

Володин Е.В., Осипов О.И.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШАЮЩЕГО *DC-DC* ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Предложен вариант силовой части повышающего *DC-DC*-преобразователя для питания автономных инверторов напряжения АИН общепромышленных преобразователей частоты ПЧ. Особенностью преобразователя является работа трех модулей АИН на отдельные высокочастотные трансформаторы, первичные обмотки которых подключены соответственно к каждому модулю АИН, а вторичные соединены последовательно, что позволяет повысить преобразуемую мощность, не превышая номинальные параметры промышленных модулей. Для ограничения перенапряжений на диодах выходного выпрямителя и ускорения процесса их коммутации (закрытия) в преобразователе использована дополнительная цепь с ответвлением от сглаживающего дросселя фильтра звена постоянного тока. Рассмотрен принцип работы повышающего *DC-DC*-преобразователя, иллюстрированный диаграммами сигналов управления его силовыми ключами. Представлены результаты моделирования коммутационных процессов и экспериментальных исследований их на реальном повышающем *DC-DC*-преобразователе, которые подтвердили работоспособность и эффективность предлагаемого варианта его силовой схемы при обеспечении всех требуемых режимов работы.

Ключевые слова: *DC-DC*-преобразователь, высокочастотный трансформатор, выпрямитель, перенапряжение, система управления, экспериментальные исследования, математическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

При питании общепромышленных преобразователей частоты ПЧ от трехфазной сети частотой 50 Гц с линейным напряжением 380 В на выходе мостового выпрямителя (на входе автономного инвертора напряжения АИН для питания электродвигателей переменного тока) напряжение постоянного тока достигает уровня 540 В. Поэтому при питании АИН от автономных или резервных источников постоянного тока с напряжениями, отличающимися от подобного значения, необходимо иметь возможность повышать (либо снижать) и стабилизировать напряжение на желаемом уровне. Вариантом такого решения может быть применение повышающих (понижающих) *DC-DC*-преобразователей с высокочастотным трансформатором. При их технической реализации остро встают проблемы, связанные с необходимостью согласования выходных мощностей преобразователей при допустимых номинальных параметрах типовых *IGBT*-модулей, ограничений перенапряжений на их элементах при ускорении процесса коммутации. Для их решения на примере повышающего *DC-DC*-преобразователя анализируется принцип его работы и представлены результаты математического моделирования и экспериментальных исследований предлагаемого варианта преобразователя.

СИЛОВАЯ ЧАСТЬ *DC-DC*-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Одним из вариантов *DC-DC*-преобразователей является наличие в них гальванической развязки с повышающим высокочастотным трансформатором (рис. 1) [1]. Здесь: $U_{вх}$ – напряжение входной сети; $R_{заряд}$ – зарядный резистор для предварительного заряда входных конденсаторов $C_{вх1}, \dots, C_{вх3}$; P_1 – реле, шунтирующее $R_{заряд}$ при заряженных конденсаторах $C_{вх1}, \dots, C_{вх3}$; K_1, K_2, K_3, K_4 – ключи инверторов напряжения; $TP_1..TP_3$ – повышающие высокочастотные

трансформаторы; $D_1..D_4$ – диоды выпрямителя; L – сглаживающий дроссель; C_{dc} – конденсатор звена постоянного тока.

Принцип работы предлагаемой схемы в том, что при подаче входного питания $U_{вх}$ происходит плавный заряд входных емкостей $C_{вх1}, \dots, C_{вх3}$ через резистор $R_{заряд}$ и при достижении напряжения порядка 175 В через 1 с происходит шунтирование резистора блоком контактом реле P_1 для исключения ударных зарядных токов входной емкости. При шунтировании $R_{заряд}$ одновременно выдается разрешение на широтно-импульсную модуляцию ШИМ ключей инвертора напряжения. В предлагаемом варианте преобразователя реализована ШИМ с частотой 12 кГц. В контроллере управления преобразователем определяется необходимая скважность для ключа K_1 , равная $\gamma_{K1} = 0..0,5$. При этом K_3 работает в комплементарном режиме с ключом при скважности $\gamma_{K3} = 0,5..1$. Для второй стойки скважность рассчитывается как $\gamma_{K4} = 1 - \gamma_{K1} = 0,5..1$. На рис. 2 представлены осциллограммы управляющих сигналов ключами $K_1..K_4$ для скважности 0,25. При этом для обеспечения синхронизации управляющие сигналы для K_2 и K_4 меняются местами, и, соответственно, $\gamma_{K2} = 1 - \gamma_{K4} = 0..0,5$.

