



УДК 621.314.1

5.3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИЛОВОЙ ЧАСТИ DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В СОСТАВЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С СУПЕРКОНДЕНСАТОРАМИ

THE MATHEMATICAL SIMULATION OF DC-DC CONVERTER IN THE FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE WITH ULTRACAPACITORS

Браславский Исаак Яковлевич, д-р. техн. наук, профессор каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: i.ya.braslavskiy@urfu.ru, Тел.: +7 (343) 375-46-46

Плотников Юрий Валерьевич, канд. техн. наук, доцент каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: yu.v.plotnikov@urfu.ru, Тел.: +7 (343) 375-46-46

Ишматов Закир Шарифович, канд. техн. наук, доцент каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: z.sh.ishmatov@urfu.ru, Тел.: +7 (343) 375-46-46

Полунин Федор Анатольевич аспирант каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: carnage@list.ru, Тел.: +7 (343) 375-46-46

Суслов Алексей Игоревич, студент каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: suslov_aleksey@bk.ru, Тел.: +7 (343) 375-46-46

Isaak I. Braslavsky, Dr. Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: i.ya.braslavskiy@urfu.ru. Ph.: +7 (343) 375-46-46

Iurii V. Plotnikov, Cand. Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: yu.v.plotnikov@urfu.ru. Ph.: +7 (343) 375-46-46

Zakir Sh. Ishmatov, Cand. Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ishmatov@mail.ru. Ph.: +7 (343) 375-46-46

Fedor A. Polunin, Postgraduate Student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: carnage@list.ru. Ph.: +7 (343) 375-46-46

Aleksey I. Suslov, Student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: suslov_aleksey@bk.ru. Ph.: +7 (343) 375-46-46

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы построения математической модели силовой части DC-DC преобразователя, который используется для подключения суперконденсаторов в звено постоянного тока частотно-регулируемого электропривода. Рассматривается принцип действия DC-DC преобразователя, режимы его работы, приводятся уравнения и структурная схема для описания силовой части преобразователя в составе частотно-регулируемого электропривода. В заключительной части статьи приводятся результаты моделирования.

Abstract: The article deals with a mathematical model of the power part of the DC-DC converter, which is used to connect the supercapacitors into the DC link of frequency-controlled electric drive. The operating principle and boost and buck modes of the DC-DC converter are considered. The functional diagram and equations for power part of DC-DC converter as a part of frequency-controlled electric drive are described. The final part of the article presents the simulations results.

Ключевые слова: DC-DC преобразователь; частотно-регулируемый электропривод; суперконденсаторы.

Key words: DC-DC converter; frequency-controlled electric drive; ultracapacitors.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время вопросам энергосбережения в электроприводе уделяется пристальное внимание, поскольку по разным источникам общее энергопотребление электроприводами всех типов в России составляет порядка 60–70 % [2]. Основные меры по повышению энергетической эффективности направлены преимущественно на использование частотно-регулируемых электроприводов в различных отраслях промышленности.

В тоже время известно, что в большинстве случаев в электроприводе на основе двухзвенных преобразователей частоты используется неэффективный с энергетической точки зрения способ торможения, при котором энергия торможения рассеивается на тормозном сопротивлении, подключенном к звену постоянного тока преобразователя частоты. Схемы с активным выпрямителем, помимо высокой стоимости, также имеют ряд недостатков [5, 7, 9], поэтому в последнее время широкое распространение, по крайней мере в области электрического транспорта, получила идея использования суперконденсаторов [5, 8]. В этом случае в тормозных режимах работы электродвигателя энергия запасается в суперконденсаторах и затем полезно используется при работе в двигательных режимах.

Очевидно, что в таком электроприводе энергопотребление будет существенно снижено. Исследования показывают, что в зависимости от режима работы экономия электроэнергии, потребляемой из сети может достигать 50 % [7-9]. Помимо этого, использование суперконденсаторов в электроприводе дает дополнительные преимущества, к наиболее существенным можно отнести возможность бесперебойной работы при провалах питающего напряжения.

Наиболее простым и наименее затратным вариантом подключения суперконденсаторов является их непосредственное включение в звено постоянного тока преобразователя частоты. При этом сам преобразователь не требует каких-либо значительных изменений в конструкции и системе управления, за исключением организации процесса заряда.

