

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 62-83:621

А. С. Коваль, А. Г. Кондратенко

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА СУПЕРКОНДЕНСАТОРА НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ НА БАЗЕ ДВУХУРОВНЕГО ПОВЫШАЮЩЕ-ПОНИЖАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ DC/DC ДЛЯ ПРИВОДА ЛИФТА

UDC 62-83:621

A. S. Koval, A. G. Kondratenko

ON CALCULATING A SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE DEVICE BASED ON THE TWO-LEVEL BUCK-BOOST DC/DC CONVERTER FOR ELEVATOR DRIVES

Аннотация

Представлена методика расчета емкости суперконденсатора накопителя на базе преобразователя DC/DC, необходимой для накопления и использования рекуперированной энергии в безредукторных приводах лифтов. Используемая методика расчета позволяет также определить промежуточное рабочее значение напряжения конденсатора или величину емкости конденсатора, позволяющих сохранить работоспособность электропривода при кратковременных нарушениях питания.

Ключевые слова:

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

Abstract

The paper presents a method for calculating the capacity of a supercapacitor energy storage device on the basis of a buck-boost DC-DC converter needed to accumulate and use recuperative energy in gearless elevator drives. The calculation method used also makes it possible to determine an intermediate operating value of the capacitor voltage or a value of the capacitor capacitance, enabling the drive to remain operational in case of short-term power failures.

Keywords:

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

Частотно-регулируемые электроприводы переменного тока имеют широкое коммерческое использование. Для ряда механизмов они позволяют существенно повысить их энергоэффективность, что достигается, в том числе, за счет исключения механических редукторных устройств при применении низкооборотных электродвигателей и ис-

пользования энергии возможных генераторных режимов работы двигателя при меньших потерях в силовом канале собственно электропривода. Например, к таким механизмам можно отнести лифты. Особенностью приводов лифтов является работа с меняющейся нагрузкой, что обеспечивает работу привода как в двигательных режимах, так и в ге-

нераторных (рекуперативное торможение) [1]. При применении лифтовых безредукторных лебедок возможно накопление рекуперированной энергии в конденсаторных накопителях энергии на суперконденсаторах и использование её для повышения энергоэффективности электрооборудования всего лифта. Так как загрузка кабины и этажность перемещения кабины лифта – это случайные величины, то возможный режим работы лифта, при котором рекуперированная энергия максимальна и на который может рассчитываться максимальная ёмкость накопителя, – это перемещение пустой кабины с первого этажа на последний либо спуск кабины при максимальной загрузке с последнего этажа на первый. При возможном последовательном чередовании этих режимов для обеспечения работоспособности накопителя в схеме такого привода сохраняется тормозной резистор. Энергия, ак-

кумулируемая в конденсаторном накопителе, может использоваться в дальнейшем и для сглаживания кратковременных перерывов по напряжению в питании инвертора (микроотключения питания длительностью от долей секунды до единиц секунд) или падений напряжения питающей сети. Таким образом, целесообразен расчет емкости емкостного накопителя для лифтов, обеспечивающий не только накопление максимально возможной за поездку рекуперированной энергии с последующим использованием её приводом лифта, но и позволяющей сохранить работоспособность привода лифта при микроотключениях или падениях напряжения питающей сети. Блок-схема частотно-регулируемого электропривода лифта с емкостным накопителем энергии (на базе суперконденсатора) с использованием преобразователя постоянного тока ДС/ДС представлена на рис. 1 [2].

