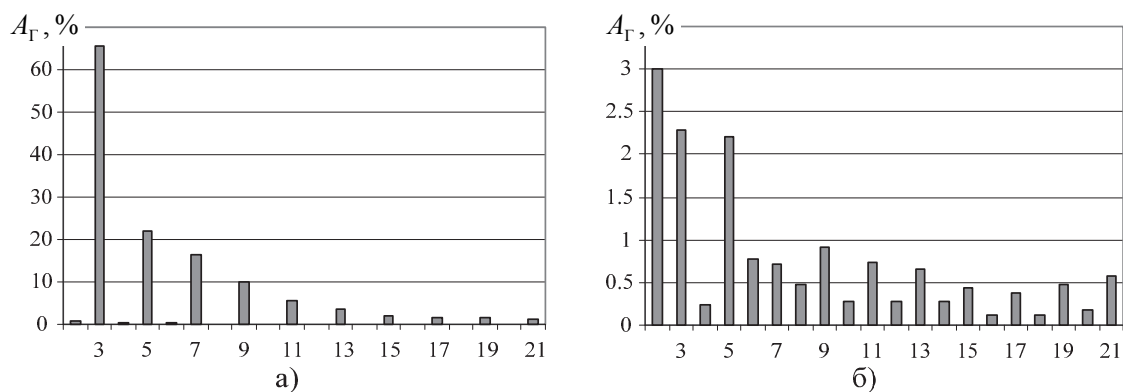


Рис. 5. Спектральные характеристики входного тока преобразователя частоты (а) и тока сети с активным фильтром (б) (A_n – амплитуда гармоника тока в процентах относительно основной)

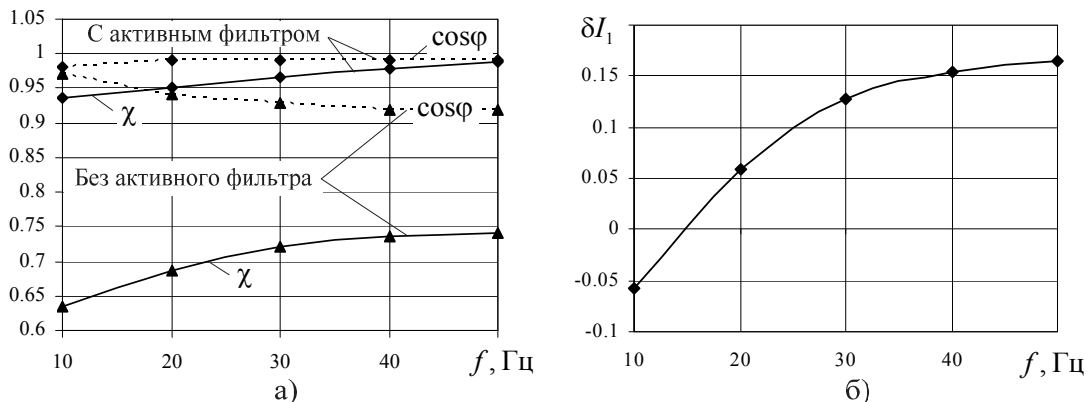


Рис. 6. Энергетические характеристики однофазного ОПН, работающего в режиме активного фильтра, совместно с преобразователем частоты: $\chi = F(f)$, $\cos \varphi = F(f)$ (а); $\delta I_1 = F(f)$ (б)

его действующее значение δI_1 на 16 % при выходной частоте автономного инвертора напряжения $f = 50$ Гц (рис. 6, б). Кроме того, активный фильтр позволяет получить высокий результирующий коэффициент мощности χ и $\cos\varphi$, близкий к единице (рис. 6, а). В результате улучшается эффективность передачи активной мощности через сеть и, как следствие, уменьшаются потери мощности на внутренних сопротивлениях сети. Это, в конечном итоге, позволяет уменьшить потребление электроэнергии. На рис. 6, б $\delta I_1 = (I_1 - I_{1(AФ)})/I_1$, где δI_1 – относительное снижение тока, потребляемого из сети; I_1 , $I_{1(AФ)}$ – действующее значение тока, потребляемого из сети, при отсутствии и наличии активного фильтра в системе соответственно.

Однофазный ОПН в режиме компенсации реактивной мощности

Схема обратимого преобразователя напряжения, приведенная на рис. 1, может также работать в режиме компенсации реактивной мощности [10, 18].

На рис. 7 приведены осциллограммы токов и напряжений однофазного ОПН, работающего в режиме компенсации реактивной мощности, совместно с активно-индуктивной нагрузкой (фазовый сдвиг между током и напряжением $\varphi \approx 55$ эл. град) и однофазным тиристорным преобразователем (угол управления тиристорами $\alpha \approx 30$ эл.

град). Там же видно, каким должен быть компенсирующий ток i_K ОПН, чтобы при включении всех нагрузок (ток i_H) из сети потреблялся синусоидальный ток i_1 , передающий необходимую активную мощность и сдвинутый относительно напряжения сети u_1 на угол $\varphi = 0$.

