

Поляков В.Н., Плотников Ю.В.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

## ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА DC-DC КОНВЕРТОРА КАК ЭЛЕМЕНТА УСТРОЙСТВА АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В статье представлены результаты исследования свойств *DC-DC* конвертора как элемента устройства аккумулирования энергии, входящего в состав регулируемого электропривода переменного тока, работающего с большим числом включений в час при наличии интенсивных пусковых и тормозных режимов. В качестве элемента аккумулирования энергии использован суперконденсатор, подключенный к звену постоянного тока двухзвенного преобразователя частоты через управляемый реверсивный *DC-DC* конвертор. Описывается блок-схема регулируемого электропривода. Приводятся принципиальная электрическая схема и схема замещения устройства аккумулирования энергии, а также результаты моделирования процессов в системе «устройство аккумулирования энергии – звено постоянного тока преобразователя частоты» с целью выявления специфических свойств этой системы как объекта управления. В статье проводится подробный анализ реакций системы на управляющее и возмущающее воздействия при различных режимах работы электропривода. В качестве управляющего воздействия используется сигнал напряжения управления для *DC-DC* преобразователя, возмущающим воздействием для данной системы является ток автономного инвертора напряжения из звена постоянного тока преобразователя частоты. Процессы в системе рассматриваются в трех режимах работы, которые имитируют пуск, торможение и последовательную работу этих режимов в частотно-регулируемом электроприводе. В заключении сформулированы специфические свойства *DC-DC* конвертора. Представленные результаты исследования раскрывают особенности режимов работы *DC-DC* конвертора как элемента устройства аккумулирования энергии, сведения о которых могут быть полезны при выборе принципа регулирования, структуры и состава регулируемых координат, а также метода синтеза регуляторов системы автоматического управления устройства аккумулирования энергии.

**Ключевые слова:** частотно-регулируемый электропривод, устройство аккумулирования энергии, *DC-DC* преобразователь, суперконденсатор, результаты моделирования.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с проблемой энергосбережения находят широкое применение *DC-DC* конверторы в системах преобразования постоянного тока различной мощности. В частности, в последнее время наметилось использование их в гибридных источниках энергии как альтернатива для различных применений в промышленных системах распределения постоянного тока [1] и различных приложениях в транспортной сфере: в трансмиссиях электрифицированных транспортных систем, дизельно-электрических гибридных системах [2], а также системах преобразования электрической энергии на судах. Важное место здесь занимают гибридные системы хранения энергии, использующие батарею и суперконденсаторы, что позволяет расширить область применения и срок службы электрического транспортного средства. Несколько видов гибридных схем изучены в [3-5]. При этом возможно пассивное и активное соединение аккумулирующих элементов с основной электрифицированной транспортной системой (ЭТС). Пассивное соединение заключается в прямом соединении аккумулирующих элементов с ЭТС. Достоинством пассивного соединения является простота схемного решения. Однако в этом случае отсутствует возможность обеспечения оптимального энергетического обмена между аккумулирующими элементами и основной ЭТС. Активное соединение предполагает подключение одного или двух аккумулирующих элементов к ЭТС через *DC-DC* конвертор [6, 7]. В схемах с *DC-DC* конверторами эффективность энергетического обмена между аккумулирующими элементами и ЭТС зависит от выбранной стратегии управления [8, 9].

Система гибридного аккумулирования энергии, включающая аккумулятор и суперконденсатор, *DC/AC* инвертор, трехфазный понижающий/повышающий конвертор и синхронный двигатель с постоянными магнитами, описана в [10].

Применение в электроприводе аккумулирующих элементов с активным соединением может дать экономию электроэнергии, потребляемой из сети, до 50% [11], а также обеспечить дополнительные преимущества, к которым можно отнести возможность бесперебойной работы при провалах либо кратковременном отключении питающего напряжения.

В статье представляются результаты анализа динамических свойств устройства аккумулирования энергии в составе регулируемого электропривода переменного тока, где требуется учет особенностей свойств устройства аккумулирования энергии как объекта управления.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

На **рис. 1** представлена обобщенная схема регулируемого электропривода переменного тока с устройством аккумулирования энергии. Электропривод включает двигатель переменного тока, двухзвенный преобразователь частоты, устройство аккумулирования энергии, тормозной прерыватель и систему управления.

В состав силовой части преобразователя частоты входят неуправляемый выпрямитель, *LC*-фильтр и автономный инвертор напряжения. Для аккумулирования энергии, отдаваемой двигателем при торможении электропривода, используются суперконденсаторы, подключенные через *DC-DC* конвертор к шинам звена постоянного тока преобразователя частоты.

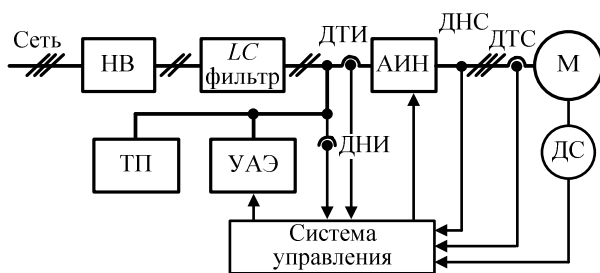


Рис. 1. Обобщенная схема регулируемого электропривода переменного тока с устройством аккумулирования энергии

В схеме силовой части электропривода предусмотрен тормозной прерыватель (ТП), вступающий в работу при выходе из строя устройства аккумулирования энергии (УАЭ). Алгоритмы управления электроприводом реализуются в блоке, куда поступают сигналы с датчиков скорости (ДС), напряжения (ДНС) и тока (ДТС) обмотки статора, а также напряжения на входе (ДНИ) и тока (ДТИ) автономного инвертора (АИН).

Схема устройства аккумулирования энергии представлена на рис. 2. Она включает реверсивный DC-DC конвертор, дроссель  $L$  и суперконденсатор  $C_{sc}$ . DC-DC конвертор представляет собой двухкомплектный реверсивный преобразователь с раздельным управлением комплектами. Для исследования выбран наиболее простой и дешевый вариант силовой схемы. В первый комплект конвертора входят транзистор  $VT1$  и диод  $VD2$ , а во второй – транзистор  $VT2$  и диод  $VD1$ . Способ формирования сигналов управления ключами соответствует односторонней широтно-импульсной модуляции.