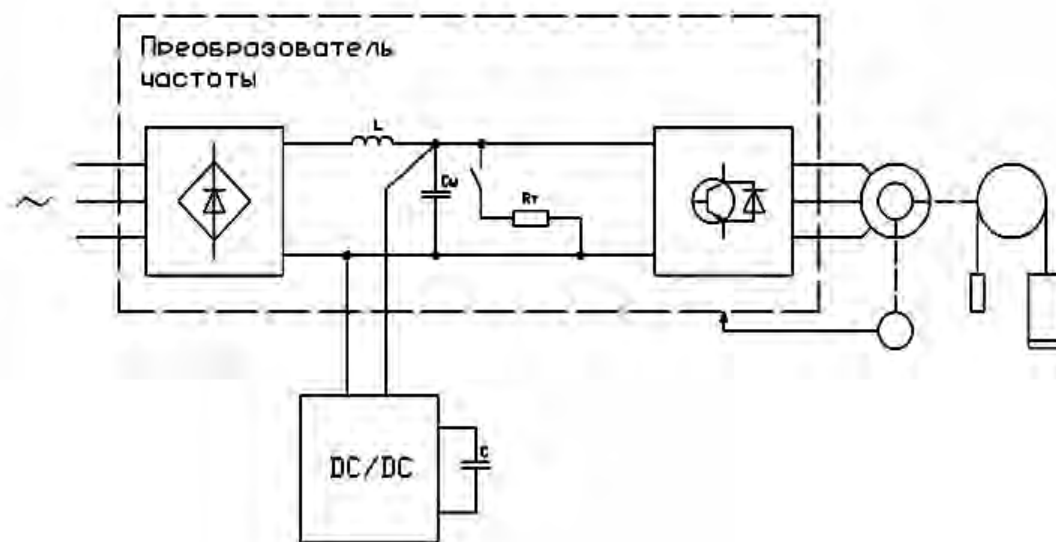


Рис. 1. Блок-схема электропривода лифта с преобразователем ДС/ДС и емкостным накопителем

Возможные графики изменения напряжения на шине постоянного тока звена постоянного тока преобразователя частоты, а также напряжения на конденсаторе и тока заряда-разряда кон-

денсатора накопителя на базе преобразователя постоянного тока ДС/ДС при энергообмене между сетью, двигателем и конденсатором накопителя показаны на рис. 2.