На рис. 2 *PWM* – опорный сигнал, *TP* – форма напряжения на первичной обмотке трансформатора (см. рис. 1). При данной схеме управления коммутация осуществляется только верхними ключами K_1 и K_2 , а синхронизация осуществляется на аппаратном уровне контроллером. Сигналы управления параллельно выдаются на три инвертора напряжения.

После преобразования инвертором входного постоянного напряжения в переменное происходит его повышение с помощью повышающих высокочастотных трансформаторов TP_1, TP_2, TP_3 . Применение высокой частоты преобразования позволяет заметно снизить массогабаритные характеристики трансформатора. Повышенное напряжение вторичной обмотки выпрямляется и фильтруется на *LC*- фильтре звена постоянного тока.

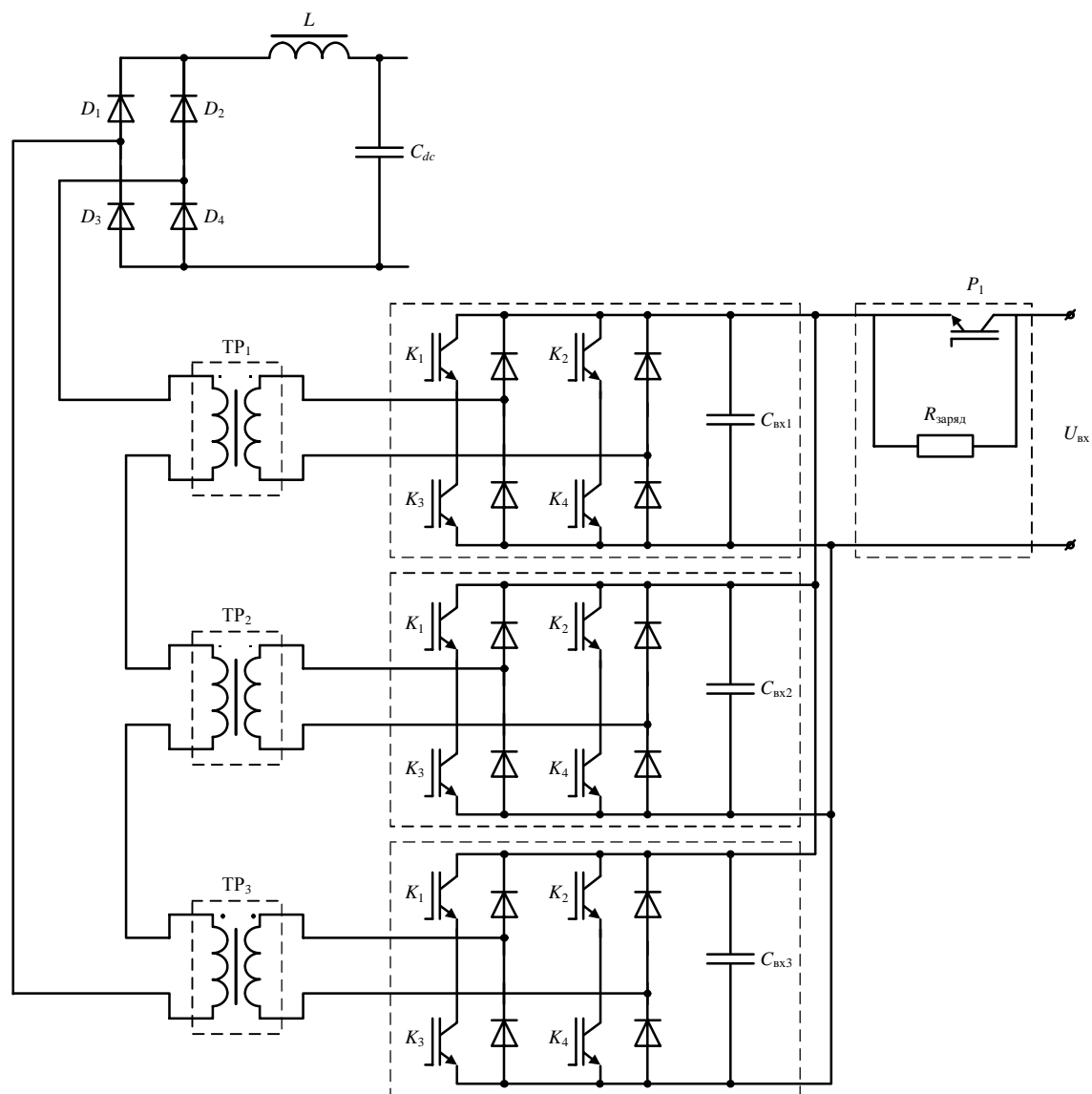


Рис. 1. Схема повышающего DC-DC-преобразователя

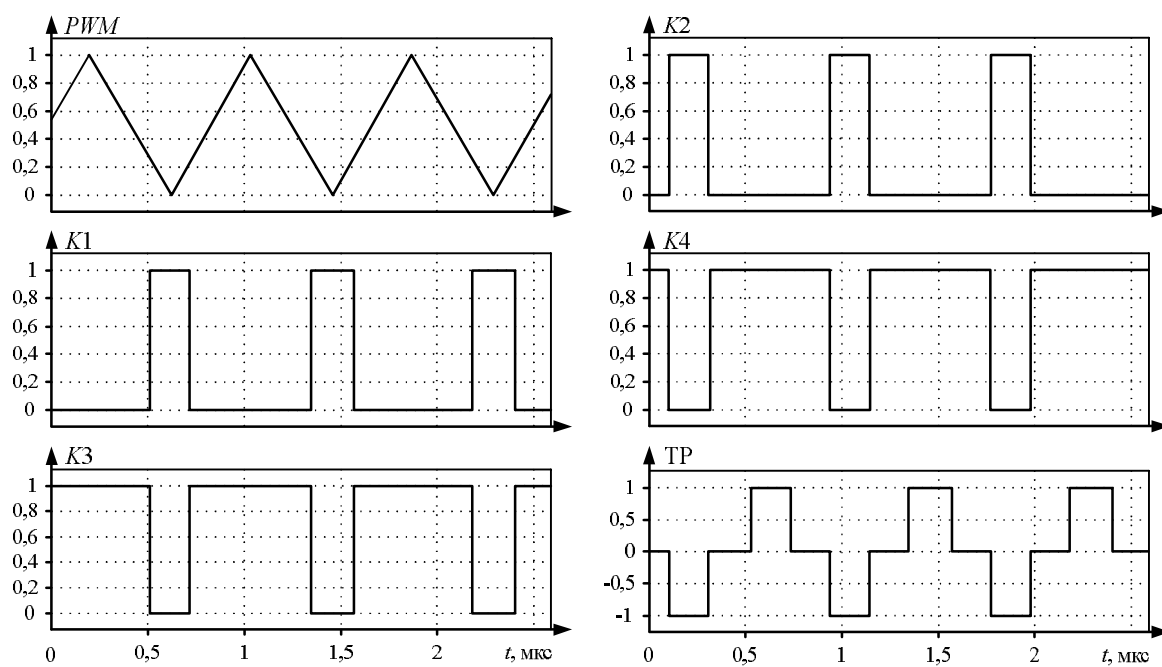


Рис. 2. Осциллограммы управляющих сигналов ШИМ

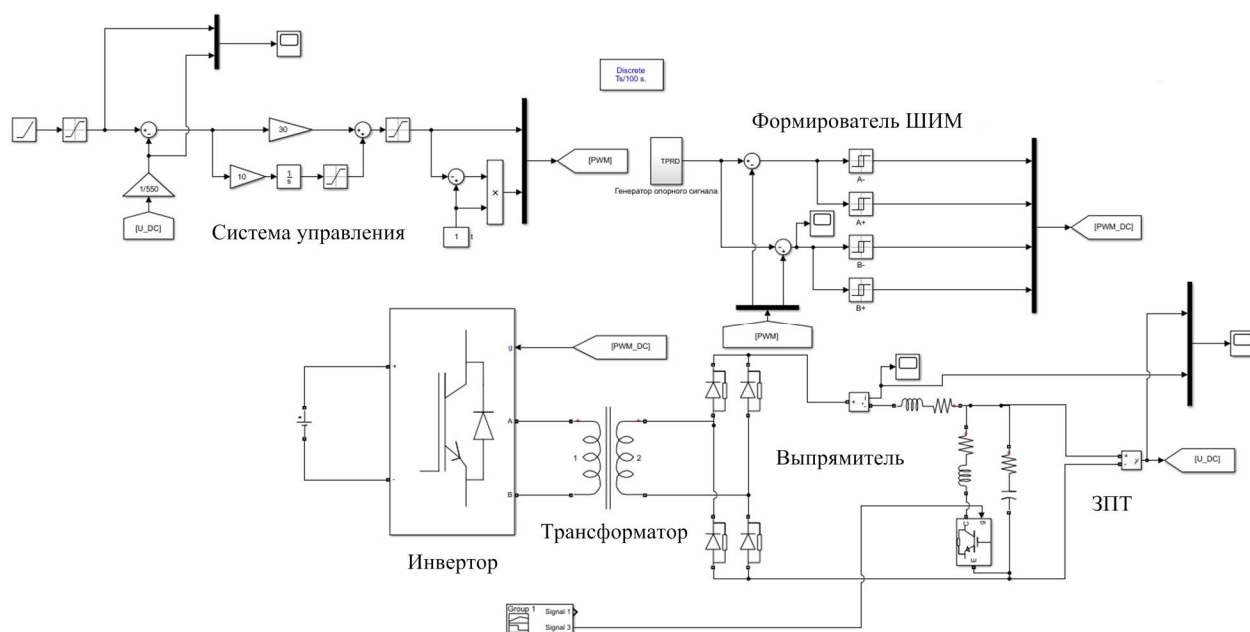


Рис. 3. Модель исследуемого DC-DC-преобразователя

