

УДК 621.316.727

DOI 10.46960/2658-6754_2022_1_27

ВЕНТИЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С ВЫСОКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ МОЩНОСТИ

Ю.Г. Пономарев

Вятский государственный университет
Киров, Россия
e-mail: yunkt@mail.ru

Н.И. Присмотров

Вятский государственный университет
Киров, Россия
ORCID: 0000-0002-6726-4209 e-mail: prismotrov@vyatsu.ru

И.А. Шураков

Вятский государственный университет
Киров, Россия
e-mail: usr10365@vyatsu.ru

Рассмотрен энергоэффективный вентильный электропривод с коэффициентом мощности близким к единице. Коррекция коэффициента мощности обеспечивается активным корректором на основе преобразователя Кука в составе звена постоянного тока электропривода. Предлагаемая структура электропривода может использоваться для бесщеточных машин как постоянного, так и переменного тока. Показана возможность коррекции коэффициента мощности при единственном контуре регулирования преобразователя Кука, работающего в режиме прерывистого напряжения на разделительном конденсаторе. Примененный режим работы преобразователя обеспечивает условия мягкой коммутации силового ключа при нулевом напряжении, что значительно снижает коммутационные потери.

Ключевые слова: вентильный электропривод, корректор коэффициента мощности, преобразователь Кука, электромагнитная совместимость, энергетическая эффективность.

Для цитирования: Пономарев, Ю.Г. Вентильный электропривод с высоким коэффициентом мощности / Ю.Г. Пономарев, Н.И. Присмотров, И.А. Шураков // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 1. С. 27-41.

DOI: 10.46960/2658-6754_2022_1_27

BLDC AND PMBLAC MOTOR DRIVES WITH HIGH POWER FACTOR

Yu.G. Ponomarev

Vyatka State University
Kirov, Russia
e-mail: yunkt@mail.ru

N.I. Prismotrov

Vyatka State University
Kirov, Russia
ORCID: 0000-0002-6726-4209 e-mail: prismotrov@vyatsu.ru

I.A. Shurakov

Vyatka State University
Kirov, Russia
e-mail: usr10365@vyatsu.ru

Abstract. The article considers an energy-efficient brushless DC electric motor (BLDC) and permanent magnet brushless AC (PMBLAC) electric drive with a unit power factor. Correction of the power factor is provided by an active corrector based on the Cuk converter as part of the direct current link of the electric drive. The proposed structure of the electric drive can be used for brushless machines of both direct and alternating current. The possibility of correcting the power factor with a single loop control of the Cuk converter operating in the intermittent voltage mode on the separation capacitor is shown. The applied mode of operation of the converter provides conditions for soft switching of the power switch at zero voltage, which significantly reduces switching losses.

Keywords: BLDC motor, PMBLAC motor, power factor corrector, Cuk converter, electromagnetic compatibility, energy efficiency.

For citation: Yu.G. Ponomarev, N.I. Prismotrov and I.A. Shurakov, “BLDC and PMBLAC motor drives with high power factor”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 27-41, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_1_27

I. Введение

В последнее время вентильные двигатели завоевывают все большую популярность по сравнению с другими типами двигателей, особенно в электроприводах малой и средней мощности. Это происходит благодаря таким их преимуществам, как высокий коэффициент полезного действия, компактный размер, отсутствие вибраций, минимальный акустический шум, высокая надежность и низкие требования к техническому обслуживанию. Они позволяют организовать относительно простое управление скоростью

и моментом на валу двигателя. Указанные преимуществам вентильных двигателей определили их широкое распространение в бытовых приборах: холодильниках, кондиционерах, вентиляционных вентиляторах, стиральных машинах, сушилках и др. Кроме того, они идеально подходят для медицинского оборудования, приводов роботов и электрического инструмента.

Разработанные в последние десятилетия технологии в области силовых полупроводников, микропроцессоров, схем управления регулированием скорости и производства вентильных двигателей с постоянными магнитами явились мощным толчком для развития вентильного электропривода. В общепринятом смысле вентильный электропривод представляет собой электромехатронную систему (рис. 1), в которой объединены синхронный двигатель, как правило, с возбуждением от постоянных магнитов, электронный коммутатор (ЭК), питающий обмотки якоря и система автоматического управления коммутатором, формирующая управляющие сигналы на основании показаний датчиков, чаще всего это датчик положения ротора (ДПР). При питании электропривода от сети переменного тока в его состав включают выпрямитель (В) и конденсатор в звене постоянного тока (ЗПТ), для формирования постоянного напряжения, питающего ЭК.

