

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ УЧАСТКОВОГО ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Г.И. Бабокин<sup>1</sup>, Д.М. Шпрехер<sup>1,2</sup>, Д.С. Овсянников<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: shpreher-d@yandex.ru

<sup>2</sup> Тульский государственный университет, Тула, Россия

**Аннотация:** Исследована энергоэффективность применения синхронного двигателя с постоянными магнитами для участкового ленточного конвейера угольной шахты. Исследование проведено для типового высокопроизводительного очистного участка шахты «Апардинская», ООО ЮжКузбассуголь. Разработана аналитическая методика расчета удельного расхода электрической энергии, потребляемой двухдвигательным асинхронным электроприводом и электроприводом с синхронными двигателями с постоянными магнитами для участкового ленточного конвейера при изменении параметров потока транспортируемого угля, с учетом зависимости КПД электропривода от коэффициента его загрузки для челноковой и односторонней схем работы очистного комбайна. Установлены зависимости КПД элементов электропривода участкового ленточного конвейера от коэффициента загрузки конвейера. Определены зависимости удельного расхода электроэнергии электропривода конвейера за период отработки очистным участком 450 м выемочного столба от сопротивляемости пласта угля резанию для двухдвигательного асинхронного электропривода и двухдвигательного электропривода с синхронными двигателями с постоянными магнитами при работе очистного комбайна по челноковой и односторонней схемам.

**Ключевые слова:** очистной комбайн, очистной участок, участковый ленточный конвейер, удельный расход электроэнергии, потребляемая электроэнергия, мощность, производительность, сопротивляемость угля резанию.

**Для цитирования:** Бабокин Г. И., Шпрехер Д. М., Овсянников Д. С. Исследование энергоэффективности применения синхронного двигателя с постоянными магнитами для участкового ленточного конвейера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 1. – С. 141–153. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_1\_0\_141.

### Energy efficiency of permanent magnet synchronous motor operation on longwall belt conveyor

G.I. Babokin<sup>1</sup>, D.M. Shprekher<sup>1,2</sup>, D.S. Ovsyannikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: shpreher-d@yandex.ru

<sup>2</sup> Tula State University, Tula, Russia

**Abstract:** The article discusses energy efficiency of operation of a permanent magnet synchronous motor on a longwall belt conveyor in a coal mine. The study is carried out for a standard

high-production longwall in the Alarda Mine of Yuzhkuzbass Company. An analytical procedure is developed to calculate specific energy consumption by a twin-motor asynchronous drive and by a drive with permanent magnet synchronous motors on a belt conveyor at the varied parameters of coal flow, with regard to the dependence of the drive efficiency on its load factor for the shuttle and one-way operation of a cutter-loader. The dependences of the drive efficiency of the belt conveyor on the conveyor load factor are determined. The specific energy consumptions of the conveyor drive during mining a longwall 450 m long are correlated with the coal seam cuttability for the twin-motor asynchronous drive and for the twin-motor drive with permanent magnet synchronous motors in the shuttle and one-way operation of a cutter-loader.

**Key words:** cutter-loader, longwall, longwall belt conveyor, specific energy consumption, consumed energy, capacity, productivity, coal cuttability.

**For citation:** Babokin G. I., Shprekher D. M., Ovsyannikov D. S. Energy efficiency of permanent magnet synchronous motor operation on longwall belt conveyor. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(1):141-153. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_1\_0\_141.

