

Нагрузочно-питающие устройства для испытания и исследования преобразователей электрической энергии

ГЕЛЬМАН М.В., ДУДКИН М.М.

Рассматриваются нагрузочно-питающие устройства, предназначенные для испытания и исследования преобразователей электрической энергии и другого электротехнического оборудования. Устройства обеспечивают передачу энергии к исследуемому преобразователю и возврат ее в сеть переменного тока, что позволяет повысить энергетические показатели в системе. Устройства, основанные на применении обратимых преобразователей напряжения, позволяют в широких пределах изменять род тока, частоту и значение напряжения на входе и выходе исследуемого преобразователя.

Ключевые слова: *нагрузочно-питающее устройство, обратимый преобразователь напряжения, активный выпрямитель, автономный инвертор напряжения, система управления, энергетические показатели*

Нагрузочно-питающие устройства (НПУ) — электротехнические устройства, обеспечивающие как нагрузку (потребление энергии), так и питание (подвод энергии) испытываемых (исследуемых) преобразователей электрической энергии.

При испытании электрических машин, 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, содержащие реостат [1]. Такие нагрузки обладают рядом существенных недостатков: трудностью одновременного плавного регулирования нагрузки во всех фазах m -фазной нагружаемой системы, трудностью регулирования угла сдвига j между векторами напряжения и тока, невозможностью изменения направления потока мощности, а главное, вся энергия, передаваемая преобразователем, поглощается в нагрузочных реостатах, т.е. переходит в тепло и рассеивается в окружающую среду. Вследствие этого усложняется проведение испытаний и повышаются затраты.

Нагрузочно-питающие устройства, содержащие тиристорные преобразователи, позволяют осуществлять рекуперацию энергии в сеть, т.е. изменять направление потока мощности [2]. Однако их ис-

Combined loading and power supply devices intended for testing and investigating electric power converters and other electrical equipment are considered. These devices serve to transfer energy to the converter being studied and to return it to the AC network, due to which better power efficiency indicators are obtained in the system. The devices constructed on the basis of reversible voltage converters allow the kind of current, frequency, and voltage at the inlet and outlet of the converter under study to be varied in a wide range.

Key words: *combined loading and power supply device, reversible voltage converter, active rectifier, independent voltage inverter, control system, power performance indicators*

пользование возможно только на постоянном токе. Такие устройства имеют низкий коэффициент мощности и оказывают вредное влияние на сеть, генерируя высшие гармоники.

В качестве нагрузочных устройств на постоянном токе используют транзисторные преобразователи с трехступенчатым преобразованием энергии [3]. Они улучшают энергетические показатели, но не позволяют изменять направление потока мощности и применимы только на постоянном токе.

В Южно-Уральском государственном университете на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» предложено нагрузочно-питающее устройство (НПУ) [4], подключаемое к выходу преобразователя электрической энергии и обеспечивающее как возврат энергии в сеть переменного тока, так и ее передачу к исследуемому преобразователю (нагрузка и питание). Трехфазное НПУ состоит из двух обратимых преобразователей напряжения $ОПН1$ и $ОПН2$ (активных выпрямителей), соединенных между собой и с емкостным накопителем C_d на стороне постоянного тока (рис. 1). Силовые блоки $СБ1$, $СБ2$ обратимых преобразователей напряжения представляют собой трехфазные транзисторно-диодные мосты с индуктивными накопителями L_1 , L_2 на стороне переменного тока. На выходах $ОПН1$ и $ОПН2$ установлены электромагнитные фильтры $ЭМФ1$ и $ЭМФ2$, обеспечивающие подавление высокочастотных гармоник, соот-

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

Преобразователь ОПН2 выполняет две функции:

1) работает на сеть переменного тока, обеспечивая двунаправленный поток мощности с высокими энергетическими показателями ($\cos \varphi \gg 1$ и коэффициент мощности $s \gg 1$), что достигается за счет формирования синусоидального тока, совпадающего по фазе или противофазного напряжению сети;

2) стабилизирует постоянное напряжение U_d на конденсаторе C_d .

Система управления СУ2 ОПН2 (рис. 1) построена по векторному принципу с ориентацией по вектору напряжения сети [5]. Формирование выходного напряжения в преобразователе осуществляется с помощью пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [6], обеспечивающей эффективное использование напряжения звена постоянного тока и сокращение числа переключений силовых ключей.