Подобный принцип работы преобразователя стимулирует создание системы управления, не допускающей ударных токов при работе, принятие мер по ограничению перенапряжений на полупроводниковых элементах, и реализацию DC-DC-преобразователя на модулях российского производства с типовыми их техническими параметрами.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Для DC-DC-преобразователя рекомендована замкнутая система управления с обратной связью по напряжению звена постоянного тока и токовая защита с применением датчика тока в этом звене. Исследуемая модель повышающего DC-DC преобразователя в среде Matlab представлена на рис. 3 [4].

При моделировании рассматривались режимы холостого хода и заряда звена постоянного тока. При заряде звена ток должен ограничиваться допустимым значением для сохранности силовых модулей и емкости звена постоянного тока. При холостом ходу преобразователя перезаряд звена постоянного тока не должен происходить при формировании малых скважностей и минимальной ошибки в заданном и действительном напряжениях.

На рис. 4 показаны переходные процессы задания напряжения от задатчика интенсивности $U_{\text{зад}dc}$ и действительное напряжение U_{dc} в звене постоянного тока на конденсаторе C_{dc} , а также зарядный ток I_{dc} в дросселе L , ограниченный на уровне 40 А. Как видно из рис. 4, управление DC-DC-преобразователем обеспечивает формирование заданного напряжения в звене постоянного тока на конденсаторе C_{dc} при ограничении тока не выше допустимого предела.

Результаты моделирования работы DC-DC-преобразователя при номинальных режимах, а также при набросе и сбросе нагрузки представлены на рис. 5.

Моделирование подтвердило работоспособность системы управления преобразователем при номинальных нагрузках. При этом в режиме наброса нагрузки наблюдались затухающие колебания напряжений и

токов в звене выпрямителя, а при ее сбросе они полностью отсутствовали. Математическое моделирование подкреплялось исследованиями на реальном DC-DC-преобразователе мощностью 22 кВт. На рис. 6 представлен процесс заряда звена постоянного тока преобразователя.