Предполагается, что электропривод работает в пуско-тормозных режимах с интенсивными переходными процессами при большом числе включений в час, причем при пуске используется накопленная при торможении энергия суперконденсатора.

Целью статьи является исследование динамических свойств устройства аккумулирования энергии как объекта управления, являющегося составной частью регулируемого электропривода переменного тока.

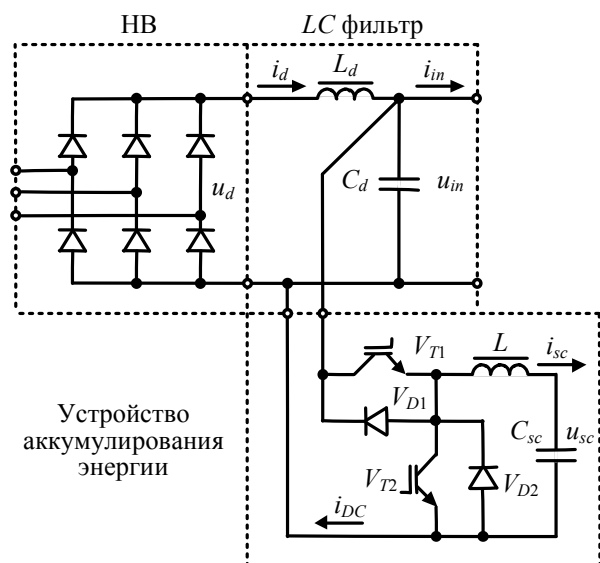


Рис. 2. Схема устройства аккумулирования энергии

#### СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ЗВЕНА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Так как режимы работы DC-DC конвертора связаны с режимами работы преобразователя частоты, рассмотрим сначала процессы в звене постоянного тока при пуско-тормозных режимах электропривода. Для этого будем использовать схему замещения звена постоянного тока, приведенную на рис. 3.

При составлении схемы замещения приняты следующие упрощающие допущения. Выпрямитель представляется в виде источника электродвижущей силы  $e_d$ , равной среднему значению электродвижущей силы за период дискретности выпрямителя. Параметры внешней цепи и самого выпрямителя приведены к цепи выпрямленного тока. Вентильные свойства неуправляемого выпрямителя отражаются в схеме включением одного вентилля ( $V_{BR}$ ) последовательно с дросселем  $L_d$  фильтра. Влияние нагрузки, создаваемой двигателем, имитируется идеальным источником тока  $i_l$ .

Звено постоянного тока является динамической системой с изменяющейся структурой. Характер переходных процессов в ней зависит от параметров  $R_d$ ,  $L_d$  и  $C_d$  элементов звена постоянного тока и режима работы двигателя. Эта система подвергается воздействию со стороны источника тока, имитирующего нагрузку двигателя. Поэтому ток  $i_l$  для этой динамической системы является возмущающим воздействием, отклоняющим входное напряжение инвертора  $u_{in}$  от заданного (базового) значения.

На рис. 4 приведены переходные процессы в звене постоянного тока при ступенчатом воздействии тока нагрузки  $i_l$ . Параметры элементов звена постоянного тока соответствуют мощности двигателя 4 кВт:  $R_d = 0,3$  Ом,  $L_d = 0,01$  Гн и  $C_d = 0,0015$  Ф.

Приведенные процессы имитируют режимы пуска ( $0 \leq t \leq 0,3$  с, ток  $i_l = -30$  А), работы с постоянной нагрузкой ( $0,3 \leq t \leq 0,6$  с, ток  $i_l = -10$  А), торможения ( $0,6 \leq t \leq 0,7$  с, ток  $i_l = +10$  А) и состояния покоя ( $0,7 \leq t \leq 0,9$  с, ток  $i_l = 0$  А) двигателя. Как видно, на начальных этапах пуска и выхода на режим постоянной нагрузки двигателя напряжение на конденсаторе  $u_{in}$  и ток выпрямителя  $i_d$  имеют колебательный характер. До момента начала торможения напряжение  $u_{in}$  незначительно отклоняется от своего базового значения  $u_{in0} = 560$  В. Ток выпрямителя  $i_d$  соответствует току нагрузки  $i_l$ . Переходный процесс по напряжению  $u_{Ld}$  на дросселе силового фильтра имеет знакопеременный характер.

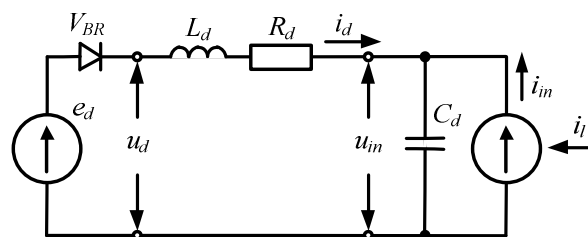


Рис. 3. Схема замещения звена постоянного тока

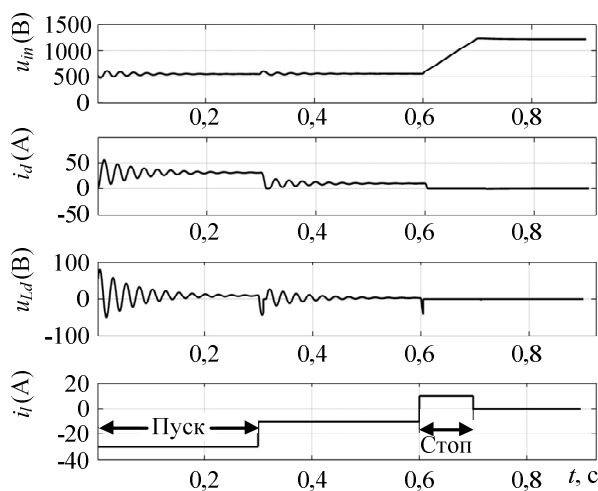


Рис. 4. Процессы в звене постоянного тока

При торможении привода напряжение  $u_{in}$  на входе инвертора возрастает. Ток выпрямителя  $i_d$  спадает до нуля. Этот момент времени соответствует запирающему вентилю  $V_{BR}$ .

