

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 62-83:621

*А. С. Коваль, А. Г. Кондратенко*

### МОДЕЛЬ В СРЕДЕ МАТЛАБ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ НА БАЗЕ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА И ДВУХУРОВНЕГО ПОВЫШАЮЩЕ-ПОНИЖАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ DC/DC

UDC 62-83:621

*A. S. Koval, A. G. Kondratenko*

### A MATLAB MODEL OF THE ENERGY STORAGE DEVICE BASED ON A SUPERCAPACITOR AND A TWO-LEVEL BUCK-BOOST DC-DC CONVERTER

#### Аннотация

Для понижающе-повышающего (buck-boost) преобразователя DC/DC предложена структурная схема и на её основе – модель в среде МАТЛАБ, позволяющая моделировать работу емкостного накопителя. Представлены результаты моделирования работы емкостного накопителя с использованием понижающе-повышающего преобразователя DC/DC по разработанной модели.

#### Ключевые слова:

преобразователь (buck-boost) DC/DC, рекуперативный режим работы, частотно-регулируемый безредукторный электропривод лифта, энергосбережение, емкостной накопитель энергии, суперконденсатор.

#### Abstract

The paper describes a block diagram for a buck-boost DC-DC converter, and on its basis, a model in the MATLAB environment, which makes it possible to model the operation of a capacitive energy storage device. Based on the developed model, simulation results of the operation of the capacitive energy storage device using the buck-boost DC-DC converter are presented.

#### Keywords:

buck-boost DC-DC converter, recuperative mode of operation, variable frequency gearless electric drive in elevators, capacitive energy storage device, supercapacitor.

Частотно-регулируемые электропривода переменного тока применяются в различных технических и технологических приложениях. Эффективность их применения обусловлена надежностью электродвигателей переменного тока и высокими статическими и динамическими характеристиками реализуемых электроприводов. Энергоэффективность частотно-регулируемых элект-

троприводов для ряда механизмов дополнительно может быть увеличена использованием рекуператоров энергии в сеть или накопителей энергии в режимах, где возможны рекуперативные режимы работы электродвигателей и где в настоящее время массово используется балластный резистор для рассеивания энергии торможения [1]. Использование накопителей энергии (емкостных



на суперконденсаторах или аккумуляторных батареях) уделяется большое внимание. Одними из механизмов, где актуально использование рекуперированной энергии, являются подъемно-транспортные механизмы, в том числе лифты. Особенностью приводов лифтов является работа с меняющейся нагрузкой, что и обеспечивает работу привода как в двигательных режимах, так и в генераторных (рекуперативное торможение). Если в редукторных приводах

лифтов, с учетом КПД редуктора, использование генераторных режимов малоэффективно, то в безредукторных регулируемых приводах возвращаемая энергия при рекуперации существенно возрастает и появляется возможность использования рекуперированной энергии [2, 3].

Блок-схема регулируемого электропривода лифта, например с емкостным накопителем энергии (суперконденсатор), представлена на рис. 1.