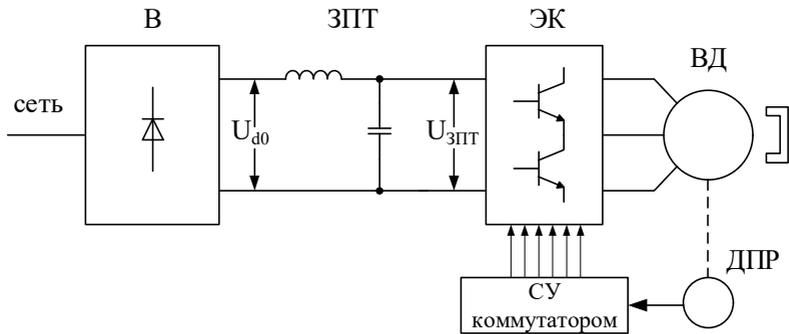


Рис. 1. Функциональная схема вентильного электропривода

Fig. 1. Functional diagram of the BLDC and PMBLAC electric drives

В зависимости от конструктивных особенностей, вентильные двигатели делятся на два основных вида: бесщеточные двигатели постоянного тока (*brushless DC motor (BLDC)*) и бесщеточные двигатели переменного тока (*permanent-magnet brushless AC motor (PMBLAC)*).

Бесщеточный двигатель постоянного тока (БДПТ) представляет собой обращенную машину постоянного тока, в которой роль щеточно-коллекторного узла выполняет электронный коммутатор совместно с ДПР. В

отличии от БДПТ, питание бесщеточного двигателя переменного тока осуществляется от инвертора, формирующего трехфазную систему напряжения (тока) с помощью синусоидальной или векторной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). При этом силовые части электронного коммутатора и инвертора, как правило аналогичны и построены по трехфазной мостовой схеме.

Наличие выпрямителя на входе силового энергетического канала вентильного электропривода и конденсатора большой емкости в ЗПТ приводит к нелинейности входного сопротивления электротехнической системы. Данное обстоятельство определяет непропорциональность входного тока напряжению питающей сети и тем самым является причиной появления высших гармонических составляющих в сетевом токе, вызывающих кондуктивные и электромагнитные помехи.

Указанные обстоятельства могут привести к следующим негативным последствиям [1]:

- перегрев и разрушение нулевых рабочих проводников кабельных линий;
- дополнительные потери в силовых трансформаторах;
- ложное срабатывание защитных устройств;
- ускоренное старение изоляции проводов и кабелей;
- ухудшение качества (несинусоидальность) питающего напряжения;
- сбои в работе и физический выход из строя цифрового оборудования;
- резонансные явления в электроустановках;
- снижение коэффициента мощности электроустановок.

Конфигурация вентильного электропривода (рис. 1) приводит к очень низкому коэффициенту мощности порядка 0,72 и высокому суммарному коэффициенту гармонических искажений (*THD*) тока питающей сети переменного тока. Такие показатели качества электроэнергии неприемлемы в рамках как отечественных (ГОСТ 30804.3.2-2013) [2], так и международных стандартов качества электроэнергии (МЭК 61000-3-2) [3].

Таким образом, проблема высших гармоник напряжений и токов в распределительных сетях электроснабжения является крайне актуальной и требует пристального внимания со стороны научно-исследовательских структур, занимающихся разработкой электротехнических установок.

Наиболее эффективным подходом в решении задачи по снижению доли высших гармонических составляющих тока и увеличению коэффициента мощности, является применение активного корректора коэффициента мощности (АККМ) (рис. 2).