Процессы в звене постоянного тока до момента запирающего вентиля  $V_{BR}$  описываются уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= L_d^{-1} [(e_d - u_{in}) - R_d i_d]; \\ \frac{du_{in}}{dt} &= C_d^{-1} i_{dc}, \quad u_{in}(t_0) = u_{in0}; \\ i_{dc} &= i_d + i_{in}. \end{aligned} \quad (1)$$

После запирающего вентиля  $V_{BR}$  уравнения модели звена постоянного тока принимают следующий вид:

$$\frac{du_{in}}{dt} = C_d^{-1} i_{dc}, \quad u_{in}(t_0) = u_{in0}; \quad (2)$$

$$i_{dc} = i_{in}. \quad (3)$$

При состоянии покоя напряжение  $u_{in}$  равно напряжению на конденсаторе, соответствующему моменту окончания торможения привода.

Таким образом, ток нагрузки  $i_{in} = i_l$ , являясь возмущающим фактором, оказывает существенное влияние на входное напряжение инвертора. Для стабилизации входного напряжения инвертора необходимо компенсировать влияние тока нагрузки. Эта задача может быть решена путем формирования компенсирующего воздействия  $i_{dc}$  с помощью управляемого реверсивного  $DC-DC$  конвертора устройства аккумулирования энергии. Схема замещения звена постоянного тока с  $DC-DC$  конвертором приведена на рис. 5.

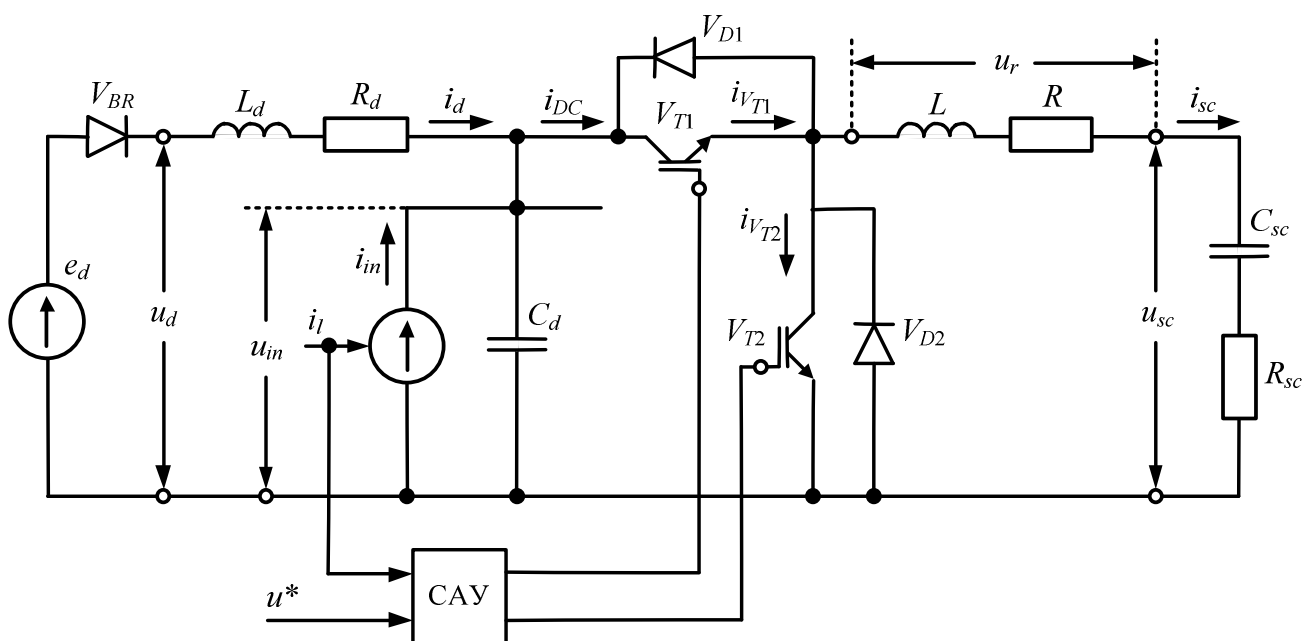
В дальнейшем предполагается, что управляемые силовые вентили представляют собой идеальные ключи: их сопротивления во включенном состоянии считаются равными нулю, а при выключенном состоянии – бесконечности. Также принимаются равными нулю сопротивления неуправляемых вентилях в их проводящем состоянии и в непроводящем состоянии – бесконечности. Кроме того, пренебрегают влиянием активных сопротивлений конденсаторов в схеме замещения.

Параметры элементов схемы замещения приведены в таблице.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗВЕНА ПОСТОЯННОГО ТОКА С $DC-DC$ КОНВЕРТОРОМ

##### 1. Объект управления

Звено постоянного тока с  $DC-DC$  конвертором будем рассматривать как динамическую систему, имеющую два входа и два выхода (см. рис. 5). Входными независимыми воздействиями являются задающее воздействие  $u^*$ , поступающее на вход системы управления  $DC-DC$  конвертора (CCS), и ток нагрузки  $i_l$ , который для этой динамической системы является возмущающим воздействием.


 Рис. 5. Расчетная схема звена постоянного тока с  $DC-DC$  конвертором

Параметры расчетной схемы звена постоянного тока с DC-DC конвертором

Название устройства	Обозначение	Размерность	Значение
Звено постоянного тока	$R_d$	Ом	0,3
	$L_d$	Гн	0,01
	$C_d$	Ф	0,0015
Устройство аккумулирования энергии	$R$	Ом	0,3
	$L$	Гн	0,005
	$C_{sc}$	Ф	0,25
	$R_{sc}$	Ом	0

Задающее воздействие имеет смысл относительно времени включенного состояния ключа (коэффициент регулирования):

$$u^* = t_i / T,$$

где  $t_i$  – время включенного состояния ключа;  $T$  – период частоты коммутации. При моделировании частота коммутации принята  $f = 1/T = 4000$  Гц.