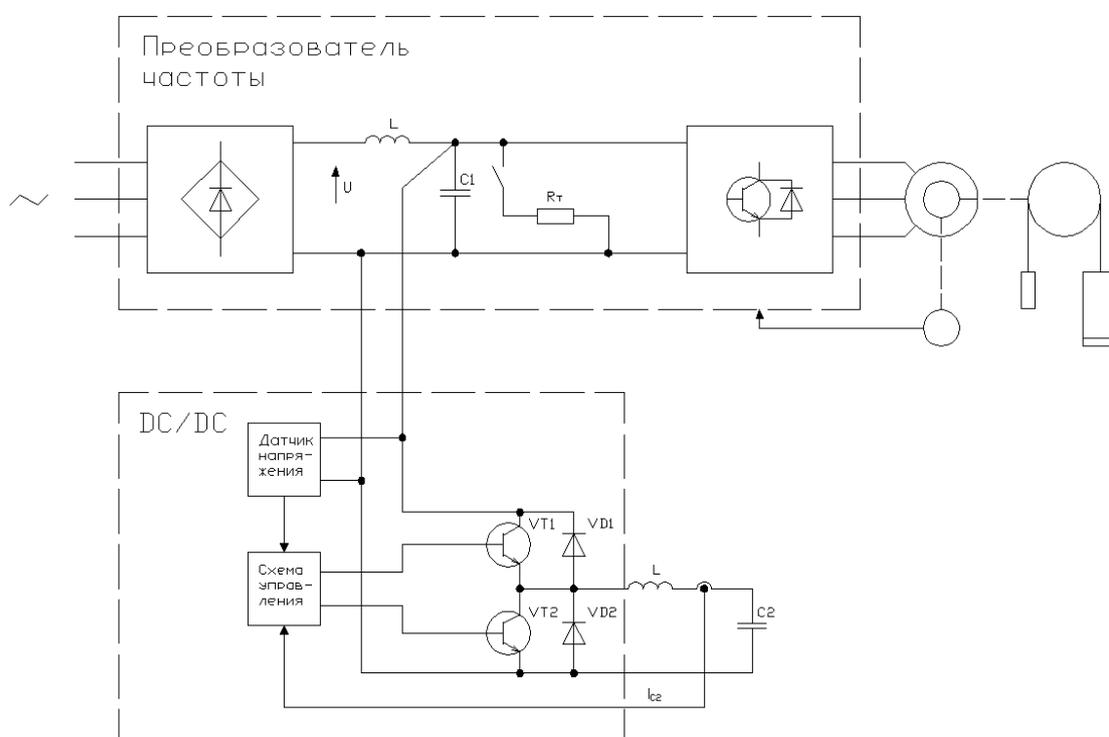


Рис. 1. Блок-схема электропривода лифта с преобразователем DC/DC и емкостным накопителем

Учитывая, что в рекуперативных режимах напряжение на шине постоянного тока преобразователя частоты существенно меняется, в таких приводах актуально использование преобразователей постоянного тока DC/DC для питания собственно накопителя [3].

Типовые варианты режимов работы для лифта, при которых возможна рекуперация и возврат энергии: подъем пустой кабины, спуск полностью гру-

женой кабины. Использование емкостного накопителя энергии позволяет получить и другие варианты обмена энергией между сетью и двигателем. Возможные варианты обмена энергией между питающей сетью, двигателем привода лифта и емкостным накопителем (Н), подключенным к шине постоянного тока преобразователя частоты (ПЧ), показаны на рис. 2.



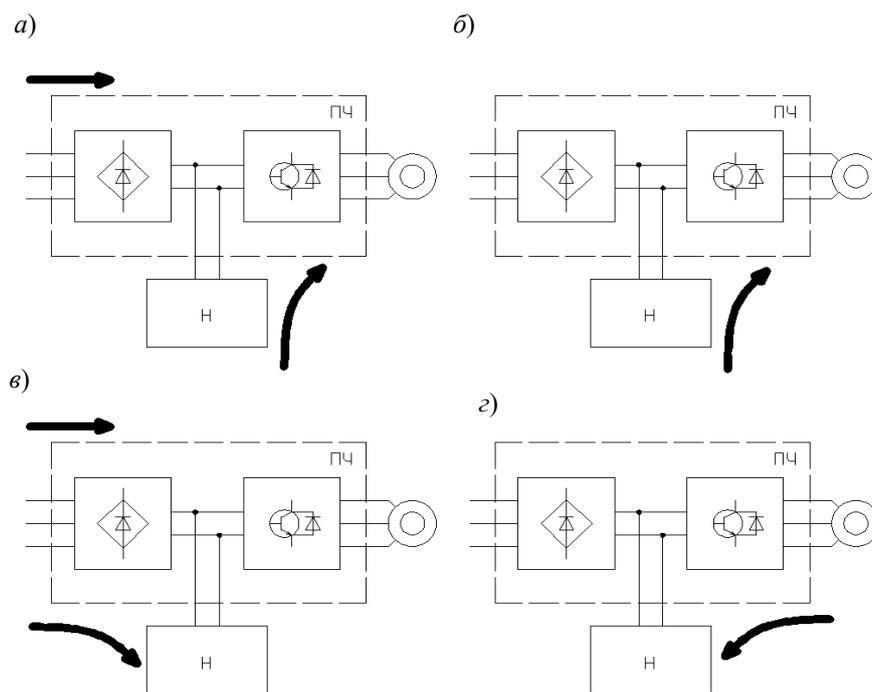


Рис. 2. Варианты обмена энергией между питающей сетью, двигателем привода лифта и емкостным накопителем

