

УДК 62-83:621

А. С. Коваль, А. И. Артеменко

К ВОПРОСУ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПАССАЖИРСКИХ ЛИФТОВ ПРИ РЕГУЛИРУЕМОЙ НОМИНАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ КАБИНЫ ЛИФТА

UDC 62-83:621

A. S. Koval, A. I. Artemenko

ON THE SELECTION OF SPEED CONTROLLER PARAMETERS AND THE FORMATION OF MOTION TACHOGRAMS IN ELEVATOR ADJUSTABLE DRIVES

Аннотация

Вопросы энергосбережения при использовании регулируемых электроприводов в массовых лифтах постоянно привлекают внимание. Показано, что увеличение скорости перемещения кабины лифта при работе двигателя привода лифта в рекуперативном режиме (подъем пустой кабины) уменьшает общее энергопотребление за круговую поездку (спуск-подъем кабины) и создает предпосылки для повышения энергоэффективности лифтов с безредукторными частотно-регулируемыми электроприводами переменного тока.

Ключевые слова:

лифт, регулируемый электропривод, энергосбережение, рекуперативный режим работы, круговая поездка, повышение энергоэффективности лифта, скорость перемещения лифта.

Abstract

The control strategy for adjustable drives in elevators is determined by the need to provide comfortable ride characteristics. It is shown that the required tachograms of the elevator car movement are formed by the speed selectors with response speed of the control system limited by settings of the speed loop, whose parameters are determined based on the amplitude-frequency criterion with the cutoff frequency of the designed system lower than the minimum resonance frequency of the mechanical subsystem of the electric drive.

Keywords:

elevator, elastic properties of ropes, transient processes in the mechanical subsystem of elevators, transfer functions, speed controller, mechanical subsystem, resonant frequencies.

На сегодняшний день частотно-регулируемый ЭП переменного тока – основной тип регулируемого привода в лифтах [1]. Особенностью приводов лифтов является работа с меняющейся нагрузкой, что обеспечивает работу привода как в двигательных режимах, так и в генераторных (рекуперативное торможение). Последние режимы привлекают все больше внимания, т. к. позволяют экономить потребляемую энергию, а в лифтах, эксплуатирующихся в

жилых зданиях, порядка 30 % энергопотребления связано с работой электропривода. Если в редукторных приводах лифтов, с учетом КПД редуктора, использование генераторных режимов малоэффективно, то в безредукторных регулируемых приводах появляется возможность более эффективного использования рекуперированной энергии. Генераторные режимы работы лифта могут прогнозироваться с учетом загрузки кабины лифта и направления её движе-



ния. Типовые варианты таких режимов работы: подъем пустой кабины, спуск полностью груженной кабины. Величина рекуперированной двигателем привода лифта энергии определяется в том числе и скоростью перемещения кабины лифта, поэтому увеличение генерируемой энергии в рекуперативных режимах работы возможно, если номинальная скорость перемещения кабины лифта в этих режимах возрастет. Увеличение скорости обуславливается загрузкой кабины лифта и возможностями используемого двигателя [2]. Например, синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ) с поверхностным расположением магнитов на роторе, применяемый в безредукторных приводах лифтов, допускает увеличение скорости ориентировочно до 20...30 % от номинальной в зависимости от нагрузки.

Как уже отмечено, работе лифтов свойственна постоянно меняющаяся загрузка кабины лифта, которая определяется случайным характером пассажиропотока как в жилых, так и в административных зданиях [3]. Показано [4], что усредненная загрузка кабины лифта в жилых зданиях, вычисленная по приведенным одно- и четырехчасовым пиковым графикам, составляет в среднем 0,35 номинальной для среднестатистической поездки вверх-вниз на три этажа, что соответствует двигательному режиму работы двигателя при движении кабины вниз и генераторному режиму при движении кабины вверх. Оценим для рассматриваемой среднестатистической поездки изменение потребляемой двигателем энергии и соответствующей мощности за поездку вверх-вниз при номинальной скорости перемещения кабины лифта и при увеличении скорости перемещения кабины только в генераторном режиме до $1,3 \omega_{\text{ном}}$. Регулируемый электропривод лифта с СДПМ и векторной системой управления позволяет формировать при пуске и торможении постоянный динамический момент, определяемый требуемым уско-