---

## Введение

При подземной добыче угля основным энергетическим ресурсом является электрическая энергия. Затраты электрической энергии механизированным оборудованием добычи и транспортирования угля составляет до 19% от общего потребления электрической энергии шахты. При обработке пологих и наклонных угольных пластов по простиранию и падению пласта применяются фланговая выемка угля узкозахватными очистными комбайнами (ОК). Технология добычи угля включает операции отделения угля от массива, его дробление и погрузку исполнительным органом ОК на скребковый конвейер, который транспортирует уголь на участковый ленточный конвейер (УЛК), расположенный на конвейерном штреке очистного участка. При этом грузопоток, поступающий на УЛК, крайне неравномерен из-за различной производительности ОК при выполнении технологических операций выемки угля, зарубки исполнительного органа и зачистки машинной дороги. Далее уголь транспортируется магистральным ленточным конвейером на поверхность шахты, при этом на ма-

гистральный конвейер поступает уголь из нескольких очистных участков. Повышение производительности и улучшение технико-экономических показателей очистных участков угольных шахт достигается переходом на отработку лав длинными столбами и увеличением установленной мощности оборудования механизированного очистного участка. При этом возрастает объем потребления и удельный расход электрической энергии очистным участком. Угольные предприятия добиваются снижения себестоимости продукции, в том числе за счет уменьшения энергозатрат на тонну добываемой продукции — удельного расхода электрической энергии, так как это обеспечивает конкурентные преимущества предприятия на рынке. Удельный расход электроэнергии при добыче угля зависит от технических параметров оборудования очистного забоя, горно-геологических условий шахты и многих случайно изменяющихся других факторов. Тип применяемого электропривода (ЭП) УЛК существенно влияет на энергозатраты очистного участка. В настоящее время для УЛК применяется в основном асинхронный нерегулируемый

ЭП и в ряде стран применяют частотно-регулируемый асинхронный ЭП (АЭП) и синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ).

В связи с изложенным актуально оценить энергетическую эффективность применения СДПМ для участков ленточных конвейеров в сравнении с применяемым асинхронным электроприводом.

### **Анализ исследований и публикаций**

Развитие оборудования очистных участков угольных шахт происходит в направлении увеличения производительности и возрастания длины лав и обрабатываемых столбов [1, 2]. При этом увеличивается мощность электрооборудования, возрастает электропотребление и усложняются системы применяемого электропривода [3 – 5]. Формирование грузопотока транспортной системы очистного участка, включающей скребковый конвейер, перегружатель и УЛК, осуществляется ОК. Расчет производительности ОК и энергетических параметров оборудования очистного участка при различных технологических схемах работы комбайна проводится различными методами. Исходные данные для расчета: технические параметры оборудования механизированного комплекса; горно-геологические условия работы; технологические схемы очистных работ. Направления развития технических параметров электрооборудования очистных работ представлены в [6]. В работе [7] для расчета параметров электропотребления участка применяется метод коэффициента спроса, имеющий низкую точность, а в [8] — методы имитационного моделирования, позволяющие определить энергетические параметры очистного забоя. Модели получены при достаточно большом количестве допущений и не учитывают технологические

операции ОК, влияющие на параметры электропотребления ленточных конвейеров. Аналитический метод расчета производительности комбайна с учетом сопротивляемости угля резанию представлен в [9]. Для привода УЛК применяется в основном нерегулируемый многодвигательный электропривод, методики расчета энергетических характеристик которого рассмотрены в работах [10 – 12], где также показано, что КПД и его коэффициент мощности зависят от коэффициента загрузки привода УЛК. В работах [9 – 13] рассмотрены аналитические методы определения удельного расхода и производительности оборудования очистного забоя и повышения его энергоэффективности. В [10] рассмотрены аналитические методы расчета энергетических показателей при работе ОК по выемке угля без учета технологических операций зачистки машинной дороги и зарубки исполнительного органа в пласт угля. В [2, 10] представлена методика выбора оптимальной длины лавы высокопроизводительного забоя, обеспечивающего максимальную производительность, без достаточного точного учета расхода электроэнергии при добыче угля. Закономерности формирования удельного расхода электрической энергии оборудования очистного участка и методика расчета удельного расхода электроэнергии очистного участка, с учетом потребления электроэнергии УЛК с асинхронным нерегулируемым ЭП при различной длине столба и учете сопротивляемости пласта угля резанию, представлены в работах [13, 14].