Рис. 2, а иллюстрирует режим работы привода лифта, при котором двигатель потребляет как энергию питающей сети, так и энергию, запасенную в накопителе. Если энергии накопителя достаточно, то возможна работа двигателя только от накопителя (см. рис. 2, б). Этот режим актуален для использования при кратковременной потере напряжения питающей сети и для сохранения работоспособности привода. В режиме, показанном на рис. 2, в, происходит подзарядка накопителя от питающей сети. При работе двигателя в режиме рекуперации энергии происходит накопление энергии в накопителе (см. рис. 2, г).

Как уже было отмечено, накопитель энергии должен быть построен на базе преобразователя постоянного тока ДС/ДС. Существуют различные конструктивные решения таких преобразователей [4].

При отсутствии необходимости в гальванической развязке емкостного накопителя и питающей сети простая и востребованная силовая схема понижа-

юще-повышающего преобразователя (buck-boost) DC/DC образована транзисторными ключами с обратными диодами (см. рис. 1). Такой преобразователь подключается на выход шины постоянного тока преобразователя частоты, как показано на рис. 1. Для нормальной работы емкостного накопителя в такой схеме напряжение на шине всегда должно быть больше, чем напряжение на суперконденсаторе. Схема обеспечивает регулируемое протекание тока как при заряде суперконденсатора, так и при его разряде за счет ШИМ-модуляции работы транзисторов (схема управления не показана). Если включен верхний транзистор VT1, происходит заряд конденсатора, в том числе и за счет энергии индуктивности (транзистор VT1 закрыт, работает нижний диод VD2). Режим возврата обеспечивается при работе нижнего транзистора VT2 и верхнего диода VD1. Расчет и выбор всех элементов такого преобра-



зователя приведен, например, в [5].

Расчетная схема без учета потерь в преобразователе (коэффициент переда-

чи  $k$ ) для анализа процессов при заря- разряде конденсатора накопителя показана на рис. 3.

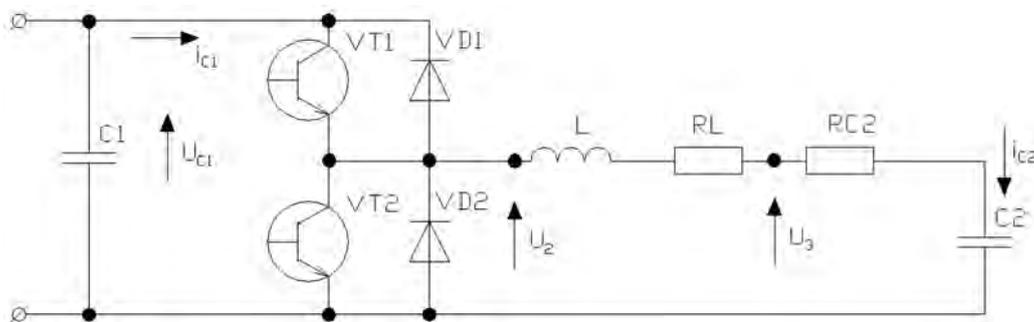


Рис. 3. Расчетная схема силовой части DC/DC преобразователя и емкостного накопителя:  $R_L$  и  $L$  – активное сопротивление и индуктивность дросселя;  $R_{C2}$  и  $C_2$  – внутреннее сопротивление и емкость суперконденсатора (линейная модель суперконденсатора [5]);  $C_1$  – емкость фильтра шины постоянного тока преобразователя частоты