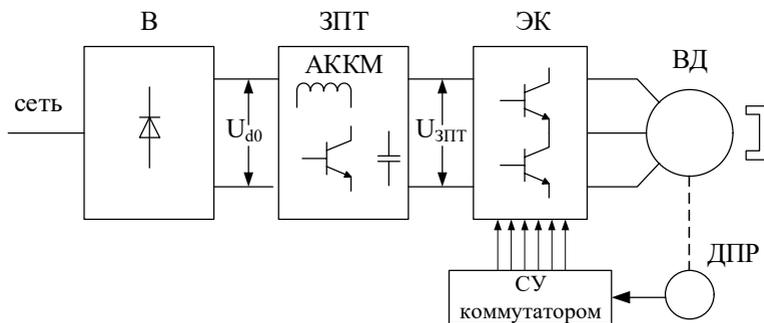


Рис. 2. Функциональная схема вентильного электропривода с АККМ

Fig. 2. Functional diagram of the BLDC and PMSBLAC electric drives with PFC

II. Активный корректор коэффициента мощности

Классический подход в построении АККМ заключается в применении импульсного повышающего преобразователя постоянного напряжения. Данный преобразователь характеризуется непрерывной передачей энергии по входу и прерывистой отдачей энергии в нагрузку, что сказывается на массогабаритных параметрах выходного фильтра [4]. Работа повышающего преобразователя в режиме непрерывного тока позволяет достичь высокого качества входного тока, что определило его использование в качестве АККМ (рис. 3).

Для реализации функции АККМ в повышающем преобразователе напряжения организуется две цепи обратной связи. Первый контур позволяет осуществить регулирование выходного напряжения с помощью сигналов задания и обратной связи. Вторая, дополнительная цепь обратной связи, обеспечивает формирование синусоидального по форме и синфазного с напряжением входного тока. Для формирования требуемого тока сигнал задания по току получают путем умножения сигнала с регулятора напряжения (РН) на сигнал модуля единичной синусоиды, полученный из входного напряжения. Исходя из реализации регулятора тока (РТ), различают следующие способы управления: управление по среднему току, управление по пиковому значению тока, гистерезисное управление и граничное управление током.

Несмотря на возможность обеспечения высокого качества потребления электроэнергии с помощью АККМ на базе повышающего преобразователя в составе вентильного электропривода, имеется ряд факторов, негативно сказывающихся на качестве преобразования энергии в рассматриваем-

мой структуре. Снижение КПД в электроприводе с бесконтактным двигателем постоянного тока связано с необходимостью двойного регулирования напряжения, как в импульсном регуляторе постоянного напряжения, так и в электронном коммутаторе. В случае с электроприводом с бесконтактным двигателем переменного тока так же возникает необходимость регулирования амплитуды выходного напряжения инвертора с помощью изменения коэффициента модуляции, что приводит к заметному искажению формы выходного напряжения, сказывающегося на КПД двигателя.

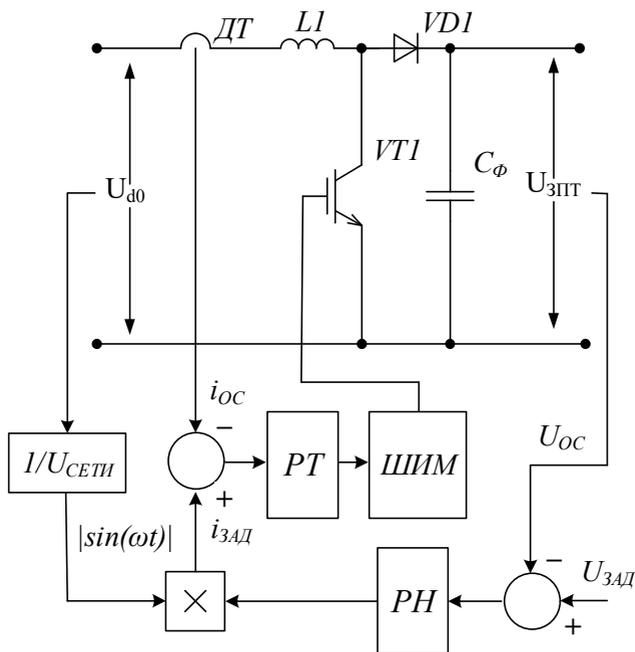


Рис. 3. Схема импульсного повышающего преобразователя напряжения с функцией корректора коэффициента мощности

Fig. 3. Circuit diagram of boost converter with power factor corrector

Для снижения потери энергии в вентильном электроприводе кажется логичным применение в качестве АККМ понижающего преобразователя напряжения (рис. 4), который может обеспечить возможность регулирования напряжения только в звене постоянного тока практически от нулевого значения.