В последние годы для привода ленточных конвейеров находят применение частотно-регулируемый АЭП и ЭП с синхронным двигателем с постоянными магнитами (СДПМ). Основные достоинства СДПМ [15 – 18]: возможность получения высоких моментов при низ-

кой угловой скорости вала, что позволяет реализовать безредукторный привод конвейера; высокая энергоэффективность потребления энергии, соответствующая классу IE4; применяемая система векторного управления обеспечивает максимальный пусковой момент и высокую перегрузочную способность; стабильность заданной угловой скорости. В [19] изложена методика расчета энергетических параметров СДПМ.

В работах [20–24] проведено сравнение уровня энергопотребления безредукторного электропривода СДПМ и асинхронного нерегулируемого ЭП УЛК и показана энергоэффективность СДПМ. При сравнении энергетических параметров электроприводов не учитывалось: зависимость КПД сравниваемых ЭП от коэффициента загрузки; изменение сопротивляемости пласта угля резанию в лаве; особенности работы ОК по челноковой и односторонней технологическим схемам.

Цель работы — установить закономерности формирования потока угля из забоя и оценить энергетическую эффективность применения СДПМ для УЛК.

Задачи, решаемые в работе: разработать аналитическую методику расчета удельного расхода электрической энергии, потребляемой УЛК, при изменении параметров потока транспортируемого угля, с учетом зависимости КПД электропривода от коэффициента загрузки; количественно установить закономерности изменения удельного расхода УЛК для АЭП и СДПМ при изменении сопротивляемости пласта угля резанию в лаве и работе ОК по челноковой и односторонней схемам.

### Методика исследований

Методика исследований включает два этапа: первый, представленный в работах [2, 6, 14], — установление параметров диаграмм производительности ОК

при его работе по челноковой и односторонней схемам и отработке пласта с сопротивляемостью угля резанию от 100 до 300 кН/м; второй — получение уравнения для определения удельного расхода УЛК для АЭП и электропривода с СДПМ при изменении сопротивляемости пласта угля резанию в лаве и работе ОК по челноковой и односторонней схемам.

На втором этапе методики определяются энергетические параметры телескопического УЛК для АЭП и ЭП с СДПМ [14], отличающиеся учетом изменения коэффициента полезного действия (КПД) конвейера в функции его загрузки.

Математическое ожидание мощности, потребляемой электрической энергии электроприводом ЛК при выполнении операций цикла работы ОК в лаве определяется по формуле [13, 14] с учетом изменения коэффициента загрузки УЛК:

$$\bar{P}_{\text{лк}} = \left[ \left( \frac{\bar{Q}}{3,6 \cdot V_{\text{л}}} + q_{\text{л}} + q_{\text{п}} \right) \cdot \omega \cdot c \cdot g \cdot L_{\text{зт}} \cdot V_{\text{л}} \right] \cdot \eta_{\text{эпт}}^{-1}(k_{\text{з}}) \quad (1)$$

где  $\bar{Q}$  — математическое ожидание производительности ОК при выполнении операций в цикле работы ОК [14], равное математическому ожиданию производительности транспортировки угля УЛК  $\bar{Q}_{\text{л}}$ ;  $q_{\text{л}}$ ,  $q_{\text{п}}$  — соответственно, погонная нагрузка ленты и вращающихся частей роликовых опор движению ленты;  $\omega$  — коэффициент сопротивления движению ленты;  $c$  — коэффициент, учитывающий сопротивление движению ленты с грузом в местах изгиба на барабанах и усилие натяжения ленты;  $g$  — ускорение свободного падения;  $L_{\text{зт}}$  — длина загруженной части ленты конвейера;  $V_{\text{л}}$  — скорость движения ленты ЛК;  $\eta_{\text{эпт}}(k_{\text{з}})$  — КПД электропривода;  $k_{\text{з}}$  — коэффициент загрузки УЛК, ( $k_{\text{з}} = Q_{\text{з}} / Q_{\text{л,ном}}$ ),

где  $Q_{\text{л.ном}}$  – номинальная производительность ЛК [2, 6, 12].