Основными переменными, представляющими интерес с точки зрения выбора их в качестве регулируемых переменных, рассматриваются входное напряжение инвертора  $u_{in}$  (напряжение на конденсаторе звена постоянного тока) и внешний ток DC-DC конвертора  $i_{DC}$ . Полезная информация о физических свойствах устройства аккумулирования энергии может быть получена при анализе процессов по напряжению и токам элементов звена постоянного тока и DC-DC конвертора. Задачей исследования является изучение характера переходных процессов в данной динамической системе при изменении внешних воздействий.

Из анализа схемы замещения (см. рис. 5) очевидно, что задающее воздействие  $u^*$  влияет как на напряжение  $u_{in}$ , так и на ток  $i_{DC}$ . Точно также можно утверждать, что напряжение  $u_{in}$  и ток  $i_{DC}$  подвержены определенному влиянию возмущающего воздействия  $i_l$ .

## 2. Программа исследования системы на внешние воздействия

Сначала рассматривалась реакция системы на задающее воздействие типа скачка

$$u^* = u_{st}^* 1(t),$$

где  $1(t)$  – единичная импульсная функция времени. Возмущающее воздействие  $i_l$  полагалось равным нулю.

Затем рассматривалась реакция системы на возмущающее воздействие в виде скачка тока нагрузки

$$i_l = i_{l,st} 1(t)$$

при  $u^* = 0$ .

Кроме того, были рассмотрены реакции системы при одновременном скачкообразном изменении возмущающего  $i_l$  и задающего  $u^*$  воздействий без изменения их знаков.

Наконец, была рассмотрена реакция системы при скачкообразном изменении возмущающего воздейст-

вия  $i_l$  с изменением его знака. Причем в первоначальный момент одновременно с подачей скачка  $i_l$  был подан скачок задающего воздействия  $u^*$ . По своему физическому смыслу такой эксперимент имитирует изменение тока нагрузки при чередовании режимов пуска и торможения привода.

## 3. Реакции системы на внешние воздействия при имитации режима пуска электропривода

### Реакция системы на управляющее воздействие

В этом эксперименте задающее воздействие  $u^* = u_{st}^* 1(t)$ , где установившееся значение  $u_{st}^* = 0,5$ . При этом возмущающее воздействие  $i_{l,st} = 0$ . Временные диаграммы основных переменных приведены на рис. 6.

Напряжение на входе АИН возрастает по линейному закону относительно начального (базового) значения  $u_{in0} = 560$  В. В этом случае клапан  $V_{BR}$  закрыт и процесс изменения напряжения  $u_{in}$  описывается уравнениями (1), (2). Ток внешней цепи  $i_{DC}$  и ток дросселя  $i_{sc}$  DC-DC конвертора имеют прерывистый характер.

При малых значениях задающего воздействия  $u^*$  ток дросселя  $i_{sc}$  существенно возрастает, принимая непрерывный характер. В то же время ток  $i_{DC}$  внешней цепи DC-DC конвертора по-прежнему сохраняет прерывистую форму тока.

Напряжение на суперконденсаторе  $u_{sc}$  снижается относительно начального значения  $u_{sc0} = 250$  В (рис. 7). Напряжение на дросселе  $u_r$  принимает импульсный трехуровневый знакопеременный характер. Значение напряжения верхнего уровня равно значению  $u_{sc}$ , а нижнего уровень – разности напряжений  $u_{sc} - u_{in}$ . Величина напряжения промежуточного уровня равна нулю.

При малых значениях задающего воздействия характер переходных процессов меняется. Ток  $i_{sc}$  увеличивается. Поэтому суперконденсатор разряжается более интенсивно. Напряжение  $u_r$  на дросселе становится двухуровневым, изменяясь в пределах от  $u_{sc}$  до  $u_{in}$ .

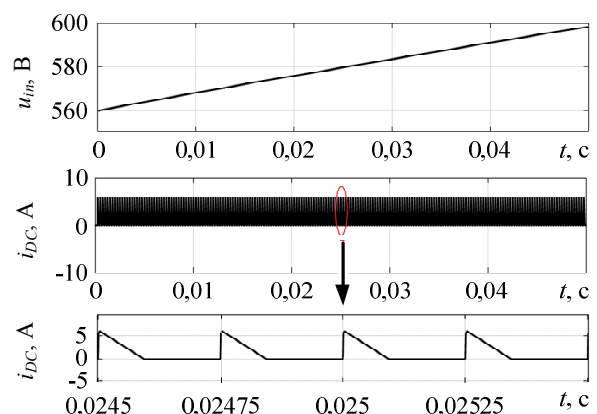


Рис. 6. Временные диаграммы  $u_{in}$  и  $i_{DC}$  при скачке задающего воздействия ( $u_{st}^* = 0,5$ )

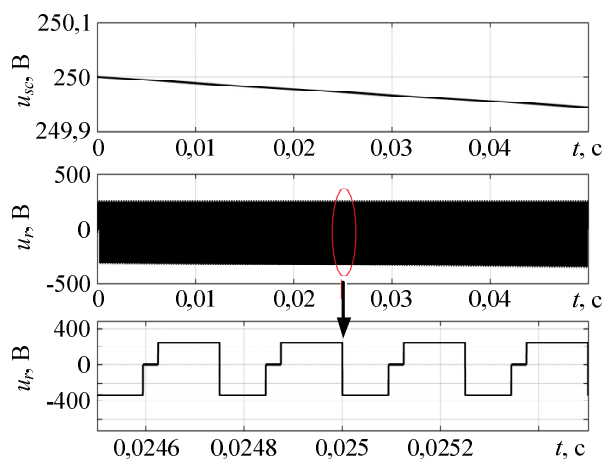


Рис. 7. Временные диаграммы напряжения на суперконденсаторе и падения напряжения на дросселе при скачке задающего воздействия ( $u_{st}^* = 0,5$ )

#### Реакция системы на возмущающее воздействие

В этом эксперименте задавался ток нагрузки  $i_l = i_{l,st} 1(t)$ , где установившееся значение тока  $i_{l,st} = -30$  А. При задающем воздействии  $u^* = 0$  транзисторы  $VT1$  и  $VT2$ , а также диоды  $VD1$  и  $VD2$  закрыты и процессы в этом случае соответствуют схеме замещения, приведенной на рис. 3. Однако реально задающий сигнал  $u^*$  ограничен как по минимальной, так и по максимальной величине:  $u_{\min}^* \leq u^* \leq u_{\max}^*$ . При значении  $u_{\min}^* = 0,01$  временные диаграммы основных переменных приведены на рис. 8 и 9. Как видно, напряжение на входе автономного инвертора  $u_{in}$  имеет непрерывный колебательный характер, а внешний ток  $DC-DC$  конвертора  $i_{DC}$  – прерывистый колебательный характер.

