

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 62-83:621

А. С. Коваль, А. Г. Кондратенко

К ВОПРОСУ ОБ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИИ В ДВИГАТЕЛЬНЫХ И РЕГУЛИРУЕМЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ В БЕЗРЕДУКТОРНОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ЛИФТОВ

UDC 62-83:621

A. S. Koval, A. G. Kondratenko

ON ENERGY CONSUMPTION UNDER MOTORING AND REGULATED MODES OF OPERATION IN GEARLESS ELEVATOR ELECTRIC DRIVES

Аннотация

На основе модели электропривода лифта с синхронным двигателем с постоянными магнитами (СДПМ) с поверхностным расположением магнитов на роторе выполнен расчет энергопотребления двигателем при номинальной скорости перемещения кабины и скорости кабины, увеличенной на 20 %.

Ключевые слова:

синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ), безредукторный электропривод лифта, регулирование скорости, движущий момент, двигательный режим работы, режим рекуперативного торможения, энергия, потребляемая и отдаваемая СДПМ.

Abstract

Based on the model of elevator electric drive having a permanent magnet synchronous motor (PMSM) with magnets mounted on the surface of the rotor, the power consumed by the motor has been calculated at the nominal speed of elevator car movement and when its speed is increased by 20 %.

Keywords:

permanent magnet synchronous motor (PMSM), gearless elevator electric drive, speed control, driving torque, motoring mode of operation, regenerative braking mode, energy consumed and supplied by PMSM.

Без использования лифтов сегодня невозможно представить возведение новых высотных жилых зданий в городских новостройках и модернизацию существующего жилого фонда. Во всех современных пассажирских и грузовых лифтах частотно-регулируемый ЭП переменного тока – основной тип регулируемого привода [1], в том числе и с синхронными двигателями с постоянными магнитами (СДПМ) в безредукторных лебедках. Так как работа лифтов

связана с постоянно меняющейся нагрузкой кабины, то создаются условия работы привода как в двигательных режимах, так и в генераторных с возвратом энергии в сеть. Последние режимы позволяют экономить потребляемую энергию, а в лифтах, работающих в жилых зданиях, порядка 30 % энергопотребления связано с работой электропривода. Если в редукторных приводах лифтов с учетом КПД редуктора использование генераторных режимов ма-



лоэфективно, то в безредукторных регулируемых приводах возвращаемая энергия при рекуперации существенно возрастает.

Переход из двигательного режима в рекуперативное торможение и обратно в безредукторном электроприводе лифтов определяется скоростью движения кабины лифта [2]. Так, при пуске в процессе подъема пустой кабины на заданный этаж в безредукторном приводе лифта на базе СДПМ рекуперативный режим возникает и существует в дальнейшем при достижении скорости в процессе пуска, большей $0,6\Omega_{ном}$. До этой скорости двигатель работает в двигательном режиме. Этот порог по

скорости, при котором происходит переход из одного режима в другой, может быть использован при моделировании работы, например, безредукторных электроприводов лифтов с СДПМ для анализа потребляемой и отдаваемой энергии в сеть.

Для моделирования двигательных и генераторных режимов работы безредукторного электропривода пассажирского лифта с СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе использована одноступенчатая модель электропривода пассажирского лифта [3] с двигателем, параметры которого приведены в табл. 1.

Табл. 1. Параметры СДПМ, использованные при моделировании

J , кгм	$M_{ном}$, Н·м	$I_{ном}$, А	$P_{ном}$, Вт	$\Psi_{ном}$, Вб	$\Omega_{ном}$, с ⁻¹
132	710	12,4	3400	4,87	4,88

Данная модель электропривода лифта с перестраиваемой структурой позволяет реализовать как двигательный, так и генераторный режим работы лифта. Переключение при моделировании из двигательного режима работы в рекуперативный и обратно происходит в переходных режимах при скорости, превышающей либо меньше $0,6\Omega_{ном}$. Модель [3] дополнена блоками для расчета мощности на валу двигателя при работе в двигательном режиме и мощности, передаваемой валу двигателя грузом в кабине лифта при работе в рекуперативном режиме работы. Графики потребляемой мощности двигателем, мощности, передаваемой на вал двигателя нагрузкой в режиме рекуперативного торможения, тахограмма изменения его скорости и момента при переходе из двигательного режима работы в режим рекуперативного торможения и обратно при нагрузке, характерной для подъема незагруженной кабины лифта, представлены на рис. 1–4. На рис. 1 и 2

показаны эти графики при «короткой» поездке (подъем на три этажа), а на рис. 3 и 4 – при «длинной» (движение вверх на пять этажей). Скорость перемещения кабины номинальная.