Преобразователь ОПН1 имитирует заданное комплексное сопротивление нагрузки с помощью системы управления СУ1 (рис. 1), которая состоит из блока задания тока БЗТ, формирующего токовые сигналы задания i_a^*, i_b^*, i_c^* синхронно с напряжением $u_{\text{син1}}$ испытываемого устройства и сдвинутые относительно напряжения на нагрузке на заданный угол сдвига φ , а также блока модуляции

БМ с обратной связью по току. Этот блок БМ представляет собой релейную систему с обратной связью по току [7]. В нем осуществляется непосредственное «слежение» реальных токов i_a, i_b, i_c за их заданными значениями i_a^*, i_b^*, i_c^* в пределах зоны неоднозначности b релейных элементов РЭ1–РЭ3 (рис. 1). Сумматоры $\Sigma 1$ – $\Sigma 3$ вычисляют разницу Di_a, Di_b, Di_c между заданными и фактическими значениями мгновенных токов по формулам:

$$Di_a = i_a^* - i_a;$$

$$Di_b = i_b^* - i_b;$$

$$Di_c = i_c^* - i_c.$$

Состояние выходов релейных регуляторов Q_a, Q_b, Q_c определяется по следующему алгоритму:

$$Q_a = 1, \text{ если } Di_a \geq b/2; Q_a = 0, \text{ если } Di_a \leq -b/2;$$

$$Q_b = 1, \text{ если } Di_b \geq b/2; Q_b = 0, \text{ если } Di_b \leq -b/2;$$

$$Q_c = 1, \text{ если } Di_c \geq b/2; Q_c = 0, \text{ если } Di_c \leq -b/2;$$

где b – модуль гистерезиса, который принимается равным (1–3)% амплитуды номинального тока нагрузки.

Релейное управление с обратной связью по току широко применяется в преобразователях вследствие своей простоты и позволяет повысить не только быстродействие, но и точность управления при возмущениях со стороны нагрузки, обеспечив тем самым эффективную защиту преобразователя от перегрузок по току. Известным недостатком этих систем является изменение частоты модуляции в процессе «слежения» за нелинейным, например синусоидальным, сигналом.

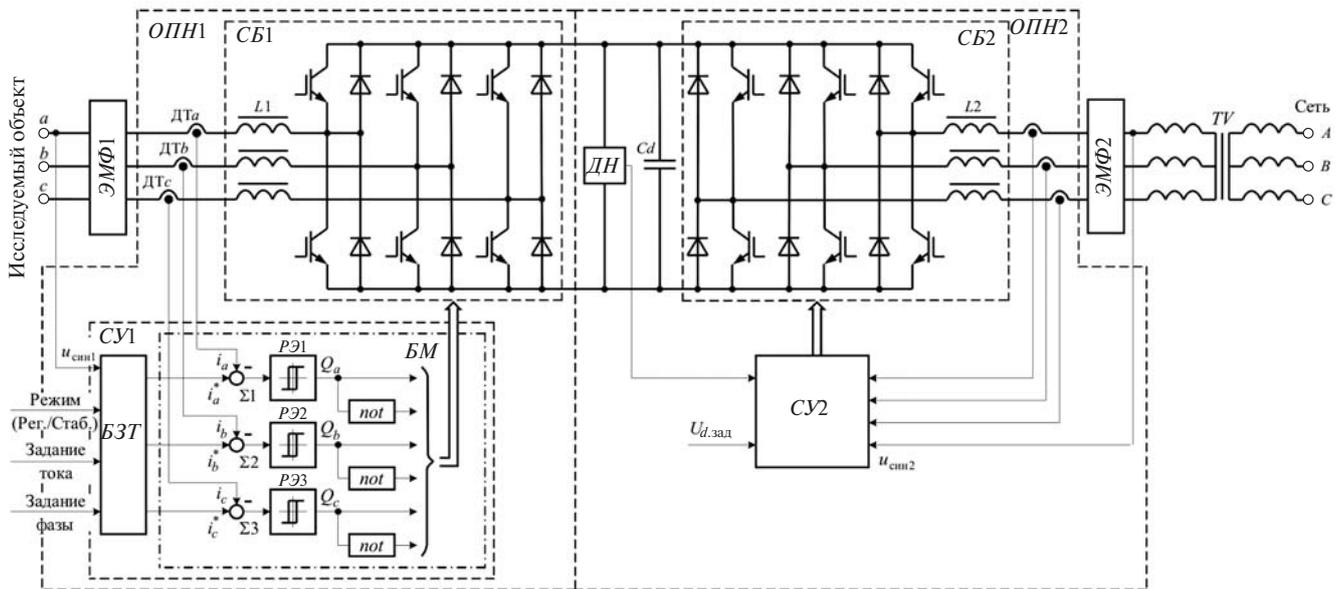


Рис. 1. Функциональная схема трехфазного нагрузочно-питающего устройства

Формирование заданного тока в СУ1 осуществляется БЗТ (рис. 2), который включает следующие основные блоки:

1. Блок синхронизации (Синхр.) обеспечивает генерацию опорных единичных сигналов $\sin(\omega t)$ и $\cos(\omega t)$, синхронизированных по частоте и фазе с напряжением исследуемого объекта. Основу этого блока составляет система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), обеспечивающая высокую точность подстройки в установившемся режиме. Синхронизация может осуществляться как по линейному, так и фазному напряжению с выхода испытываемого устройства. Фильтр Φ , включенный на входе блока, выделяет первую гармонику напряжения с выхода исследуемого преобразователя.

2. Блок вычисления вектора тока нагрузки, в котором определяются проекции вектора тока на неподвижные оси координат ab по формулам:

$$I_a = I_m \cos j ; I_b = I_m \sin j ,$$

где I_m – амплитудное значение вектора тока нагрузки; j – его фазовый сдвиг.

3. Блок синхронного преобразования координат (ab - abc), в котором вычисляются мгновенные значения заданных токов i_a^*, i_b^*, i_c^* с использованием единичных сигналов $\sin(\omega t)$ и $\cos(\omega t)$ блока синхронизации по следующим формулам:

$$i_a^* = I_a \sin(\omega t) + I_b \cos(\omega t);$$

$$i_b^* = I_a \sin(\omega t - 2\pi/3) + I_b \cos(\omega t - 2\pi/3);$$

$$i_c^* = I_a \sin(\omega t + 2\pi/3) + I_b \cos(\omega t + 2\pi/3).$$

Блок БЗТ может работать в режимах: поддержание амплитуды тока (режим Стаб.), когда значение заданной амплитуды тока I_m через ключ Кл. непосредственно воздействует на блок вычисления вектора тока (рис. 2);

регулирование (Рег.), когда осуществляется пропорциональная коррекция амплитуды тока при изменении напряжения исследуемого объекта.

Данный режим обеспечивает имитацию активно-индуктивной (активно-емкостной) нагрузки. Для его организации в схему БЗТ дополнительно введены блок измерителя амплитуды напряжения (ИА) и умножитель (рис. 2). Регулирование фазового сдвига j между напряжением и током исследуемого объекта осуществляется в обоих режимах.

Трехфазное НПУ позволяет исследовать различные нагрузки, например трехфазные трансформаторы, автономные инверторы напряжения, преобразователи частоты и т.д., обеспечивая двунаправленный поток мощности: от нагрузки в сеть (режим нагрузки) и от сети в нагрузку (режим питания).

В программе MatLab/Simulink была разработана компьютерная модель трехфазного НПУ, на которой были получены осциллограммы токов и напряжений НПУ со стороны нагрузки и сети приведенные на рис. 3 при исследовании трехфазного автономного инвертора напряжения (АИН). При работе АИН в инверторном режиме энергия за вычетом потерь в НПУ возвращается обратно в сеть (рис. 3,а), а в режиме выпрямления НПУ питает АИН со стороны нагрузки, когда оба устройства переходят в режим выпрямления (рис. 3,б). Фазовый сдвиг j между первой гармоникой фазного напряжения АИН, выделяемой фильтром Φ в БЗТ (рис. 2), и током нагрузки соответствует 20° (рис. 3).

Таким образом, трехфазное НПУ обладает повышенными энергетическими показателями, так его коэффициент мощности $S_{НПУ}$ и $\cos j_{НПУ}$ близки к единице, когда фазовый сдвиг между напряжением и током сети равен нулю в режиме выпрямления (рис. 3,б) либо составляет 180° в режиме инвертирования (рис. 3,а), а также позволяет одновременное плавное регулирование нагрузки по заданному закону во всех фазах нагружаемого устройства. Т.е. НПУ – это рекуперирующий преобразователь электроэнергии, позволяющий изменять направление потока мощности в системе, подводя или отдавая энергию в сеть.