рением. При этом закон изменения скорости двигателя привода при пуске и торможении можно считать линейным. При спуске кабины привод работает в двигательном режиме. Для этого случая потребляемая двигателем энергия (не учитываются постоянные потери в двигателе) при движении кабины с номинальной скоростью может быть рассчитана следующим образом:

$$A_{\text{в}} = A_1 + A_2 + A_3, \quad (1)$$

где $A_{\text{в}}$ – энергия, потребляемая двигателем при движении вниз; A_1 – энергия, потребляемая двигателем при пуске при движении вниз; A_2 – энергия, потребляемая двигателем при торможении при движении вниз; A_3 – энергия, потребляемая двигателем в установившемся режиме работы за время движения вниз.

Энергия, потребляемая двигателем при пуске [5],

$$A_1 = \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2} \left(1 + k_{\text{п}} \frac{T}{t_{\text{п}}} \right), \quad (2)$$

где $k_{\text{п}}$ – коэффициент увеличения потерь при пуске под нагрузкой; T – постоянная времени, $T = \frac{J_{\Sigma}}{\beta}$; $t_{\text{п}}$ – время

управляемого пуска; ω_0 – скорость идеального холостого хода.

Ей соответствует развиваемая двигателем мощность

$$P_1 = \frac{A_1}{t_{\text{п}}}. \quad (3)$$

Энергия, потребляемая двигателем при торможении [5],

$$A_2 = \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2} \left(1 + k_{\text{т}} \frac{T}{t_{\text{т}}} \right), \quad (4)$$

где $k_{\text{т}}$ – коэффициент увеличения потерь при торможении под нагрузкой; $t_{\text{т}}$ – время управляемого торможения.

Соответствующая развиваемая



двигателем мощность

$$P_2 = \frac{A_2}{t_t} \quad (5)$$

Энергия, потребляемая двигателем при установившемся режиме движения [5],

$$A_3 = P_3 t_1 = (M_d \omega_{уст} + 3I_d^2 R) t_1, \quad (6)$$

где M_d , $\omega_{уст}$ – момент и скорость двигателя соответственно; I_d , R – ток и сопротивление статора двигателя соответственно; P_3 – мощность, потребляемая двигателем в установившемся режиме работы; t_1 – время движения в установившемся режиме кабины лифта.

Средняя мощность, потребляемая двигателем за время движения кабины вниз,

$$P_{ср.в.} = \frac{P_1 t_{п} + P_2 t_{т} + P_3 t_1}{t_{п} + t_{т} + t_1} \quad (7)$$

При подъеме кабины с этой же нагрузкой привод работает в режиме рекуперативного торможения и вырабатываемая двигателем энергия может быть рассчитана следующим образом:

$$A_T = A_4 + A_5 + A_6, \quad (8)$$

где A_T – отдаваемая двигателем энергия за время движения вверх; A_4 – энергия, вырабатываемая двигателем за время пуска при движении вверх; A_5 – энергия, вырабатываемая двигателем за время торможения при движении вверх; A_6 – энергия, вырабатываемая двигателем

за время движения в установившемся режиме при подъеме кабины.

$$A_4 = \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2} \left(1 - k_{п} \frac{T}{t_{п}} \right) \quad (9)$$

Соответствующая развиваемая двигателем мощность

$$P_4 = \frac{A_4}{t_{п}} \quad (10)$$

$$A_5 = \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2} \left(1 - k_{т} \frac{T}{t_{т}} \right)$$

Соответствующая развиваемая двигателем мощность

$$P_5 = \frac{A_5}{t_t} \quad (11)$$

$$A_6 = P_6 t_1 = (M_d \omega_{уст} - 3I_d^2 R) t_1,$$

где P_6 – мощность, вырабатываемая двигателем в установившемся режиме работы при подъеме кабины.

Средняя мощность, вырабатываемая двигателем за время движения кабины вверх,

$$P_{ср.вн.} = \frac{P_4 t_{п} + P_5 t_{т} + P_6 t_1}{t_{п} + t_{т} + t_1} \quad (12)$$

Для двигателя (табл. 1) и тахограммы движения без участка дотягивания (рис. 1) результат расчета потребляемой двигателем энергии и развиваемой им мощности за цикл перемещения вверх-вниз для среднестатистической поездки на три этажа (формулы (1)–(14)) приведен в табл. 2.

