

УДК 62-835

Д. П. Вислогузов, Д. А. Котин
Новосибирский государственный технический университет

Синтез системы управления импульсным преобразователем постоянного тока в составе электропривода переменного тока

Обсуждаются вопросы разработки системы резервного питания частотно-регулируемого электропривода переменного тока автономного объекта от сети постоянного тока. В качестве источника электрической энергии сети постоянного тока выступает аккумуляторная батарея. Особенность рассмотренной электромеханической системы – изменение напряжения резервной сети в достаточно широком диапазоне. Оно служит возмущающим воздействием для преобразовательного оборудования системы электропривода. Рассмотрены силовая схема и основные характеристики повышающего импульсного преобразователя постоянного тока. Разработана система управления преобразователем резервного электропитания. Синтез замкнутых контуров регулирования производился методом разделения движений. Составлена и исследована имитационная модель преобразователя, представлены его выходные характеристики. Результаты цифрового моделирования подтверждены экспериментальными исследованиями на макетном образце импульсного преобразователя. Приводятся осциллограммы режимов работы.

Частотно-регулируемый электропривод, резервное питание, преобразователь постоянного тока, система регулирования

В настоящее время все большую популярность приобретают системы, получающие электропитание от альтернативных или возобновляемых источников энергии. Как правило, мощность подобного источника непостоянна и может зависеть от текущего времени суток, скорости потока ветра или времени года и т. п. Решение данной проблемы возможно с помощью накопителей энергии, которые позволяют аккумулировать выработанную мощность в пики интенсивности альтернативного источника с ее дальнейшим потреблением нагрузкой по мере необходимости. Наиболее популярный накопитель энергии сегодня – это аккумуляторные батареи или конденсаторные установки. С другой стороны, на сегодняшний день наиболее распространен в качестве потребителя электрической энергии для промышленных и бытовых нужд электропривод на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором [1], работа которого напрямую от источника постоянного тока невозможна.

Исходя из обозначенной проблематики становится актуальной разработка и применение электромеханических систем двойного электропитания, как от стандартной сети переменного тока, так и от альтернативного накопителя или аккумуляторной батареи. Для работы электропривода

переменного тока от аккумуляторной батареи автономными в основной части работы будет предложено дополнить классический двухзвенный преобразователь частоты повышающим преобразователем постоянного тока в постоянный (ППТ).

Среди множества топологий силовых схем [2], [3] ППТ наибольший интерес вызывает импульсный повышающий преобразователь, выполненный по схеме step-up DC-DC-converter [4]. Интерес к разработке и исследованию ППТ подобного типа обусловлен прежде всего относительно низкой стоимостью и простотой его реализации, а также приемлемыми массогабаритными показателями. Указанные преимущества обеспечивают таким ППТ перспективу широкого применения на автономных объектах.

Несмотря на то что в литературе подобные силовые схемы ППТ были в той или иной степени рассмотрены, синтез систем автоматического регулирования таких преобразователей освещен довольно мало. В данной статье будет представлена подробная методика синтеза системы управления ППТ в составе частотно-регулируемого асинхронного электропривода.

Функциональная схема электропривода двойного электропитания. На рис. 1 изображена функциональная схема электропривода двойного электропитания.