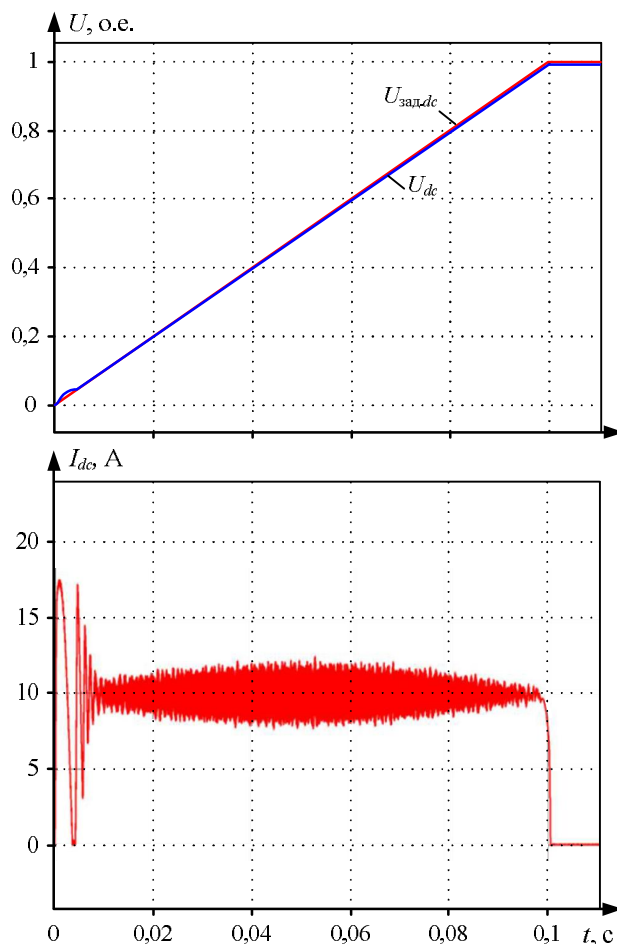


Рис. 4. Переходные процессы при заряде звена постоянного тока DC-DC-преобразователем

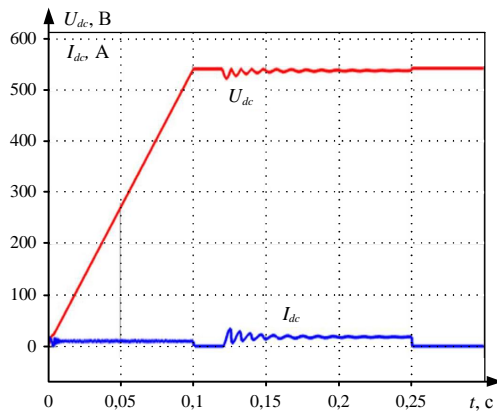


Рис. 5. Переходные процессы при сбросе и набросе нагрузки

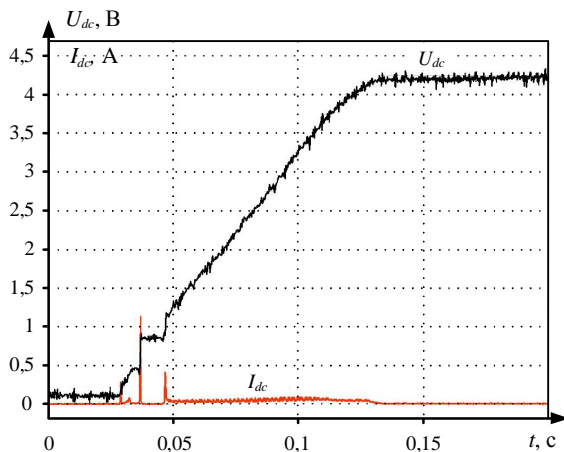


Рис. 6. Осциллограммы напряжения U_{dc} и тока I_{dc} при заряде звена постоянного тока (масштаб для напряжения 1 В АЦП – 127 В, для тока 1 В АЦП – 10 А)

Результаты экспериментов подтвердили работоспособность предлагаемой схемы $DC-DC$ -преобразователя во всех его рабочих режимах.

СНИЖЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ЭЛЕМЕНТАХ $DC-DC$ -ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Паразитные индуктивности в цепях $DC-DC$ -преобразователя и дроссель в фильтре звена постоянного тока способствуют возникновению перенапряжений на его диодах, величина которых может привести к выходу их из строя [2, 3]. Причина в том, что при закрытии диодов выпрямителя происходит снижение тока в дросселе, сопровождающееся ростом напряжения на выпрямителе, способным его вывести из строя.

В подтверждение тому на рис. 7 показаны экспериментальные осциллограммы напряжений на диодах $D1, \dots, D4$ в исходном варианте $DC-DC$ -преобразователя (см. рис. 1).

Перенапряжения на диодах $D1, \dots, D4$ при их закрытии превышали 1000 В, что требует их ограничения. С этой целью предложен вариант $DC-DC$ -преобразователя (рис. 8) с запирающей отпайкой L_{sn} дросселя L , диодами $D5$ и $D6$ в цепи LC -фильтра выпрямителя.

Экспериментальные осциллограммы напряжений на диодах $D1, \dots, D4$ и токов в их цепи (рис. 9) для предложенного варианта выпрямителя $DC-DC$ -преобразователя подтвердили при закрытии диодов уменьшение перенапряжений выпрямителя на 400-500 В.

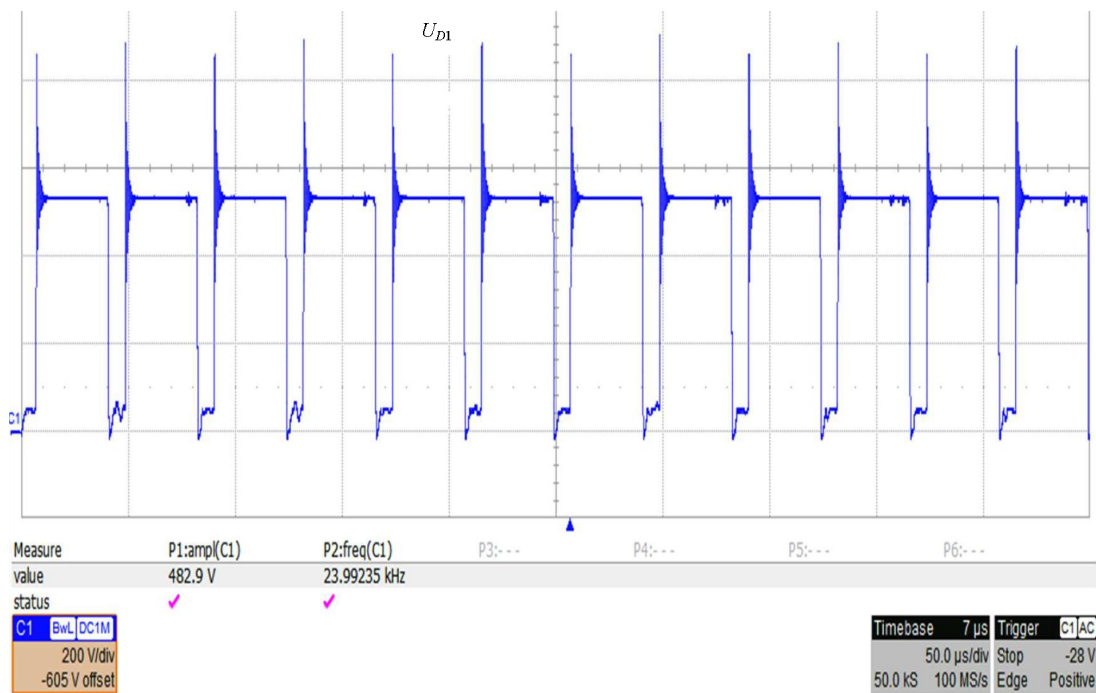


Рис. 7. Экспериментальная осциллограмма U_{D1} в исходном варианте преобразователя (масштаб 200 В/дел.)