Табл. 1. Исходные данные для расчета

J_{Σ} , кгм ²	ω_0 , с ⁻¹	$k_{п\ пуск}$	$k_{т\ пуск}$	β	$t_{п} = t_t$, с	t_t , с	$\omega_{уст}$, с ⁻¹	M_d , нм	I , А	R , Ом	$k_{п\ торм.}$	$k_{т\ торм.}$
114,85	4,87	2,72	1,72	7562,8	4,6	22,5	4,76	198,04	3,35	0,652	1,72	2,72



Табл. 2. Расчет потребляемой двигателем мощности при номинальной скорости кабины движения за цикл перемещения вверх-вниз

$P_1, \text{Вт}$	$P_2, \text{Вт}$	$P_3, \text{Вт}$	$P_{\text{ср.вн.}}, \text{Вт}$	$P_4, \text{Вт}$	$P_5, \text{Вт}$	$P_6, \text{Вт}$	$P_{\text{ср.вв.}}, \text{Вт}$
297,71	298,7	964,6	771,21	-294,4	-293,4	-920,7	-738,8

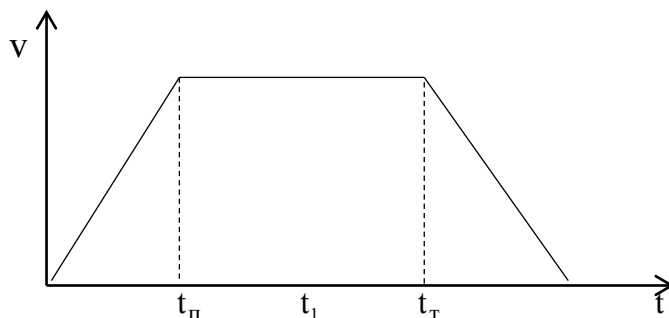


Рис. 1. Тахограмма движения

Средняя мощность, потребляемая в двигательном режиме работы (движение кабины вниз), превышает мощность, генерируемую в режиме рекуперативного торможения (движение кабины вверх), примерно на 32,41 Вт, т. е. двигатель при таком цикле перемещения в средне-статистической поездке в итоге является потребителем энергии.

Рассмотрим этот же цикл перемещения кабины лифта, но при увеличенной скорости ($\omega_{\text{уст}} = 1,3\omega_{\text{ном.}}$) только подъема кабины (рекуперативный режим работы двигателя).

Составляющие энергии, вырабатываемой двигателем в режиме рекуперации A_T , соответственно изменятся.

$$A_4 = \frac{J_{\Sigma} (1,3\omega_0)^2}{2} \left(1 + k_{\text{п}} \frac{T}{t_{\text{п}}} \right); \quad (13)$$

$$A_5 = \frac{J_{\Sigma} (1,3\omega_0)^2}{2} \left(1 - k_{\text{т}} \frac{T}{t_{\text{т}}} \right); \quad (14)$$

$$A_6 = (M_{\text{д}} 1,3 \omega_{\text{уст}} - 3I_{\text{д}}^2 R)t_1. \quad (15)$$

Для двигателя (см. табл. 1), с учетом изменения скорости подъема кабины (табл. 3), результат расчета потребляемой энергии и мощности за цикл перемещения вверх-вниз для среднестатистической поездки на три этажа и на 30 % большей скорости перемещения кабины лифта в генераторном режиме работы (формулы (1)–(7), (13)–(15)) приведен в табл. 4.