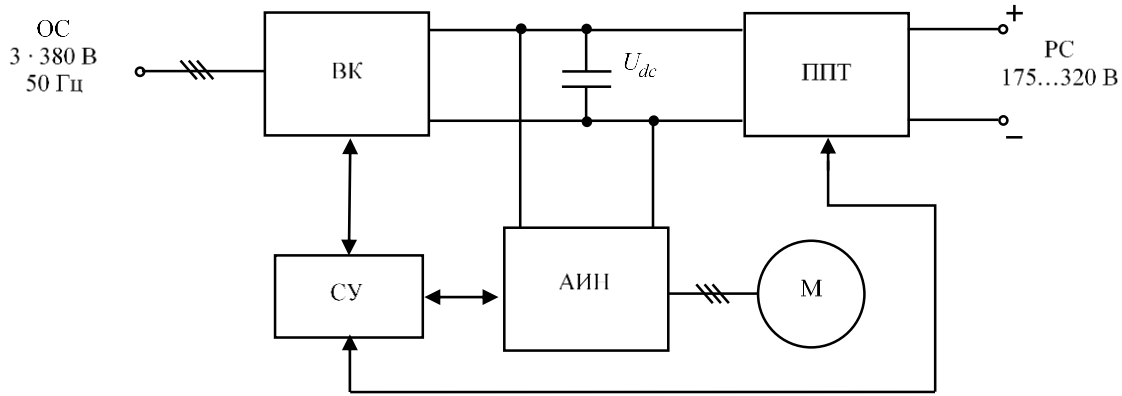


Рис. 1

Питание электродвигателя переменного тока (М) согласно функциональной схеме возможно, как от основной сети (ОС) переменного тока (3 · 380 В, 50 Гц), так и от резервной сети (РС) постоянного тока (175...320 В), реализованной при помощи аккумуляторных батарей.

При питании от основной сети управление электродвигателем осуществляется по схеме классического двухзвенного преобразователя частоты (ПЧ), в состав которого входит выпрямительный комплект (ВК), звено постоянного тока и автономный инвертор напряжения (АИН). В качестве алгоритма управления используется бездатчиковое векторное или частотное (скалярное) управление [5].

В случае нестабильности параметров ОС происходит переход на РС. Питание АИН непосредственно от аккумуляторных батарей невозможно в силу их низкого напряжения, которое к тому же варьируется в широком диапазоне. Для решения данной проблемы в состав ПЧ был включен повышающий импульсный преобразователь постоянного тока (ППТ). ПЧ и ППТ имеют общую систему управления (СУ), которая запитана от звена постоянного тока. Заряд аккумуляторных батарей ограничен, поэтому при восстановлении параметров сети переменного тока происходит обратный процесс переключения с РС на ОС.

Гальваническую развязку между основной и резервной сетями обеспечивает силовая коммутационная аппаратура с промежуточной выдержкой времени при каждом переходе. Работа электропривода двойного электропитания возможна по принципу «холодного» или «теплого» замещения. Режим работы по принципу «теплого» замещения питания электропривода возможен в системах с большими инерционными массами благодаря применению специальных алгоритмов, например «бестоковая пауза» или «кинетическая буферизация» [6], [7].

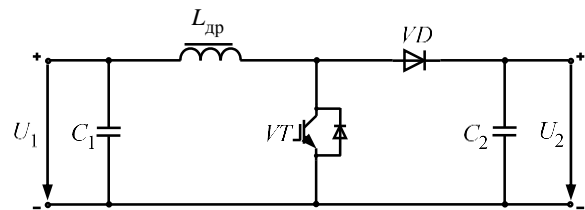


Рис. 2

Силовая схема и математическое описание ППТ. Силовая схема повышающего импульсного преобразователя постоянного тока изображена на рис. 2, где были приняты следующие обозначения: U_1 – входное напряжение; U_2 – выходное напряжение; $L_{др}$ – дроссель; VT – IGBT-транзистор; VD – диод; C_1 – входная емкость (первичная сторона ППТ); C_2 – выходная емкость (вторичная сторона ППТ).

Первичная сторона ППТ подключена к аккумуляторным батареям с напряжением 175...320 В, а вторичная – непосредственно к звену постоянного тока ПЧ с напряжением 520...540 В. Выходная мощность преобразователя регулируется скважностью IGBT-транзистора.

Выходная мощность ППТ (без учета «мертвого времени», активных сопротивлений трансформатора и дросселя, падений напряжения на полупроводниковых приборах):

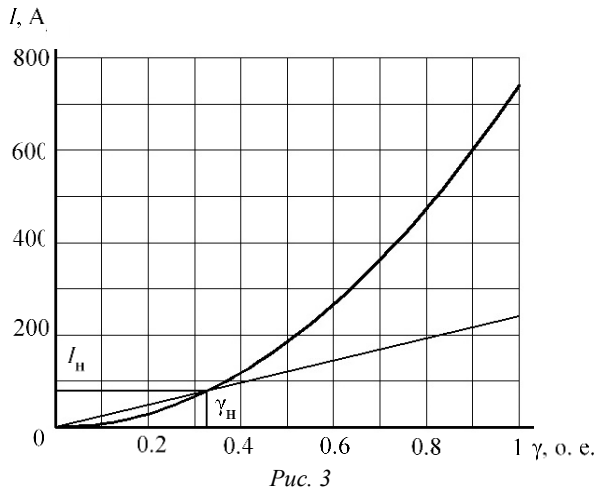
$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_1^2 U_2}{2(U_2 - U_1) L_{др} f} \gamma^2, \quad (1)$$

где f – частота коммутации транзистора; γ – скважность транзистора VT .