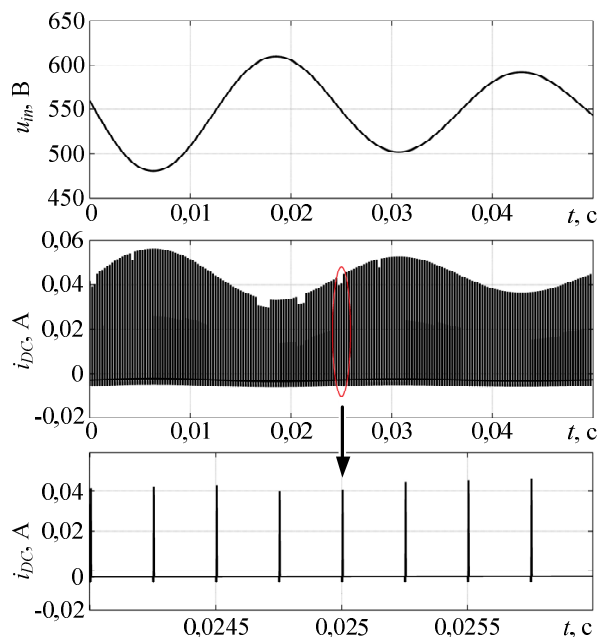


Рис. 8. Временные диаграммы  $u_{in}$  и  $i_{DC}$  при скачке тока нагрузки ( $i_{l,st} = -30$  А) и значении  $u^* = 0,01$

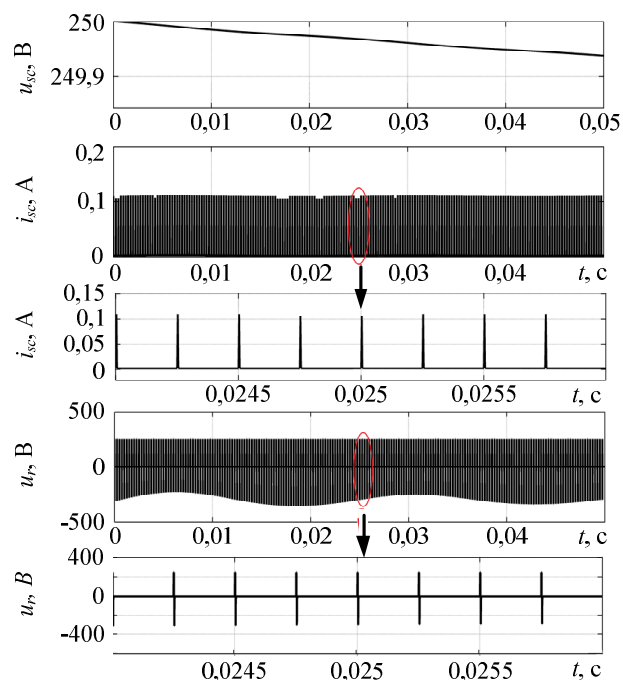


Рис. 9. Временные диаграммы напряжения, тока суперконденсатора и падения напряжения на дросселе при скачке тока нагрузки ( $i_{l,st} = -30$  А) и значении  $u^* = 0,01$

На рис. 9 приведены временные диаграммы напряжения, тока суперконденсатора и падения напряжения на дросселе  $DC-DC$  конвертора. Как видно, напряжение  $u_{sc}$  на суперконденсаторе монотонно снижается относительно его начального значения  $u_{sc0} = 250$  В (конденсатор разряжается). При этом ток разряда  $i_{sc}$  имеет прерывистый характер, а падение напряжения на дросселе  $u_L$  – двухуровневую знакопеременную импульсную форму. Положительный уровень падения напряжения равен напряжению  $u_{sc}$ , а отрицательный – разности напряжений  $u_{sc} - u_{in}$ .

С уменьшением абсолютного значения  $i_{l,st}$  характер переходных процессов по большинству переменных сохраняется.

#### 4. Реакции системы на внешние воздействия при имитации режима торможения электропривода

##### Реакция системы на управляющее воздействие

Переходные процессы при ступенчатом управляющем воздействии  $u^* = u_{st}^* 1(t)$ , где установившееся значение  $u_{st}^* = 0,5$ , и возмущающем воздействии  $i_{l,st} = 0$  приведены на рис. 10 и 11. Как видно, напряжение  $u_{in}$  на входе АИН имеет колебательный характер и меньше базового значения 560 В. Ток внешней цепи  $i_{DC}$  имеют прерывистый характер. Форма импульсов меняется в зависимости от величины управляющего воздействия.

Напряжение  $u_{sc}$  на суперконденсаторе возрастает относительно начального значения  $u_{sc0} = 250$  В (рис. 11). Напряжение на дросселе имеет импульсный двухуровневый знакопеременный характер при  $u_{st}^* = 0,5$ .