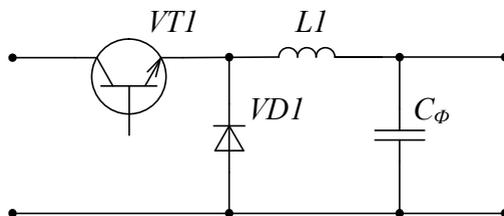


Рис. 4. Схема импульсного понижающего преобразователя напряжения

Fig. 4. Circuit diagram of buck converter

Понижающий преобразователь формирует на выходе напряжение меньше по значению входного напряжения [5]. Он отличается прерывистым характером входного тока, поэтому может работать только в режиме прерывистого тока, что диктует повышенные требования к входному фильтру, и непрерывным током нагрузки, т. е. снижаются требования к выходному фильтру [6, 7]. Кроме того, данное схемное решение практически не используется при низковольтном питании, так как в моменты времени, когда входное напряжение ниже выходного отсутствует входной ток (рис. 5). Эти особенности и определяют применение данных преобразователей на относительно малых мощностях.

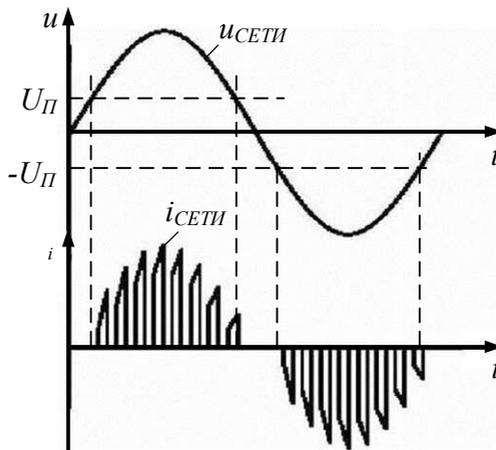


Рис. 5. Сетевые напряжение и ток при нагрузке мостового выпрямителя на импульсный понижающий преобразователь напряжения

Fig. 5. The input voltage and current applied to the diode bridge rectifier with load of the buck converter

III. Преобразователь Кука

В качестве альтернативы импульсному понижающему преобразователю напряжения может быть рассмотрен импульсный повышающе-понижающий преобразователь напряжения (преобразователь Кука), который по сути является результатом последовательного соединения повышающего и понижающего преобразователей (рис. 6). Он способен формировать на выходе значение напряжения как ниже, так и выше входного, при этом обеспечивает непрерывность передачи энергии по входу и по выходу [8, 9].

Наличие повышающего каскада на входе преобразователя позволяет использовать его в качестве АККМ с таким же успехом, как используется повышающий преобразователь. При этом возможно применение всех схемотехнических наработок, полученных при исследованиях АККМ на базе повышающего преобразователя.

Преобразователь может работать в режимах непрерывного тока дросселя и напряжения на конденсаторе (РНТН), прерывистого напряжения на разделительном конденсаторе (РПНК) или прерывистого тока дросселя (РПТД). В РНТН токи дросселей ($L1$, $L2$) и напряжение на конденсаторе $C1$ непрерывны во всем периоде коммутации. В РПНК напряжение на разделительном конденсаторе $C1$ падает до нуля на такте открытого состояния транзистора $VT1$, а токи дросселей непрерывны. В РПТД ток, протекающий через дроссель $L1$ или $L2$, носит прерывистый характер на такте закрытого состояния транзистора $VT1$ [10, 11].

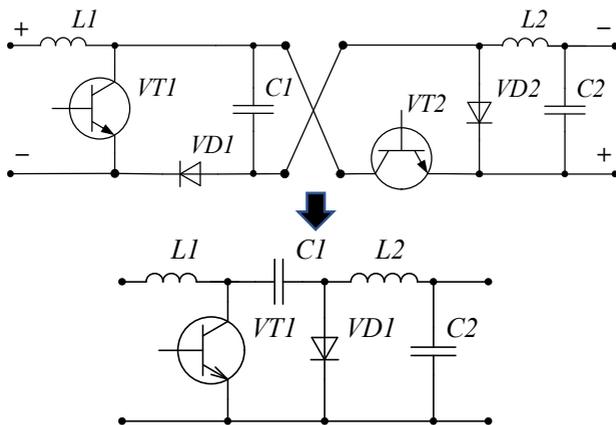


Рис. 6. Схема импульсного повышающе-понижающего преобразователя напряжения (преобразователь Кука)

Fig. 6. Circuit diagram of boost-buck converter (Cuk converter)

При работе преобразователя Кука в режиме РПНК (рис. 7, а) возможно формирование синусоидальной формы тока с использованием единственного контура обратной связи по выходному напряжению. Такое автоматическое формирование синусоидального сетевого тока синфазного с сетевым напряжением определяется синусоидальной формой сигнала $u_{C1}(t)_{CP}$ (рис. 7, б) синфазного с сетевым напряжением, являющегося по сути выходным напряжением повышающего каскада преобразователя Кука.