Однако, такой вариант имеет существенный недостаток, который заключается в неполном использовании емкости и, соответственно, энергии

суперконденсаторов (СК). Рабочий диапазон изменения напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты в этом случае составляет примерно от 513 до максимум 800 В. Энергия, запасенная в суперконденсаторе, и которую использовать не представляется возможным, может быть рассчитана по известному выражению:

$$W_{ск} = C \frac{U_{max}^2 - U_{min}^2}{2} \tag{1}$$

Так, при использовании четырех последовательно соединенных отечественных суперконденсаторов 200ПП – 18/0,31 емкостью 0,85 Ф каждый, и максимальным напряжением 200 В, энергия, которая остается неиспользованной составит примерно 27,5 кДж. Это более 40 % от полной энергии, которую могут запастись суперконденсаторы. При существующей высокой стоимости суперконденсаторов такой подход является нерациональным, поэтому в докладе рассматривается более эффективная идея подключения суперконденсаторов к звену постоянного тока преобразователя частоты через DC-DC преобразователь. Схема силовых цепей такого варианта представлена на рис. 1.

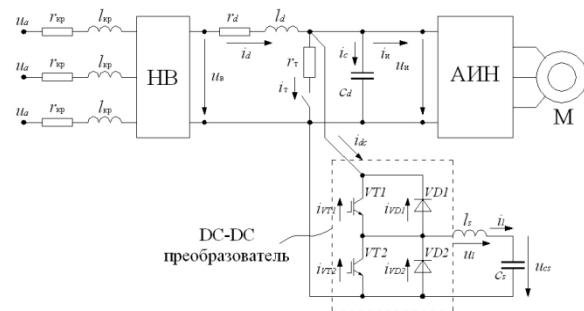


Рис. 1. Схема частотно-регулируемого электропривода с блоком суперконденсаторов и DC-DC преобразователем

В этом случае на блоке суперконденсаторов C_s предлагается использовать максимальное напряжение до 200 В, что позволит за счёт параллельного включения увеличить емкость суперконденсаторов при том же общем запасе энергии. На первый взгляд, в таком варианте за счёт управляемого преобразователя постоянного тока можно полностью использовать суперконденсаторы по напряжению, однако, как будет показано далее, существует и нижний предел по напряжению.

В качестве схемы DC-DC преобразователя был выбран наиболее простой вариант на основе двух полностью управляемых транзисторов VT1, VT2 и диодов VD1, VD2. Очевидно, что для нормальной работы этой схемы необходима достаточно сложная система автоматического управления ключами.

В связи с этим поставлена задача создания математической модели DC-DC преобразователя в составе частотно-регулируемого электропривода с суперконденсаторами. Модель должна демонстрировать принципы работы, отражать основные физические процессы в элементах преобразователя постоянного тока, чтобы результаты моделирования можно было использовать при отладке реальной схемы. Другой важной функцией модели должна являться возможность ее использования для синтеза и отладки системы автоматического управления.

РЕЖИМЫ РАБОТЫ DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Для построения математической модели DC-DC преобразователя необходимо проанализировать режимы его работы. Преобразователь постоянного тока может работать в двух характерных режимах. Первый режим – понижающий (направленный на понижение напряжения в звене постоянного тока), который в зарубежной литературе обозначается «buck» [1]. Схема работы преобразователя в этом режиме представлена на рис. 2. Энергия, вырабатываемая электродвигателем при работе в тормозном режиме, через инвертор поступает в звено постоянного тока, что приводит к повышению напряжения. Задача DC-DC преобразователя в этом случае заключается в стабилизации напряжения в звене постоянного тока u_d .

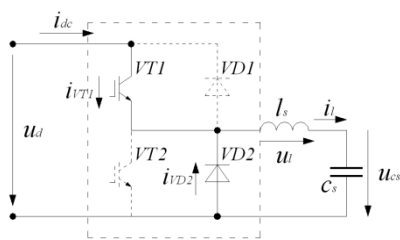


Рис. 2. Схема силовых цепей DC-DC преобразователя в понижающем режиме (заряд СК)

С физической точки зрения DC-DC преобразователь в этом режиме потребляет ток i_{dc} из звена постоянного тока, за счет которого и происходит заряд суперконденсатора c_s и напряжение на суперконденсаторе постепенно увеличивается.