На рис. 8 представлены экспериментальные энергетические характеристики, из которых видно, что при отсутствии компенсатора реактивной мощности в диапазоне α от 15 до 150 эл. град коэффициент мощности системы χ и $\cos\varphi$ имеют низкое значение, лежащее в пределах от 0,5 до 0,78, а при наличии компенсатора значения χ и $\cos\varphi$ близки к единице (рис. 8, а). Кроме этого, в системе наблюдается снижение действующего значения тока I_1 , потребляемого из сети. Так, например, при $\alpha = 105$ эл. град δI_1 уменьшается на 40 % (рис. 8, б). Все это однозначно свидетельствует об эффективном использовании электроэнергии и снижении потерь мощности в сети.

Однофазное нагрузочно-питающее устройство

Весьма привлекательным с точки зрения энергосбережения является применение обратимых преобразователей напряжения в качестве универсальной нагрузки при исследовании силовых вентильных преобразователей (ВП).

На сегодняшний день в научно-технических лабораториях для испытания электрических машин,

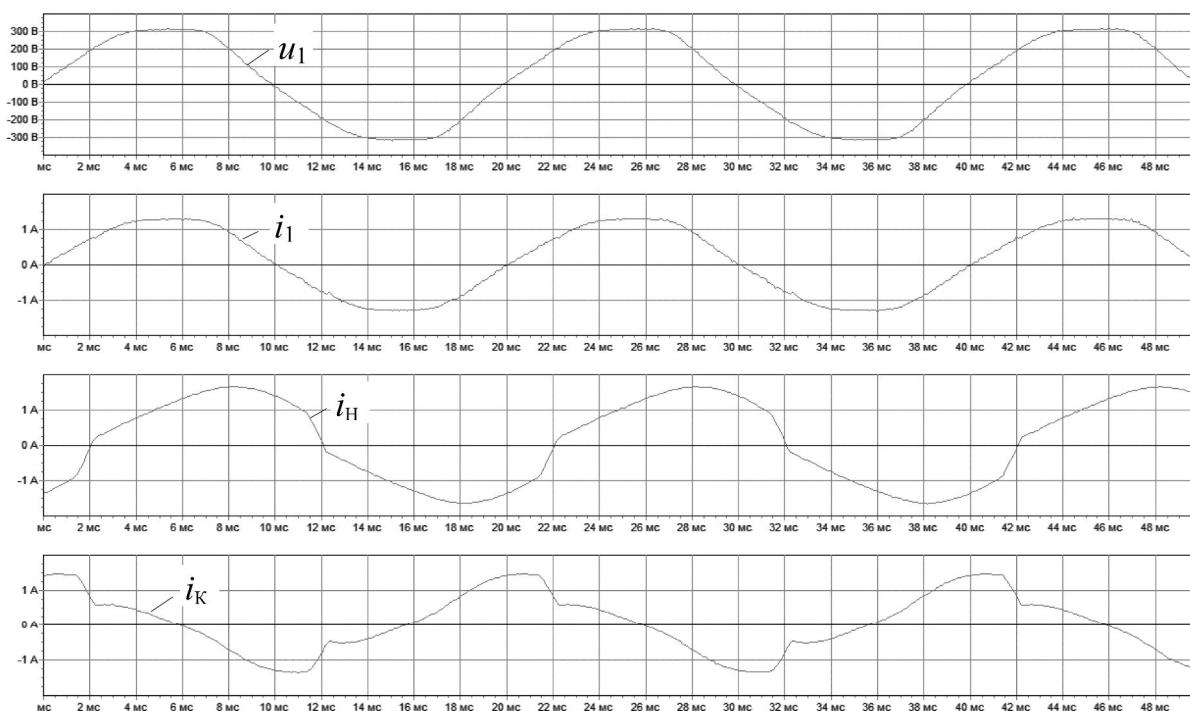


Рис. 7. Осциллограммы токов и напряжений однофазного ОПН, работающего в режиме компенсации реактивной мощности, совместно с активно-индуктивной нагрузкой и тиристорным преобразователем ($\alpha \approx 30$ эл. град; $\varphi \approx 55$ эл. град)

трансформаторов, автономных инверторов, тиристорных выпрямителей, преобразователей постоянного напряжения, источников вторичного электропитания, аккумуляторных батарей и других электротехнических устройств чаще всего применяются дискретно регулируемые активные, активно-индуктивные или активно-емкостные нагрузки. Такие нагрузки обладают рядом существенных недостатков:

- вся преобразованная энергия используется неэффективно, превращается в тепло и рассеивается в окружающую среду, поэтому при больших мощностях исследуемых объектов габариты таких устройств резко возрастают;

- невозможно изменение направления потока мощности в системе, что не позволяет, например, исследовать силовые ВП в инверторном режиме, когда требуется подводить энергию к преобразователю со стороны нагрузки;

- трудность одновременной плавной регулировки тока и угла сдвига в фазах трехфазной нагрузки вследствие естественного разброса параметров пассивных элементов нагрузки.

На кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» была разработана универсальная нерассеивающая электронная нагрузка (в дальнейшем нагрузочно-питающее устройство НПУ) [19–20], позволяющая исследовать не только все виды силовых вентильных преобразователей в режимах выпрямления и инвертирования, но и другое электротехническое оборудование.