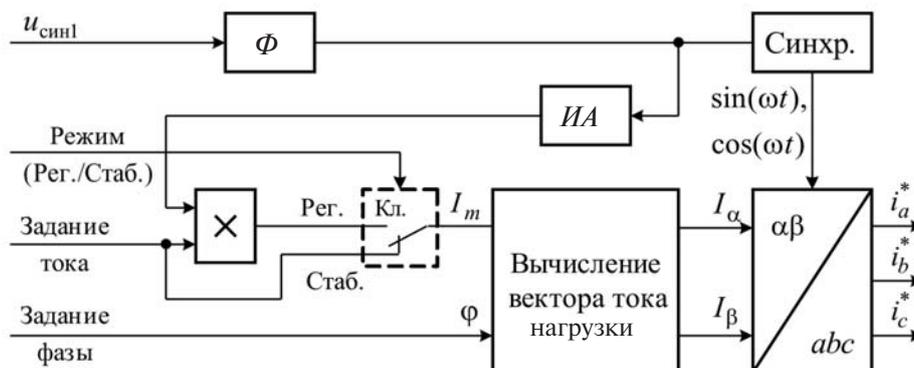


Рис. 2. Функциональная схема блока задания тока для трехфазного нагрузочно-питающего устройства

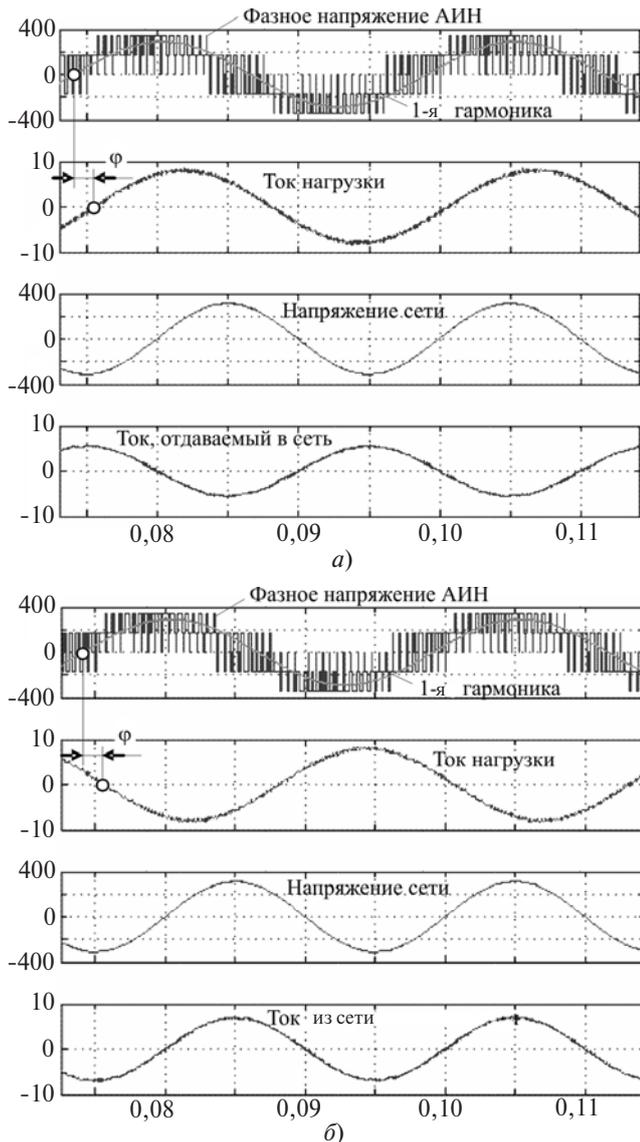


Рис. 3. Осциллограммы токов и напряжений трехфазного НПУ со стороны нагрузки и сети при исследовании трехфазного автономного инвертора напряжения, работающего на активно-индуктивную нагрузку в инверторном (а) и выпрямительном (б) режимах

Для исследования однофазных нагрузок как на постоянном, так и переменном токе на рис. 4 предложена функциональная схема однофазного НПУ, состоящая, так же как и трехфазное НПУ, из двух обратимых преобразователей напряжения *ОПН1* и *ОПН2*, соединенных между собой и с емкостным накопителем C_d на стороне постоянного тока. Силовые блоки *СБ1*, *СБ2* обратимых преобразователей напряжения представляют собой однофазные транзисторно-диодные мосты с индуктивными накопителями на выходах L_1 , L_2 .

Поскольку *ОПН2* работает на сеть переменного тока, то его основная задача – сформировать синусоидальный ток на выходе, совпадающий по фазе (режим выпрямления) или противофазный (режим инвертирования) напряжению сети u_1 . Рассмотрим

более подробно систему управления *ОПН2* (рис. 4). Для синхронизации преобразователя с сетью в системе управления используется датчик напряжения *ДН2*, на выходе которого формируется опорное напряжение синусоидальной формы $U_{оп}\sin(\omega t)$. В ячейке сдвига *ЯС* осуществляется фазовый сдвиг синусоидального сигнала на заданный угол $j_{зад}$, что обеспечивает требуемое значение $\cos j$ на выходе преобразователя. С целью достижения наиболее высоких энергетических показателей в системе рекомендуется задавать $j_{зад} = 0$.