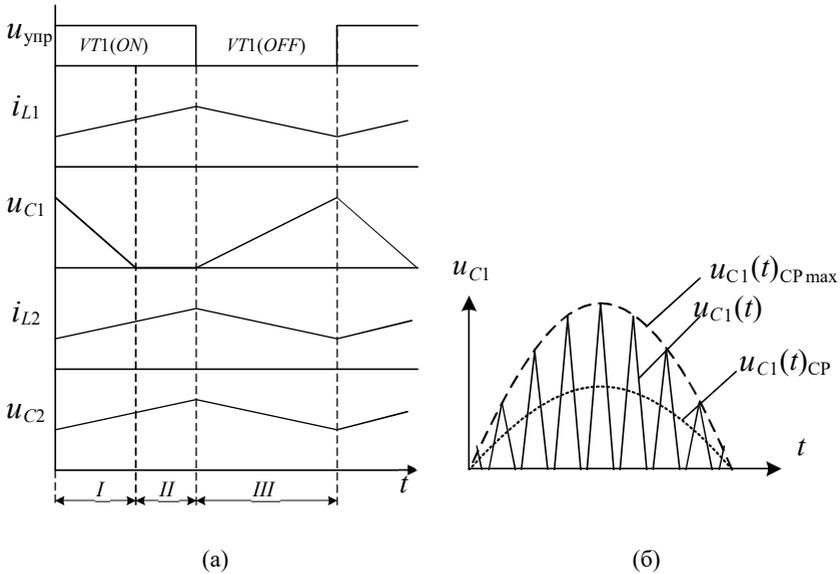


Рис. 7. Работа преобразователя Кука в режиме РПНК

Fig. 7. Operation of Cuk converter in discontinuous capacitor voltage mode

Так как $u_{C1}(t)_{CP}$ пропорционален напряжению на выходе выпрямителя, можно говорить о том, что входное напряжение преобразователя Кука эквивалентно линейному активному сопротивлению. Это свойство преобразователя Кука, проявляющееся при работе в режиме РПНК, обеспечивает высокое качество потребления электроэнергии и соответственно величину коэффициента мощности близкую единице.

В перечне преимуществ применения импульсного преобразователя Кука в составе ЗПТ вентильного электропривода для решения задач по увеличению коэффициента мощности и регулирования напряжения можно отметить следующее [12-14]:

- простота реализации управления преобразователем в функции

АККМ с использованием ШИМ регулирования в функции выходного напряжения;

- малые пульсации входного тока благодаря присутствию $L1$, подобно импульсному повышающему преобразователю;
- требуется только один силовой ключ, таким образом, исключаются проблемы коммутации, которые возникают в мостовых и полумостовых преобразователях;
- естественная защита силового ключа от короткого замыкания, связанная с присутствием емкостной развязки $C1$;
- возможность реализации дросселей $L1$ и $L2$ на одном сердечнике, что приводит к улучшению массогабаритных показателей;
- низкая стоимость при хороших массогабаритных показателях.

IV. Моделирование преобразователя Кука

Для расчета параметров дросселей и разделительного конденсатора в различных режимах работы преобразователя Кука можно использовать выражения, определяющие значения параметров для граничных условий [15]. Данные значения будут определять условия перехода между режимами непрерывного и прерывного тока и напряжения на элементах.

Входное напряжение преобразователя, запитанного от однофазного мостового выпрямителя, будет равно среднему значению выпрямленного напряжения:

$$U_{d0} = \frac{2U_{\text{сети}}\sqrt{2}}{\pi}, \quad (1)$$

где $U_{\text{сети}}$ – действующее значение сетевого напряжения.

Выходное напряжение преобразователя Кука запишется:

$$U_{\text{ЗПТ}} = \frac{D}{(1-D)} U_{d0}, \quad (2)$$

где D – коэффициент заполнения импульсов, равный отношению длительности импульса к периоду их следования.