Табл. 3. Исходные данные для расчета при $\omega_{\text{уст}} = 1,3\omega_{\text{ном.}}$

$J_{\Sigma}, \text{кгм}^2$	$\omega_0, \text{с}^{-1}$	β	$t_{\text{п}} = t_{\text{т}}, \text{с}$	$t_1, \text{с}$	$\omega_{\text{уст}}, \text{с}^{-1}$	$M_{\text{д}}, \text{нм}$	$I_{\text{рек}}, \text{А}$	$R, \text{Ом}$	$k_{\text{п}}$	$k_{\text{т}}$
114,85	6,33	7562,8	5,98	17,3	6,19	198,04	5,025	0,652	1,72	2,72

Табл. 4. Расчет потребляемой мощности при скорости кабины в генераторном режиме $\omega_{\text{уст}} = 1,3\omega_{\text{ном.}}$

$P_1, \text{Вт}$	$P_2, \text{Вт}$	$P_3, \text{Вт}$	$P_{\text{ср.вн.}}, \text{Вт}$	$P_4, \text{Вт}$	$P_5, \text{Вт}$	$P_6, \text{Вт}$	$P_{\text{ср.вв.}}, \text{Вт}$
297,71	298,7	964,6	771,21	-383,17	-382,2	-1176,1	-867,9



В этом случае средняя мощность, потребляемая двигателем в двигательном режиме работы (движение кабины вниз), меньше мощности, генерируемой в режиме рекуперативного торможения (движение кабины вверх), на 96,7 Вт, т. е. двигатель при таком цикле перемещения в среднестатистической поездке в итоге является источником энергии. Возможность рекуперации энергии в электроприводах лифтов существенно зависит от общего КПД электропривода. Определено [6] граничное значение КПД и равное 0,618 для электропривода лифта, ниже которого рекуперация энергии в цикле «пуск – торможение» отсутствует. Можно оценить КПД безредукторного электропривода. Номинальный КПД СДПМ, используемых в таких лебедках, невысок, на уровне 0,6...0,7 [8]. Кроме того, в регулируемом электроприводе при работе с постоянным моментом регулирование скорости приводит тоже к уменьшению мощности и, соответственно, КПД. При допущении, что при номинальном моменте при снижении скорости сохраняются номинальные потери мощности, новое значение номинального КПД двигателя имеет зависимость от диапазона регулирования скорости:

$$\eta = \frac{1}{1 + D \left(\frac{1}{\eta_{\text{ном}}} - 1 \right)}, \quad (16)$$

где D – диапазон регулирования скорости; $\eta_{\text{ном}}$ и η – номинальный КПД и КПД при работе на пониженной скорости.

При однозонном регулировании скорости в диапазоне 1:4 (пассажирский лифт) и номинальном КПД двигателя 0,65 КПД двигателя на пониженной скорости равен 0,32. КПД преобразователя частоты достаточно высок, например, 0,97 [6]. Тогда результирующий КПД электропривода на пониженной скорости равен 0,31, т. е. при работе на пониженной скорости и в безредуктор-

ном приводе лифта в теоретически возможном режиме рекуперации возврата энергии в сеть не будет, т. к. результирующий КПД меньше граничного. Определим диапазон регулирования, при котором рекуперация будет иметь место. В формулу (16) подставим граничный КПД (0,63), с учетом КПД преобразователя частоты (0,97) и для номинального КПД двигателя определим необходимый диапазон регулирования. Он будет равен 1,2. Таким образом, при номинальной скорости лифта 1 м/с при торможении и пуске режим рекуперации возможен со скорости 0,83 м/с и выше. Для возможного номинального КПД двигателя 0,7 эта скорость равна 0,7 м/с.

На рис. 2 показана осциллограмма вырабатываемой (потребляемой) активной мощности безредукторным электроприводом (СДПМ мощностью 3,6 кВт) лифта грузоподъемностью 630 кг и скоростью перемещения 1 м/с при подъеме пустой кабины (привод работает в режиме рекуперации) с первого на последний этаж и переходе на пониженную скорость дотягивания 0,25 м/с.

Прекращение режима рекуперации происходит примерно через 1,6 с после начала торможения (скорость кабины лифта 0,6 м/с и меньше) и остальное торможение и весь процесс дотягивания осуществляются в двигательном режиме. Таким образом, все время пуска и торможения электропривода лифта может быть разделено на две составляющие. Для пуска: $t_{\text{п.двиг.}}$ – часть времени пуска, при которой двигатель потребляет активную мощность (скорость лифта меньше 0,6 м/с); $t_{\text{п.ген.}}$ – часть времени пуска, при которой двигатель работает в рекуперативном режиме (скорость лифта больше 0,6 м/с). Аналогично для процесса торможения: $t_{\text{т.двиг.}}$ и $t_{\text{т.ген.}}$. С учетом данного факта для тахограммы движения кабины лифта (см. рис. 1) рассчитаем потери в двигателе за цикл передвигания с номинальной скоростью и уве-