Уравнения электрического равновесия для схемы на рис. 3 имеют вид:

$$\begin{aligned} U_2 - U_3 &= i_{c2}R_L + L \frac{di_{c2}}{dt}; \\ U_3 &= i_{c2}R_{c2} + U_{c2}; \\ U_{c2} &= \frac{1}{C_2} \int i_{c2} dt; \\ U_{c1} &= \frac{1}{C_1} \int i_{c1} dt; \\ U_{c2} &= kU_{c1}. \end{aligned} \quad (1)$$

получить следующие уравнения:

$$\begin{aligned} U_2(s) - U_3(s) &= i_{c2}(s)(R_L + L)s; \\ U_3(s) &= i_{c2}(s)(R_{c2} + \frac{1}{C_2s}); \\ U_{c1}(s) &= i_{c1}(s) \frac{1}{C_1s}. \end{aligned} \quad (2)$$

С учетом уравнений (2) структурная схема регулирования напряжения на шине постоянного тока имеет вид, представленный на рис. 4.

Из уравнений (1) с использованием преобразования по Лапласу можно

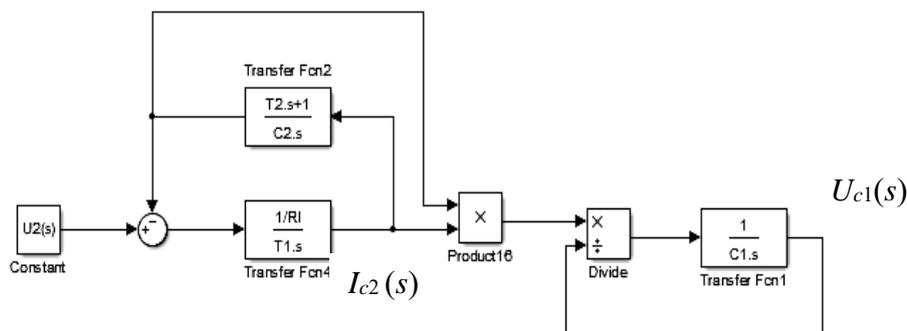


Рис. 4. Структурная схема DC/DC преобразователя при регулировании напряжения на шине постоянного тока преобразователя частоты:  $U_{c1}(s)$  – напряжение на конденсаторе фильтра шины постоянного тока;  $U_3(s)$  – напряжение на суперконденсаторе;  $I_{c2}(s)$  – ток заряда-разряда суперконденсатора;  $U_2(s)$  – напряжение на выходе преобразователя;  $T_2$  и  $T_1$  – соответствующие постоянные времени,  $T_2 = R_{C2}C_2$  и  $T_1 = R_L L$



Для структурной схемы (см. рис. 4) разработана модель в среде МАТЛАБ (рис. 5). Основные регулируемые параметры схемы (см. рис. 4):  $I_{c2}(s)$  – ток конденсатора  $C2$ ;  $U_{c1}(s)$  – напряжение на шине. Эти параметры регулируются в рамках стандартной схемы регулирования напряжения на шине (конденсаторе  $C1$ ) с использованием последовательно включенных соответствующих регуляторов тока Transfer Fcn1 (внутренний контур) и напряжения на шине

Transfer Fcn10 (см. рис. 5). Возрастание напряжения на шине постоянного тока при генераторных режимах работы моделируется блоком Signal Bulder2. Время существования генераторного режима задается в схеме (см. рис. 5) блоками Step3, Step4. Напряжение на шине определяется блоком Constant1.

Параметры схемы (см. рис. 5), используемые при моделировании, представлены в табл. 1.