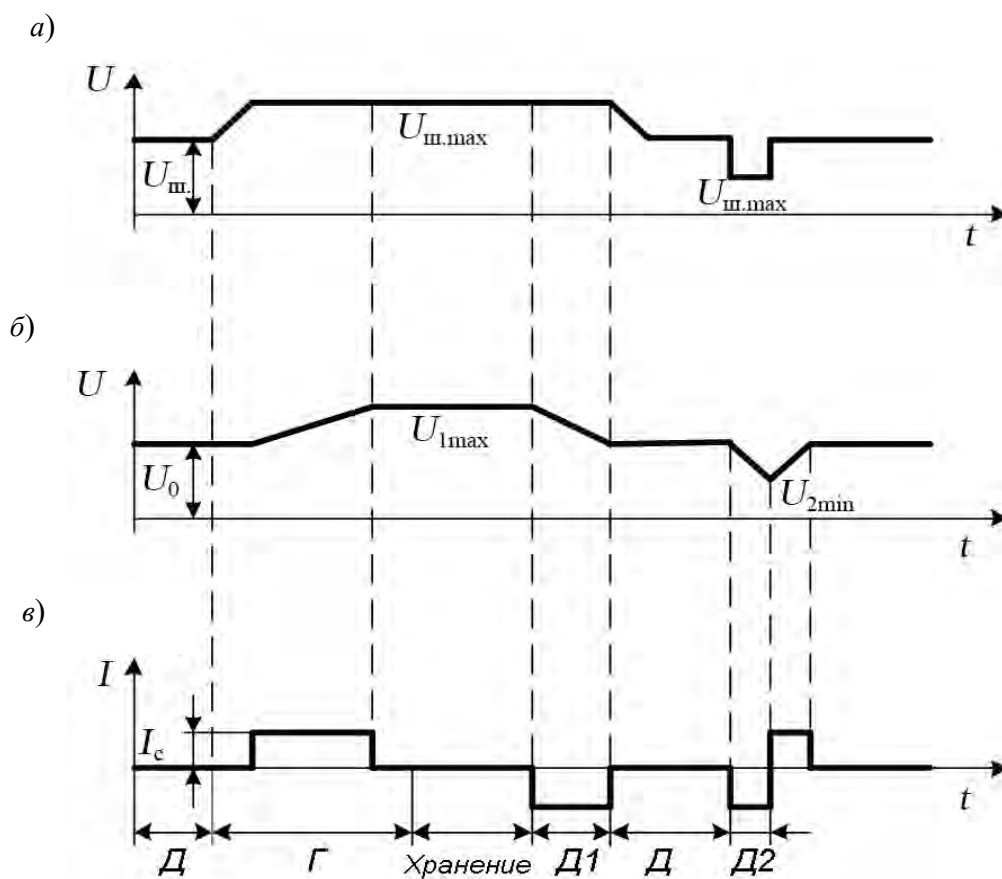


Рис. 2. Графики изменения: а – напряжения на шине постоянного тока преобразователя частоты; б – напряжения на конденсаторе накопителя; в – тока заряда-разряда конденсатора накопителя

Работа накопителя на базе ДС/ДС преобразователя осуществляется схемой управления [2] на основе анализа напряжений на шине постоянного тока преобразователя частоты и тока суперконденсатора накопителя. При переходе от двигательного режима работы двигателя привода лифта в генераторный (участок $Д$, рис. 2) напряжение на шине постоянного тока определяется значением $U_{ш.}$, а напряжение на конденсаторе – U_0 . В рекуперативном режиме работы (участок $Г$, см. рис. 2) напряжение на шине увеличивается до значения $U_{ш.маx}$. Режим накопления рекуперированной энергии начинается при достижении напряжением на шине значения $U_{ш.маx}$. Происходит заряд конденсатора до напряжения на конденсаторе $U_{1маx}$. (окончание режима рекуперации),

и конденсатор сохраняет это напряжение (режим «хранение» на рис. 2) до возникновения следующего двигательного режима работы (участок $Д1$, см. рис. 2), при котором энергия конденсатора используется двигателем привода. Если напряжение конденсатора накопителя достигло значения $U_{1маx}$, а режим рекуперации не закончился, то система управления преобразователя частоты обеспечивает дальнейший сброс энергии рекуперации на тормозной резистор. В двигательном режиме (участок $Д1$, см. рис. 2), следующем за рекуперативным, напряжение конденсатора при его разряде опять принимает значение U_0 , и накопитель готов к следующему рекуперативному режиму. При возникновении кратковременного падения напряжения питания (участок $Д2$,

см. рис. 2) за счет энергии конденсатора (разряд от напряжения U_0 до напряжения $U_{2\min}$) обеспечивается сохранение работы привода. При этом конденсатор C разряжается до минимально возможного напряжения $U_{2\min}$ при работе накопителя. С восстановлением питания конденсатор накопителя заряжается опять до напряжения U_0 и готов к следующему возможному режиму рекуперативного торможения. Таким образом, напряжение на конденсаторе накопителя имеет значение U_0 при работе в двигательном режиме и уменьшается до $U_{2\min}$ (режим кратковременного падения напряжения питания) либо растет до $U_{1\max}$ (режим рекуперативного торможения).