Временная диаграмма работы преобразователя в понижающем режиме представлена на рис. 3. В схеме силовых цепей преобразователя задействован транзистор VT1 и диод VD2, при этом токи через транзистор VT2 и диод VD1 не

протекают. В интервале, когда ключ VT1 замкнут, происходит постепенное увеличение тока i_l на индуктивности l_s и суперконденсатор заряжается. На следующем интервале ключ VT1 закрывается и ток i_l замыкается через диод VD2.

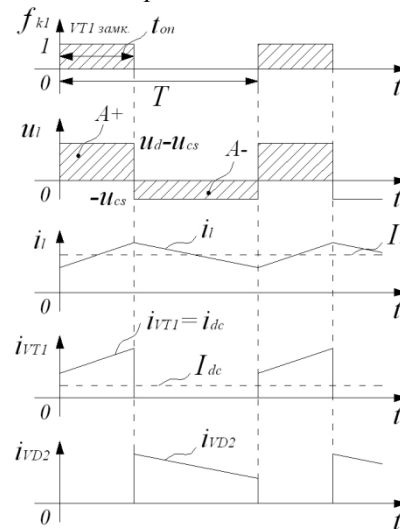


Рис. 3. Диаграмма работы DC-DC преобразователя в понижающем режиме (buck)

Важно отметить, что в установившемся режиме продолжительность включения транзистора VT1 определяется по выражению $D = t_{on}/T$ и не является произвольной, а определяется соотношением между напряжениями на высокой U_d и низкой стороне U_{cs} , что соответствует равенству площадей A+ и A- на рис. 3. Без учета КПД преобразователя можно записать следующее соотношение, в котором используются средние значения переменных за период дискретности преобразователя:

$$D = \frac{t_{on}}{T} = \frac{U_{cs}}{U_d} = \frac{I_{dc}}{I_l}, \quad (2)$$

Из соотношения (2) можно сделать вывод о целесообразном диапазоне изменения напряжения на суперконденсаторах. В качестве примера рассмотрим асинхронный двигатель RA100LBY3 мощностью 3 кВт, который в дальнейшем будет использоваться при моделировании, и проведем следующие упрощенные расчеты. Без учета КПД двигателя и инвертора напряжения при работе в тормозном режиме с номинальной нагрузкой мощность, которая передается в звено постоянного тока, составит эти же 3 кВт. При напряжении в звене постоянного тока около 600 В среднее значение тока на входе DC-DC преобразователя составит примерно $3000/600=5$ А. Это означает, что если принять диапазон изменения напряжений 10:1, то минимальное напряжение на суперконденсаторе составит 60 В, а ток на индуктивности I_l , на основе которого выбирается транзистор VT1, составит уже 50 А. Заметим, что номинальный ток двигателя составляет всего 5 А. Очевидно, что чем более широкий диапазон изменения напряжения требуется получить, тем выше будет стоимость DC-

DC преобразователя. Отметим также, что есть и другие ограничения по диапазону изменения напряжений, связанные с коэффициентом полезного действия DC-DC преобразователя [1].

Используя математический аппарат коммутационных функций [3, 4] можно записать систему уравнений для DC-DC преобразователя в понижающем режиме:

$$\begin{cases} u_l = f_{k1}u_d - u_{cs}, \\ i_l = \frac{I_s^{-1}}{T_\theta p} u_l, \\ u_{cs} = \frac{c_s^{-1}}{T_\theta p} u_l, \\ i_{VT1} = f_{k1}i_l, \\ i_{VD2} = (1 - f_{k1})i_l, \\ i_{DC} = i_{VT1}, \end{cases} \quad (3)$$

где u_l и u_{cs} – напряжения на индуктивности l_s и суперконденсаторе c_s соответственно. i_l , i_{VT1} , i_{VD1} – токи, протекающие через индуктивность, транзистор VT1 и диод VD1. i_{DC} – ток на входе DC-DC преобразователя. f_{k1} – коммутационная функция для транзистора VT1. T_θ – базисная постоянная времени.

Коммутационная функция f_{k1} принимает значение 1, когда ключ VT1 замкнут и 0, когда разомкнут. Нужно отметить, что все переменные, кроме времени записаны в системе относительных единиц [4].

В повышающем режиме работы DC-DC преобразователя поток энергии направлен в обратную сторону. Такой режим в зарубежной литературе называется «boost» [1]. То есть, электропривод работает в двигательном режиме и запасенная на суперконденсаторе энергия расходуется на совершение полезной работы. Пока напряжение на суперконденсаторе не достигло минимального значения, преобразователь частоты не потребляет энергию из питающей сети. Схема силовых цепей преобразователя постоянного тока при работе в этом режиме представлена на рис. 4.