Согласно (1) выходной ток преобразователя

$$I_{\text{ВЫХ}} = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{U_2} \frac{U_1^2}{2(U_2 - U_1) L_{др} f} \gamma^2. \quad (2)$$

Регулировочная характеристика для выходного тока при следующих параметрах системы: $U_1 = 175 \text{ В}$, $U_2 = 520 \text{ В}$, $L_{др} = 10 \text{ мкГн}$, $f = 6 \text{ кГц}$, представлена на рис. 3.



Структура системы управления ППТ (рис. 4) построена по принципу подчиненного регулирования с условием разделения темпов движений в замкнутых контурах и является системой стабилизации выходного напряжения [8]. Система управления имеет замкнутый внутренний контур тока с интегральным регулятором и внешний замкнутый контур выходного напряжения с пропорционально-интегральным регулятором. Коэффициенты обратных связей рассчитаны исходя из максимальных значений выходного тока и напряжения соответственно.

На рис. 4 были приняты следующие обозначения: U_{ref1} , I_{ref1} – сигналы задания на выходное напряжение и выходной ток ППТ; РН, РТ – регуляторы выходного напряжения и выходного тока; γ_{ref} – сигнал задания на скважность транзистора VT; k_d – коэффициент передачи ППТ по току; I_2 – выходной ток ППТ; I_n – ток нагрузки ППТ;

$p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования; U_2 – выходное напряжение ППТ; k_{dI_2} , k_{dU_2} – коэффициенты обратной связи по выходному току и по выходному напряжению.

Для проведения процедуры синтеза контуров регулирования силовая часть ППТ описывается безынерционным звеном с коэффициентом передачи k_d . Такое допущение справедливо, если быстродействие внутреннего контура регулирования тока ППТ будет как минимум на порядок меньше частоты коммутации силового транзистора VT (рис. 2). Поскольку регулировочная характеристика преобразователя нелинейна относительно скважности и входного напряжения, ее линеаризация проводилась в точке номинальных параметров, как показано на рис. 3.

Передаточная функция замкнутого контура тока будет иметь вид

$$W_{\text{зам КРТ}}(p) = \frac{1/k_{dI_2}}{1/k_n k_d k_{dI_2} p + 1} \quad (3)$$

Для нахождения интегрального коэффициента регулятора тока необходимо передаточную функцию замкнутого контура приравнять к желаемому (нормированному) полиному. Желаемый полином примем в виде

$$W_{\text{зам. жел}}(p) = \frac{1}{1/\Omega_{\text{жел}}(p+1)}, \quad (4)$$

где $\Omega_{\text{жел}} = \frac{1\pi f_{\text{дис}}}{k_{рд1}}$.

Тогда коэффициент интегральной части регулятора тока будет равен:

$$k_i = 1\Omega_{\text{жел}}/k_d k_{dI_2} \quad (5)$$

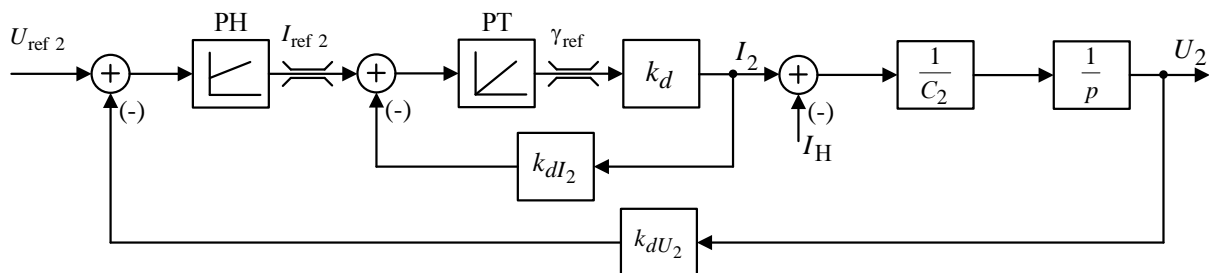


Рис. 4

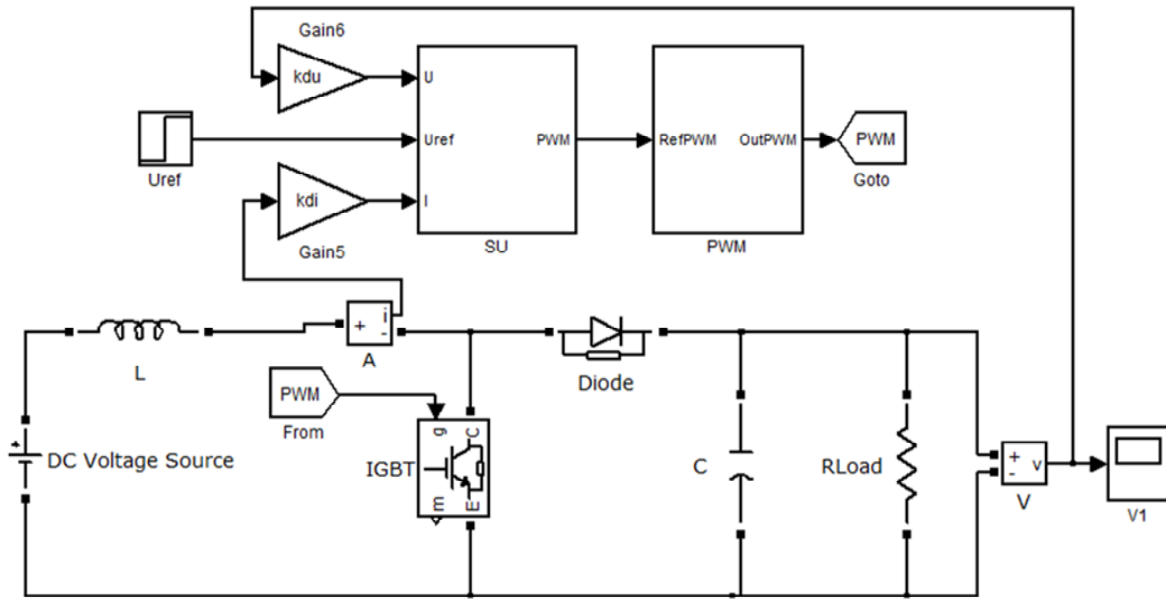


Рис. 5

Передаточная функция замкнутого контура регулирования выходного напряжения по управляющему воздействию равна

$$W_{\text{зам КРТ}}(p) = \frac{(k_{\text{П}}/k_{\text{Э}})p + k_{\text{И}}/k_{\text{Э}}}{p^2 k_{\text{П}}k_{\text{д}}U_2/k_{\text{Э}} + k_{\text{И}}k_{\text{д}}U_2/k_{\text{Э}}}, \quad (6)$$

где эквивалентный коэффициент равен $k_{\text{д}}I_2 C$, C – эквивалентное значение емкости конденсаторов звена постоянного тока электропривода.

Для нахождения коэффициентов интегральной и пропорциональной частей регулятора напряжения необходимо приравнять знаменатель замкнутой передаточной функции контура (6) к нормированному полиному, который имеет вид

$$N(p) = p^2 + A_1 \Omega_{\text{н}} p \Omega_{\text{н}}^2, \quad (7)$$

где A_1 – коэффициент формы переходного процесса (для обеспечения монотонного переходного процесса была выбрана стандартная биномиальная настройка, где для полинома второго порядка коэффициент $A_1 = 2$); $\Omega_{\text{н}} = \Omega_{\text{жел}}/k_{\text{рд}2}$ – согласно условию разделения движений в контурах регулирования.