На графике (см. рис. 1, а) показаны полученные при моделировании значения развиваемой мощности на валу двигателя при работе в двигательном режиме – моменты времени с 0 до 4,4 с и с 11,2 до 13,2 с; мощности, передаваемой на вал двигателя грузом кабины в режиме рекуперативного торможения, – моменты времени с 4,4 до 11,2 с.

Для «короткой» поездки «вверх» в табл. 2 и 3 представлены полученные при обработке графиков (см. рис. 1 и 2) итоговые расчетные значения энергии, потребляемой при работе в двигательном режиме работы и в режиме рекуперативного торможения, а также средней мощности за поездку. Для оценки энергии, возвращаемой двигателем в рекуперативном режиме, учитывались только потери в меди статора СДПМ [4].



Аналогичные итоговые расчетные значения энергии и средней мощности, полученные при обработке графиков

(см. рис. 3 и 4), но для «длинной» поездки «вверх», представлены в табл. 4 и 5.

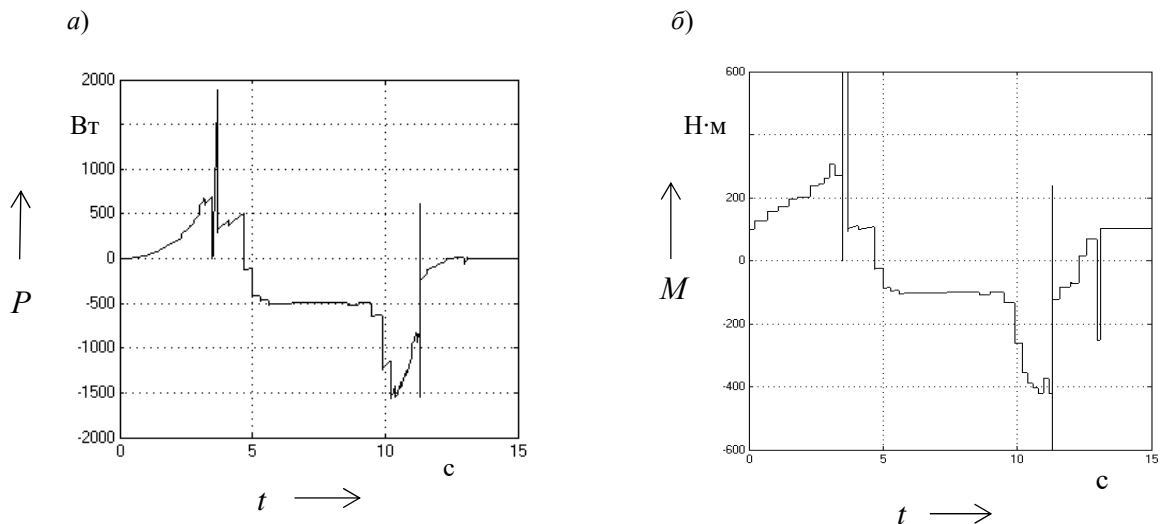


Рис. 1. Расчетные графики мощности (а) и момента (б) при «короткой» поездке

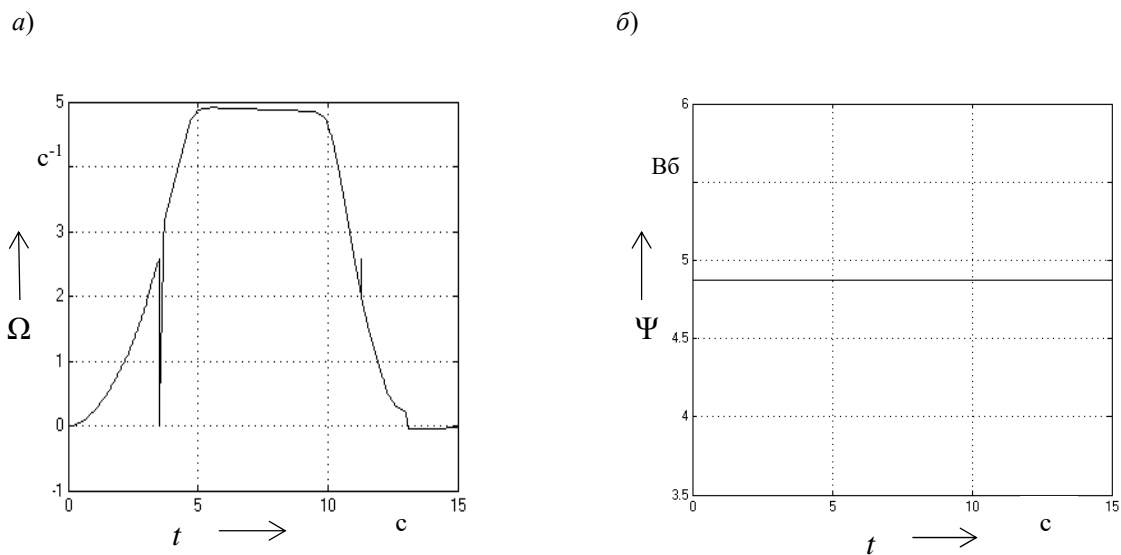


Рис. 2. Графики: тахограммы скорости (а) и потока двигателя (б)