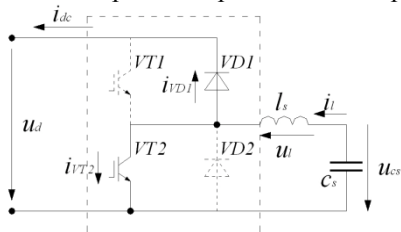


Рис. 4. Схема силовых цепей DC-DC преобразователя в повышающем режиме (разряд СК)

В этом режиме задействованы транзистор VT2 и диод VD1. Транзистор VT1 в этом режиме постоянно находится в закрытом состоянии.

Временная диаграмма работы DC-DC преобразователя в этом режиме представлена на рис. 5. Для управления транзистором VT2 используется своя коммутационная функция f_{k2} .

Из рис. 3 и рис. 5 видно, что при одинаковом соотношении напряжений на высокой и низкой стороне будет выполняться соотношение:

$$f_{k1} = \overline{f_{k2}} = 1 - f_{k2}, \quad (4)$$

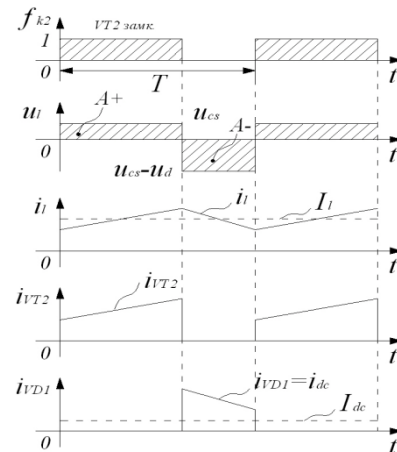


Рис. 5. Диаграмма работы DC-DC преобразователя в повышающем режиме (boost)

Система уравнений DC-DC преобразователя в повышающем режиме с использованием коммутационной функции f_{k2} записывается в следующем виде:

$$\begin{cases} u_l = u_{cs} - f_{k1}u_d, \\ i_l = \frac{I_s^{-1}}{T_\theta p} u_l, \\ u_{cs} = \frac{c_s^{-1}}{T_\theta p} u_l, \\ i_{VT2} = (1 - f_{k1})i_l, \\ i_{VD1} = i_{DC} = f_{k1}i_l. \end{cases} \quad (5)$$

Системы уравнений (5) и (3) имеют схожую структуру и отличаются только выражениями для напряжения на индуктивности u_l и токов через полупроводниковые элементы преобразователя.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

На основе систем уравнений (3) и (5) можно составить выражения, которые описывают работу DC-DC преобразователя в двух рассмотренных режимах. Выделим ряд основных допущений, которые используются при построении математической модели:

1. Не учитывается работа преобразователя в режиме прерывистого тока.
2. Выполняется соотношение (4) между коммутационными функциями f_{k1} и f_{k2} .

3. Не учитывается мертвое время и падение напряжения на силовых ключах DC-DC преобразователя.
4. Пренебрегаем активным сопротивлением в цепи суперконденсатора.

Для разграничения и выбора режимов введем функцию f_m , которая принимает значение 1 в повышающем (boost) и -1 в понижающем режиме (buck). Тогда система уравнений для описания процессов в DC-DC преобразователе может быть записана в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_l = f_m(u_{cs} - f_{k1}u_d), \\ i_l = \frac{L_s^{-1}}{T_{\sigma P}} u_l, \\ u_{cs} = \frac{C_s^{-1}}{T_{\sigma P}} u_l, \\ i_{VT1} = f_{m2}f_{k1}i_l, \\ i_{VT2} = (1 - f_{k1})f_{m1}i_l, \\ i_{VD1} = f_{m1}f_{k1}i_l, \\ i_{VD2} = (1 - f_{k1})f_{m2}i_l, \\ i_{DC} = i_{VT1}, \end{array} \right. \quad (6)$$

где значения функций f_{m1} и f_{m2} определяются по следующим соотношениям:

$$\text{при } f_m = -1 \quad \left\{ \begin{array}{l} f_{m1} = 0 \\ f_{m2} = 1 \end{array} \right. \quad (\text{понижающий режим}),$$

$$\text{при } f_m = 1 \quad \left\{ \begin{array}{l} f_{m1} = 1 \\ f_{m2} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{повышающий режим}).$$

Дополнив эту систему уравнений выражениями для звена постоянного тока преобразователя частоты [4, 5, 7, 9] можно составить структурную схему DC-DC преобразователя с блоком суперконденсаторов, подключенного к звену постоянного тока преобразователя частоты (рис. 6).