Для стабилизации выпрямленного напряжения U_d на конденсаторе C_d и расчета амплитуды заданного тока $I_{1мзад}$ в систему управления введен внешний контур напряжения, состоящий из датчика напряжения *ДН3*, сглаживающего фильтра Φ , источника сигнала задания $U_{dзад}$ и ПИ-регулятора напряжения *РН* с блоком ограничения *БО*, ограничивающим амплитуду потребляемого тока $I_{1мзад}$. В блоке умножения формируется мгновенное значение заданного тока $i_{1зад} = I_{1мзад}\sin(\omega t + j)$.

Закон изменения выходного тока i_1 обеспечивается внутренним контуром регулирования, состоящим из индуктивного накопителя L_2 , датчика тока *ДТ2* и ПИ-регулятора тока *РТ2* (рис. 4).

Переключение силовых транзисторов $T1–T4$ может осуществляться в режиме ШИМ по симметричному и несимметричному законам управления [8]. Применение несимметричного способа управления (однополярной модуляции) с удвоением частоты импульсов на выходе преобразователя, подробно рассмотренного в статье [9], позволяет по сравнению с симметричным алгоритмом переключения силовых вентилях в 4 раза снизить значения индуктивностей L_1 и L_2 на выходе преобразователей [8, 9]. Это значительно уменьшает массогабаритные показатели НПУ и повышает его быстродействие. Управление транзисторами осуществляется с помощью блока *ШИМ2* и распределителя импульсов *РИ2* (рис. 4). Драйверы 2 в системе управления обеспечивают потенциальную развязку и усиление управляющих импульсов.

Преобразователь *ОПН1* работает в режиме источника тока, имитируя требуемый ток в нагрузке исследуемого объекта. С этой целью в преобразователь введен внутренний контур тока, состоящий из индуктивного накопителя L_1 , датчика тока *ДТ1* и ПИ-регулятора тока *РТ1*. Переключение силовых транзисторов $T1–T4$ *ОПН1* осуществляется аналогично переключению *ОПН2*. Для задания требуемых режимов работы в систему управления *ОПН1* введен блок *БЗТ* (рис. 4), выполняющий аналогичные функции как и в трехфазном НПУ:

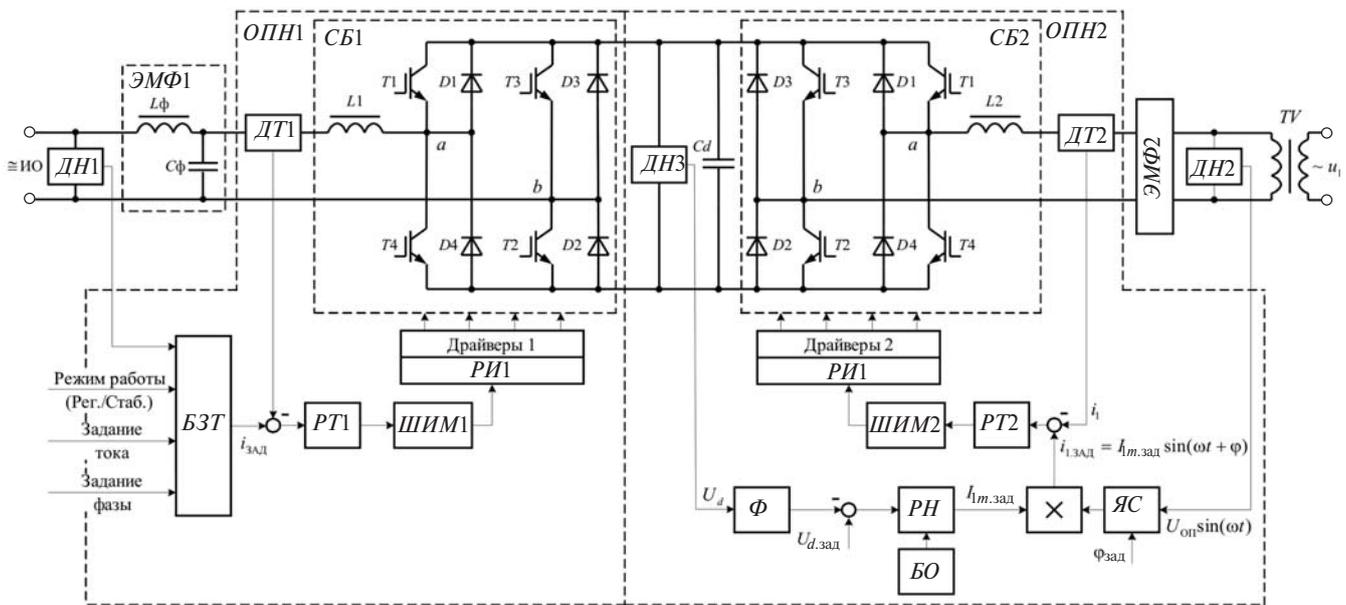


Рис. 4. Функциональная схема однофазного нагрузочно-питающего устройства

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

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

регулирование значения тока нагрузки – Задание тока;