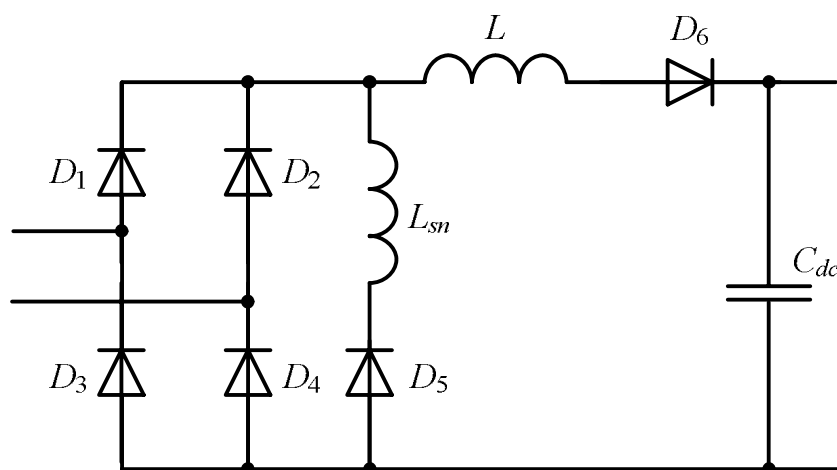
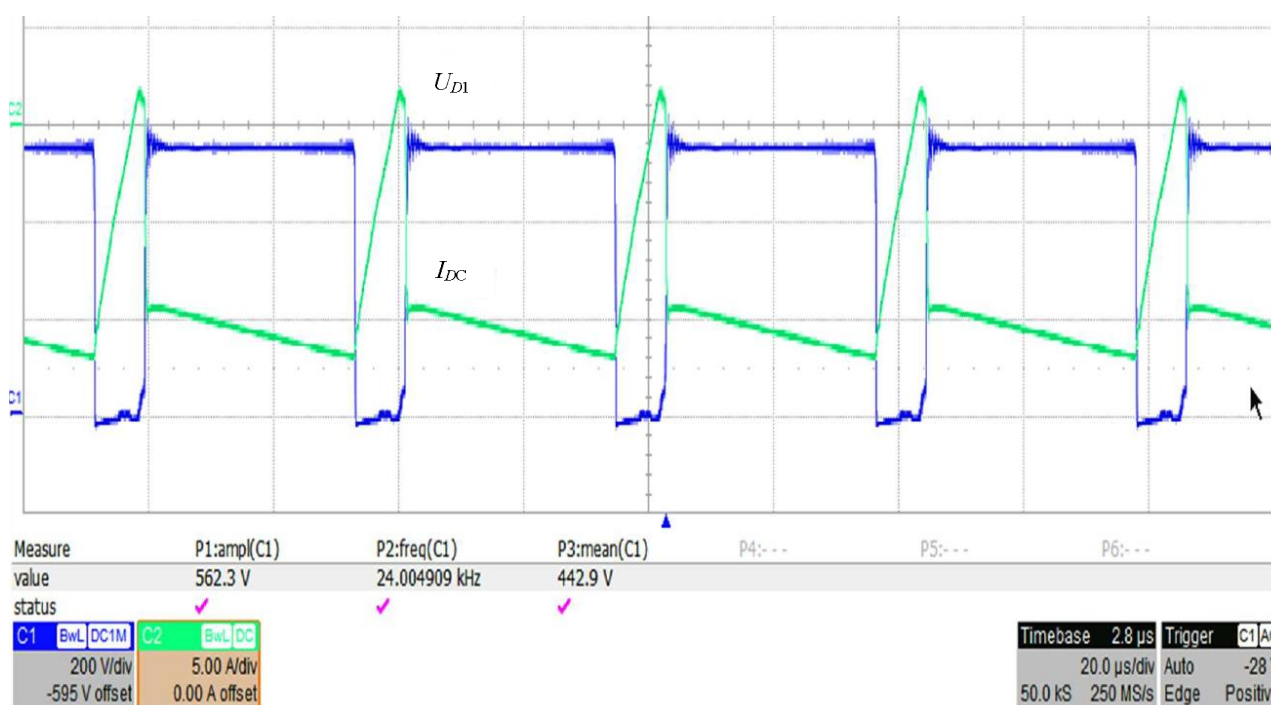