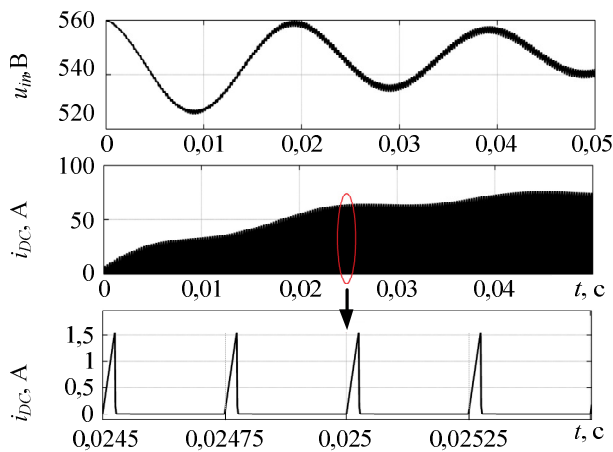


Рис. 10. Временные диаграммы  $u_{in}$  и  $i_{DC}$  при скачке задающего воздействия ( $u_{st}^* = 0,5$ )

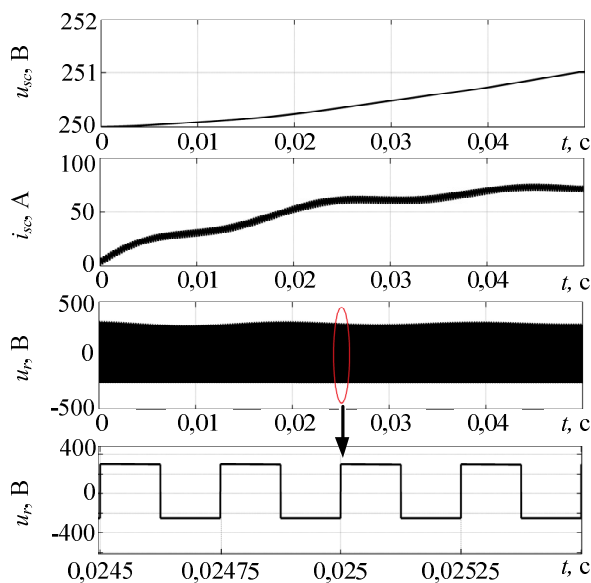


Рис. 11. Временные диаграммы напряжения на суперконденсаторе, тока дросселя и падения напряжения на дросселе при скачке задающего воздействия ( $u_{st}^* = 0,5$ )

При уменьшении  $u_{st}^*$  падение напряжения на дросселе меняет двухуровневую на трехуровневую знакопеременную форму. Верхний уровень определяется разностью напряжений  $u_{in} - u_{sc}$ , а нижний уровень равен  $-u_{sc}$ . Величина напряжения промежуточного уровня равна нулю.

Токи имеют колебательный характер при больших значениях задающего воздействия. Однако с уменьшением задающего воздействия степень колебательности токов снижается. Заметим, что при  $u_{st}^* = 0,5$  ток дросселя непрерывный, а при малых значениях  $u_{st}^*$  становится прерывистым.

#### Реакция системы на возмущающее воздействие

При ступенчатом воздействии  $i_l = i_{l,st}1(t)$ , где установившееся значение тока  $i_{l,st} = +30$  А, и задающем воздействии  $u^* = 0$  имитируется режим торможения привода с отдачей энергии в звено постоянного тока и использованием этой энергии для заряда суперконден-

сатора. В этом случае процессы также соответствуют схеме замещения, приведенной на рис. 3, но при положительном значении возмущающего воздействия.

При минимальном значении задающего воздействия  $u_{min}^* = 0,01$  временные диаграммы переменных приведены на рис. 12 и 13. Как видно, процессы напряжения  $u_{in}$  на входе автономного инвертора и тока внешней цепи  $i_{DC}$  DC-DC конвертора при минимальном значении задающего воздействия (см. рис. 12) возрастают. Причем ток  $i_{DC}$  имеет прерывистый характер.

Также растет напряжение  $u_{sc}$  на суперконденсаторе (см. рис. 13). Напряжение на дросселе  $u_r$  имеет двухуровневую знакопеременную форму с верхним пределом, равным разности напряжений  $u_{in} - u_{sc}$ , а нижний уровень соответствует значению напряжения  $-u_{sc}$ . Ток дросселя  $i_{sc}$  (ток заряда конденсатора) увеличивается во времени и имеют прерывистый характер.

При малых значениях  $i_{l,st}$  характер процессов сохраняется.

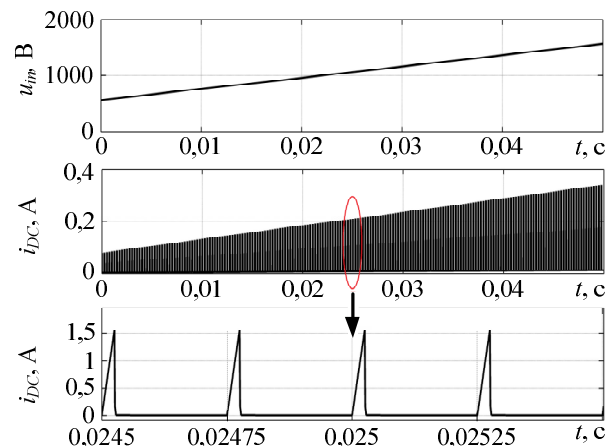


Рис. 12. Временные диаграммы  $u_{in}$  и  $i_{DC}$  при скачке тока нагрузки ( $i_{l,st} = +30$  А) и значении  $u^* = 0,01$

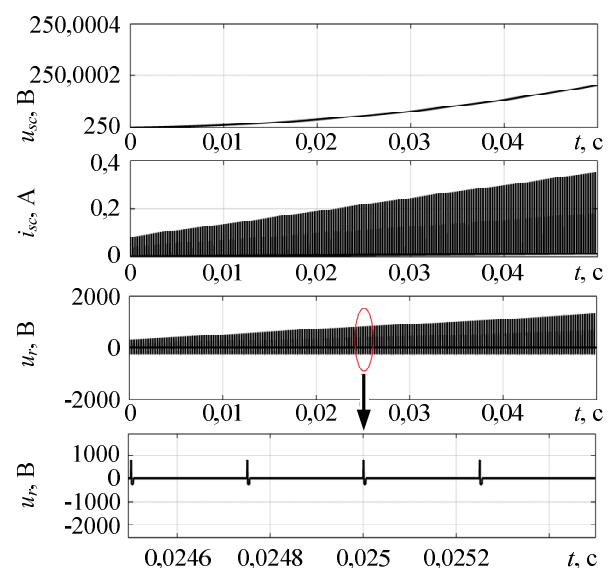


Рис. 13. Временные диаграммы напряжения, тока суперконденсатора и падения напряжения на дросселе при скачке тока нагрузки ( $i_{l,st} = +30$  А) и значении  $u^* = 0,01$

### 5. Реакции системы на внешние воздействия при имитации режима пуска и торможения электропривода

Интерес представляют процессы токов при переходе с одного комплекта на другой комплект  $DC-DC$  конвертора при подаче команды на переход по сигналу смены знака возмущающего воздействия (рис. 14). В момент смены знака тока нагрузки абсолютное значение внешнего тока  $DC-DC$  конвертора сначала снижается до нуля и только после этого начинает проводить ток вентиля второго комплекта конвертора. При этом внешний ток конвертора меняет свой знак на противоположный.

