

DOI: 10.53078/20778481\_2023\_2\_129

УДК 62-83:621

*А. С. Коваль*

**РАСЧЕТ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ БЕЗРЕДУКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ЛИФТА НА БАЗЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ЗА ЦИКЛ РАБОТЫ**

*A. S. Koval*

**CALCULATION OF ELECTRICITY CONSUMED PER OPERATING CYCLE BY ELEVATOR GEARLESS ELECTRIC DRIVE ON THE BASIS OF A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR**

**Аннотация**

На основе использования выражений для ускорения и скорости при пуске и торможении по близкой к оптимальной  $s$ -тахограмме изменения скорости лифта (синусоидальный закон изменения рывка) предложена методика и приведен пример расчета энергопотребления приводом лифта на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами за базовый цикл работы лифта.

**Ключевые слова:**

синхронный двигатель с постоянными магнитами, электропривод лифта, управляемые электромагнитные переменные потери, базовый цикл работы, годовое энергопотребление.

**Для цитирования:**

Коваль, А. С. Расчет потребления электроэнергии безредукторным электроприводом лифта на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами за цикл работы / А. С. Коваль // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 2 (79). – С. 129–136.

**Abstract**

The paper presents a technique and an example of calculating electric energy consumed by an elevator drive on the basis of a synchronous motor with permanent magnets during the basic elevator operating cycle, with the expressions for acceleration and speed under start-up and deceleration conditions according to close to optimal  $s$ -tachogram of elevator speed change (sinusoidal law of change in jerk) being used.

**Keywords:**

permanent magnet synchronous motor, electric elevator drive, controlled electromagnetic variable losses, basic operation cycle, annual energy consumption.

**For citation:**

Koval, A. S. Calculation of electricity consumed per operating cycle by elevator gearless electric drive on the basis of a permanent magnet synchronous motor / A. S. Koval // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 2 (79). – P. 129–136.

Потребляемая лифтами энергия составляет значительную часть общих расходов в зданиях. Уменьшение её потреб-

ления имеет важное значение. Существует стандарт ГОСТ Р 56420.2–2015 (ИСО 25745-2:2015) *Лифты, эскалато-*

ры и конвейеры пассажирские. Энергетические характеристики. Часть 2: Расчет энергопотребления и классификация энергетической эффективности лифтов, определяющий методику определения энергопотребления лифтами и классификацию их по этому признаку [1]. В соответствии с этим стандартом устанавливается категория использования лифта (табл. 1) в зависимости от числа включений в сутки и определяется энергетическая эффективность лифта

(основа для их классификации) по суммарному энергопотреблению за время в режиме ожидания и за время всех поездок. Определение категории эксплуатации для лифта позволяет оценить среднее время работы привода лифта в день, а значит, и соответствующее энергопотребление. Соответственно, классы по энергосбережению от А до G, используемые для бытовой техники распространены и на системы лифтов.

Табл. 1. Категории для лифтов массового применения

Категория использования	1	2	3	4	5	6
Интенсивность/частота использования	Очень низкая	Низкая	Средняя	Высокая	Очень высокая	Чрезвычайно высокая
Число включений за сутки (типичный диапазон)	50 (<75)	125 (75...200)	300 (200...500)	750 (500...1000)	1500 (1000...2000)	2500 ( $\geq 2000$ )

Наиболее трудоемкий этап в определении энергетических показателей привода – определение энергопотребления во время поездки. Специфика работы привода лифта заключается в сочетании при его работе двигательных и тормозных (рекуперативных) режимов работы при случайном характере изменения числа включений двигателя в час и длины поездки, а также в возможной погрешности балансировки противовеса и кабины, которая влияет на энергоэффективность применения, в частности, безредукторного привода. Объективная оценка энергопотребления в лифтах определяется на основе сопоставления лабораторных испытаний и эксплуатационных для конкретного режима работы. Для расчетного определения энергопотребления по ГОСТ [1] может быть использован один из двух циклов при движении порожней кабины лифта: базовый и короткий (при использовании короткого цикла высота подъема составляет от 1/2 до 1/4 полной высоты подъема). В доступных источниках отсутствует информация об аналитической оценке энергопотребления лифтом

