

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

DOI: 10.24412/2077-8481-2025-1-43-51

УДК 62-83:621

А. С. КОВАЛЬ, канд. техн. наук, доц.

А. Ю. САДОВСКИЙ

Д. С. ЛУКАШОВ

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ DC/DC ДЛЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА КАК ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация

Для силовой схемы понижающего (buck) и повышающего (boost) преобразователей DC/DC предложены структурная схема и на её основе модели систем автоматического управления в среде MATLAB формирования выходного напряжения рассматриваемых преобразователей. Представлены результаты моделирования работы преобразователей DC/DC по разработанным моделям.

Ключевые слова:

преобразователь (buck-boost) DC/DC, емкостной накопитель, частотно-регулируемый электропривод, регуляторы напряжения и тока.

Для цитирования:

Коваль, А. С. Преобразователь DC/DC для частотно-регулируемого электропривода как элемент системы автоматического управления / А. С. Коваль, А. Ю. Садовский, Д. С. Лукашов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 1 (86). – С. 43–51.

Введение

Частотно-регулируемые электроприводы переменного тока применяются сегодня в различных технических и технологических приложениях. Их эффективность применения обусловлена надежностью электродвигателей переменного тока и высокими статическими и динамическими характеристиками реализуемых электроприводов. Энергоэффективность частотно-регулируемых электроприводов для ряда механизмов дополнительно может быть увеличена использованием рекуператоров энергии в сеть или накопителей энергии в режимах, в которых возможны рекуперативные режимы работы электродвигателей,

и где в настоящее время массово используется балластный резистор для рассеивания энергии торможения [1]. Использованию накопителей энергии (емкостных на суперконденсаторах или аккумуляторных батарей) сегодня уделяется большое внимание. В этом случае в зависимости от режима работы экономия электроэнергии, потребляемой из сети, может достигать 50 % [2].

Эффективным вариантом использования накопителей энергии является их подключение в двухзвенных преобразователях частоты с инвертором напряжения к звену постоянного тока через преобразователь DC/DC, который содержит систему автоматического управления для управления силовыми тран-

зисторами силовой схемы. Представляет интерес математическое описание силовой схемы преобразователя, как звена системы автоматического управления, и разработка математической модели и структурной схемы его системы автоматического управления, которые в дальнейшем могли бы быть использованы для синтеза и отладки систем автоматического управления импульсных преобразователей.

Основная часть

В настоящее время схемотехника силовых схем преобразователей DC/DC достаточно разнообразна и по сложно-

сти, и по возможностям. Для поставленных целей в качестве силовой схемы DC/DC выбран один из наиболее простых, но востребованных вариантов понижающих (buck) импульсных преобразователей на основе двух силовых транзисторов (рис. 1) [3].

На рис. 1 приняты следующие обозначения: R_L , L – активное сопротивление и индуктивность дросселя; C_2 – емкость выходного конденсатора; C_1 – емкость фильтра звена постоянного тока.

На базе этой схемы возможен и вариант повышающего (boost) преобразователя (рис. 2).