Тогда из равенства выражений (6) и (7) коэффициенты интегральной и пропорциональной частей регулятора напряжения будут равны, соответственно,

$$k_{\text{И}} = \frac{\Omega_{\text{н}}^2 k_{\text{Э}}}{k_{\text{д}} U_2}, \quad (8)$$

$$k_{\text{П}} = \frac{A_1 \Omega_{\text{н}} k_{\text{Э}}}{k_{\text{д}} U_2}. \quad (9)$$

Имитационное моделирование режимов работы преобразователя постоянного тока. Имитационная модель ППТ в пакете программ Matlab (с использованием библиотек Simulink, SimPowerSystems) представлена на рис. 5.

Переходный процесс по выходному напряжению ППТ (с учетом заранее проведенной процедуры предварительного заряда емкости звена постоянного тока электропривода и наличия статической нагрузки на валу асинхронного двигателя) представлен на рис. 6. Переходные процессы выходного тока ППТ и совмещенной с ним коммутационной функции транзистора VT на интервале t_1-t_2 представлены на рис. 7. Параметры преобразователя рассчитаны исходя из максимального допустимого тока и максимальной скважности силового транзистора.

Преобразователь работает в режиме прерывистого тока, что соответствует регулировочной характеристике (2). Переходный процесс выходного напряжения монотонный, что соответствует биномиальной настройке. Время переходного процесса по управляющему воздействию составляет 0.0816 с.

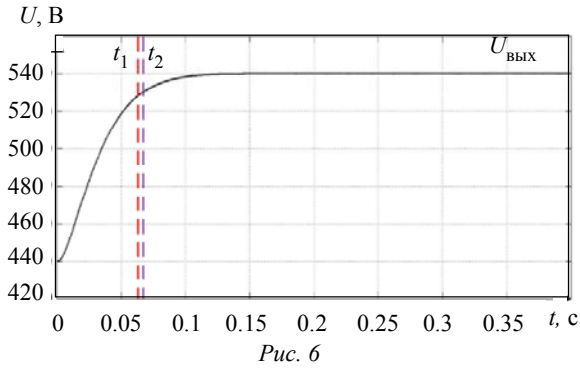


Рис. 6

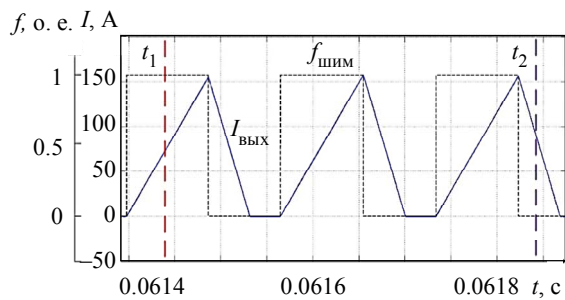


Рис. 7

Экспериментальный макет преобразователя постоянного тока и его характеристики. На рис. 8 изображен макетный образец ППТ мощностью 40 кВт.

Силовая полупроводниковая часть макета построена на базе модульного транзистора CM1400DU-24NF и модульного диода MD/T3-540-18-A. Подложка модулей зафиксирована на алюминиевом радиаторе с принудительным воздушным охлаждением.

Для снижения потерь в дросселе, его сердечник имеет тороидальную конструкцию и изготавливается из феррита, а проводник представляет собой многожильный провод (литцендрат).

В основе системы управления лежит микропроцессор Freescale (MC56F8345VFGE). В целях

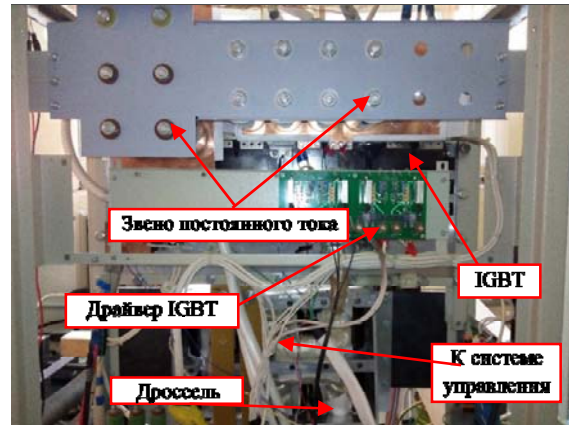
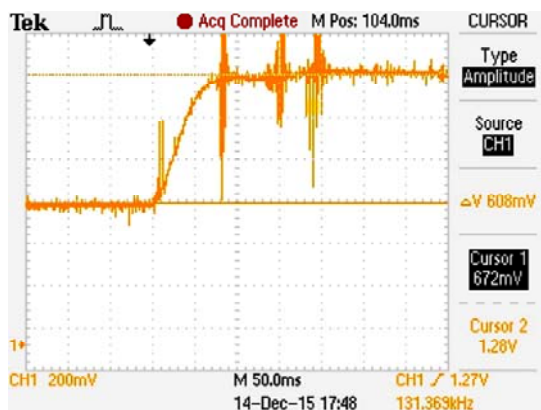