Однофазное НПУ состоит из двух обратимых преобразователей напряжения ОПН1 и ОПН2, соединенных между собой и с емкостным накопителем C_d на стороне постоянного тока C_d (рис. 9). Силовые блоки СБ1, СБ2 обратимых преобразователей напряжения представляют собой однофазные транзисторно-диодные мосты с индуктивными накопителями на выходах $L1, L2$.

На выходе ОПН1 и ОПН2 установлены электромагнитные фильтры ЭМФ1 и ЭМФ2, обеспечивающие подавление высокочастотных гармоник,

соответствующих частотному спектру импульсной модуляции. Если внутри исследуемого преобразователя нет потенциальной развязки или уровень напряжения на выходе отличается от сетевого, то ОПН2 подключается к сети через трансформатор TV .

Поскольку ОПН2 работает на сеть переменного тока, то его основная задача – сформировать синусоидальный ток на выходе, совпадающий по фазе (режим выпрямления) или противофазного напряжению сети (режим инвертирования) u_1 , т. е. обеспечить двунаправленный поток мощности в системе с высокими энергетическими показателями, такими как $\cos\varphi \approx 1$ и коэффициент мощности $\chi \approx 1$, а также стабилизировать постоянное напряжение U_d на конденсаторе C_d .

Система управления ОПН2 (рис. 9) состоит из двух замкнутых контуров: внешнего контура напряжения и внутреннего контура тока, аналогично системе управления ОПН, работающего в режиме активного фильтра высших гармоник и компенсации реактивной мощности (рис. 1), с той лишь разницей, что в НПУ отсутствует датчик тока со стороны напряжения сети, устраняющий искажения токов, создаваемых нелинейными нагрузками.

ОПН1 (рис. 9) работает в режиме источника тока, имитируя требуемый ток в нагрузке исследуемого объекта (ИО). С этой целью в преобразователь введен внутренний контур тока, состоящий из дросселя $L1$, датчика тока ДТ1 и ПИ-регулятора тока РТ1. Переключение силовых транзисторов $T1 - T4$ ОПН1 осуществляется аналогично ОПН2. Для задания требуемых режимов работы в системе управления ОПН1 введен блок задания тока БЗТ, выполняющий следующие основные функции:

- формирование постоянного или переменного тока нагрузки в функции напряжения исследуемого объекта – режим регулирования (Reg.). С этой целью параллельно с ИО установлен датчик напряжения ДН1, задающий системе управления форму требуемого тока в нагрузке;

- поддержание постоянного тока нагрузки – режим стабилизации (Стаб.);

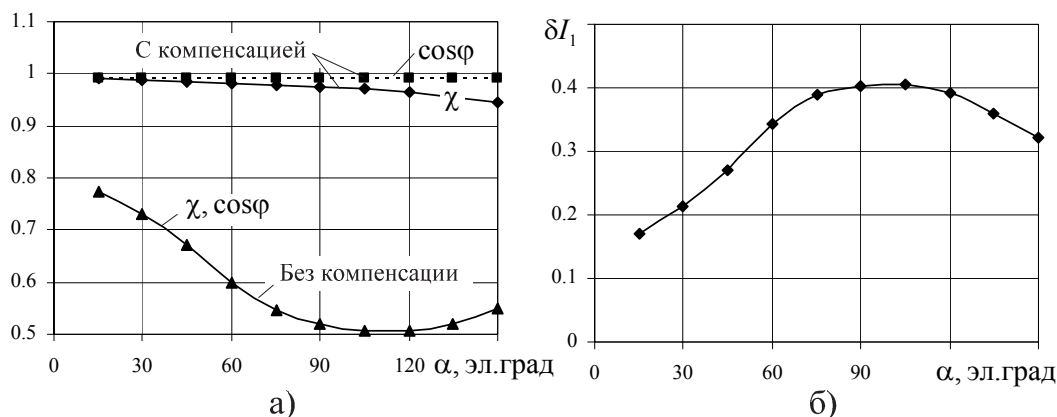


Рис. 8. Энергетические характеристики однофазного ОПН, работающего в режиме компенсации реактивной мощности, совместно с активно-индуктивной нагрузкой и тиристорным преобразователем:

$$\chi = F(\alpha), \cos\varphi = F(\alpha) \text{ (а)}; \delta I_1 = F(\alpha) \text{ (б)}$$