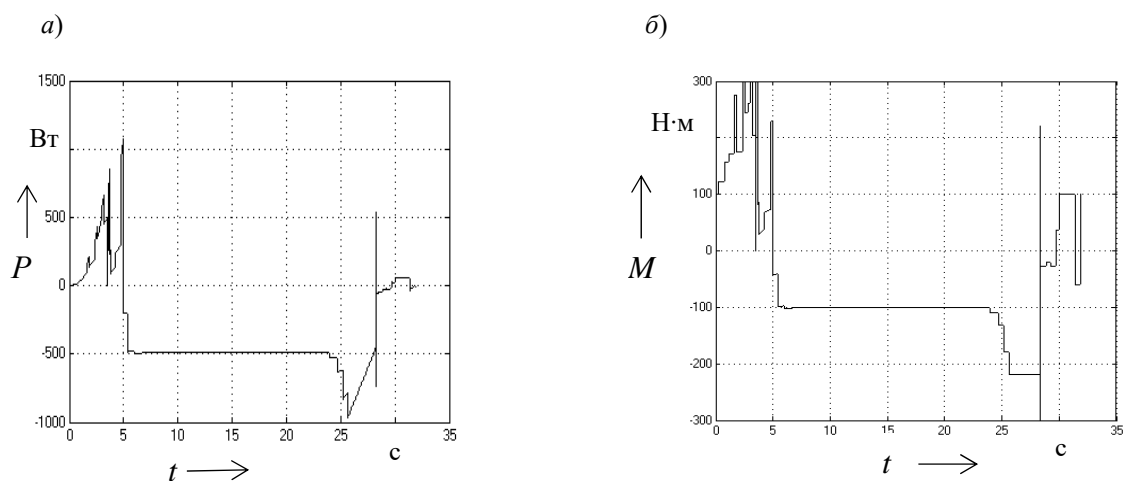


Рис. 3. Расчетные графики мощности (а) и момента (б) при «длинной» поездке

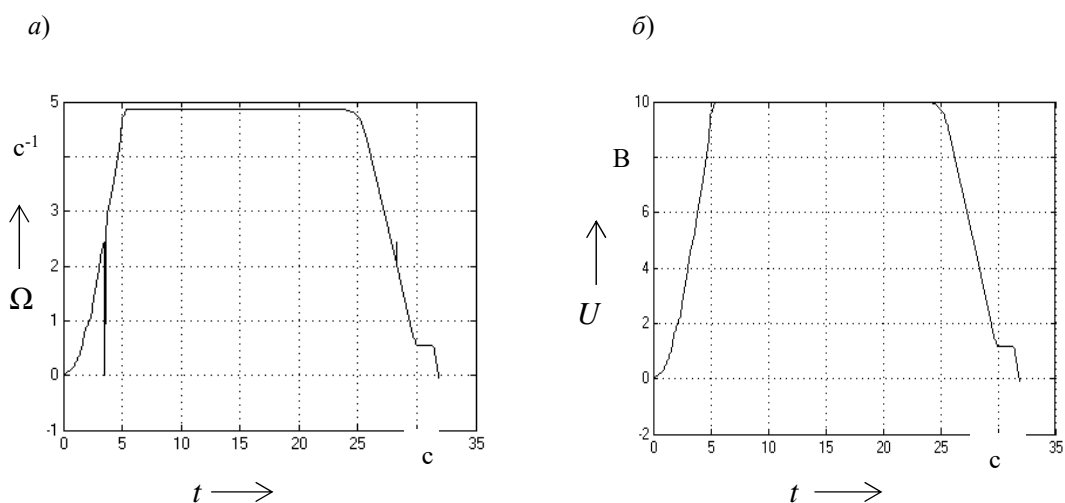


Рис. 4. Графики при «длинной» поездке: тахограмма скорости двигателя (а); тахограмма задания скорости (б)

Табл. 2. Энергия и средняя мощность на валу двигателя при «короткой» поездке с $\Omega_{ном}$

Пуск и торможение (двигательный режим)	Пуск, движение кабины с $\Omega_{ном}$, торможение (рекуперат. режим)	Энергия за весь цикл	Средняя мощность за весь цикл
818,2 Дж	-3422,4 Дж	-2604,2 Дж	-197,3 Вт



Табл. 3. Энергия, потребляемая, отдаваемая двигателем (с учетом потерь в двигателе), и средняя мощность при «короткой» поездке с $\Omega_{ном}$

Пуск и торможение (двигательный режим)	Пуск, движение кабины с $\Omega_{ном}$, торможение (рекуперат. режим)	Энергия за весь цикл	Средняя мощность за весь цикл
818,2 Дж	-3377,8 Дж	-2559,6 Дж	-193,9 Вт

Табл. 4. Энергия и средняя мощность на валу двигателя при «длинной» поездке с $\Omega_{ном}$

Пуск и торможение (двигательный режим)	Пуск, движение кабины с $\Omega_{ном}$, торможение (рекуперат. режим)	Энергия за весь цикл	Средняя мощность за весь цикл
836,6 Дж	-11698,85 Дж	-10862,25 Дж	-339,4 Вт

Табл. 5. Энергия, потребляемая, отдаваемая двигателем (с учетом потерь в двигателе), и средняя мощность при «длинной» поездке с $\Omega_{ном}$

Пуск и торможение (двигательный режим)	Пуск, движение кабины с $\Omega_{ном}$, торможение (рекуперат. режим)	Энергия за весь цикл	Средняя мощность за весь цикл
836,6 Дж	-11415,45 Дж	-10578,85 Дж	-330,6 Вт