за цикл работы с учетом потерь мощности в двигателе в пускотормозных режимах при учете закона изменения скорости двигателя в пускотормозных режимах при циклических поездках. Рассмотрен [2] расчет потерь в пусковых режимах в регулируемых электроприводах переменного тока при линейном изменении скорости. В меньшей степени рассмотрены эти вопросы при других законах изменения скорости, в частности для  $s$ -образной тахограммы, которая имеет место в регулируемых приводах лифтов. При реализации  $s$ -образной тахограммы рывок и ускорение могут меняться по разным законам с выполнением нормативных требований по их ограничению.  $s$ -образная тахограмма при формировании синусоидального рывка при пуске и торможении близка к оптимальной по времени пуска и торможения, и она может быть принята как базовая при расчетной оценке энергопотребления в лифтах. В этом случае при пуске линейная скорость кабины лифта меняется по закону [3]  $V(t) = A_0^* \cdot t - A_1^* \sin(\Omega t)$ , ускорение –

$a(t) = A_0^*(1 - \cos(\Omega t))$ , а рывок –  
 $R(t) = r_m \cdot \sin(\Omega t)$ . При торможении,  
 соответственно,

$$V(t) = V_0 - A_0^*t + A_1^* \sin(\Omega t);$$

$$a(t) = \frac{r_m}{\Omega} (\cos(\Omega t) - 1);$$

$$R(t) = -r_m \cdot \sin(\Omega t),$$

где  $A_0^* = \frac{r_m}{\Omega}$ ;  $A_1^* = \frac{r_m}{\Omega^2}$ ;  $r_m$  – номиналь-  
 ное значение рывка;  $\Omega = \frac{2\pi}{T}$ ;  $T$  – время  
 разгона при пуске и торможения при  
 останове.

Для безредукторного электропри-  
 вода лифта с диаметром канатопроводящего  
 шкива  $D$  соответствующий закон измене-  
 ния частоты вращения вала двигателя  
 определяется через радиус канатопроводяще-  
 го шкива  $R_{шк} = \frac{D}{2}$  как  $\omega(t) = \frac{V(t)}{R_{шк}}$ .

В [4] предложена методика расче-  
 та основных управляемых электромаг-  
 нитных потерь в двигателе при  $s$ -образ-  
 ной тахограмме разгона привода лифтов  
 (рывок меняется по синусоидальному  
 закону) и при постоянном моменте  
 нагрузки (загрузка кабины лифта в цик-  
 ле). Полученные выражения расчета по-  
 терь для лифтового высокомоментного  
 низкоскоростного асинхронного двига-  
 теля имеют вид:

– потери при торможении в генераторном режиме работы

$$P_{pot} = \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[ \frac{9}{4} \frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{k_4}{\Psi_r^4} \left[ ((M_s + JA_0) - JA_0 \cos \Omega t)^2 \right] + n_1 \left[ (A_{1*} - tA_0) + \frac{A_0}{\Omega} \right]^2 \right];$$

– потери при торможении в двигательном режиме работы

$$P_{pot} = \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[ \frac{9}{4} \frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{k_4}{\Psi_r^4} \left[ ((M_s + JA_0) + JA_0 \cos \Omega t)^2 - 4M_s JA_0 \right] + n_1 \left[ (A_{1*} - tA_0) + \frac{A_0}{\Omega} \right]^2 \right];$$

– потери при пуске в генераторном режиме работы

$$P_{pot} = \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[ \frac{9}{4} \frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{k_4}{\Psi_r^4} \left[ (M_s - JA_0) + JA_0 \cos \Omega t \right]^2 + n_1 A_0^2 \left( t - \frac{1}{\Omega} \sin \Omega t \right)^2 \right];$$

– потери при пуске в двигательном режиме работы

$$P_{pot} = \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[ \frac{9}{4} \frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{k_4}{\Psi_r^4} \left[ (M_s + JA_0) - JA_0 \cos \Omega t \right]^2 + n_1 A_0^2 \left( t - \frac{1}{\Omega} \sin \Omega t \right)^2 \right].$$

Аналогично потери для лифтового  
 высокомоментного синхронного двига-  
 теля с постоянными магнитами (СДПМ)

с поверхностным расположением маг-  
 нитов на роторе имеют вид [5]:

– потери при торможении в генераторном режиме работы

$$P_{pot.торм.ген.} = \frac{3}{2} R_s I_{\max}^2 + \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[ \frac{k^*}{\Psi_r^4} [(M_s + JA_0) - JA_0 \cos \Omega t]^2 + n^* \left[ (A_{1*} - tA_0) + \frac{A_0}{\Omega} \sin \Omega t \right]^2 \right];$$

– потери при торможении в двигательном режиме работы

$$P_{pot.торм.дв.} = \frac{3}{2} R_s I_{\max}^2 + \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[ \frac{k^*}{\Psi_r^4} [(M_s - JA_0) + JA_0 \cos \Omega t]^2 + n^* \left[ (A_{1*} - tA_0) + \frac{A_0}{\Omega} \sin \Omega t \right]^2 \right];$$

– потери при пуске в генераторном режиме работы

$$P_{pot.пус.ген.} = \frac{3}{2} R_s I_{\max}^2 + \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[ \frac{k^*}{\Psi_r^4} [(M_s - JA_0) + JA_0 \cos \Omega t]^2 + n^* A_0^2 \left( t - \frac{1}{\Omega} \sin \Omega t \right)^2 \right];$$

– потери при пуске в двигательном режиме работы

$$P_{pot.пус.дв.} = \frac{3}{2} R_s I_{\max}^2 + \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[ \frac{k^*}{\Psi_r^4} [(M_s + JA_0) - JA_0 \cos \Omega t]^2 + n^* A_0^2 \left( t - \frac{1}{\Omega} \sin \Omega t \right)^2 \right].$$

Эти выражения с учетом механической работы  $P = M(t)\omega(t)$  на валу двигателя (она же подводимая механическая мощность к валу двигателя в генераторном режиме), определяемой при известном законе изменения скорости и ускорения при пуске, торможении и движении кабины лифта с установившейся скоростью и известном режиме работы привода лифта (двигательный или рекуперативного торможения), позволяют определить совершаемую работу (без учета потерь в шахте и в преобразователе) при циклическом перемещении кабины лифта на любой этаж и соответствующий цикловой КПД. Для дальнейших расчетов принят короткий цикл работы привода, определяемый базовой поездкой на три этажа вверх и вниз при пустой кабине.

Для высокомоментного низкоскоростного лифтового СДПМ (табл. 2, пассажирский лифт со скоростью перемещения 1 м/с, расчетные значения для двигателя: КПД = 0,55;  $R_f = 237,9$  Ом;  $M_{наг.} = 247$  Н·м;  $J = 18,85$  кг·м<sup>2</sup>, время

цикла – 15 с, одинаковое время пуска и торможения – 2,5 с) была рассчитана энергия, преобразуемая электродвигателем за цикл. При этом часть времени короткого цикла при пуске (подъем пустой кабины) при скорости, меньшей 0,6 от номинальной, привод работает в двигательном режиме, а другая часть времени цикла при превышении скорости 0,6 от номинальной отрабатывается в генераторном режиме работы привода [5].

На рис. 1 приведены расчетные графики энергии, потребляемой (двигательный режим работы) или подводимой к валу двигателя (генераторный режим работы), и энергии, преобразуемой в механическую работу или отдаваемой в сеть за рассматриваемый цикл работы.

При спуске пустой кабины (двигательный режим работы) расчетные графики энергии потребляемой и энергии, подводимой к валу двигателя и преобразуемой в механическую работу, приведены на рис. 2. Тахограмма движения кабины лифта в рассматриваемом цикле работы показана на рис. 3.

Табл. 2. Расчетные параметры СДПМ, использованные при моделировании

$R_1$ , Ом	$M_{ном}$ , Н·м	$I_{ном}$ , А	$P_{ном}$ , Вт	$Lq = Ld$ , Гн	$\Psi_{ном}$ , Вб	$\Omega_{ном}$ , с <sup>-1</sup>	$D$ , м	$r_m$ , м/с <sup>2</sup>
0,652	710	12,4	3400	0,065	4,87	4,88	0,32	1