Граничное значение индуктивности дросселя $L1$ может быть найдено из выражения:

$$L1 = \frac{1}{2f_{\text{к}}} \left(\frac{U_{d0 \text{ min}}^2}{P_{\text{min}}} \right) \left(\frac{U_{\text{ЗПТ min}}}{U_{d0 \text{ min}} + U_{\text{ЗПТ min}}} \right), \quad (3)$$

где $U_{d0\min}$ – минимальное значение входного напряжения, определяемое возможными колебаниями напряжения сети; $U_{3ПТ\min}$ – минимальное значение напряжения на выходе звена постоянного тока, определяемое необходимым диапазоном регулирования скорости; P_{\min} – минимальная передаваемая мощность; f_K – частота коммутации силового ключа VTI .

Выражение для определения граничного значения индуктивности дросселя $L2$ запишется:

$$L2 = \frac{U_{3ПТ\max}}{2U_{d0\min}f_K} \left(\frac{U_{d0\min}^2}{P_{\max}} \right) \left(\frac{U_{3ПТ\max}}{U_{d0\min} + U_{3ПТ\max}} \right), \quad (4)$$

где $U_{d0\max}$ – максимальное значение входного напряжения; $U_{3ПТ\max}$ – максимальное значение напряжения на выходе звена постоянного тока; P_{\max} – максимальная передаваемая мощность.

Граничное значение емкости разделительного конденсатора $C1$

$$C1 = \frac{P_{\min}}{2f_K (U_{d0\max} + U_{3ПТ\min})^2}. \quad (5)$$

Расчет величины емкости фильтрующего конденсатора $C2$ производится по выражению:

$$C2 = \frac{P_{\min}}{4\pi f \delta U_{3ПТ\min}^2}, \quad (6)$$

где f – частота питающей сети; δ – коэффициент пульсаций выходного напряжения.

Результаты моделирования вентильного электропривода, реализованного по структуре (рис. 2), где функцию АККМ и регулятора напряжения выполняет преобразователь Кука, отражены на рис. 8.

Полученные осциллограммы тока дросселя $L1$ и напряжения на разделительном конденсаторе $C1$ показывают корректность расчета параметров элементов и верность теоретических выводов. Форма сигнала сетевого тока близка к синусоидальной и фазовый сдвиг сетевых напряжения и тока практически равен нулю.

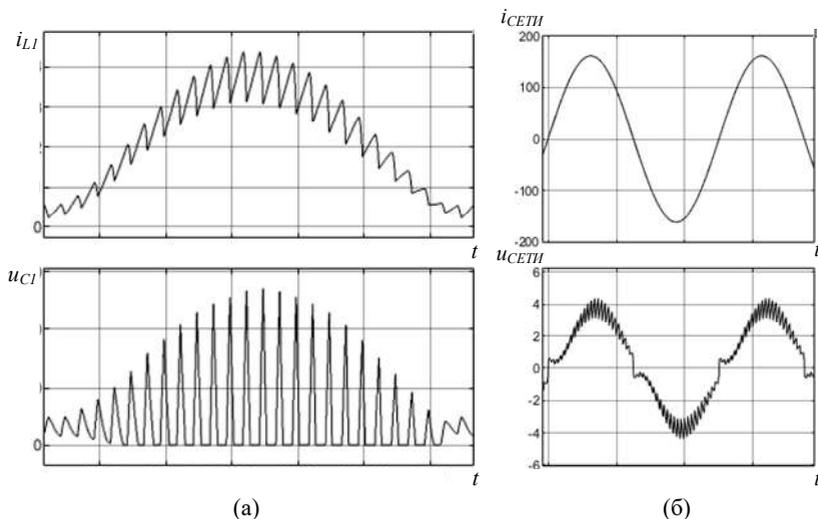


Рис. 8. Результаты моделирования:
 ток входного дросселя $L1$ и напряжение на разделительном конденсаторе $C1$ преобразователя Кука при работе в режиме РПНК (а);
 сетевые напряжение и ток при питании вентиляционного электропривода с АККМ на базе преобразователя Кука (б)

Fig. 8. Modelling results:
 input inductor $L1$ current and voltage of intermediate capacitance $C1$ of Cuk converter in discontinuous capacitor voltage mode (a);
 voltage and current supplied to the electric drive of a DC motor including a PFC based on a Cuk converter (b)

V. Заключение

АККМ на базе преобразователя Кука, по сравнению с другими однотактными преобразователями напряжения в составе вентиляционного электропривода, обеспечивает лучшую эффективность передачи и преобразования энергии. Он способен обеспечить коэффициент мощности близкий единичному значению при единственном контуре регулирования выходного напряжения. Предлагаемый режим работы преобразователя Кука позволяет осуществлять мягкую коммутацию силового транзистора при нулевом напряжении, что значительно снижает коммутационные потери.