Энергия, сообщаемая валу двигателя от перемещения груза в рекуперативном режиме, зависит и от скорости его перемещения. Увеличение номинальной скорости используемого при моделировании СДПМ в режиме рекуперативного торможения возможно за счет ослабления потока двигателя [4]. В приводах лифтов это обеспечивает увеличение номинальной скорости перемещения кабины лифта в режиме рекуперативного торможения. Применяемая модель позволяет моделировать такой режим работы при неуравновешенной нагрузке, характерной для подъема незагруженной кабины лифта, например, при увеличении скорости двигателя на 20 %, что соответствует работе используемого двигателя с перегрузкой по току не выше допустимой (ток $I_{осл.пот}$ в табл. 1). Для этого режима работы при «короткой» поездке соответствующие графики представлены на рис. 5 и 6, а итоговые расчетные значения энергии

и средней мощности – в табл. 6 и 7. Для «длинной» поездки аналогичные графики приведены на рис. 7 и 8, а итоговые расчетные значения энергии и средней мощности – в табл. 8 и 9.

При «короткой» поездке увеличение номинальной скорости движения кабины в рекуперативном режиме работы позволяет увеличить расчетную энергию, сообщаемую валу двигателя грузом за поездку, на 40 %, но из-за существенно возросших потерь в СДПМ при реализации ослабления потока СДПМ это преимущество практически не используется и расчетная средняя мощность, отдаваемая СДПМ в сеть, уменьшается на 5 % по сравнению с поездкой с неизменной номинальной скоростью движения. В «длинной» поездке (см. рис. 7 и 8) двигатель привода лифта является генератором средней мощности, на 13 % большей по сравнению с поездкой при номинальной скорости.