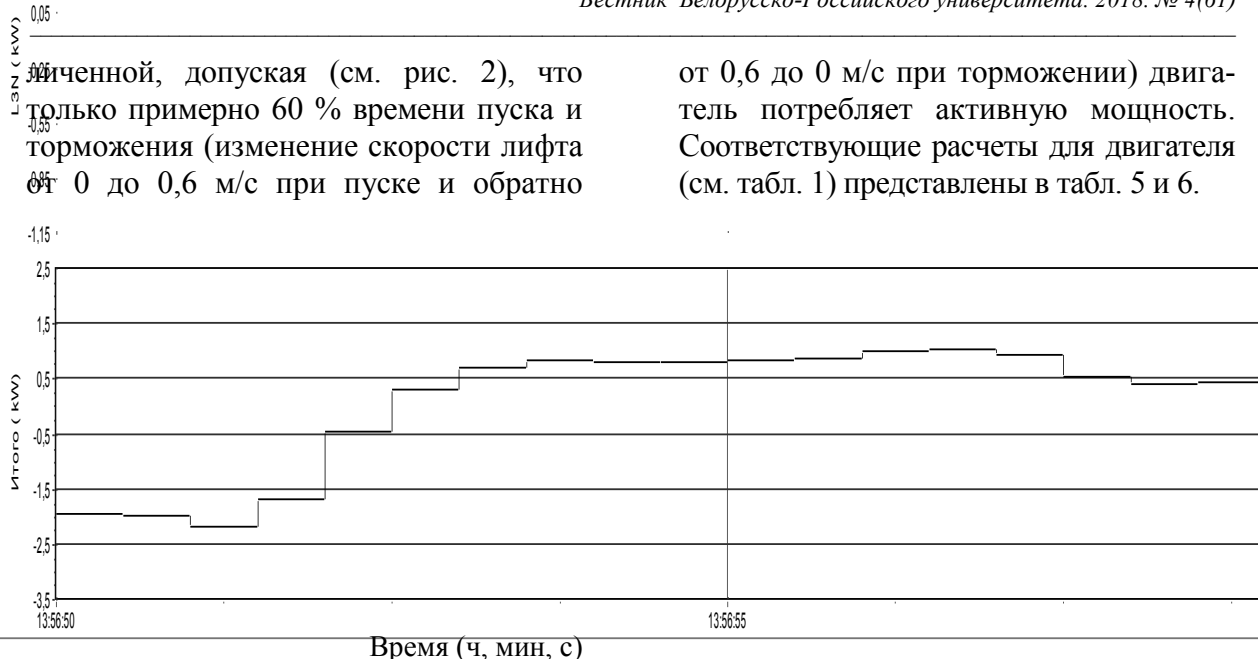


Рис. 2. Осциллограмма выработываемой (потребляемой) электроприводом лифта мощности (кВт) при торможении с номинальной скорости (1 м/с) и переходе на пониженную скорость дотягивания и движении на этой скорости до наложения тормоза

Табл. 5. Расчет потребляемой двигателем мощности при номинальной скорости кабины движения за цикл перемещения вверх-вниз (рекуперация при $\omega_{л}$ больше 0,6 м/с)

P_1 , Вт	P_2 , Вт	P_3 , Вт	$P_{\text{средн. вниз.}}$, Вт	$P_{4\text{дв.}}$, Вт	$P_{4\text{ген.}}$, Вт	$P_{5\text{дв.}}$, Вт	$P_{5\text{ген.}}$, Вт	P_6 , Вт	$P_{\text{средн. вверх.}}$, Вт
297,71	298,7	964,6	771,21	189,3	-238,6	179,1	-236,5	-920,7	-648,3

Табл. 6. Расчет потребляемой и генерируемой двигателем мощности за цикл перемещения вверх-вниз (рекуперация при $\omega_{л}$ больше 0,6 м/с) при скорости в режиме рекуперации $\omega_{уст} = 1,3 \omega_{ном}$.