Поступила в редакцию 01.03.22

Received 01.03.22

Библиографический список

- [1] Григорьев О.А., Петухов В.В., Соколов В.А., Красилов И.К. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ // Новости электротехники. 2003. № 1 (19). С. 18-19.
- [2] ГОСТ 308043.2-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. Введ. 2014-01-01. М.: Стандартиформ, 2014. – 25 с.
- [3] ГОСТ ИЕС 61000-3-2-2017. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 3-2. Нормы. Нормы эмиссии гармонических составляющих тока (оборудование с входным током не более 16 А в одной фазе). Введ. 2018-12-01. М.: Стандартиформ, 2020. – 25 с.
- [4] Nazir M. Design of a single phase unity power factor switch mode power supply (SMPS) with active power factor correction: MSc thesis, Universiti Sains Malaysia, Malaysia, 2008.
- [5] Kayisli K., Tuncer S., Poyraz M. An educational tool for fundamental DC–DC converter circuits and active power factor correction applications // Computer Applications in Engineering Education. 2013. Vol. 21. №. 1. Pp. 113-134. DOI: 10.1002/cae.20455
- [6] Fu M., Chen Q. A DSP based controller for power factor correction (PFC) in a rectifier circuit // proc. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 4-8, 2001, Anaheim, CA, USA. IEEE, 2001. Vol. 1. Pp. 144-149. DOI: 10.1109/APEC.2001.911640
- [7] Keogh B. Power factor correction using the buck topology – Efficiency benefits and practical design considerations. Texas Instruments. Tech. Rep. SLUP264, 2010.
- [8] Cuk S., Middlebrook R.D. A new optimum topology switching DC-to-DC converter // proc. 1977 IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 14-16, 1977, Palo Alto, CA, USA. IEEE, 1977. Pp. 160-179. DOI: 10.1109/PESC.1977.7070814
- [9] Dahono A., Dahono P.A. A comparative evaluation of bidirectional step-up DC-DC converters // International Journal on Electrical Engineering and Informatics. 2020. Vol. 12. №. 2. Pp. 388-397. DOI: 10.15676/ijeii.2020.12.2.14
- [10] Tse C.K., Chow M.H.L. A theoretical examination of the circuit requirements of power factor correction // proc. PESC 98 Record. 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, May 22, 1998, Fukuoka, Japan. IEEE, 1998. Vol. 2. Pp. 1415-1421. DOI: 10.1109/PESC.1998.703229
- [11] Пономарев Ю.Г., Присмотров Н.И., Охупкин С.И. Преобразователь Кука в составе специализированного преобразователя частоты электропривода ручного инструмента на базе асинхронного двигателя // Труды X Межд. конф. по автоматизированному электроприводу АЭП 2018, Октябрь 03–06, 2018, Новочеркасск, Россия. Новочеркасск: ООО «Лик», 2018. – С. 28-33.
- [12] Поликарпов А. Г., Сергиенко Е. Ф. Однотактные преобразователи напряжения в устройствах электропитания РЭА. М.: Радио и связь, 1989. – 160 с.

- [13] Erickson R.W. DC–DC power converters // Wiley encyclopedia of electrical and electronics engineering, Webster J.G. Wiley, 2007. DOI: 10.1002/047134608X.W5808.pub2
- [14] Middlebrook R.D., Čuk S. A general unified approach to modelling switching-converter power stages // International Journal of Electronics. 1977. Vol. 42. №. 6. Pp. 521-550. DOI: 10.1080/00207217708900678
- [15] Пономарев Ю. Г., Присмотров Н. И., Охупкин С. И. Преобразователь частоты для питания ручного инструмента с высоким коэффициентом мощности // Интеллектуальная электротехника. 2018. №. 2. С. 105-115. DOI: 10.46960/2658-6754_2018_2_105