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

На первых этапах исследование однофазного НПУ было проведено на основе компьютерного моделирования в среде MatLab/Simulink совместно с силовыми вентильными преобразователями. Результаты моделирования показали, что с помощью однофазного НПУ возможно испытание следующих преобразователей электрической энергии:

трехфазного реверсивного тиристорного преобразователя [10] в режимах выпрямления и инвертирования при активно-индуктивной нагрузке с противоЭДС (ПЭДС). Индуктивный характер нагрузки имитировался катушкой индуктивности (реактор) L_ϕ (рис. 4);

реверсивного широтно-импульсного преобразователя [8, 10] в режимах выпрямления и инвертирования при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС;

однофазного автономного инвертора напряже-

ния при активно-индуктивной нагрузке. Индуктивный характер нагрузки имитировался за счет регулирования фазового сдвига между напряжением и желаемым током нагрузки системой управления ОПН1. Катушка индуктивности (реактор) L_ϕ и конденсатор C_ϕ (рис. 4) в данном случае выполняют роль фильтра, выделяющего первую гармонику выходного напряжения автономного инвертора.

Опытный образец однофазного нагрузочно-питающего устройства был изготовлен в ООО НПП «Учтех–Профи».

На рис. 5 приведены осциллограммы токов и напряжений однофазного НПУ со стороны сети и нагрузки 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. 5,а). В режиме инвертирования НПУ, наоборот, питает ТП со стороны нагрузки. При этом НПУ переходит в режим выпрямления, а трехфазный ТП – в инверторный (рис. 5,б).

Экспериментальные энергетические характеристики $\cos \varphi_{\text{НПУ}} = f(\alpha)$, $\cos \varphi_{\text{ТП}} = f(\alpha)$ однофазного НПУ, снятые при постоянном значении тока нагрузки (режим стабилизации тока в НПУ), представлены на рис. 6. Здесь $\cos \varphi_{\text{НПУ}}$, $\cos \varphi_{\text{ТП}}$ – коэффициент мощности и модуль $\cos \varphi_{\text{НПУ}}$ соответственно; $\eta_{\text{НПУ}}$ – коэффициент полезного действия НПУ; $\eta_{\text{ТП}}$ – коэффициент мощности ТП; α – угол управления ТП.