Предложено определять КПД многодвигательного электропривода с учетом его зависимости от коэффициента загрузки УЛК и по формуле

$$\eta_{\text{эп}} = \eta_{\text{эд}}^{n_1}(k_3) \cdot \eta_{\text{р}}^{n_2}(k_3) \cdot \eta_{\text{м}}^{n_3}, \quad (2)$$

где  $\eta_{\text{эд}}(k_3)$  – КПД электродвигателя;  $\eta_{\text{р}}(k_3)$  – КПД редуктора;  $\eta_{\text{м}}$  – КПД гидравлической муфты;  $n_1$  – число электродвигателей ЭП;  $n_2$  – число редукторов ЭП;  $n_3$  – число муфт ЭП.

Зависимость КПД электродвигателя (ЭД) от коэффициента загрузки в установившемся режиме работы имеет следующий вид:

$$\eta = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{пол}} + \Delta P} = \frac{k_3 \cdot M_{\text{н}} \cdot \omega_i}{k_3 \cdot M_{\text{н}} \cdot \omega_i + \Delta P_{\text{пос}} + \Delta P_{\text{пер}}} \quad (3)$$

где  $P_{\text{пол}} = k_3 \cdot M_{\text{н}} \cdot \omega_i$  – полезная мощность на валу ЭД;  $k_3$  – коэффициент загрузки ЭД;  $M_{\text{н}}$  – номинальный момент ЭД;  $\omega_i$  – угловая скорость ЭД на естественной механической характеристике;  $\Delta P_{\text{пос}}$  – постоянные потери мощности в ЭД;  $\Delta P_{\text{пер}}$  – переменные потери мощности в ЭД.

Для АД постоянные потери мощности равны [12]

$$\Delta P_{\text{пос}} = \Delta P_{\text{ст1}} + \Delta P_{\text{ст2}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{д}} \quad (4)$$

где  $\Delta P_{\text{ст1}}$ ,  $\Delta P_{\text{ст2}}$ ,  $\Delta P_{\text{мех}}$ ,  $\Delta P_{\text{д}}$  – соответственно потери в стали статора и ротора, механические и добавочные.

Переменные потери мощности в АД равны

$$\Delta P_{\text{пер}} = \Delta P_{\text{пер1}} + \Delta P_{\text{пер2}} \quad (5)$$

где  $\Delta P_{\text{пер1}} = m_1 I_1^2 R_1$  – переменные потери мощности в статоре;  $m_1$  – число фаз обмотки статора;  $I_1$  – фазный ток в