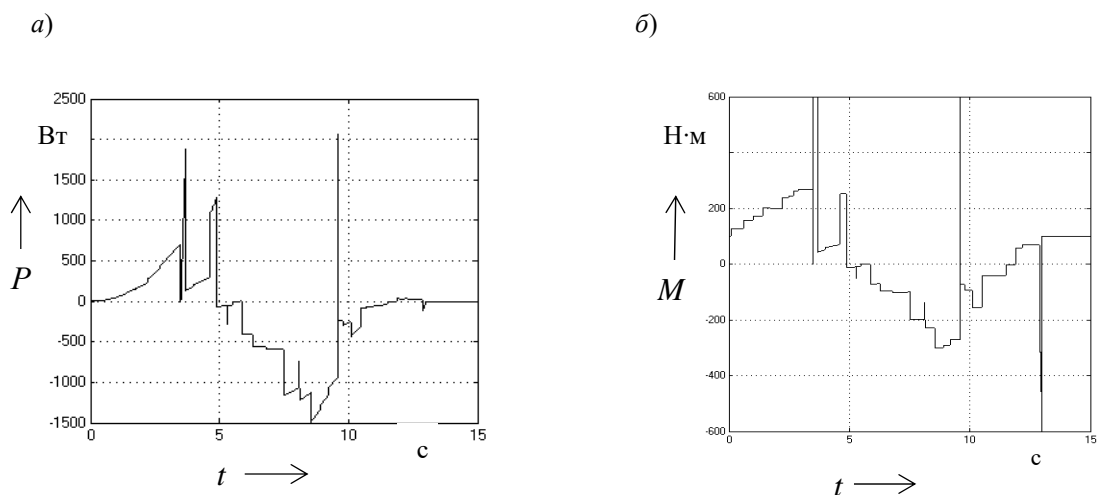


Рис. 5. Расчетные графики мощности (а) и момента (б) при «короткой» поездке с $\Omega = 1,2\Omega_{ном}$

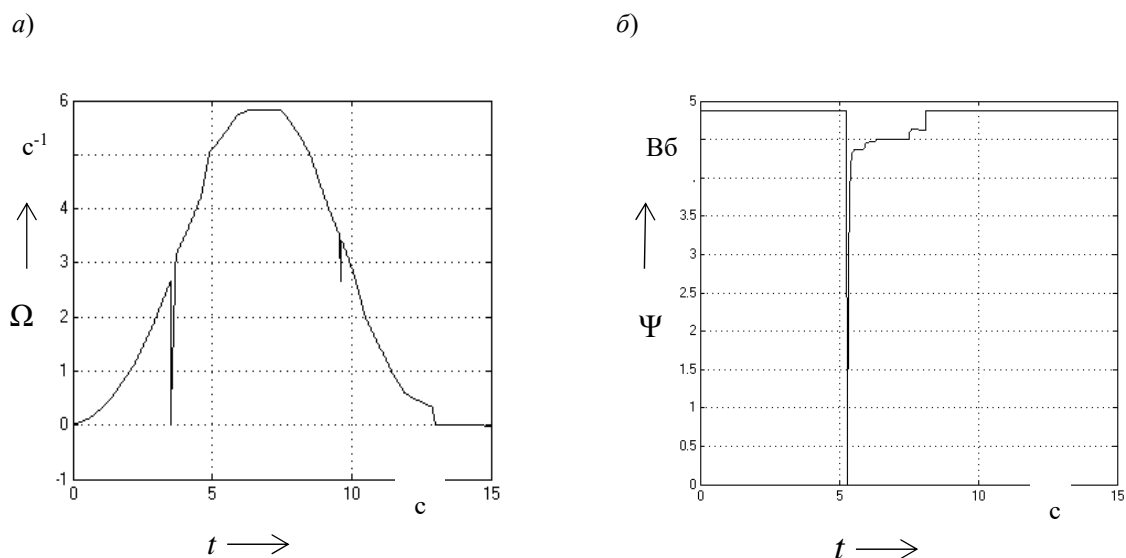


Рис. 6. Графики при «короткой» поездке с $\Omega = 1,2\Omega_{ном}$: тахограммы скорости (а) и потока двигателя (б)

Табл. 6. Энергия и средняя мощность на валу двигателя при «короткой» поездке и $\Omega = 1,2\Omega_{ном}$