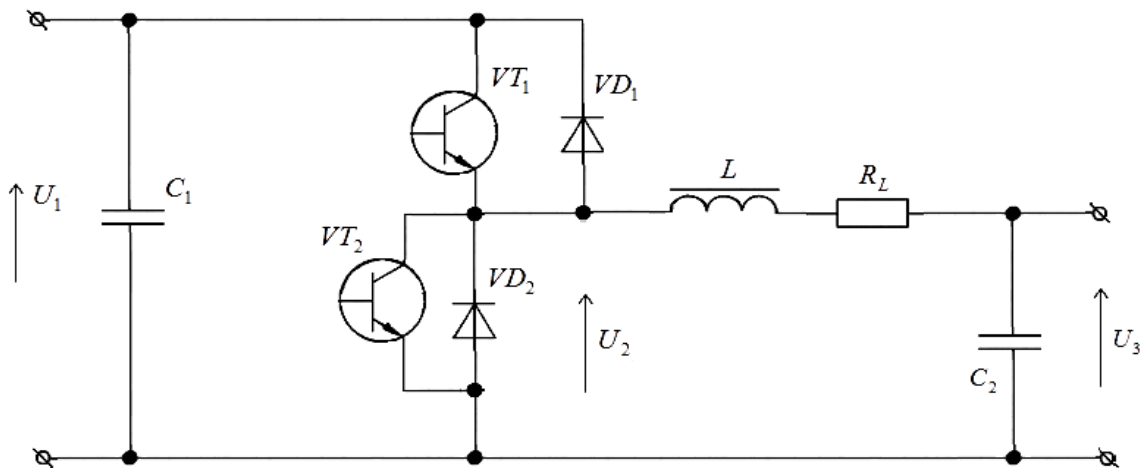


Рис. 1. Импульсный понижающий преобразователь напряжения

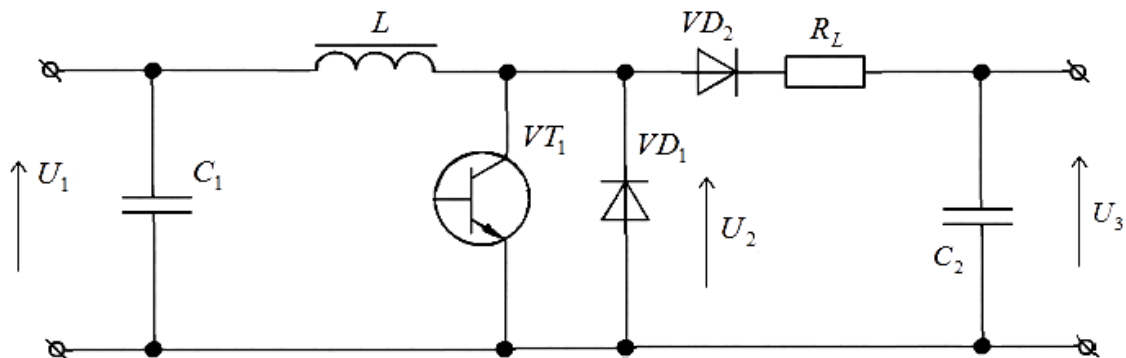


Рис. 2. Импульсный повышающий преобразователь напряжения

Работа схемы в этих режимах, расчет и выбор всех элементов преобразователя приведены в [4].

При разработке математической модели рассматриваемых преобразователей приняты основные допущения:

1) преобразователь работает в режиме непрерывного тока;

2) не учитывается мертвое время и падение напряжения на силовых ключах и диодах;

3) не учитывается сопротивление конденсатора.

Уравнения электрического равновесия для силовой схемы понижающего преобразователя (см. рис. 1) имеют вид

$$U_2 - U_3 = i_L \cdot R_L + L \frac{di_L}{dt};$$

$$U_3 = \frac{1}{C_2} \cdot \int i_L \cdot dt. \quad (1)$$

Из (1) с использованием преобразования по Лапласу можно получить следующие уравнения:

$$U_2(p) - U_3(p) = i_L(p) \cdot (R_L + Ls);$$

$$U_3(p) = i_L(p) \cdot \frac{1}{C_2 \cdot p}. \quad (2)$$

С учетом (2) структурная схема регулирования напряжения на выходе преобразователя имеет вид, представленный на рис. 3.

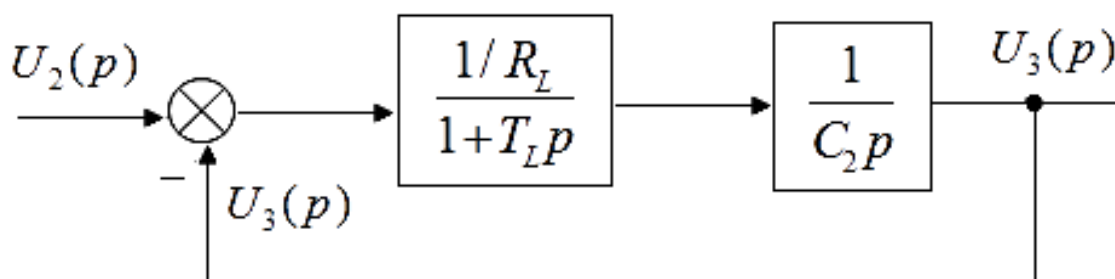


Рис. 3. Структурная схема импульсного понижающего преобразователя напряжения

Передаточная функция преобразователя $W(p) = \frac{U_3(p)}{U_2(p)}$ имеет вид

$$\begin{aligned} W(p) &= \frac{\left(\frac{1}{R_L + Lp} \right) \cdot \left(\frac{1}{C_2 p} \right)}{1 + \left(\frac{1}{R_L + Lp} \right) \cdot \left(\frac{1}{C_2 p} \right)} = \\ &= \frac{1}{LC_2 p^2 + R_L \cdot C_2 p + 1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Это передаточная функция колебательного звена. После несложных