Интервал времени, в течение которого происходит переход конвертора с одного комплекта на другой, зависит от постоянной времени контуров и величины тока в момент изменения знака нагрузки. Видно, что при изменении знака нагрузки с отрицательного значения на положительное время перехода сравнительно невелико, так как величина тока в момент смены знака тока нагрузки мала. Вместе с тем при смене знака возмущающего воздействия переход тока с одного комплекта на другой занимает более длительное время. На рис. 15 приведены токи ключей. Несмотря на то, что импульсы управления на ключ соответствующего комплекта подаются точно по сигналу смены знака нагрузки, тем не менее, между токами этих ключей имеется пауза. В течение этой паузы  $DC-DC$  конвертор теряет управляемость. Эффект потери управляемости  $DC-DC$  конвертора объясняется тем, что после смены знака тока нагрузки ключ, на который подано управление, шунтируется диодом до тех пор, пока ток, протекающий через него, не спадет до нуля.

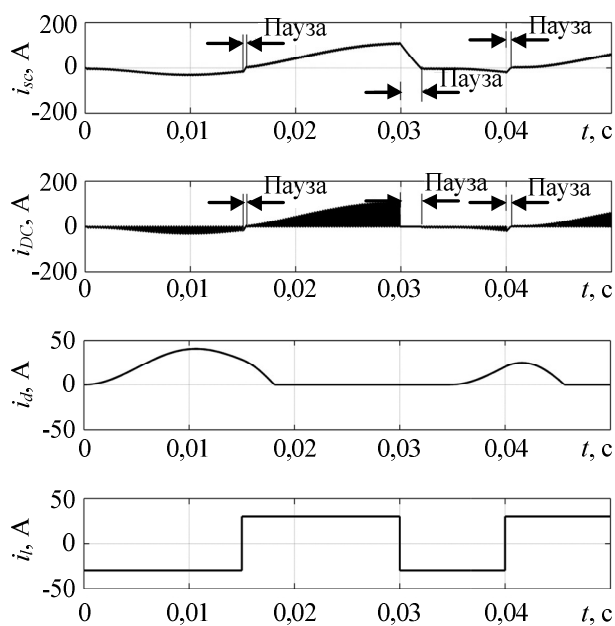


Рис. 14. Временные диаграммы тока дросселя, внешнего тока УАЭ и тока выпрямителя при изменении знака скачка возмущающего воздействия ( $u_{st}^* = 0,5$ )

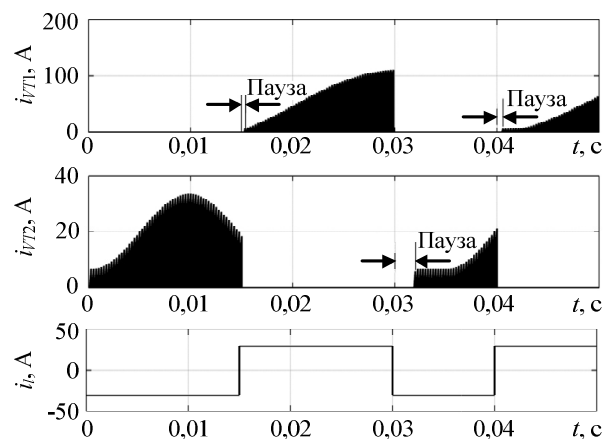


Рис. 15. Временные диаграммы токов управляемых вентилях при изменении знака скачка возмущающего воздействия ( $u_{st}^* = 0,5$ )

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Напряжение на входе инвертора может изменяться в широких пределах при интенсивных пуско-тормозных режимах электропривода, существенно отклоняясь от базового значения, соответствующего номинальному режиму преобразователя частоты.

2. Динамический провал и выброс напряжения зависит от ряда факторов, в том числе от параметров фильтра звена постоянного тока (в частности, от величины емкости) и величины скачка тока нагрузки.

3. Анализ переходных процессов звена постоянного тока позволяет выявить важную особенность, заключающуюся в том, что как динамическое звено в составе электропривода оно может изменять свою структуру: при пуске звено постоянного тока ведет себя как колебательное, а при торможении как колебательное либо интегрирующее звено.

4. При соответствующем управлении устройство аккумулирования энергии в системе электропривода не только участвует в обмене энергией, но и одновременно может выполнять роль компенсатора влияния нагрузки двигателя в пуско-тормозных режимах на напряжение автономного инвертора преобразователя частоты, обеспечивая тем самым более высокие динамические характеристики электропривода.

5. Устройство аккумулирования энергии в общем случае представляет собой сложный нелинейный динамический объект управления, обладающий рядом специфических особенностей, к числу которых следует отнести дискретность управления, неполную управляемость и изменчивость его структуры в зависимости от режима работы электропривода, а также наличие режимов непрерывного и прерывистого токов.

6. Важным вопросом при разработке систем автоматического регулирования является выбор состава регулируемых переменных и принципа их регулирования при наличии режимов непрерывного и прерывистого тока, неполной управляемости и нелинейности регулировочных характеристик. В этом аспекте приобретает актуальное значение проблема выбора частоты коммутации и параметров элементов  $DC-DC$  конвертора при разработке высокоэффективных систем автоматического регулирования переменных устройства аккумулирования энергии.