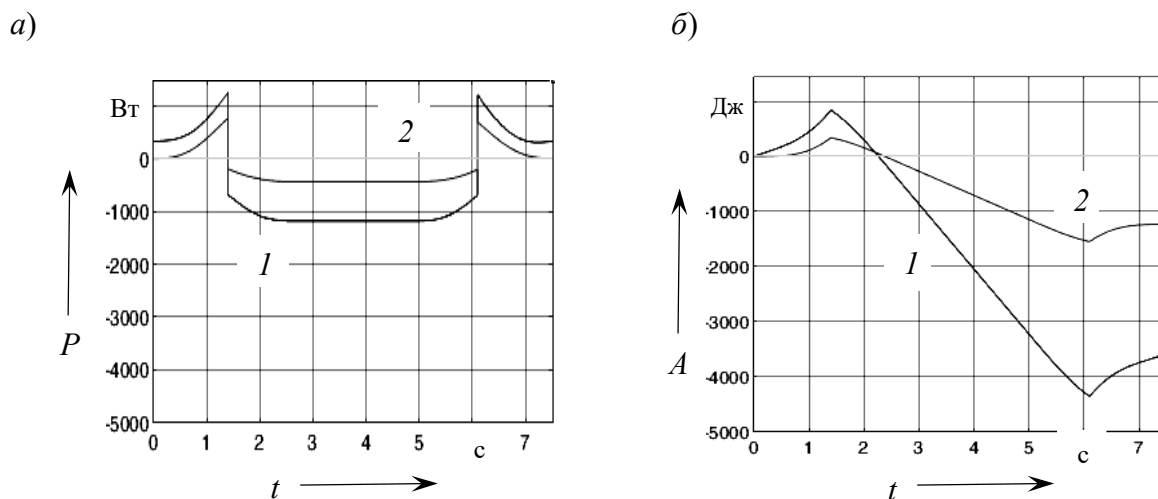


Рис. 1. При подъеме пустой кабины: *a* – мощность 1, потребляемая или подводимая к валу двигателя, и мощность 2, преобразуемая в механическую работу или отдаваемая в сеть; *б* – энергия 1, потребляемая из сети, или подводимая к валу двигателя, и энергия 2, преобразуемая в механическую работу или отдаваемая в сеть

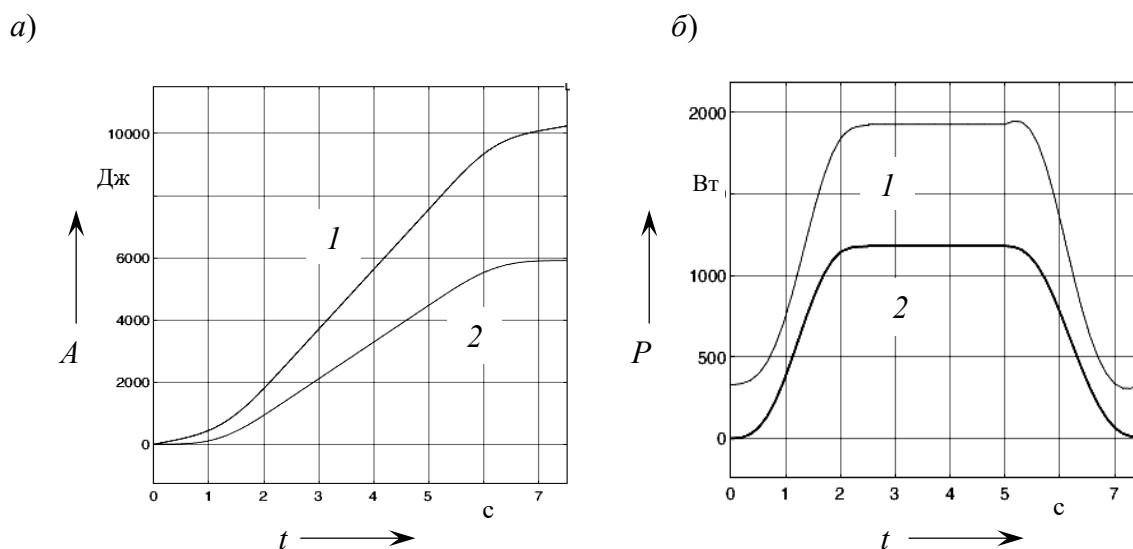


Рис. 2. При спуске пустой кабины: *a* – потребляемая энергия 1 и преобразуемая в полезную работу на валу энергия 2; *б* – потребляемая мощность потерь 1 и мощность полезной работы на валу 2