преобразований $W(p)$ можно преобразовать к виду

$$W(p) = \frac{U_4(p)}{U_2(p)} = \frac{1}{T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1}, \quad (4)$$

$$\text{где } T_1 = \sqrt{L \cdot C_2}; \quad \xi_1 = \frac{R_L}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_2}{L}}.$$

Уравнения электрического равновесия для силовой схемы повышающего преобразователя при отдаче накопленной энергии дросселем на нагрузку (см. рис. 2) имеют вид

$$U_2(t) = U_3(t);$$

$$U_3(t) = \frac{1}{C_2} \cdot \int i_L(t) \cdot dt;$$

$$U_2(t) = \frac{U_1(t) - i_L(t) \cdot R_L - L \frac{di_L(t)}{dt}}{1 - \gamma}, \quad (5)$$

где γ – скважность импульсов управления транзисторами преобразователя.

Из (5) с использованием преобразования по Лапласу можно получить следующие уравнения:

$$U_2(p) = U_3(p);$$

$$U_3(p) = i_L(p) \cdot \frac{1}{C_2 \cdot p};$$

$$U_2(p) = \frac{U_1(p) - i_L(p) \cdot R_L - L \cdot i_L(p) \cdot p}{1 - \gamma}. \quad (6)$$

С учетом (6) структурная схема регулирования напряжения на выходе преобразователя имеет вид, представленный на рис. 4.

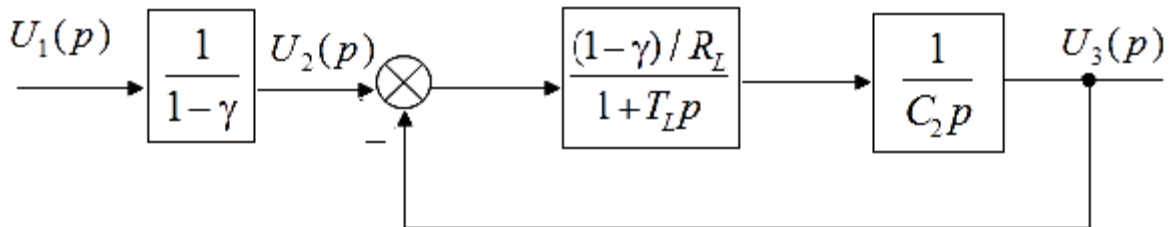


Рис. 4. Структурная схема импульсного повышающего преобразователя напряжения

Передаточная функция преобразователя $W(p) = \frac{U_3(p)}{U_1(p)}$ для этой схемы имеет вид передаточной функции колебательного звена

$$\begin{aligned} W(p) &= \frac{\left(\frac{k}{1 + T_L p} \right) \cdot \left(\frac{1}{C_2 p} \right)}{1 + \left(\frac{k}{1 + T_L p} \right) \cdot \left(\frac{1}{C_2 p} \right) \cdot (1 - \gamma)} = \\ &= \frac{k}{T_L \cdot C_2 p^2 + C_2 p + k \cdot (1 - \gamma)} = \\ &= \frac{1}{1 - \gamma} \cdot \frac{1}{\frac{T_L \cdot C_2 \cdot p^2}{k \cdot (1 - \gamma)} + \frac{C_2 p}{k \cdot (1 - \gamma)} + 1}, \end{aligned}$$

$$\text{где } k = \frac{1 - \gamma}{R_L}.$$

После преобразований передаточная функция силовой части повышающего преобразователя имеет вид

$$W(p) = \frac{U_3(p)}{U_1(p)} = \frac{1}{T_0^2 p^2 + 2\xi_0 T_0 p + 1},$$

$$\text{где } T_0 = \frac{\sqrt{LC_2}}{1 - \gamma}; \quad \xi_0 = \frac{\sqrt{\frac{C_2}{L}}}{1 - \gamma} \cdot \left(\frac{R_L}{2} \right).$$

Переходные процессы при формировании выходного напряжения рассматриваемых импульсных преобразователей определяются коэффициентом демпфирования ξ_0 и в зависимости от параметров могут иметь различный ха-