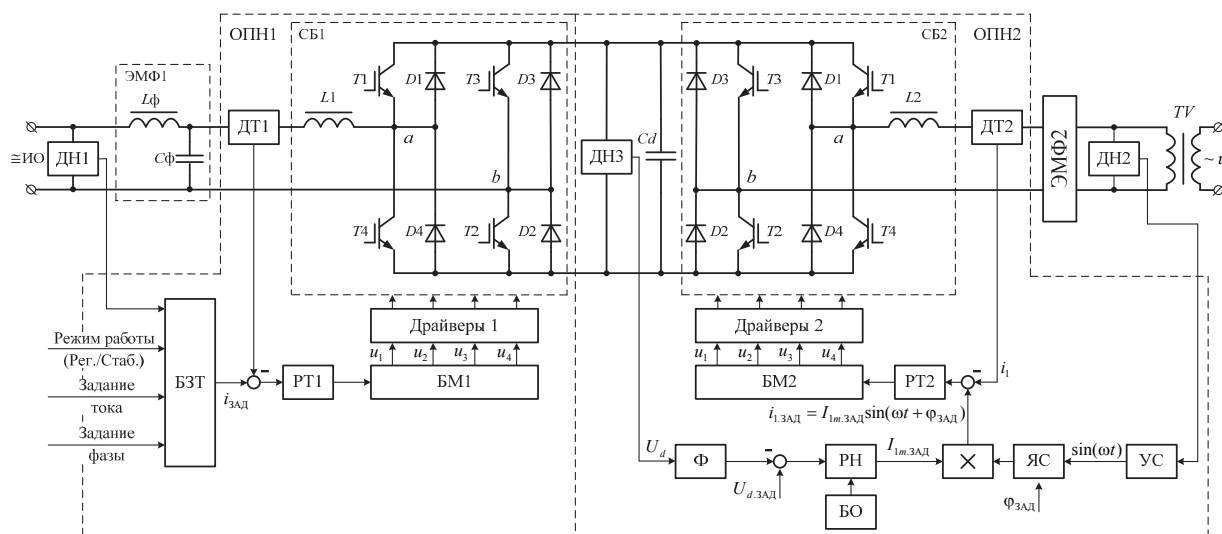


Рис. 9. Функциональная схема однофазного нагрузочно-питающего устройства

- регулирование величины тока нагрузки – «Задание тока»;

- регулирование фазового сдвига между напряжением и током в нагрузке – «Задание фазы». Имитация активно-индуктивной нагрузки на переменном токе.

Результаты экспериментальных исследований показали, что при помощи однофазного НПУ возможно испытание следующих преобразователей электрической энергии:

- трехфазного реверсивного тиристорного преобразователя [8] в режимах выпрямления и инвертирования при активно-индуктивной нагрузке с противо-ЭДС (ПЭДС). Индуктивный характер нагрузки имитировался за счет катушки индуктивности L_Φ (рис. 9);

- реверсивного широтно-импульсного преобразователя [8, 12] в режимах выпрямления и инвертирования при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС;

- однофазного автономного инвертора напряжения [12] в режимах выпрямления и инвертирования при активно-индуктивной нагрузке. Индуктивный характер нагрузки имитировался за счет регулирования фазового сдвига между напряжением и желаемым током нагрузки системой управления ОПН1. Катушка индуктивности L_Φ и конденсатор C_Φ (рис. 9) в данном случае выполняют роль фильтра, выделяющего первую гармонику выходного напряжения автономного инвертора.

На рис. 10 приведены осциллограммы токов и напряжений однофазного НПУ со стороны нагрузки и сети при исследовании трехфазного реверсивного тиристорного преобразователя (ТП), работающего на активно-индуктивную нагрузку с ПЭДС в выпрямительном (а) и инверторном (б)

режимах. В режиме выпрямления энергия, потребляемая ТП, за вычетом потерь в НПУ возвращается в сеть (рис. 10, а). В режиме инвертирования НПУ, наоборот, питает ТП со стороны нагрузки. При этом НПУ переходит в режим выпрямления, а трехфазный ТП – в инверторный (рис. 10, б).

Экспериментальные энергетические характеристики $\chi_{\text{НПУ}} = f(\alpha)$, $\cos \varphi_{\text{НПУ}} = f(\alpha)$, $\eta_{\text{НПУ}} = f(\alpha)$, $\chi_{\text{ТП}} = f(\alpha)$ однофазного НПУ, снятые при постоянном значении тока нагрузки (режим стабилизации тока в НПУ), представлены на рис. 11. Здесь $\chi_{\text{НПУ}}$, $\cos \varphi_{\text{НПУ}}$ – коэффициента мощности и модуль $\cos \varphi$ НПУ соответственно; $\eta_{\text{НПУ}}$ – коэффициент полезного действия НПУ; $\chi_{\text{ТП}}$ – коэффициента мощности ТП; α – угол управления ТП.

Видно, что НПУ обеспечивает высокие энергетические показатели, такие как коэффициент мощности $\chi_{\text{НПУ}}$ и $\cos \varphi_{\text{НПУ}}$, близкие к единице, когда фазовый сдвиг между напряжением и током сети равен нулю в режиме выпрямления (рис. 10, б), либо 180 эл. град в режиме инвертирования (рис. 10, а), за исключением области, соответствующей углам управления ТП $60 < \alpha < 90$ эл. град, в которой происходит смена режима работы НПУ (рис. 11). КПД нагрузочно-питающего устройства достаточно низкий и не превышает значения 0,8 (рис. 11), что объясняется малой мощностью НПУ, когда суммарные потери составляют существенную часть мощности преобразователя. При больших мощностях $\eta_{\text{НПУ}}$ возрастает и достигает значений 0,9 и выше. При $\alpha \approx 95$ эл. град происходит изменение направления потока мощности в ТП и переход его из выпрямительного ($\alpha < 95$ эл. град) в инверторный ($\alpha > 95$ эл. град) режимы работы.