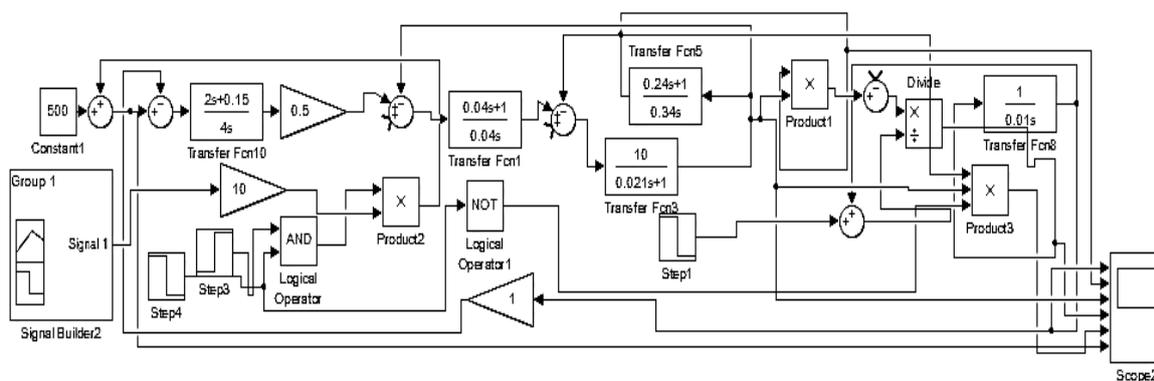


Рис. 5. Модель DC/DC преобразователя при регулировании напряжения на шине постоянного тока преобразователя частоты

Табл. 1. Параметры схемы

$R_{c2}$ , Ом	$C2$ , Ф	$L_s$ , мГн	$R_{L_s}$ , Ом	$C1$ , Ф	$U_{шины}$ , В
0,7	0,34	0,21	0,1	0,01	500

Динамические характеристики процессов заряда и разряда конденсатора  $C1$  определяются настройкой регуляторов в системе регулирования напряжения на шине постоянного тока. Для ПИ-регуляторов, используемых в схеме (см. рис. 5), результаты моделирования показаны на рис. 6 и 7.

Для емкостного накопителя на основе востребованной двухуровневой схемы понижающе-повышающего (buck-boost) преобразователя постоянного напряжения DC/DC получена структурная схема и предложена модель в среде МАТЛАБ системы регулирования

напряжения на шине постоянного тока. Эта модель позволяет моделировать процессы заряда-разряда суперконденсатора накопителя. Результаты моделирования работы рассматриваемого преобразователя подтверждают работоспособность предложенной модели. Рассматриваемая схема емкостного накопителя может быть использована для повышения энергоэффективности частотно-регулируемых безредукторных электроприводов лифтов, и предложенная модель позволяет оценивать эффективность её использования в таких приводах.



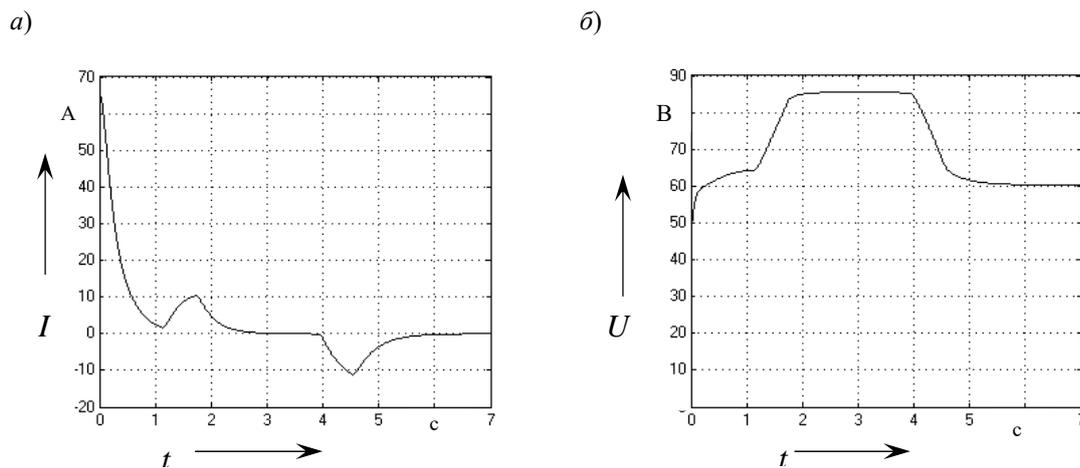


Рис. 6. Ток заряда–разряда конденсатора C2 (а) и напряжение на нём (б)