ракти [5]. Формировать эти процессы можно используемой в преобразователе системой управления и при этом рассматривать ШИМ как безынерционное звено, на вход которого поступает напряжение регулятора системы управления, а на выходе формируется напряжение, которое с учетом напряжения питания и скважности управления γ определяет среднее напряжение на дросселе $U_{вых}$: для понижающего преобразователя при постоянном напряжении силового питания

$$U_{вых} = \gamma \cdot U_{пит} ,$$

а для повышающего [4] –

$$U_{вых} = \frac{U_{пит}}{1 - \gamma} .$$

Если брать в качестве регулируемых координат рассматриваемых преобразователей напряжение на нагрузке и средний ток нагрузки в непрерывном режиме работы при постоянном напряжении силового источника питания преобразователей DC/DC, то систему автоматического управления преобразователем можно построить, например, на основе структур с подчиненным регулированием параметров с постоянными коэффициентами передачи, как показано на рис. 5.

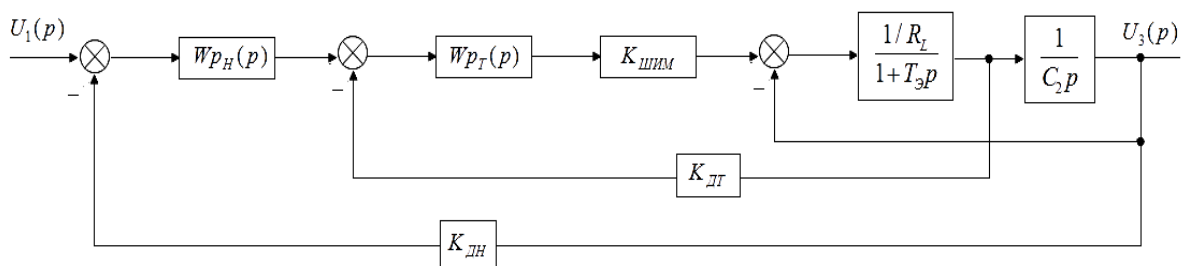


Рис. 5. Структурная схема системы автоматического управления понижающим импульсным преобразователем

Для синтеза регуляторов может быть применена инженерная методика их расчета на основе понятий модульного оптимума или симметричного оптимума [5]. Например, для синтеза регуляторов тока и напряжения в схеме (см. рис. 5) используем желаемую передаточную функцию разомкнутого контура (при не учете обратной связи по напряжению) в виде

$$W_{ж}(p) = \frac{1}{2T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1)} ,$$

где $T_{\mu} = T_{\vartheta}$.

Выполним расчет передаточной функции регулятора тока для понижающего преобразователя с расчетными параметрами, приведенными в табл. 1.

Табл. 1. Расчетные параметры импульсных преобразователей

C_2 , мФ	R_L , Ом	L , мГн	T_{ϑ} , с	$K_{ДТ}$	K_{ω} , В/с ⁻¹
10	0,8	15	0,0003	10	0,028

$$W_{РТ}(p) = \frac{W_{ж}(p)}{W_p(p)} = \frac{1}{2T_{\vartheta} \cdot p \cdot (T_{\vartheta} \cdot p + 1)} \cdot \frac{(T_{\vartheta} \cdot p + 1)}{K_{РТ}} = \frac{1}{K_{РТ} \cdot p} ,$$

где $K_{PT} = 2 \cdot T_L \cdot K_{ШИМ} \cdot K_{ДТ} \cdot \frac{1}{R_L}$.

Это передаточная функция интегрирующего звена. Подставим номинальные данные элементов схемы и определим K_{PT} регулятора:

$$K_{PT} = 2 \cdot 0,0003 \cdot 42 \cdot 10 \cdot 1,25 = 0,31.$$

Для регулятора напряжения в контуре регулирования напряжения, считая, что передаточная функция для замкнутого контура регулирования тока имеет вид

$$W_{PT3}(p) = \frac{1}{(2T_3 \cdot p + 1)},$$

получим

$$W_{PH}(p) = \frac{W_{ЖН}(p)}{W_{PH}(p)} = \frac{1}{4T_3 p(2T_3 p + 1)} \times \\ \times \frac{(2T_3 p + 1) \cdot C_2 p}{K_\omega} = \frac{C_2}{K_\omega \cdot 4T_\mu}.$$