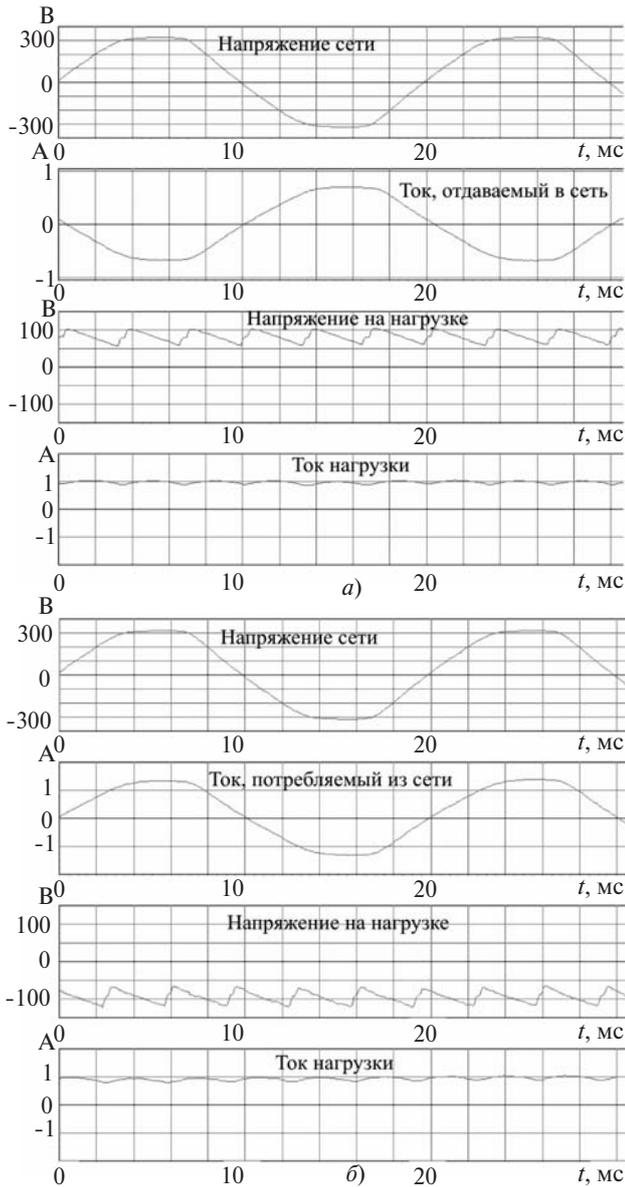


Рис. 5. Осциллограммы токов и напряжений однофазного НПУ со стороны сети и нагрузки при исследовании трехфазного реверсивного тиристорного преобразователя, работающего на активно-индуктивную нагрузку с ПЭДС в выпрямительном $\alpha = 30^\circ$ (а) и инверторном $\alpha = 135^\circ$ (б) режимах

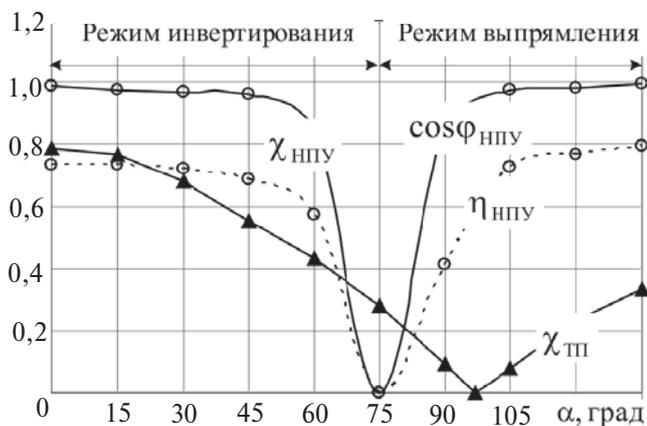


Рис. 6. Энергетические характеристики однофазного НПУ: $\cos \varphi_{\text{НПУ}} = f(\alpha)$, $\eta_{\text{НПУ}} = f(\alpha)$, $\chi_{\text{НПУ}} = f(\alpha)$, $\chi_{\text{ТП}} = f(\alpha)$ при поддержании постоянного значения тока нагрузки

Видно, что НПУ обеспечивает высокие энергетические показатели, такие как коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{НПУ}}$ и $\eta_{\text{НПУ}}$, значение которых близко к единице, за исключением области, соответствующей углам управления ТП $60^\circ < \alpha < 90^\circ$, в которой происходит смена режима работы НПУ (рис. 6). У этого НПУ КПД достаточно низкий (не превышает значения 0,8), 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 $\alpha \gg 95^\circ$ происходит изменение направления потока мощности в ТП и переход его из выпрямительного ($\alpha < 95^\circ$) в инверторный ($\alpha > 95^\circ$) режим работы.

На рис. 7 приведены осциллограммы токов и напряжений однофазного НПУ со стороны нагрузки и сети при исследовании реверсивного широтно-импульсного преобразователя (а) и однофазного автономного инвертора напряжения (б), снятые с помощью компьютерного моделирования в среде MatLab/Simulink.