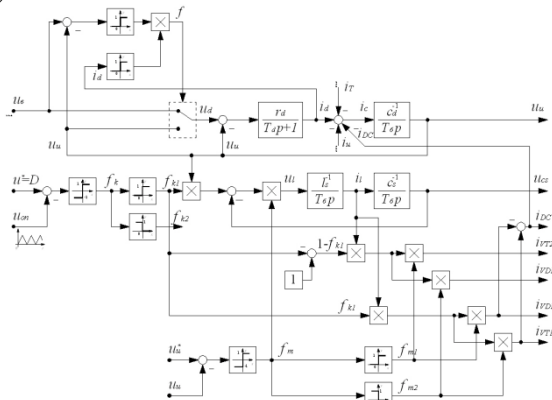


Рис. 6. Структурная схема DC-DC преобразователя, подключенного к звену постоянного тока преобразователя частоты

С точки зрения теории автоматического управления DC-DC преобразователь представляет собой нелинейный дискретный объект управления с внутренними обратными связями по напряжению в звене постоянного тока и напряжению суперконденсатора.

Нужно отметить, что на рис. 6 не показано формирование напряжения неуправляемого выпрямителя u_b , тока от автономного инвертора напряжения i_u и тока от тормозного сопротивления i_T .

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 7 представлена работа преобразователя постоянного тока в повышающем режиме. Для моделирования переходных процессов была построена двухконтурная замкнутая система подчиненного регулирования с настройкой контуров на модульный оптимум [6]. Система управления включает в себя внутренний контур регулирования тока на индуктивности и суперконденсаторе i_l и внешний контур регулирования напряжения в звене постоянного тока u_d . Задание на напряжение в звене постоянного тока было установлено на уровне 2,45 о.е., что соответствует 513 В. Начальное напряжение на суперконденсаторах было выбрано на уровне 0,55 о.е., что соответствует 115 В. Таким образом, относительная продолжительность включения D в этом режиме согласно выражению (2) составляет 0,22. Частота широтно-импульсной модуляции во время модельных экспериментов была выбрана равной 1кГц.

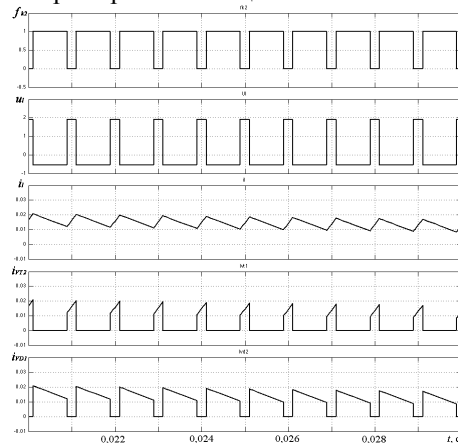


Рис. 7. Работа преобразователя в повышающем режиме

Нижняя граница напряжения для блока суперконденсаторов была установлена на уровне 100 В. То есть максимальный коэффициент передачи схемы DC-DC преобразователя в этом случае не превышает 1:6. Возвращаясь к расчетам, приведенным во введении, при использовании DC-DC преобразователя четыре суперконденсатора типа 200ПП – 18/0,31 в можно соединить параллельно, тем самым получив общую емкость порядка 3,4 Ф при рабочем диапазоне изменения

напряжения от 100 до 200 В. Исходя из разумного нижнего лимита в 100 В по напряжению, в схеме с DC-DC преобразователем неиспользуемая энергия суперконденсаторов составит всего 25 %. Конечно, существует возможность расширить диапазон напряжений за счет нижней границы, но как было показано выше, это приведет к увеличению мощности и соответственно стоимости DC-DC преобразователя.

На рис. 8 в качестве примера приведено сравнение переходных процессов для двух вариантов подключения суперконденсаторов к частотно-регулируемому электроприводу со скалярной системой управления.

Диаграмма работы электропривода включает в себя участки разгона и торможения, а также приложение активного момента статического сопротивления.