Рис. 8. Схема выпрямителя с запирающей отпайкой


 Рис. 9. Экспериментальные осциллограммы напряжения U_{DI} (масштаб 200 В/дел.) и тока I_{DC} (масштаб 5 А/дел.) с запирающей цепочкой

Выводы

Особенностью предложенного повышающего DC-DC-преобразователя является применение трех его модулей автономных инверторов напряжения с отдельными высокочастотными трансформаторами, первичные обмотки которых подключены соответственно на выход каждого модуля, а вторичные соединены последовательно, что позволяет повысить общую преобразуемую мощность, не повышая требований к изменению номинальных параметров типовых модулей отечественного производства.

Моделирование коммутационных процессов и экспериментальные исследования их на реальном DC-DC-преобразователе подтвердили работоспособность предлагаемого варианта его силовой схемы при обеспечении всех требуемых режимов работы.

Техническое решение выпрямителя DC-DC-преобразователя по схеме рис. 8 позволило снизить перенапряжения на силовых его элементах до допустимых значений, что подтверждено на реальном объекте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005. 632 с.
2. Паспорт «Модуль на основе БВД 5М6БВД» «Электрум АВ».
3. Севернс Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания: пер. с англ. / под ред. Л.Е. Смольникова. М.: Энергоатомиздат, 1988. 294 с.: ил.
4. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб: Питер, 2008. 288 с.

Поступила в редакцию 22 июля 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

EXPERIMENTAL RESEARCH OF STEP-UP DC-DC CONVERTER

Evgeni V. Volodin

Graduate student, the Department of automated electric drive, Power Engineering Institute (MPEI) (National Research Institute), Moscow, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9081-8660>

Oleg I. Osipov

D.Sc. (Engineering), Professor, the Department of automated electric drive, Moscow Power Engineering Institute (MPEI) (National Research Institute), Moscow, Russia.

A variant of the power part of a step-up *DC-DC* converter for supplying autonomous voltage inverters for industrial inverter frequency converters is proposed. The converter feature is the operation of three autonomous voltage inverters modules for separate high-frequency transformers, the primary windings of which are connected respectively to each autonomous voltage inverters module, and the secondary windings are connected in series, which makes it possible to increase the converted power without exceeding the rated parameters of industrial modules. To limit overvoltages on the diodes of the output rectifier and to accelerate the process of their switching (closing), an additional circuit is used in the converter with a branch from the smoothing choke of the DC link filter. The principle of operation of a step-up *DC-DC* converter illustrated by diagrams of control signals of its power switches is considered. The results of the simulation of switching processes and experimental studies of them on a real step-up *DC-DC* converter, which are presented in the paper, confirmed the efficiency and effectiveness of the proposed version of its power circuit while ensuring all the required operating modes.

Keywords: *DC-DC* converter, high-frequency transformer, rectifier, overvoltage, control system, experimental studies, mathematical modeling.

REFERENCES

1. Meleshin V.I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika* [Transistor converter technology]. Moscow: Technosphere, 2005. 632 p. (In Russian)
2. Passport "Module based on BVD 5M6BVD" "Electrum AV".
3. Severns R., Bloom G. *Impulsnye preobrazovateli postoyan-nogo napryazheniya dlya system vtorichnogo elektropitaniya* [Pulse DC-voltage converters for secondary power systems]. Translated from English by L.E. Smolnikov. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 294 p., Illustrated. (In Russian)
4. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MatLab, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of electrical devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMK Press, St. Petersburg: Peter, 2008. 288 p. (In Russian)

Володин Е.В., Осипов О.И. Экспериментальное исследование повышающего DC-DC преобразователя // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 3(44). С. 47-52. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-47-52](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-47-52)

Volodin E.V., Osipov O.I. Experimental Research of Step-up DC-DC Converter. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 3(44), pp. 47-52. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-47-52](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-47-52)