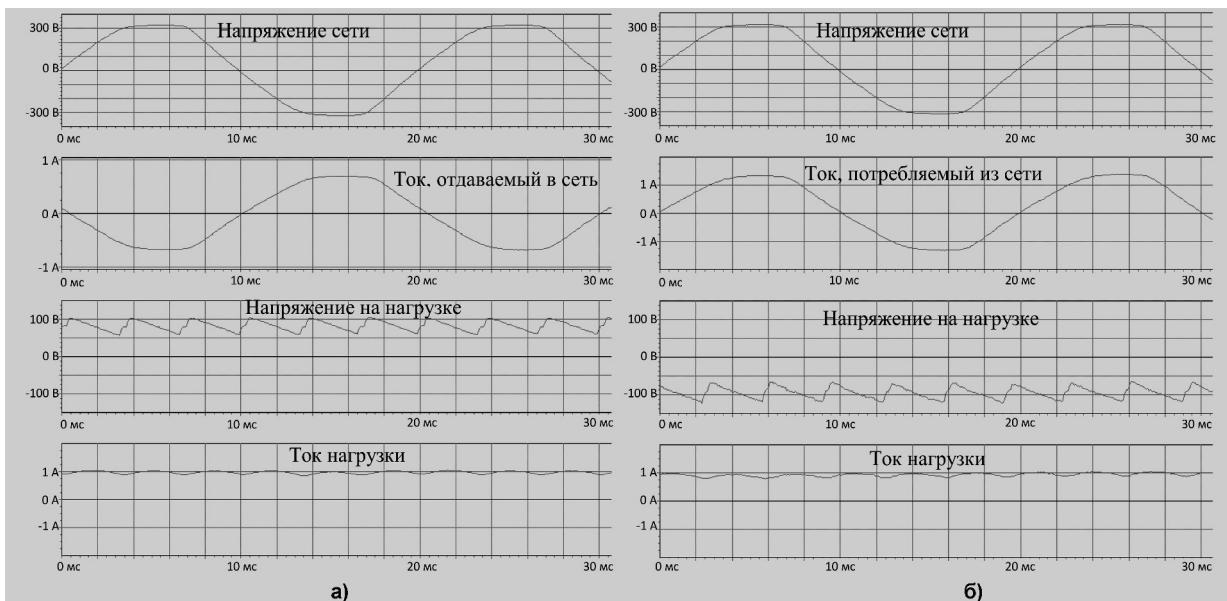


Рис. 10. Осциллограммы токов и напряжений однофазного НПУ со стороны нагрузки и сети при исследовании трехфазного реверсивного тиристорного преобразователя, работающего на активно-индуктивную нагрузку с ПЭДС в выпрямительном $\alpha = 30$ эл. град (а) и инверторном $\alpha = 135$ эл. град (б) режимах

Однофазные обратимые преобразователи напряжения, работающие в режимах активного фильтра и компенсатора реактивной мощности, а также однофазное НПУ используются в автоматизированном лабораторном комплексе «Энергосберегающая энергетическая электроника», изготовленном в ООО НПП «Учтех-Профи». На стенде изучается большинство элементов, применяемых в современных устройствах силовой электроники [21–25]. Исследуются также все классы современных преобразователей. Особое внимание уделяется изучению и измерению энергетических показателей, а также способам улучшения показателей качества системы электроснабжения.

Заключение

На основании проведенных теоретических и

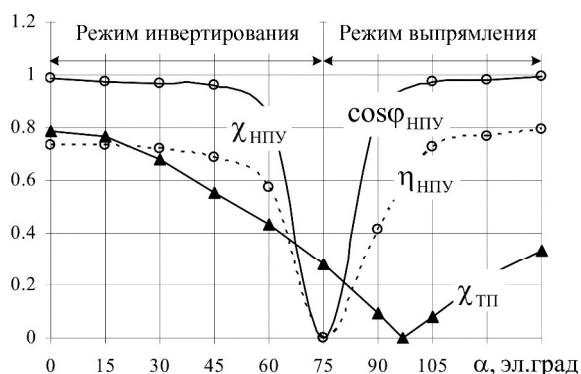


Рис. 11. Энергетические характеристики однофазного НПУ: $\chi_{НПУ} = f(\alpha)$, $\cos \varphi_{НПУ} = f(\alpha)$, $\eta_{НПУ} = f(\alpha)$, $\chi_{ТП} = f(\alpha)$ при поддержании постоянного значения тока нагрузки

практических исследований можно сделать следующие выводы.

1. Использование несимметричного алгоритма переключения силовых ключей (однополярная модуляция) с удвоением частоты импульсов на выходе позволяет по сравнению с симметричным способом управления (двухполярная модуляция) улучшить быстродействие ОПН и уменьшить его массогабаритные показатели за счет снижения индуктивности входного дросселя в четыре раза.