References

- [1] O.A. Grigoriev, V.V. Petukhov, V.A. Sokolov and Krasilov I.K., “Vysshie garmoniki v setyah elektrosnabzheniya 0,4 kV [Higher harmonics in power supply networks 0.4 kV]”, *The News of Electrical Engineering*, no. 1, pp. 18-19, 2003 (in Russian).
- [2] Electromagnetic compatibility of technical equipment. Harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase). Limits and test methods, GOST 30804.3.2-2013 (IEC 61000-3-2:2009), Jan. 2014.
- [3] Electromagnetic compatibility (EMC). Part 3-2. Limits. Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase), GOST IEC 61000-3-2-2017, Jan. 2018.
- [4] M.N. Abdullah, “*Design of a single phase unity power factor switch mode power supply (SMPS) with active power factor correction*”, MSc thesis, Universiti Sains Malaysia, Malaysia, 2008.
- [5] K. Kayisli, S. Tuncer and M. Poyraz “An educational tool for fundamental DC–DC converter circuits and active power factor correction applications”, *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 21, no. 1, pp. 113-134. March 2013. DOI: 10.1002/cae.20455
- [6] M. Fu and Q. Chen, “A DSP based controller for power factor correction (PFC) in a rectifier circuit”, in proc. *APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, March 4-8, 2001, Anaheim, CA, USA, vol. 1, pp. 144-149. DOI: 10.1109/APEC.2001.911640
- [7] B. Keogh, “*Power factor correction using the buck topology—Efficiency benefits and practical design considerations*”, Texas Instruments, Tech. Rep. SLUP264, 2010.
- [8] S. Čuk and R.D. Middlebrook, “A new optimum topology switching DC-to-DC converter”, in proc. *1977 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, June 14-16, 1977, Palo Alto, CA, USA, pp. 160-179. DOI: 10.1109/PESC.1977.7070814
- [9] A. Dahono and P.A. Dahono, “A comparative evaluation of bidirectional step-up DC-DC converters”, *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, vol. 12, no. 2, pp. 388-397, June 2020. DOI: 10.15676/ijeie.2020.12.2.14
- [10] C.K. Tse and M.H.L. Chow, “A theoretical examination of the circuit requirements of power factor correction”, in proc. *PESC 98 Record. 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, May 22, 1998, Fukuoka, Japan, vol. 2, pp. 1415-1421. DOI: 10.1109/PESC.1998.703229

- [11] Yu.G. Ponomarev, N.I. Prismotrov and S.I. Okhapkin, “Preobrazovatel' Kuka v sostave specializirovannogo preobrazovatelya chastoty elektroprivoda ruchnogo instrumenta na baze asinhronnogo dvigatelya [Cook's converter as part of a specialized frequency converter for the electric drive of a hand tool based on an asynchronous motor]”, in proc. *X Int. conf. po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP 2018 [automated electric drive AEP 2018]*, Oct. 03–06, 2018, Novocherkassk, Russia, pp. 28–33 (in Russian).
- [12] A.G. Polikarpov and E.F. Sergienko, *Odnotaktnye preobrazovateli napryazheniya v ustrojstvakh elektropitaniya REA [Single-cycle voltage converters in electronic equipment power supply devices]*. Moscow: Radio i svyaz' [Radio and communications], 1989 (in Russian).
- [13] R.W. Erickson DC–DC power converters, in *Wiley encyclopedia of electrical and electronics engineering*, J.G. Webster. Wiley, 2007. DOI: 10.1002/047134608X.W5808.pub2
- [14] R.D. Middlebrook and S. Čuk, “A general unified approach to modelling switching-converter power stages”, *International Journal of Electronics*, vol. 42, no. 6, pp. 521–550, 1977. DOI: 10.1080/00207217708900678
- [15] Yu.G. Ponomarev, N.I. Prismotrov and S.I. Ohapkin, “Converter for power supply of electric hand power tools with high power factor”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 105–115, 2018. DOI: 10.46960/2658-6754_2018_2_105

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юрий Геннадьевич Пономарев, кандидат технических наук, ведущий инженер Вятского государственного университета, г. Киров, Российская Федерация

Yuriy G. Ponomarev, Cand. Sci. (Eng.), lead engineer of the Vyatka State University, Kirov, Russian Federation

Николай Иванович Присмотров, доктор технических наук, профессор Вятского государственного университета, г. Киров, Российская Федерация

Nikolay I. Prismotrov, D. Sci. (Eng.), professor of the Vyatka State University, Kirov, Russian Federation

Иван Александрович Шураков, младший научный сотрудник Вятского государственного университета, г. Киров, Российская Федерация

Ivan A. Shurakov, junior researcher of the Vyatka State University, Kirov, Russian Federation