При выборе емкости суперконденсатора емкостного накопителя необходимо определить номинальное напряжение конденсаторного модуля $U_{ном}$ и номинальную емкость модуля C . Конденсатор накопителя начинает заряжаться, когда напряжение на шине постоянного тока в режиме рекуперации достигает максимума $U_{ш.макс}$. Соответственно, номинальное напряжение конденсаторного модуля $U_{ном}$:

$$U_{ш.макс} \leq U_{ном}.$$

Так как накопитель, предполагается, должен обеспечивать работу привода при микроотключениях или кратковременных падениях сетевого напряжения питания длительностью t_0 (доли секунд и секунды), то, при использовании энергии рекуперации в последующем двигательном режиме, он должен разряжаться не до $U_{2\min}$, а до напряжения U_0 , большего $U_{2\min}$, сохраняя часть энергии, необходимую для питания двигателя в течение этого времени t_0 . Чем больше напряжение U_0 , тем обеспечивается большее время, при котором сохраняется работоспособность привода. Энергия E_1 , накапливаемая в накопителе (суперконденсатор – линейный элемент) в режиме рекуперации и используемая в

последующем двигательном режиме, может быть определена [3]:

$$E_1 = \eta \int_{t_1}^{t_2} P_0 dt = \frac{C_0}{2} (U_{1\max}^2 - U_0^2), \quad (1)$$

где P_0 – мощность в цепи постоянного тока преобразователя частоты при работе двигателя привода лифта в рекуперативном режиме (определяется механической работой на валу двигателя совершаемой кабиной с грузом в режиме рекуперативного торможения с учетом общего КПД при передаче энергии в цепь постоянного тока преобразователя частоты); U_0 – начальное значение напряжения конденсатора; $U_{1\max}$ – максимальное значение напряжения при заряде суперконденсатора; C_0 – емкость суперконденсатора; t_1, t_2 – время начала режима торможения и его окончания соответственно.

Для определения напряжения U_0 , обеспечивающего энергию конденсатора E_2 необходимую для сохранения непрерывной работы привода при микроотключении или падении сетевого напряжения питания, необходимо выполнение следующего условия:

$$E_2 = \frac{1}{\eta_1} \int_{t_3}^{t_4} P_1 dt = \frac{C}{2} (U_0^2 - U_{2\min}^2). \quad (2)$$

где E_2 – энергия в цепи постоянного тока преобразователя частоты, необходимая для обеспечения работы двигателя в течение времени микроотключения или падения сетевого напряжения; P_1 – мощность, отдаваемая конденсатором C в цепь постоянного тока в промежутке времени t_3, t_4 (определяют длительность нарушения питания); η_1 – КПД преобразователя постоянного тока ДС/ДС.

Используя выражения (1) и (2), можно определить напряжение U_0 :

$$U_0 = \sqrt{\frac{E_1 \cdot U_{1\max}^2 + E_2 \cdot U_{2\min}^2}{E_1 + E_2}}$$

Это напряжение определяет максимальное время нарушения питания, при котором обеспечивается работа двигателя от накопителя при заданной емкости C . Соответственно, выражение (2) можно переписать для этого случая в следующем виде:

$$P_1 \cdot t_{\max} = \frac{1}{2} C \cdot (U_0^2 - U_{2\min}^2) \cdot \eta_1$$

Откуда имеем

$$t_{\max} = \frac{C \cdot (U_0^2 - U_{2\min}^2) \cdot \eta_1}{2 \cdot P_1}$$

Таким образом, можно рассчитать емкость накопителя, чтобы он обеспе-

чивал движение кабины до ближайшего этажа при микроотключении или падении сетевого напряжения. В цепи постоянного тока преобразователя частоты присутствует также емкость фильтра. Величина этой емкости и, как следствие, энергия, запасаемая в ней, мало влияют на время работы двигателя при нарушении питания.

Рассмотрим пример расчета емкости накопителя. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1. Для расчета значения энергий E_1 и E_2 в цепи постоянного тока преобразователя частоты определены экспериментально для безредукторного привода лифта грузоподъемностью 630 кг и скоростью движения 1 м/с при перемещении пустой кабины с первого этажа на девятый (номинальная мощность двигателя 5954 Вт).