2. Интегрирующие развертывающие преобразователи с ШИМ-2 обеспечивают высокую помехоустойчивость системы управления ОПН со стороны информационного канала по отношению к сигналам внешних помех с частотным спектром, близким или превышающим частоту несущих колебаний РП, что объясняется замкнутым характером структуры РП и наличием интегратора в прямом канале регулирования.

3. Адаптивное устройство синхронизации, применяемое в системе управления ОПН, обеспечивает автоподстройку своих характеристик в установленном режиме при нестабильности амплитуды и частоты напряжения сети в пределах $\pm 50\%$ и даже выше, а также высокую помехоустойчивость к сигналам внешних помех, наводимых со стороны синхронизирующего канала УС вследствие совместной работы силовых вентильных преобразователей.

4. Применение однофазного ОПН, работающего в режимах активного фильтра высших гармоник и компенсатора реактивной мощности, позволяет улучшить спектральный состав тока, потребляемого из сети, и снизить его действующее значение, вследствие улучшения таких показате-

лей системы как χ и $\cos\varphi$. В результате снижается потребление электроэнергии.

5. НПУ является универсальной нагрузкой, позволяющей исследовать не только все виды силовых вентиляльных преобразователей в выпрямительном и инверторном режимах, но и других электротехнических устройств, например, электрических машин, трансформаторов, источников питания и т.д. в режимах потребления и рекуперации энергии.

6. НПУ обеспечивает высокие энергетические показатели, такие как коэффициент мощности χ и $\cos\varphi$, близкие к единице. При этом вся энергия за вычетом потерь в НПУ, в отличие от пассивных нагрузок, возвращается в сеть, что позволяет сэкономить большое количество электрической энергии во время проведения испытаний различных электротехнических устройств, особенно большой мощности.

Литература

1. Гельман, М.В. Повышение энергетических показателей системы электроснабжения управляемых электроприводов переменного тока и прочих нагрузок постоянного и переменного тока / М.В. Гельман, Ю.И. Хохлов, К.А. Преображенский // Труды международной тринадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока ЭППТ-05». – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. – С. 223–226.
2. Григорьев, М.А. Линейная плотность поверхностного тока в энергосберегающих электроприводах с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев, А.Е. Бычков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 14. – № 32(208). – С. 46–51.
3. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / А.А. Ефимов, Р.Т. Шрейнер; под ред. Р.Т. Шрейнера. – Новоуральск: НГТИ, 2001. – 250 с.
4. Пат. 2346376 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/24. Синхронная реактивная машина / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, С.А. Чупин. – № 2007126685; заявл. 12.07.07; опубл. 10.02.09, Бюл. № 4.
5. Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, Н.Д. Монюшко, Г.В. Караваев, М.А. Григорьев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2001. – Вып. 1. – № 4(4). – С. 70–76.
6. Удельные показатели электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2008. – Вып. 9. – № 11(111). – С. 52–53.
7. Akagi, H. Active filters for power conditioning. The power electronics: Handbook / Ed. T.L. Scvorenina. – USA: CRC Press, 2002.
8. Розанов, Ю.К. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 632 с.
9. Дудкин, М.М. Энергетические характеристики однофазных обратимых преобразователей напряжения с различными законами модуляции / М.М. Дудкин // Практическая силовая электроника. – 2010. – № 2 (38). – С. 25–32.
10. Дудкин, М.М. Однофазные обратимые преобразователи напряжения для улучшения качества электрической энергии в сетях ограниченной мощности / М.М. Дудкин // Практическая силовая электроника. – 2012. – № 2 (46). – С. 19–27.
11. Дудкин, М.М. Динамические спектральные характеристики развертывающих преобразователей с широтно-импульсной модуляцией / М.М. Дудкин, Л.И. Цытович, О.Г. Брылина // Практическая силовая электроника. – 2012. – № 4 (48). – С. 49–55.
12. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями / С.Г. Герман-Галкин, В.Д. Лебедев, Б.А. Марков, Н.И. Чичерин. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 248 с.
13. Чернов, Е.А. Комплектные электроприводы станков с ЧПУ: справочное пособие / Е.А. Чернов, В.П. Кузьмин. – Горький: Волго-Вятское книжное издательство, 1989. – 320 с.
14. Качалов, А.В. Интегрирующие устройства синхронизации для систем импульсно-фазового управления вентиляльными преобразователями / А.В. Качалов, Л.И. Цытович, М.М. Дудкин // Практическая силовая электроника. – 2010. – № 1 (37). – С. 42–51.
15. Адаптивная интервало-кодовая двоично-десятичная интегрирующая синхронизация систем управления силовыми вентиляльными преобразователями / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматулин // Электротехника. – 2013. – № 3. – С. 8–15.
16. Анализ динамики интегрирующего амплитудно-частотно-импульсного развертывающего преобразователя аналоговых сигналов в частоте импульсов / Л.И. Цытович, Р.Х. Гафиятуллин, Р.З. Хусаинов, М.М. Дудкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2003. – Вып. 3. – № 11(27). – С. 36–40.
17. Интегрирующие развертывающие преобразователи с повышенной температурной стабильностью характеристик / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 10. – С. 38–43.
18. Дудкин, М.М. Применение однофазных обратимых преобразователей напряжения для энергосбережения в испытательных стендах / М.М. Дудкин // Народное хозяйство. Вопросы инновационного развития. – М.: МИИ НАУКА. – 2012. – № 4. – С. 83–93.