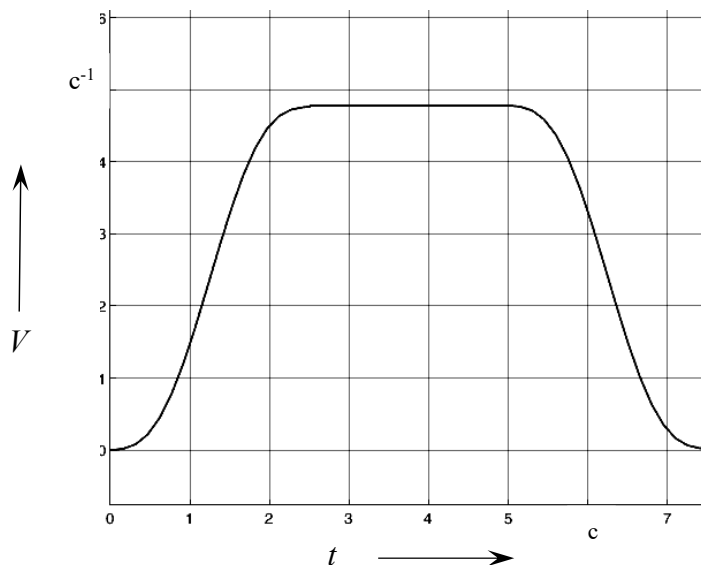


Рис. 3. Тахограмма частоты вращения двигателя привода лифта за рассматриваемый цикл работы

Энергия  $A_1$ , потребляемая за весь цикл работы (см. рис. 1 и 2, подъем –  $A_G$ , спуск –  $A_D$ ):

$$A_1 = A_D - A_G = 10100 - 1200 = 8900 \text{ Дж},$$

или 2,47 Вт·ч (0,00247 кВт·ч).

Энергия  $A_2$ , преобразуемая в полезную работу (см. рис. 1 и 2, работа на валу двигателя –  $A_B$ , энергия, отданная в сеть, –  $A_C$ ) за весь цикл работы:

$$A_2 = A_B + A_C = 6000 + 1100 = 7100 \text{ Дж},$$

или 1,97 Вт·ч (0,00197 кВт·ч).

Соответственно, цикловой КПД лифта в этом случае

$$\eta_{цл} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{7100}{8900} = 0,797.$$

Если в рассматриваемом цикле допустить, что двигатель работает и при подъеме, и при спуске в двигательном режиме (подъем при номинальной загрузке кабины, а спуск при пустой кабине), то энергия полезной работы

$A_2 = 12000$  Дж, а потребляемая энергия  $A_1 = 20200$  Дж.

Соответственно, цикловой КПД поездки

$$\eta_{цл} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{12000}{20200} = 0,594.$$

Используя энергопотребление рассматриваемого цикла и категорию использования лифта, можно оценить годовое потребление электроэнергии лифтом. Если лифт установлен, например, в жилом здании до 12 этажей и относится по интенсивности использования к группе 3 (см. табл. 1, интенсивность использования средняя), то число включений за сутки может быть принято, например 360. Тогда среднее время работы в день 1,5 ч (15 с – время короткой поездки). При известном времени короткого цикла (15 с), среднем времени работы лифта в день (1,5 ч) и числе базовых поездок в день (360 поездок) соответствующее годовое (365 дн.) энергопотребление:

– при подъеме-спуске пустой кабины

$$A_{лл} = 0,00247 \cdot 360 \cdot 365 = 324,558 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

– при подъеме загруженной и спуске пустой кабины (отсутствует рекуперация энергии)

$$A_{л-г} = 0,00561 \cdot 360 \cdot 365 = 737,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Известна [6] формула для расчета потребления электроэнергии лифтовыми приводами, которая учитывает только двигательный режим работы:

$$E = \frac{z \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot h \cdot P}{V \cdot 3600},$$

где  $E$  – потребление электроэнергии в год, кВт·ч/год;  $z$  – среднестатистическое ежегодное количество циклов;  $h$  – максимальная высота шахты, м;  $k_1$  – средний коэффициент нагрузки (для лифтов с канатоведущим шкивом  $k_1 = 0,35$ );  $k_2$  – коэффициент высоты шахты,  $k_2 = 0,5$ ;  $P$  – мощность электродвигателя, кВт;  $V$  – скорость перемещения, м/с.