Рис. 8

обеспечения безопасности системы электропривода ППТ оборудован аппаратными и программными защитами: от превышения максимального допустимого тока, повышенного или пониженного напряжения питания, перегрева и др.

Переходные процессы выходного напряжения и тока макета ППТ с учетом статической нагрузки представлены на рис. 9, а и б соответственно. Переходные процессы, полученные в результате цифрового моделирования и натурального эксперимента, идентичны по всем показателям качества.

В статье рассмотрены вопросы проектирования систем регулируемого электропривода переменного тока с двойным электропитанием. Применение повышающего ППТ обеспечивает согласование уровней напряжений резервного источника питания и звена постоянного тока стандартного преобразователя частоты без его значительных конструктивных доработок, что существенно облегчает распространение подобных систем в промышленности и повышению надежности электропривода в целом.



а



б

Рис. 9

Синтез системы управления ППТ производился методом разделения движений в замкнутых контурах регулирования. Результаты цифрового моделирования и экспериментальных исследований подтвердили рациональность выбранного подхода к построению системы электропривода.

В дальнейшем планируется разработка систем электроприводов с возможностью двойного электропитания средней и большой мощности, а также разработка алгоритмов управления совместной работы ПЧ и ППТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нос О. В. Математические модели преобразования энергии в асинхронном двигателе: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. 168 с.
2. A Review of Non-Isolated High Step-Up DC/DC Converters in Renewable Energy Applications / W. Li, X. Lv, Y. Deng, J. Liu, X. He // 24th Annual IEEE Appl. Power Electronics Conf. and Exposition (APEC). China: Zhejiang University, 2009. P. 364–369.
3. Survey on non-isolated high-voltage step-up dc-dc topologies based on the boost converter / F. L. Tofoli, D. de Castro Pereira, W. J. de Paula, D. de Sousa Oliveira Jun // IET Power Electronics. 2015. Vol. 8, № 10. P. 2044–2057.
4. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: учеб. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. Ч. 1. 199 с.
5. Панкратов В. В. Векторное управление асинхронными электроприводами: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. 66 с.
6. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Гос. комитет СССР по упр. качеством продукции и стандартам, 1990. 25 с.
7. Вислогузов Д. П., Котин Д. А., Волков В. Ю. Алгоритм работы электропривода переменного тока в условиях кратковременной пропажи питающей сети // Тр. IX Междунар. (XX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2016, Пермь, 3–7 окт. 2016 г. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2016. С. 16–19.
8. Востриков А. С., Французова Г. А., Гаврилов Е. Б. Основы теории непрерывных и дискретных систем регулирования. 5-е изд., перераб. и доп.: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. 476 с.

D. P. Visloguzov, D. A. Kotin
Novosibirsk State Technical University

PULSE DC/DC CONVERTER CONTROL SYSTEM SYNTHESIS AS A COMPONENT OF AC ELECTRIC DRIVE

The problems of development of DC mains backup power system for frequency-controlled AC electric drive for standalone object are discussed. As a DC mains electric power source stand in as storage battery. The feature of the considered electromechanical system is a variation of the backup mains voltage in the quite wide range. This property is a disturbance effect for the converting equipment of the electric drive system. Power circuit and general properties of step-up pulsed DC/DC converter are considered. The control system of the converter for backup supply is developed. Synthesis of closed control loops was realized by the motion separation method. Composed and investigated simulation model of the converter and its output performance are presented. The results of a computer simulation are verified by experimental research on a bread-board pulsed converter model. The oscilloscope pictures of the operation modes are given.

Frequency-controlled electric drive, backup power system, DC/DC converter, control system