19. Пат. 2345376 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 R 31/40. Нагрузочно-питающее устройство / М.В. Гельман, Р.З. Хусаинов, О.Г. Терещина, Р.М. Рахматулин, М.М. Дудкин. – № 2007130645/28; заявл. 10.08.07; опубл. 27.01.09, Бюл. № 3.

20. Дудкин, М.М. Трехфазное нагрузочно-питающее устройство с высокими энергетическими показателями / М.М. Дудкин // *Materialy IX Mezinarodni vedecko-prakticka conference «Moderni Vymozenosti vedy – 2013»*. – Praha: Publishing House «Education and Science» s.r.o., 2013. – Dil 75. *Technicke vedy*. – PP. 73–79.

21. Комплектный автоматизированный стенд для изучения физических основ электроники и преобразовательной техники / М.В. Гельман,

22. Р.З. Хусаинов, М.М. Дудкин, О.Г. Терещина // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2007. – Вып. 7. – № 12(84). – С. 19–24.

23. Совместное применение физического и виртуального моделирования при изучении

устройств преобразовательной техники / М.В. Гельман, Р.З. Хусаинов, М.М. Дудкин, О.Г. Терещина // *Электромеханика: известия высших учебных заведений*. – Новочеркасск: Изд-во ЮрГТУ, 2007. – № 5. – С. 62–65.

24. Развитие частотных методов синтеза электроприводов с синхронными электрическими машинами / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2011. – Вып. 16. – № 34(251). – С. 21–27.

25. Частотные характеристики канала регулирования момента в синхронных электроприводах / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков // *Электричество*. – 2012. – № 4. – С. 54–59.

26. Потери в регулируемых электроприводах при разных законах управления / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2010. – Вып. 13. – № 14(190). – С. 47–51.

Дудкин Максим Михайлович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8 (351) 267-93-21, e-mail: dudkinmax@mail.ru

Bulletin of the South Ural State University
Series "Power Engineering"
2013, vol. 13, no. 1, pp. 5–18

Energy-Efficient Technologies in Test Beds with Application of Single-Phase Reversible Converters

M.M. Dudkin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, dudkinmax@mail.ru

The lowering of losses and refinement of electrical energy in electric mains is one of the most important tasks at solution of a resource economies problem, in particular, energy savings in industrial technological systems and complexes. One of the possible candidate solutions of the given problem is the application of reversible voltage converter (RVC).

In article the results of experimental investigating of a single-phase RVC, operating under of higher harmonics active filter and reactive power compensation and also for the first time of offered single-phase load-feeding device intended for a test and research of electric energy converters and other electrotechnical equipment as on direct and alternating-current are given. The considered devices ensure lowering of power consumption and improvement of electrical energy quality. The high operate reliability and noise stability of a control system and also improvement bulk-overall indices of RVC is reached at the expense of application of integrating sweep converters and unipolar modulation at switching power valves. The results of operation are used in the automatized laboratory complex «Energy-efficient power electronics».

Keywords: reversible voltage converter, active filter, reactive power compensator, load-feeding device, integrating sweep converter, thyristor converter, frequency converter.

References

1. Gelman M.V., Khokhlov Yu.I., Preobrazhenskiy K.A. A Boost of Energy Indices of a Power-Supply System of Controlled Alternating Current Drives both Other Direct and Alternating Current Loads [Povyshenie energeticheskikh pokazateley sistemy elektrosnabzheniya upravlyaemykh elektroprivodov peremennogo toka i prochikh nagruzok postoyannogo i peremennogo toka]. *Trudy 13 Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektroprivody peremennogo tokai»*. [Proc. 13th International Scientific-Technical Conference "Alternating Current Electrical Drives"], Ekaterinburg, 2005, pp. 223–226.

2. Grigorev M.A., Bychkov A.E. The Linear Density of the Surface Current in the Energy-saving Motor Drives with the Field Regulated Reluctance Machine, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2010, no. 32 (208), pp. 46–51.