*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-08-00188.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Salomonsson D. and Sannino A. Low-voltage DC distribution system for commercial power systems with sensitive electronic loads, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 3, pp. 1620-1627, July 2007.
- Rajashekara K. Present status and future trends in electric vehicle propulsion technologies, *IEEE Trans. Emerging Select. Topics Power Electron.*, vol. 1, no. 1, pp. 3-7, Mar. 2013.
- Chan C.C., Bouscayrol A. and Chen K. Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 2, pp. 589-598, 2010.
- Khaligh and Li Z. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 6, pp. 2806-2814, July. 2010.
- Hegazy O., Van Mierlo J. and Lataire P. Analysis, Modeling, and Implementation of a Multidevice Interleaved DC/DC Converter for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles, *Power Electron. IEEE Trans. On*, vol. 27, no. 11, pp. 4445-4458, Nov. 2012.
- Cao J. and Emadi A. A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 1, pp. 122-132, 2012.
- Ortuzar M., Moreno J. and Dixon J. Ultracapacitor-Based Auxiliary Energy System for an Electric Vehicle: Implementation and Evaluation, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 4, pp. 2147-2156, 2007.
- Allegre A.-L., Bouscayrol A., Delarue P., Barrade P., Chattot E. and El-Fassi S. Energy Storage System With Supercapacitor for an Innovative Subway, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 4001-4012, 2010.
- Allègre A.-L., Bouscayrol A. and Trigui R. Flexible real-time control of a hybrid energy storage system for electric vehicles, *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 3, no. 3, pp. 79-85, 2013.
- Szalai T., Heidrich T., Schwalbe U., Endert F. and Ivanov S. Decentralized electromotive drive train system in PCIM Europe, 2013.
- Braslavsky I., Plotnikov Z., Ishmatov F., Polunin. The Estimation of Technical and Economic Efficiency of Using the Supercapacitors in the Hoisting Applications. *Proceeding of Symposium on Power Electronics, Electric Drives, Automation and Motion. Ischia (Italy)*, 2014, pp. 179-183.

Поступила в редакцию 4 сентября 2017 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

# DYNAMIC PROPERTIES OF THE DC-DC CONVERTER AS AN ELEMENT OF ENERGY STORAGE DEVICE IN THE COMPOSITION OF FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE

Vladimir N. Polyakov

D.Sc. (Eng.). Professor, Department of Electric drive and automation of industrial plants, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.n.polyakov@urfu.ru

Yurii V. Plotnikov

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Electric drive and automation of industrial plants, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: y.v.plotnikov@urfu.ru

The article presents the results of the transients investigation of DC-DC converter as a part of energy storage system in the frequency-controlled electric drive, which works in hard start-up and braking modes with a large number of cycles per hour. The ultracapacitor is used as an energy storage element, which is connected to DC link of frequency converter through the bidirectional DC-DC converter. The block diagram of alternating current electric drive is described. The circuit diagram and the equivalent circuit of the energy storage system, and also the simulation results of processes in the system «energy storage device – frequency converter DC link» in order to identify the specific properties of the system as a control object are shown. In the article, a detailed analysis of the system responses to the control and disturbing actions under different operating conditions of the electric drive are considered. As a control action, a control voltage signal of the DC-DC converter is used, the disturbance for this system is the current from the voltage source inverter DC link of the frequency converter. Processes in the system are considered in three modes of operation, which simulate the starting, braking and sequential operation of these modes in a frequency-controlled electric drive. In conclusion, the specific properties of DC-DC converter are formulated. The presented investigation results show the operation modes features of DC-DC converter as part of an energy storage system. This information can be used for choosing the structure and the method of controllers synthesis for the automatic control system of bidirectional DC-DC converter.

**Keywords:** Frequency-controlled electric drives, energy storage system, supercapacitors, DC-DC power converters, simulation results.

## REFERENCES

- Salomonsson D. and Sannino A. Low-voltage DC distribution system for commercial power systems with sensitive electronic loads, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 3, pp. 1620-1627, July 2007.
- Rajashekara K. Present status and future trends in electric vehicle propulsion technologies, *IEEE Trans. Emerging Select. Topics Power Electron.*, vol. 1, no. 1, pp. 3-7, Mar. 2013.
- Chan C.C., Bouscayrol A. and Chen K. Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 2, pp. 589-598, 2010.
- Khaligh and Li Z. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 6, pp. 2806-2814, July. 2010.
- Hegazy O., Van Mierlo J. and Lataire P. Analysis, Modeling, and Implementation of a Multidevice Interleaved DC/DC Converter for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles, *Power Electron. IEEE Trans. On*, vol. 27, no. 11, pp. 4445-4458, Nov. 2012.
- Cao J. and Emadi A. A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 1, pp. 122-132, 2012.



7. Ortuzar M., Moreno J. and Dixon J. Ultracapacitor-Based Auxiliary Energy System for an Electric Vehicle: Implementation and Evaluation, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 4, pp. 2147-2156, 2007.
8. Allegre A.-L., Bouscayrol A., Delarue P., Barrade P., Chattot E. and El-Fassi S. Energy Storage System With Supercapacitor for an Innovative Subway, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 4001-4012, 2010.
9. Allègre A.-L., Bouscayrol A. and Trigui R. Flexible real-time control of a hybrid energy storage system for electric vehicles, *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 3, no. 3, pp. 79-85, 2013.
10. Szalai T., Heidrich T., Schwalbe U., Endert F. and Ivanov S. Decentralized electromotive drive train system in PCIM Europe, 2013.
11. Braslavsky I., Plotnikov Z., Ishmatov F., Polunin. The Estimation of Technical and Economic Efficiency of Using the Supercapacitors in the Hoisting Applications. *Proceeding of Symposium on Power Electronics, Electric Drives, Automation and Motion. Ischia, (Italy)*, 2014. pp. 179-183.

Поляков В.Н., Плотников Ю.В. Динамические свойства DC-DC конвертора как элемента устройства аккумулярования энергии в составе регулируемого электропривода переменного тока // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 4(37). С. 11-19. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4\(37\)-11-19](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4(37)-11-19)

Polyakov V.N., Plotnikov Yu.V. Dynamic Properties of the DC-DC Converter as an Element of Energy Storage Device in the Composition of Frequency-Controlled Electric Drive. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 4(37), pp. 11-19. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4\(37\)-11-19](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4(37)-11-19)