Для рассматриваемого выше примера привода лифта годовое потребление электроэнергии при двигательном режиме работы привода

$$\begin{aligned} E &= \frac{z \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot h \cdot P}{V \cdot 3600} = \\ &= \frac{131400 \cdot 0,35 \cdot 0,5 \cdot 36 \cdot 3,4}{1 \cdot 3600} = \\ &= 781,83 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.} \end{aligned}$$

Информация в открытых источниках об экспериментальном определении энергопотребления в цикловых режимах работы в лифтовых безредукторных приводах на базе СДПМ отсутствует. В [6] приведены результаты экспериментального определения энергопотребления лифтом с безредукторной лебедкой на базе лифтового асинхронного электродвигателя АЧ200L8 (кратность полиспастной подвески – 1:1, грузо-

подъемность – 320 кг, скорость перемещения – 1 м/с) при подводимой мощности – 4,170 кВт в цикле подъем-спуск пустой кабины при времени работы 11 с. Этот лифт наиболее близок по техническим характеристикам и рабочему циклу к рассматриваемому в примере лифту. Энергия, потребляемая за цикл подъем-спуск пустой кабины и определенная экспериментально, составляет 0,0066 кВт·ч. Расчетная величина энергии потерь для вышерассмотренного примера работы привода (без учета потерь в шахте и в преобразователе) – 0,00247 кВт·ч. Экспериментальная оценка потерь в приводе [6] отличается от расчетной оценки потерь в рассматриваемом приводе лифта на базе СДПМ, но как база для качественной оценки в первом приближении используемой методики расчета энергопотребления в безредукторном приводе лифта, цифры энергопотребления показательны.

### Выводы

В доступных источниках отсутствует информация об аналитической оценке энергопотребления лифтом с учетом потерь мощности в двигателе в пускотормозных режимах. Предложена методика определения энергопотребления в безредукторном электроприводе лифта с учетом потерь мощности в двигателе в пускотормозных режимах. Приведен пример расчета энергопотребления в безредукторном электроприводе лифта при близкой к оптимальной  $s$ -образной тахограмме разгона-торможения привода лифтов (рывок меняется по синусоидальному закону) для цикла работы привода, определяемого короткой поездкой на три этажа вверх и вниз при пустой кабине. Для этого цикла расчетное энергопотребление в безредукторной лебедке с лифтовым СДПМ равно 0,00247 кВт·ч за поездку, при выбранной категории эксплуатации лифта (группа 3) годовое расчетное энергопотребление – 324,558 кВт·ч. При

работе привода в рассматриваемом цикле только в двигательном режиме годо-

вое расчетное потребление возрастает до 737,3 кВт·ч.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ Р 56420.2–2015 (ИСО 25745-2:2015)**. Лифты, эскалаторы и конвейеры пассажирские. Энергетические характеристики. Ч. 2: Расчет энергопотребления и классификация энергетической эффективности лифтов. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 16 с.
2. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.
3. **Коваль, А. С.** К вопросу расчета управляемых электромагнитных потерь в двигателе в пуско-тормозных режимах работы регулируемого асинхронного электропривода лифта / А. С. Коваль // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 1. – С. 49–55.
4. **Коваль, А. С.** К вопросу определения циклового КПД асинхронного двигателя частотно-регулируемого привода лифта / А. С. Коваль // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 2. – С. 41–48.
5. **Коваль, А. С.** К вопросу энергосбережения в электроприводе пассажирских лифтов при регулируемой номинальной скорости движения кабины лифта / А. С. Коваль // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 4. – С. 49–55.
6. **Афонин, В. А.** Вопросы энергопотребления массовых лифтовых приводов / В. И. Афонин, Р. В. Родионов // Лифт. – 2010. – № 9. – С. 21–25.

*Статья сдана в редакцию 6 марта 2023 года*

**Александр Сергеевич Коваль**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

**Aleksandr Sergeyevich Koval**, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor, Belarusian-Russian University.