Пуск и торможение (двигательный режим)	Пуск, движение кабины с $1,2\Omega_{ном}$, торможение (рекуперат. режим)	Энергия за весь цикл	Средняя мощность за весь цикл
1104,9 Дж	-4706,5 Дж	-3601,6 Дж	-272,8 Вт

Табл. 7. Энергия, потребляемая и отдаваемая двигателем с учетом потерь в двигателе, и средняя мощность при «короткой» поездке с $\Omega = 1,2\Omega_{ном}$

Пуск и торможение (двигательный режим)	Пуск, движение кабины с $1,2\Omega_{ном}$, торможение (рекуперат. режим)	Энергия за весь подъем	Средняя мощность
1104,9 ж	-4641,1 Дж	-3536,2 Дж	-267,9 Вт



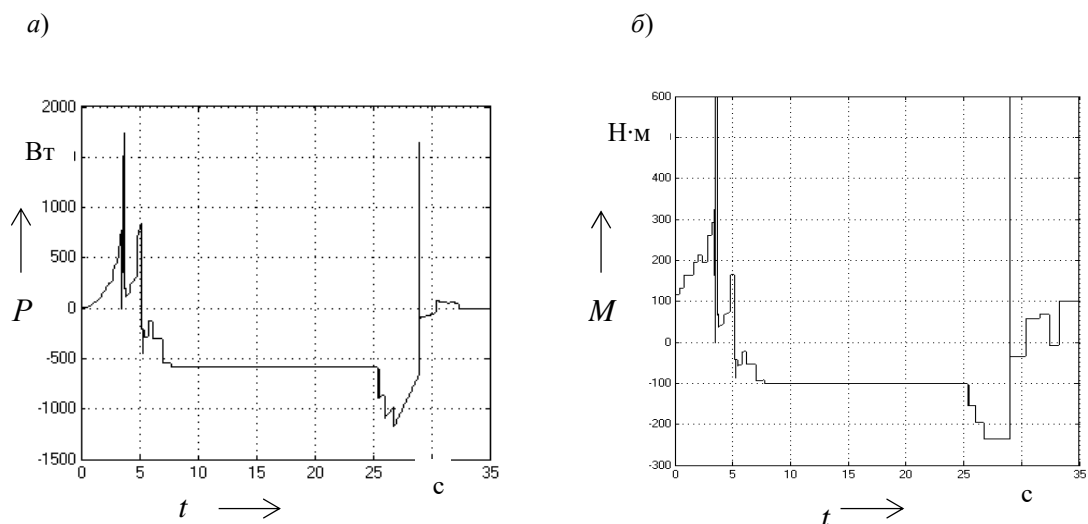


Рис. 7. Расчетные графики мощности (а) и момента (б) при «длинной» поездке с $\Omega = 1,2\Omega_{ном}$

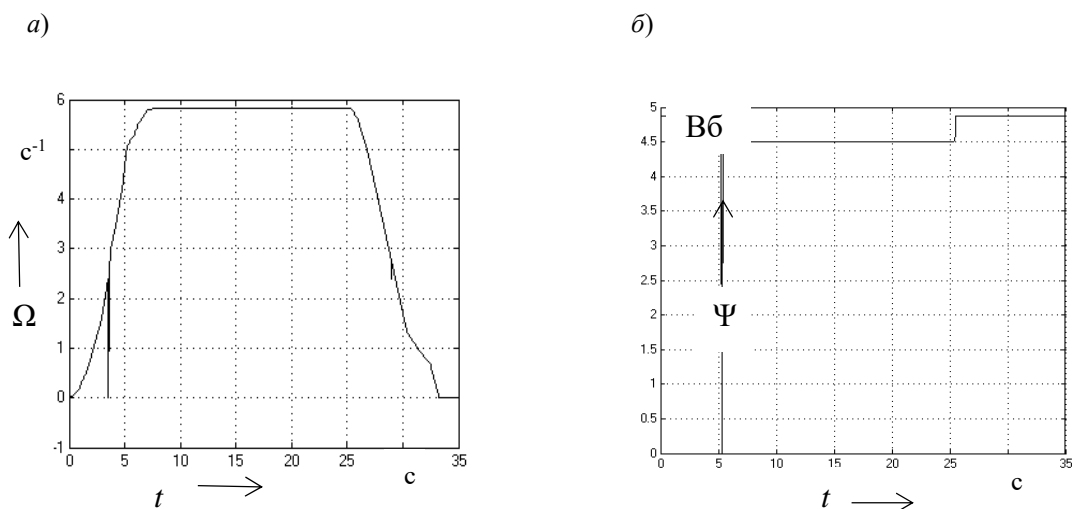


Рис. 8. Графики при «длинной» поездке с $\Omega = 1,2\Omega_{ном}$: тахограммы скорости (а) и потока двигателя (б)