3. Efimov A.A., Shreyner R.T. *Aktivnyye preobrazovateli v reguliruemyykh elektroprivodakh peremennogo toka* [Active Converters in Regulated Alternating Current Drives], Novouralsk, 1993, 250 p.
4. Usynin U.S., Grigorev M.A., Vinogradov K.M., Gorozhankin A.N., Chupin S.A. Synchronous Reluctance Machine [Sinkhronnaya reaktivnaya mashina], patent 2346376, 2007.
5. Usynin U.S., Moniuszko N.D., Karavaev G.V., Grigorev M.A. The Electric Drive with the Field Regulated Reluctance Machine, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2001, no. 4 (4), pp. 70–76.
6. Usynin U.S., Grigorev M.A., Vinogradov K.M., Gorozhankin A.N. Specific Indicators of the Electric Drive with The Field Regulated Reluctance Machine, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2008, no. 11 (111), pp. 52–53.
7. Akagi, H. Active filters for power conditioning. *The power electronics: Handbook*, USA: CRC Press, 2002.
8. Rozanov Yu.K., Ryabchitskiy M.V., Kvasnyuk A.A. *Silovaya elektronika: uchebnik dlya VUZov* [Power Electronics: the Textbook for Higher Education Institutes], Moscow, 2007, 632 p.
9. Dudkin M.M. Power Performances of Single-Phase Reversible Voltage Converter with the Different Modulation Principles, *Prakticheskaya silovaya elektronika [Practical Power Electronics]*, 2010, no. 2 (38), pp. 25–32.
10. Dudkin M.M. Single-phase Reversible Voltage Converter for Electrical Energy Quality Improvement in Restricted Power Electronic Mains, *Prakticheskaya silovaya elektronika [Practical Power Electronics]*, 2012, no.2 (46), pp. 19–27.
11. Dudkin M.M., Tsytoich L.I., Brylina O.G. Dynamic Spectral Performances of Sweep Converters with Pulse-Width Modulation, *Prakticheskaya silovaya elektronika [Practical Power Electronics]*, 2012, no.4 (48), pp. 49–55.
12. German-Galkin S.G., Lebedev V.D., Markov B.A., Chicherin N.I. *Tsivrovyye tlektroprivody s tranzistornymi preobrazovatelyami* [Digital Electric Drives with Transistor Converters], Leningrad, 1986, 248 p.
13. Chernov E.A., Kuzmin V.P. *Komplektnyye elektroprivody c ChPU: spravochnoe posobie* [Electric Drives Engineering Package of NC Machine Tools: Manual of Information], Gorkiy, 1989, 320 p.
14. Kachalov A.V., Tsytoich L.I., Dudkin M.M. Integrating Lockers for Pulse-Phase Control Systems of Valve Converters, *Prakticheskaya silovaya elektronika [Practical Power Electronics]*, 2010, no.1 (37), pp. 42–51.
15. Tsytoich L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Rakhmatulin R.M. Adaptive Interval-Code Binary-Decimal Integrating Synchronization of Control Systems of Power Valve Converters, *Russian Electrical Engineering*, 2013, no.3, pp. 8–15.
16. Tsytoich L.I., Gafiatullin R.H., Husainov R.Z., Dudkin M.M. Analysis of Dynamics the Integrating Amplitude-Frequency-Pulse Sweep Converter of Analog Signals into Frequency of Pulses, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2003, no.11 (27), pp. 36–40.
17. Tsytoich L.I., Dudkin M.M., Kachalov A.V., Tereshchina O.G., Loginova N.A. Integrating Sweep Converters with Heightened Temperature Stability of Performances, *Pribory i sistemy. Ypravlenie, control, diagnostika [Devices and Systems. Control, Monitoring, Diagnostics]*, 2010, no.10, pp. 38–43.
18. Dudkin M.M. Application of Single-Phase Reversible Voltage Converter for Energy-Saving in Test Beds, *Narodnoe khozyaystvo. Voprosy innovatsionnogo razvitiya [National Economy. Questions of Innovation Development]*, 2012, no. 4, pp. 83–93.
19. Gelman M.V., Khusainov R.Z., Tereshchina O.G., Rakhmatulin R.M., Dudkin M.M. Load-Feeding Device [Nagruzochno-pitayushchee ustroystvo], patent 2445376 Russian Federation. decl. 10.08.07, publ. 27.01.09, bul. no.3.
20. Dudkin M.M. Three-Phase Load-Feeding Device with High Power Indexes [Trekhfaznoe nagruzochno-pitayushchee ustroystvo s vysokimi energeticheskimi pokazatelyami]. *Materialy 9 Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennyye nauchnyye dostizheniya – 2013»*. [Materialy IX Mezinarnodni vedecko-prakticka conference “Moderni Vymozhenosti vedy – 2013”], Praga, 2013, Dil 75, pp. 73–79.
21. Gelman M.V., Khusainov R.Z., Dudkin M.M., Tereshchina O.G. Complete Automated Bed for Learning Basic Physics of Electronics and Converter Engineering, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2007, no.12 (84), pp. 19–24.
22. Gelman M.V., Khusainov R.Z., Dudkin M.M., Tereshchina O.G. Compatible Application of Physical and Virtual Simulation at Learning Devices of Converter Engineering, *Elektromekhanika: izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy* [Electromechanics: News of Higher Educational Institutions], 2007, no.5, pp. 62–65.
23. Usynin U.S., Grigorev M.A., Shishkov A.N., Bychkov A.E., Belousov E.V. The Development of Methods for the Synthesis of Frequency Drives with Synchronous Machines, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2011, no. 34 (251), pp. 21–27.
24. Usynin U.S., Grigorev M.A., Shishkov A.N. The Frequency Response of the Torque Control Channel in Synchronous Electric Drive, *Electrical Technology Russia*, 2012, no 4, pp. 54–59.
- Usynin U.S., Grigorev M.A., Shishkov A.N., Gorozhankin A.N. Losses in the Regulated Electric Drive for Different Control Laws, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2010, no. 14 (190), pp. 47–51.

Поступила в редакцию 05.03.2013 г.