Для моделирования использовался двигатель RA100LBU3 мощностью 3 кВт, и в обоих случаях емкость суперконденсаторов составляла 0,21 Ф.

В том случае, когда используется прямое подключение суперконденсаторов (рис. 8а), во время тормозного режима работы электродвигателя постепенно происходит увеличение напряжения в звене постоянного тока. Несколько другой процесс заряда суперконденсаторов наблюдается при их подключении через DC-DC преобразователь (рис. 8б). В последнем случае напряжение в звене постоянного тока поддерживается постоянным за счет системы автоматического управления DC-DC преобразователем, а напряжение на низкой стороне постепенно увеличивается по мере заряда суперконденсаторов.

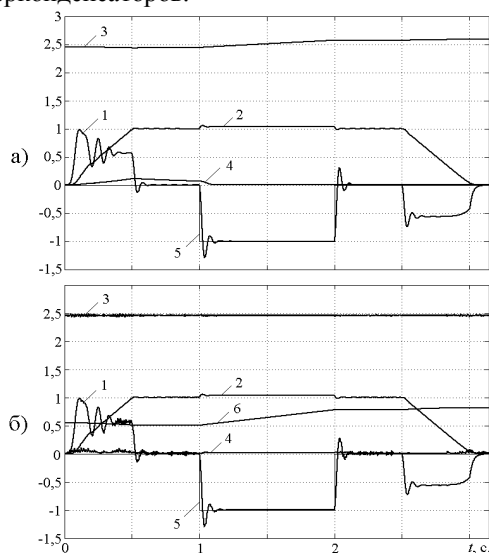


Рис. 8. Результаты моделирования частотно-регулируемого электропривода

(а – непосредственное включение СК в звено постоянного тока, б – подключение СК через DC-DC преобразователь)

1 – электромагнитный момент двигателя m , 2 – угловая скорость двигателя ω , 3 – напряжение в звене постоянного тока u_d , 4 – ток на выходе неуправляемого выпрямителя i_d , 5 – момент статической нагрузки m_c , 6 – напряжение на блоке суперконденсаторов, который подключен через DC-DC преобразователь u_{cs} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предыдущих работах [7-9] на основе модельных и экспериментальных исследований было показано, что использование суперконденсаторов в частотно-регулируемом электроприводе позволяет существенно снизить общее энергопотребление электропривода. Однако выбор между различными вариантами подключения суперконденсаторов оказывается непростой задачей и требует дальнейших исследований и оценки технико-экономической эффективности. Предварительно можно сделать вывод, что использование DC-DC преобразователя позволяет повысить эффективность использования емкости дорогостоящих суперконденсаторов и соответственно на 15-30% снизить их стоимость, но затраты на DC-DC преобразователь с системой автоматического управления могут перекрыть эту экономию.

Разработанная математическая модель DC-DC преобразователя в составе частотно-регулируемого электропривода может использоваться для анализа переходных процессов в преобразователе с учетом его дискретности, а также для синтеза регуляторов системы автоматического управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Marian K. Kazimierzczuk. Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters. Wright State University, Dayton, Ohio, USA, 2008, 808 p.
2. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков // Под ред. И.Я. Браславского. - М.: Издательский центр "Академия", 2004. - 256 с.
3. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Р.Т. Шрейнера. Новоуральск: Изд-во НТИ, 2001.
4. Поляков В.Н. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов переменного тока / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер; под ред. Р.Т. Шрейнера. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», 2012.
5. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Костылев А.В., Плотников Ю.В., Поляков В.Н., Эрман Г.З. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод с емкостным накопителем энергии. Электротехника № 9, 2012. 30-35 с.
6. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов: учеб. пособие / Р.Т. Шрейнер. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008. 279 с.
7. Браславский И.Я., Поляков В.Н., Ишматов З.Ш., Плотников Ю.В., Костылев А.В., Эрман Г.З. Математическое моделирование частотно-регулируемого электропривода с емкостными накопителями энергии. Труды международной пятнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». Екатеринбург, 2012.
8. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Плотников Ю.В., Полуниин Ф.А. Математические модели для оценки эффективности применения частотно-регулируемого электропривода с суперконденсаторами в крановых механизмах. Электротехника № 9, 2014. 24-29 с.
9. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Костылев А.В., Плотников Ю.В., Поляков В.Н., Эрман Г.З. Использование емкостных накопителей энергии для улучшения эксплуатационных характеристик электроприводов. Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012. 46-50 с.