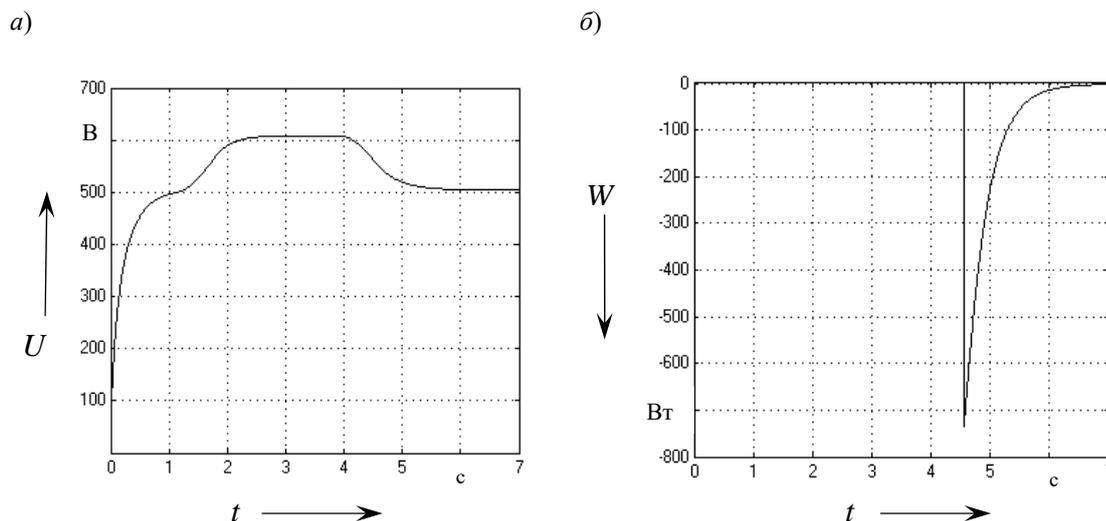


Рис. 7. Напряжение на конденсаторе C1 (а) и мощность, отдаваемая конденсатором C2 при разряде (б)

**Выводы**

Энергоэффективность частотно-регулируемых электроприводов может быть увеличена использованием накопителей энергии в режимах, где возможны рекуперативные режимы работы электродвигателей и где в настоящее время массово используется балластный резистор для рассеивания энергии торможения. Используемые емкостные накопители энергии на суперконденса-

торах предполагают для подключения к источнику генерируемого напряжения применение преобразователей постоянного тока DC/DC. Для двухуровневой схемы понижающе-повышающего преобразователя (buck-boost) DC/DC получена структурная схема и предложена модель в среде МАТЛАБ системы регулирования напряжения на шине постоянного тока. Результаты моделирования работы рассматриваемого преобразователя подтверждают работоспособ-



ность предложенной модели. Рассматриваемая модель может быть использована при моделировании процессов в частотно-регулируемых электроприво-

дах с аналогичным емкостным накопителем для оценки энергоэффективности его использования.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коваль, А. С.** Электромеханическая система лифтов со скоростью до 2 м/с / А. С. Коваль, А. В. Шваяков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 4. – С. 113–120.
2. **Коваль, А. С.** К вопросу энергосбережения в электроприводе пассажирских лифтов с регулируемой номинальной скоростью движения кабины лифта / А. С. Коваль, А. И. Артеменко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 4. – С. 49–55.
3. **Barrade, P.** A supercapacitor-based energy storage system for elevators with soft commutated interface / P. Barrade // IEEE Trans. on Ind. Appl. – 2002. – Vol. 38, № 5. – P. 1151–1159.
4. **Ярославцев, М. В.** Энергоэффективный тяговый привод городского безрельсового транспорта / М. В. Ярославцев, Н. И. Щуров, В. Н. Аносов. – Новосибирск: НГТУ, 2017. – 136 с.
5. The ultracapacitor-based controlled electric drives with braking and ride-through capability: overview and analysis / P. J. Grobovic [et al.] // IEEE Trans. on Ind. Electron. – 2011. – Vol. 58, № 3. – P. 925–936.

*Статья сдана в редакцию 10 февраля 2020 года*

**Александр Сергеевич Коваль**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
**Алексей Григорьевич Кондратенко**, аспирант, Белорусско-Российский университет.

**Aleksandr Sergeyevich Koval**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
**Aleksey Grigoryevich Kondratenko**, PhD student, Belarusian-Russian University.