Это пропорциональный регулятор с коэффициентом передачи

$$W_{PH}(p) = \frac{0,01}{4 \cdot 0,0003 \cdot 0,028} = 248.$$

Аналогично для регулятора напряжения для повышающего преобразователя

$$W_{PH3}(p) = \frac{W_{ЖН}(p)}{W_{PH}(p)} = \frac{1}{4T_3 p(2T_3 p + 1)} \times \\ \times \frac{(2T_3 p + 1) \cdot C_2 p}{K_\omega} = \frac{1}{K_\omega \cdot p}.$$

Для структурных схем (см. рис. 3 и 4) разработаны модели в среде MATLAB повышающего и понижающего преобразователей (рис. 6 и 7).

Основные регулируемые параметры схем: $I_{C2}(s)$ – ток конденсатора C_2 и $U_{C1}(s)$ – напряжение на выходе. Эти параметры регулируются в рамках стандартной схемы регулирования напряжения на шине (конденсаторе C_2) с использованием последовательно включенных соответствующих регуляторов тока (внутренний контур) и напряжения (см. рис. 4). Регулирование напряжения на выходе преобразователей задается блоком Step (время начала регулирования – 0,4 с, время до 0,4 с – включение преобразователя).

Результаты моделирования работы рассматриваемых вариантов преобразователей приведены на рис. 8–10.

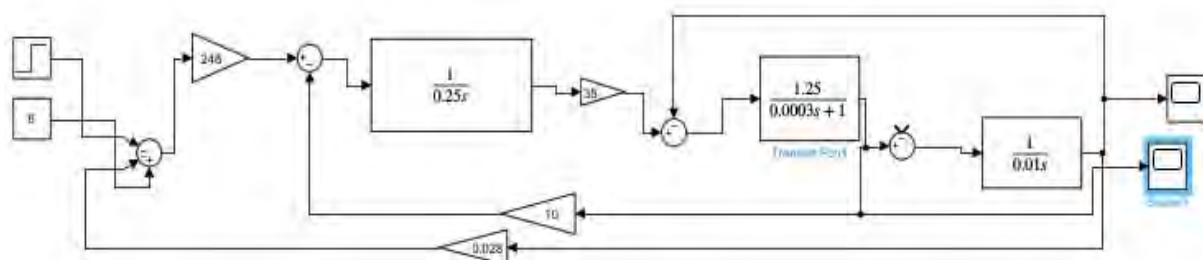


Рис. 6. Модель импульсного понижающего преобразователя напряжения

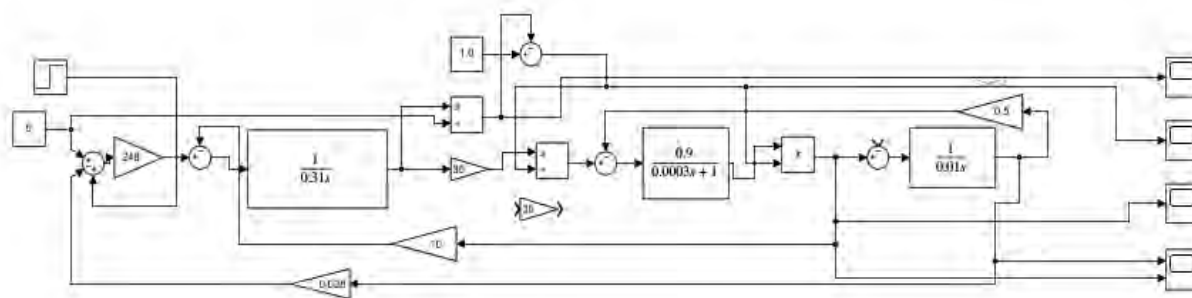
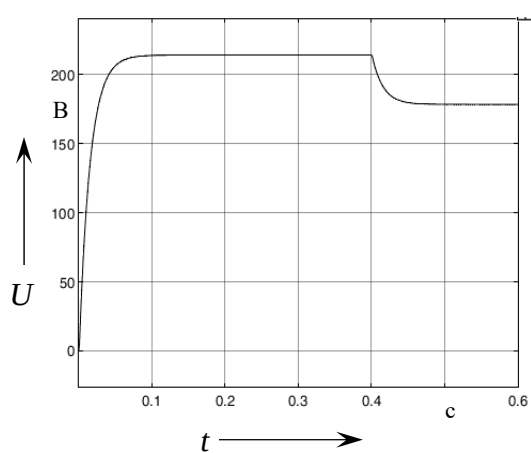