P_1 , Вт	P_2 , Вт	P_3 , Вт	$P_{\text{средн. вниз.}}$, Вт	$P_{4\text{дв.}}$, Вт	$P_{4\text{ген.}}$, Вт	$P_{5\text{дв.}}$, Вт	$P_{5\text{ген.}}$, Вт	P_6 , Вт	$P_{\text{средн. вверх.}}$, Вт
297,71	298,7	964,6	771,21	180,1	-205,7	178,8	-204,7	-1176,1	-706,6

Анализ табл. 5 и 6 показывает, что в среднестатистической поездке на три этажа (загрузка кабины 0,35 номинальной) при постоянной скорости перемещения в двигательном режиме работы и при увеличенной на 30 % в генераторном режиме работы двигатель за поездку, в отличие от расчета при неучете изменения КПД привода, является потребителем энергии. В первом случае результирующее потребление мощности составляет 122,9 Вт, а во втором – 64,61 Вт, т. е. увеличение скорости перемещения кабины лифта при работе

от 0,6 до 0 м/с при торможении) двигатель потребляет активную мощность. Соответствующие расчеты для двигателя (см. табл. 1) представлены в табл. 5 и 6.

двигателя в режиме рекуперативного торможения (конкретно на 30 %) в среднестатистической круговой поездке на три этажа сохраняет в итоге работу двигателя как потребителя электроэнергии, но с потреблением энергии на 90 % меньше, что позволяет говорить о возможном увеличении энергосбережения в регулируемых безредукторных электроприводах лифтов при увеличении скорости кабины лифта выше номинальной в зависимости от загрузки кабины в рекуперативных режимах работы.



Выводы

С целью повышения энергоэффективности пассажирских лифтов с безредукторной лебедкой возможно увеличение номинальной скорости движения кабины лифтов в пределах круговой поездки в режимах, при которых вероятен рекуперативный режим работы двигателя. Это увеличение номинальной скорости определяется возможностями используемого двигателя (СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе – ориентировочно увеличение скорости на 20...30 %) и загрузкой ка-

бины. Для среднестатистической поездки на три этажа вверх-вниз при загрузке кабины 0,35 номинальной и скорости движения кабины лифта в рекуперативном режиме, равной $1,3\omega_{\text{ном}}$, двигатель, с учетом изменения КПД привода при регулировании скорости, потребляет на 90 % меньше в сравнении с такой же поездкой при неизменной номинальной скорости движения кабины, что и создает предпосылки для повышения энергоэффективности безредукторных лифтов.

СПИСОК 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 разработки электропривода пассажирских лифтов с регулируемой номинальной скоростью движения кабины лифта / А. С. Коваль, Е. В. Ефименко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2015. – № 1. – С. 96–102.
3. Гайдукевич, В. И. Случайные нагрузки силовых электроприводов / В. И. Гайдукевич, В. С. Титов. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 159 с.
4. Бойко, А. А. Особенности расчета загрузки пассажирских лифтов / А. А. Бойко // Підйомно-транспортна техніка. – 2014. – Вып. 1 (41). – С. 90–93.
5. Фираго, Б. И. Теория электропривода : учебное пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – 2-е изд. – Минск, 2007. – 585 с.
6. Бойко, А. А. Предварительный анализ возможности рекуперации энергии в лифтовых подъемных механизмах / А. А. Бойко // Підйомно-транспортна техніка. – 2013. – Вып. 3 (39). – С. 69–74.
7. Афонин, И. В. Моделирование работы безредукторного электропривода лифта / И. В. Афонин, Р. В. Родионов // Лифт. – 2009. – № 2. – С. 42–46.
8. Кругликов, О. В. Асинхронные частотно-регулируемые электродвигатели для привода безредукторных лифтовых лебедок : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 54.09.03 / О. В. Кругликов ; Нац. исследоват. ун-т МЭИ. – Москва, 2015. – 19 с.

Статья сдана в редакцию 16 ноября 2018 года

Александр Сергеевич Коваль, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: etf@bru.by.

Александр Игоревич Артеменко, аспирант, Белорусско-Российский университет.

Aleksandr Sergeyevich Koval, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: etf@bru.by.

Aleksandr Igorevich Artemenko, PhD student, Belarusian-Russian University.