Табл. 1. Исходные данные для расчета

$U_{1\max}$, В	$U_{2\min}$, В	E_1 , Дж	E_2 , Дж	η
750	600	2384	5678	0,9

Напряжение

$$U_0 = \sqrt{\frac{2384 \cdot 750^2 + 5678 \cdot 600^2}{2384 + 5678}} = 648 \text{ В.}$$

Емкость конденсатора

$$C = \frac{2 \cdot 2384}{750^2 - 600^2} = 0,033418 \text{ Ф.}$$

Энергия, запасаемая в режиме рекуперативного торможения (1),

$$E_1 = \frac{0,033418}{2} \cdot (750^2 - 648^2) = 2383,9 \text{ Дж.}$$

Энергия, отдаваемая накопителем в двигательном режиме при микроотключении (2),

$$E_2 = \frac{0,033418}{2} \cdot (648^2 - 600^2) = 999,6 \text{ Дж.}$$

Полная энергия, запасаемая в накопителе,

$$E = \frac{0,033418}{2} \cdot (750^2 - 600^2) = 3383,5 \text{ Дж.}$$

Возможное время нарушения питания, обеспечиваемое энергией накопителя при расчетных параметрах,

$$t = \frac{0,033418 \cdot (648^2 - 600^2)}{2 \cdot 5111} \cdot 0,9 = 0,176 \text{ с.}$$

Работа ДС/ДС преобразователя в рассматриваемых режимах с рассчитанной емкостью суперконденсатора может быть смоделирована в соответствии с моделью [1]. При расчетных параметрах модель имеет вид (рис. 3).

В модели в качестве энергетического эквивалента двигателя привода

лифта использована емкость фильтра шины постоянного тока преобразователя частоты. Величина этой емкости равна емкости накопителя, обеспечивая обмен энергией (при не учете потерь в преобразователе ДС/ДС) на уровне, соответствующем потребляемой и рекуперированной мощности, используемой при расчетах. Графики работы накопителя, полученные в результате моделирования, представлены на рис. 4–6.