Рис. 7. Модель импульсного повышающего преобразователя напряжения

а)



б)

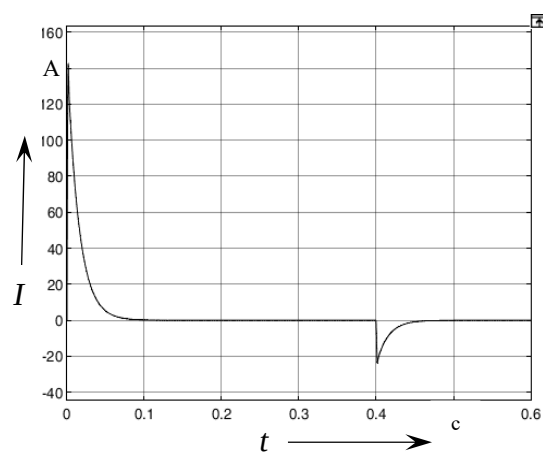
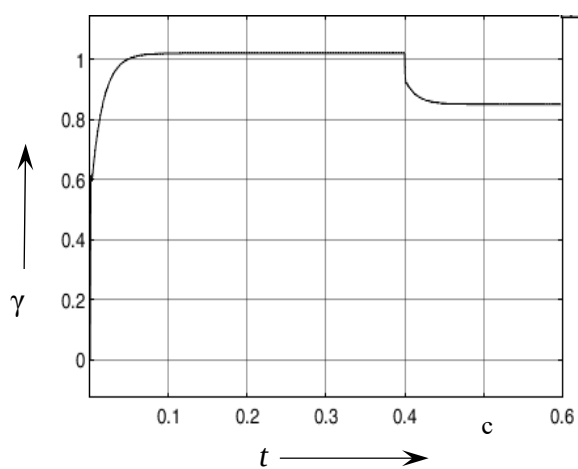


Рис. 8. Напряжение (а) и ток (б) для понижающего преобразователя

а)



б)

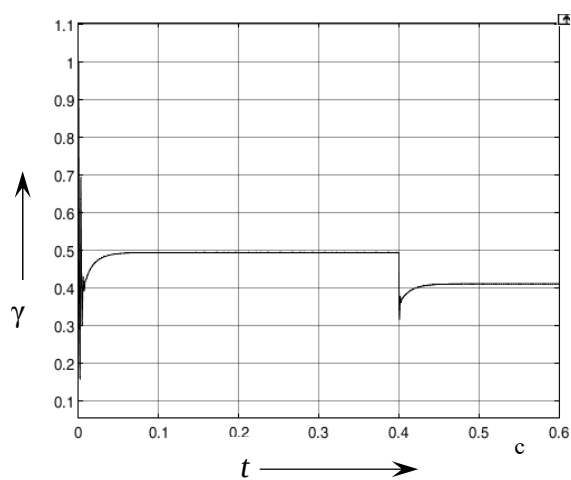


Рис. 9. Изменение скважности импульсов γ для понижающего (а) и повышающего (б) преобразователей