Табл. 8. Энергия и средняя мощность на валу двигателя при «длинной» поездке и $\Omega = 1,2\Omega_{ном}$

Пуск и торможение (двигательный режим)	Пуск, движение кабины с $1,2\Omega_{ном}$, торможение (рекуперат. режим)	Энергия за весь подъем	Средняя мощность
462,7 Дж	-13873,4 Дж	-13410,7 Дж	-419,1 Вт

Табл. 9. Энергия, потребляемая и отдаваемая двигателем с учетом потерь в двигателе, и средняя мощность при «длинной» поездке и $\Omega = 1,2\Omega_{ном}$

Пуск и торможение (двигательный режим)	Пуск, движение кабины с $1,2\Omega_{ном}$, торможение (рекуперат. режим)	Энергия за весь подъем	Средняя мощность
462,7 Дж	-12698,6 Дж	-12235,9 Дж	-382,4 Вт



Полученные результаты при моделировании показывают, что во всех рассмотренных режимах в моделируемом электроприводе СДПМ за цикл работы в итоге является генератором энергии, а отдаваемая энергия может быть увеличена за счет увеличения скорости перемещения кабины лифта в рекуперативном режиме. Увеличение номинальной скорости движения кабины лифта в режиме рекуперативного торможения увеличивает мощность от груза на валу двигателя, но энергия, вырабатываемая двигателем в этом режиме, определяется потерями в двигателе. В рассматриваемом приводе в качестве двигателя использован СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе. Режим ослабления магнитного потока в таком двигателе реализуется за счет существенного возрастания тока, что приводит к значительному росту потерь в двигателе. С учетом потерь в двигателе в режиме «короткой» поездки теряется дополнительная энергоэффективность рекуперативного режима, связанная с увеличением скорости. В «длинной» поездке реализуется данное преимущество в энергоэффективности, но время работы с током, превышающим номинальный, делает этот режим работы невозможным. Для использования преимуществ в энергоэффективности от увеличения номинальной скорости лифта в режиме рекуперативного торможения нужен другой тип двигателя, потери в котором при работе со скоростью выше номинальной меньше, например, асинхронный низкоскоростной лифтовый двигатель для безредукторной лифтовой лебедки [5].

Выводы

На основе модели регулируемого безредукторного электропривода переменного тока лифта с СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе произведен расчет энергии, потребляемой и отдаваемой в рекуперативном режиме двигателем при нагрузке, характерной для подъема незагруженной кабины лифта. Выполнено моделирование для «короткой» и «длинной» поездок соответственно на три и пять этажей при номинальной и увеличенной на 20 % скорости перемещения кабины лифта и получаемой за счет уменьшения магнитного потока двигателя. Во всех рассмотренных режимах СДПМ за цикл работы в итоге является генератором энергии. Показано, что увеличение скорости перемещения кабины на 20 % приводит к увеличению энергии, передаваемой на вал двигателя грузом в рекуперативном режиме, на 40 %. С учетом потерь при ослаблении потока в используемом при моделировании СДПМ энергия, которую СДПМ может отдать в этом режиме в сеть при «короткой» поездке, меньше, чем при работе с постоянным потоком. «Длинная» поездка увеличивает в таком режиме энергоэффективность СДПМ, но невозможна из-за вероятности перегрева машины. Для использования преимуществ в энергоэффективности от увеличения номинальной скорости лифта при работе в рекуперативном режиме необходим двигатель с меньшими потерями при работе со скоростью выше номинальной по сравнению с СДПМ с поверхностным расположением магнитов, например, тихоходный лифтовый асинхронный двигатель или СДПМ, но со встроенными магнитами в ротор двигателя.



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. **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.
4. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.
5. **Кругликов, О. В.** К вопросу повышения технического уровня привода безредукторных лебедок с высокомоментными асинхронными электродвигателями / О. В. Кругликов // Электротехника. – 2013. – № 3. – С. 28–32.

Статья сдана в редакцию 12 мая 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.