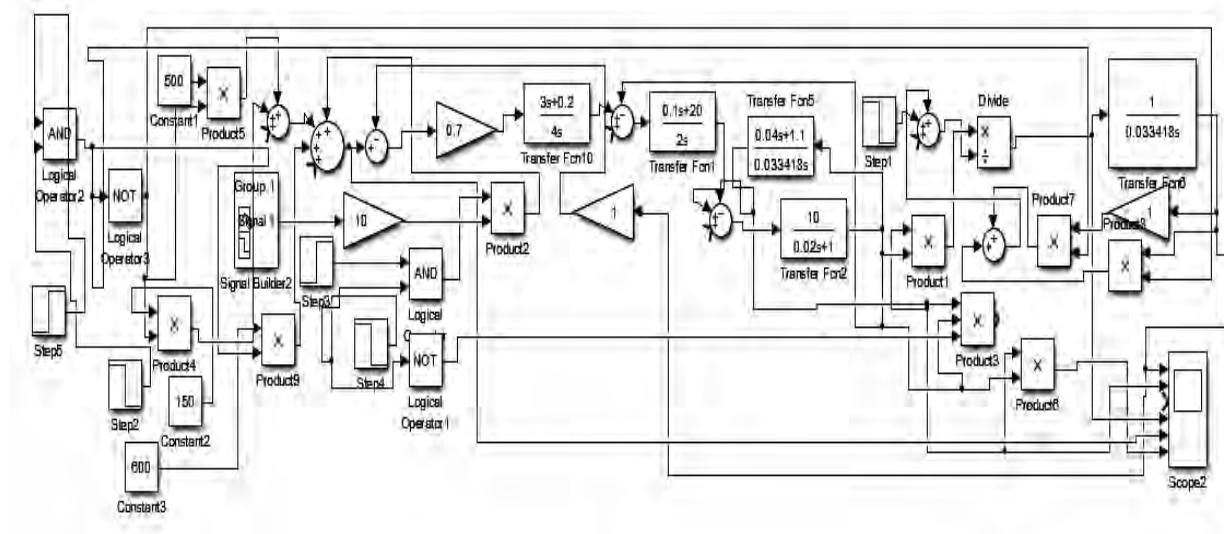


Рис. 3. Модель ДС/ДС преобразователя для емкостного накопителя

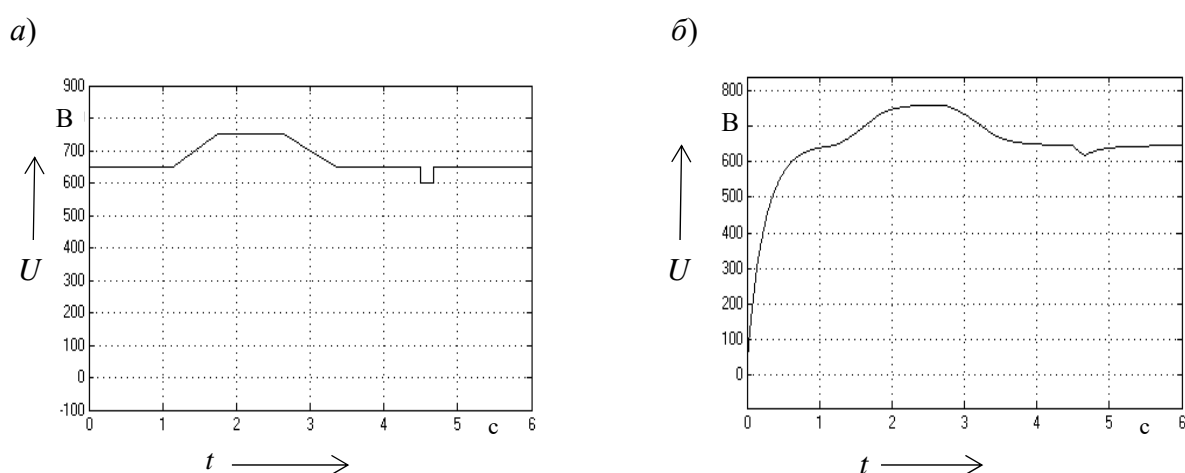


Рис. 4. Задаваемое напряжение на шине постоянного тока (а) и напряжение на конденсаторе накопителя (б)

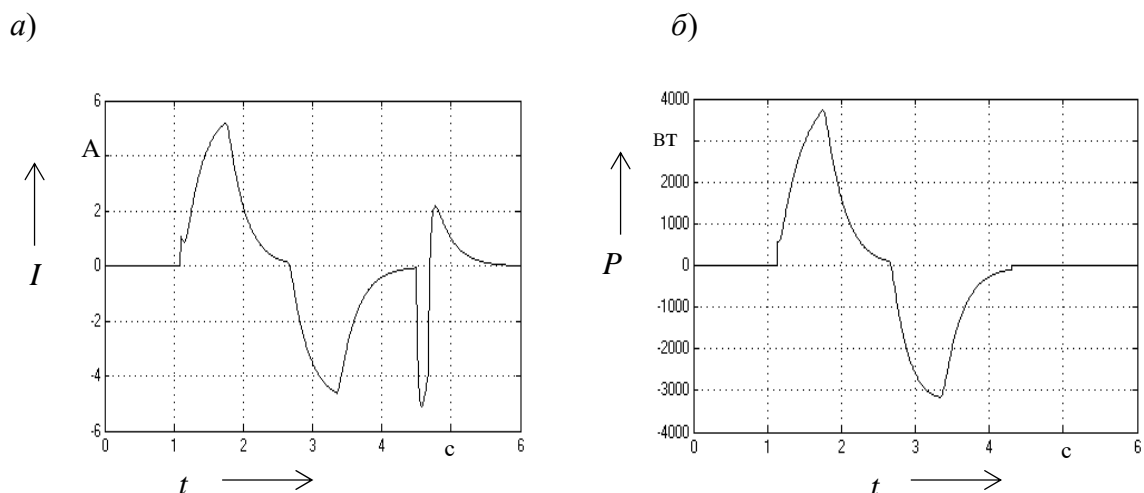


Рис. 5. Ток конденсатора накопителя (а) и мощность накопителя в рекуперативном и двигательном режимах работы (б)