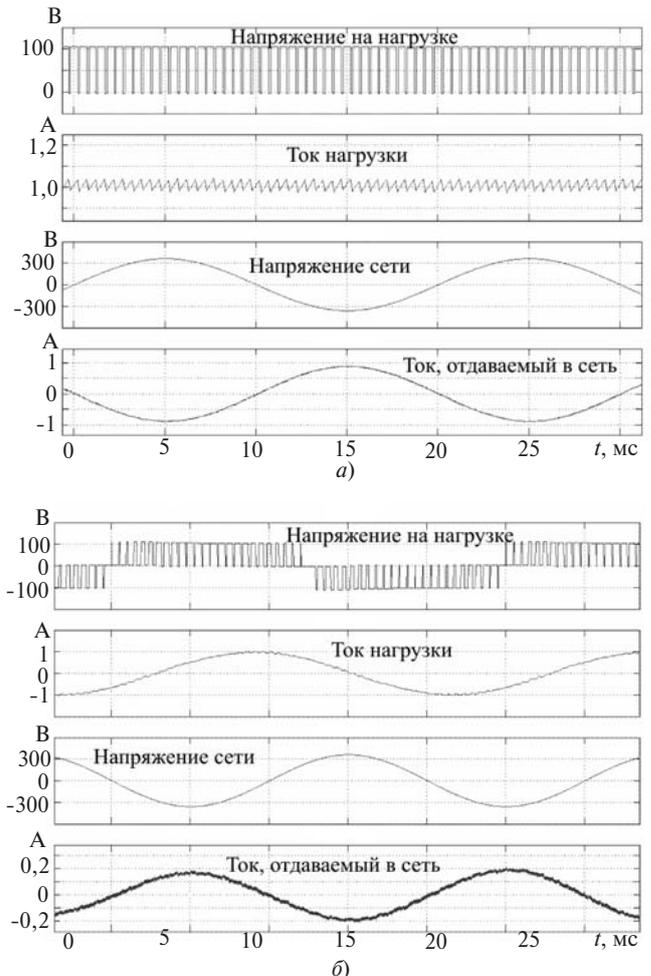


Рис. 7. Осциллограммы токов и напряжений однофазного НПУ со стороны нагрузки и сети при исследовании реверсивного широтно-импульсного преобразователя (а) и однофазного автономного инвертора напряжения (б)

Однофазное НПУ используется в автоматизированном лабораторном комплексе «Энергосберегающая энергетическая электроника», изготовленном в ООО НПП «Учтех–Профи». На стенде изучаются почти все типы преобразователей, применяемых в силовой электронике [10].

Выводы. 1. Предложенные НПУ характеризуются как универсальная нагрузка, что позволяет исследовать не только все виды вентильных преобразователей, но и другие преобразователи электрической энергии, например электрические машины, трансформаторы, источники питания и т.п., в режимах потребления и рекуперации энергии на постоянном и переменном токе.

2. Предложенные НПУ обеспечивают высокие энергетические показатели (коэффициент мощности s и $\cos\varphi$ близки к единице). При этом устройства являются энергосберегающими, так как вся энергия за вычетом потерь в НПУ, в отличие от пассивных нагрузок, возвращается в сеть.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котеленец Н.Ф., Акимова Н.А., Антонов М.В. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: Учебник для вузов. — М.: Издат. центр «Академия», 2003.
2. Зорохович А.Е., Бельский В.П., Эйгель Ф.И. Устройства для заряда и разряда аккумуляторных батарей. — М.: Энергия, 1975.
3. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. — М.: Техносфера, 2005.
4. Пат. 2345376 РФ, МПК7 G01R31/40. Нагрузочно-питающее устройство/М.В. Гельман, Р.З. Хусаинов, О.Г. Терещина, Р.М. Рахматулин, М.М. Дудкин. — № 2007130645/28. — БИ, № 3.
5. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока/Под ред. Р.Т. Шрейнера. — Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001.
6. Trzynałowski A.M., Kirlin R.L., Legowski S.F. Space vector PWM technique with minimum switching losses and a variable pulse rate. — IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, vol. 44, № 2.
7. Мещерекоев В.Н., Башлыков А.М., Абросимов А.С. и др. Системы скалярного и векторного управления частотными электроприводами с релейным регулятором тока. — Тр. VII Международ. научно-технической конф. по автоматизированному электроприводу: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». — Иваново, 2012.
8. Герман-Галкин С.Г., Лебедев В.Д., Марков Б.А., Чичерин Н.И. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями. — Л.: Энергоатомиздат, 1986.
9. Дудкин М.М. Однофазные обратимые преобразователи напряжения для улучшения качества электрической энергии в сетях ограниченной мощности. — Практическая силовая электроника, 2012, № 2(46).
10. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника: Учебник для вузов. — М.: Издат. дом МЭИ, 2007.

[26.11.12]

А в т о р ы : Гельман Морис Владимирович окончил Уральский политехнический институт (УПИ) по специальности «Электрические аппараты» в 1953 г. В 1965 г. защитил кандидатскую диссертацию «Инверторы промышленной и повышенной частоты» в УПИ. Профессор кафедры электропривода ЮУрГУ.

Дудкин Максим Михайлович окончил ЮУрГУ по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок» в 2004 г. В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию «Фазосдвигающие устройства для управления силовыми вентильными преобразователями» в ЮУрГУ. Доцент кафедры электропривода ЮУрГУ.

* * *

ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи.

Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении (стоимость по договоренности).

При повторении той же рекламы в следующем номере — скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах — скидка 20%. Стоимость оплаты рекламных статей — по договоренности. Последний срок представления рекламного материала — за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648
тел./факс: (7-495)362-7485