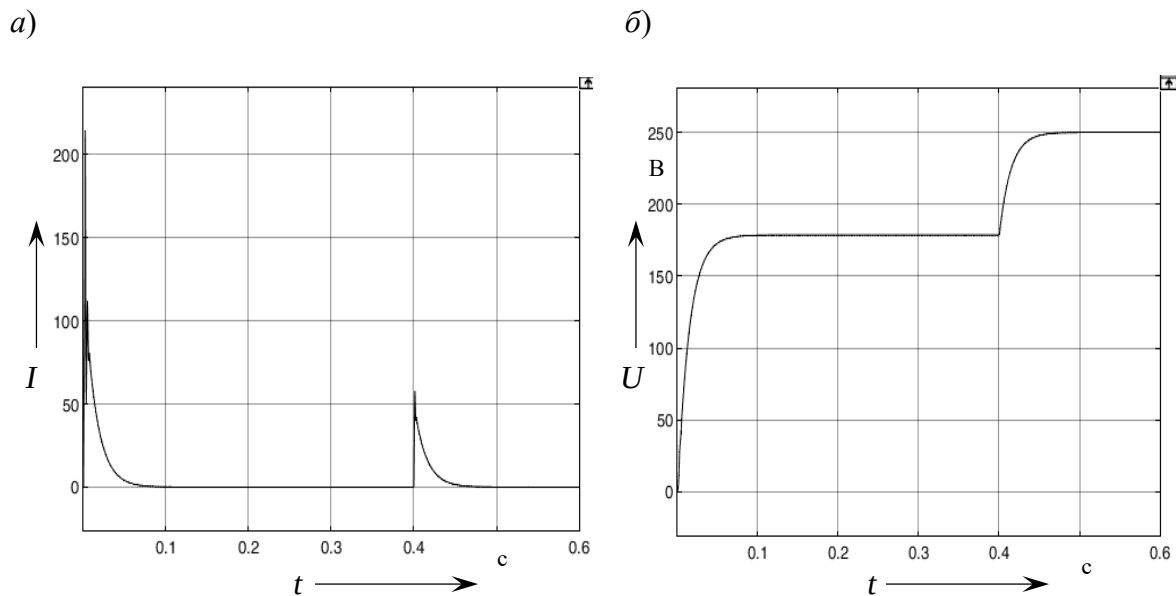


Рис. 10. Ток (а) и напряжение (б) для повышающего преобразователя

Модели приведенных схем импульсных преобразователей позволяют проводить их анализ и синтез, а также могут быть использованы для разработки рассматриваемых схем преобразователей DC/DC, применяемых, например, с целью повышения энергоэффективности частотно-регулируемых электроприводов соответствующих рабочих механизмов.

Выводы

Энергоэффективность частотно-регулируемых электроприводов может быть увеличена использованием накопителей энергии в режимах, в которых возможны рекуперативные режимы работы электродвигателей, и где в настоящее время массово используется балластный резистор для рассеивания энер-

гии торможения. Эффективным вариантом использования накопителей энергии является их подключение в двухзвенных преобразователях частоты с инвертором напряжения к звену постоянного тока через преобразователь DC/DC. Получено математическое описание силовых схем вариантов (см. рис. 1 и 2) понижающего (buck) и повышающего (boost) преобразователей DC/DC, как звеньев системы автоматического управления, и разработаны математические модели их схем автоматического управления на базе структур подчиненного регулирования. На основе этих схем получены модели в среде MATLAB вариантов систем автоматического регулирования для синтеза и отладки систем автоматического управления рассматриваемых преобразователей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода: учеб. пособие для вузов / Б. И. Фираго. – Минск : Техноперспектива, 2012. – 639 с.
2. **Коваль, А. С.** К вопросу энергосбережения в электроприводе пассажирских лифтов с регулируемой номинальной скоростью движения кабины лифта / А. С. Коваль, А. И. Артеменко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2018. – № 4. – С. 49–55.

3. **Коваль, А. С.** Модель в среде MATLAB накопителя энергии на базе суперконденсатора и двух-уровневого повышающе-понижающего преобразователя DC/DC / А. С. Коваль, А. Г. Кондратенко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2020. – № 2. – С. 106–112.

4. **Мэк, Р.** Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководства по практическому применению: пер. с англ. / Р. Мэк. – М. : Додэка-XXI, 2008. – 272 с.

5. **Анхимюк, В. Л.** Теория автоматического управления / В. Л. Анхимюк. – Минск : Выш. шк., 2002. – 352 с. : ил.

Статья сдана в редакцию 27 января 2025 года

Контакты:

eriapubru@gmail.com (Коваль Александр Сергеевич);

eriapubru@gmail.com (Садовский Артем Юрьевич);

eriapubru@gmail.com (Лукашов Денис Сергеевич).

A. S. KOVAL, A. Y. SADOVSKY, D. S. LUKASHOV

DC/DC CONVERTER FOR VARIABLE FREQUENCY DRIVE AS AN ELEMENT OF AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM

Abstract

A structural diagram is proposed for the power circuit of buck and boost DC/DC converters and, based on it, models of automatic control systems in the MATLAB environment of output voltage generation in the converters under consideration. The results of modeling the operation of DC/DC converters according to the developed models are presented.

Keywords:

buck and boost DC/DC converters, capacitive storage, variable frequency drive, voltage-current controller.

For citation:

Koval, A. S. DC/DC converter for variable frequency drive as an element of an automatic control system / A. S. Koval, A. Y. Sadovsky, D. S. Lukashov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2025. – № 1 (86). – P. 43–51.