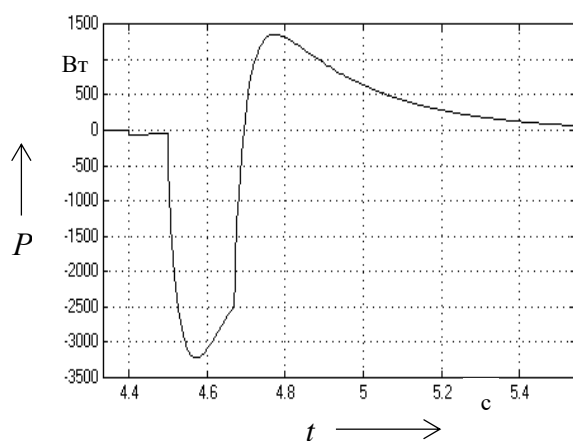


Рис. 6. Мощность, отдаваемая накопителем в режиме микроотключения

Используя графики на рис. 5 и 6, можно определить значения энергии, накапливаемой и отдаваемой накопителем. Энергия, накапливаемая в рекуперативном режиме и отдаваемая в следующем двигательном режиме, равна 2484,8 Дж. Энергия, используемая в режиме нарушения питания (при диапазоне изменения напряжения конденсатора накопителя от 646 до 619 В), равна 418 Дж.

Таким образом, используемая методика расчета емкости накопителя на базе преобразователя ДС/ДС позволяет определить емкость суперконденсатора,

необходимую для накопления и последующего использования рекуперированной энергии в безредукторных приводах лифтов в режимах работы, в которых двигатель работает генератором. Максимальное значение этой энергии в общем случае соответствует максимальному времени работы двигателя при номинальной мощности в рекуперативном режиме. Это поездка с первого на максимальный этаж пустой кабины или, наоборот, спуск грузовой кабины с максимального этажа на первый.

Используемая методика расчета позволяет также определить промежу-

точное значение напряжения конденсатора и величину емкости конденсатора, позволяющих сохранить работоспособность электропривода при кратковременных нарушениях питания и микроотключениях питающей сети, и может быть использована в расчетах для обеспечения в этом случае движения кабины лифта в пределах межэтажного расстояния до ближайшего этажа.

Выводы

Используемая методика расчета емкости суперконденсатора накопителя на базе повышающе-понижающего пре-

образователя постоянного тока ДС/ДС позволяет определить емкость суперконденсатора, необходимую для накопления и последующего использования рекуперированной энергии в безредукторных приводах лифтов. Возможно также определение промежуточного значения напряжения конденсатора или величины его емкости, позволяющих сохранить работоспособность электропривода при микроотключениях или кратковременных нарушениях питающей сети и, в последнем случае, для обеспечения движения кабины лифта в пределах межэтажного расстояния до ближайшего этажа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коваль, А. С.** Моделирование двигательных и генераторных режимов работы безредукторного электропривода пассажирского лифта на базе СДПМ / А. С. Коваль, В. А. Яшин, А. И. Артеменко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 1. – С. 86–93.
2. **Коваль, А. С.** Модель в среде МАТЛАБ накопителя энергии на базе суперконденсатора и двухуровневого повышающе-понижающего преобразователя ДС/ДС / А. С. Коваль, А. Г. Кондратенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 2. – С. 106–113.
3. **Поливанов, К. М.** Теоретические основы электротехники / К. М. Поливанов. – Москва: Энергия, 1972. – Т. 1. – 240 с.

Статья сдана в редакцию 12 октября 2020 года

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

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