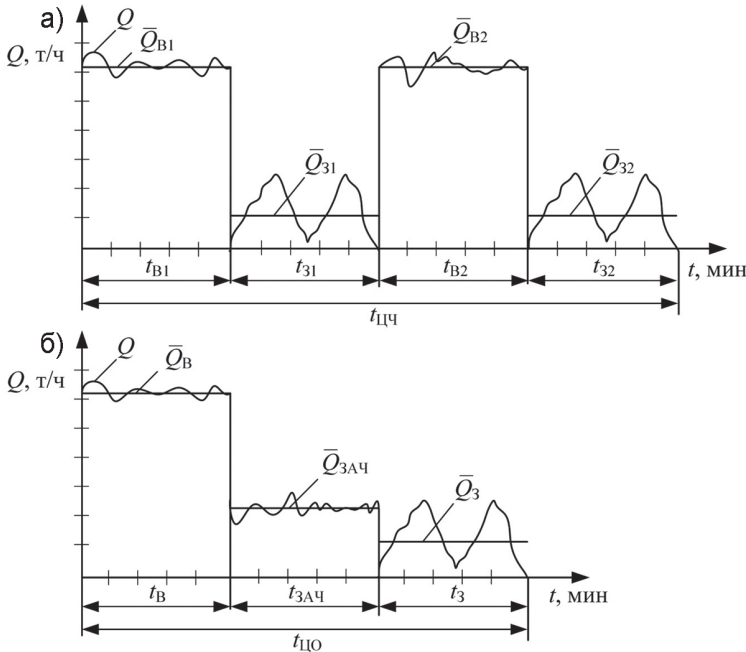


Рис. 1. Диаграммы производительности потока угля, поступающего на УЛК за цикл работы ОК: челноковая схема работы ОК (а); односторонняя схема работы ОК (б)

Fig. 1. Diagrams of the coal flow entering the SBC during the operating cycle of the shearer: shuttle operation of the shearer (a); one-sided scheme of operation of the shearer (b)

обмотке статора;  $R_1$  – активное сопротивление фазы обмотки статора;  $\Delta P_{\text{пер}2} = m_1 (I'_2)^2 R'_2$  – переменные потери мощности в роторе;  $I'_2$  – фазный ток в обмотке ротора;  $R'_2$  – активное сопротивление фазы обмотки ротора.

Для СДПМ [19] при работе в режиме с постоянной угловой скоростью  $\omega_1 = \omega_0$  в (8) потери в стали ротора  $\Delta P_{\text{ст}2} = 0$  и переменные потери в роторе  $\Delta P_{\text{пер}2} = 0$ , так как на роторе СДПМ отсутствует фазная обмотка и установлены постоянные магниты.

Уравнение КПД редуктора с зубчатым зацеплением имеет вид

$$\eta_p = \frac{1}{(1/\eta_{p,\text{ном}}) + k((1/k_3) - 1)}, \quad (6)$$

где  $\eta_{p,\text{ном}}$  – номинальный КПД редуктора;  $k_3$  – коэффициент загрузки редуктора;  $k$  – коэффициент постоянных потерь в редукторе.

Применение СДПМ позволяет создать безредукторный электропривод УЛК, для которого  $\eta_p = 1$ .

По уравнению (1) при заданных параметрах ОК и механизированного комплекса по методике (14) определяются диаграммы производительности потока угля  $Q(t)$ , поступающего на УЛК за цикл работы ОК (см. рис. 1). На рисунке:  $\bar{Q}_{в1}$ ,  $\bar{Q}_{в2}$ ,  $\bar{Q}_{з1}$ ,  $\bar{Q}_{з2}$  – математические ожидания производительности потока угля за время выполнения технологических операций за цикл работы ОК по челноковой схеме (рис. 1, а);  $\bar{Q}_в$ ,  $\bar{Q}_{зач}$ ,  $\bar{Q}_з$  – математические ожидания производительности потока угля за время выполнения технологических операций за цикл работы ОК по односторонней схеме (рис. 1, б). Расшифровка временных параметров диаграмм представлена в таблице.

Так как на вход УЛК поступает непрерывный поток угля ступенчатой формы (рис. 1) и, в соответствии с (1), математическое ожидание мощности, потребляемой электроприводом конвейера, пропорционально математическому ожиданию производительности, то диаграммы

#### Параметры режима работы очистного комбайна и ленточного конвейера при изменении сопротивляемости угля резанию

#### Parameters of the operating mode of the shearer and belt conveyor when changing the resistance of coal to cutting

№ п/п	Параметры режима работы очистного комбайна и ленточного конвейера	Сопротивляемость угля резанию, кН/м		
		300	200	100
1	Техническая производительность комбайна при выемке угля, т/мин	10,8	16,2	32,5
2	Длительность времени (челноковая/односторонняя схема): – цикла работы, $t_{\text{цч}}/t_{\text{цo}}$ – выемки угля в цикле, $t_{в1} = t_{в}/t_{в}$ – зарубки ИО в цикле, $t_{з1} = t_{з}/t_{з}$ – зачистки машинной дороги, нет/ $t_3$	172,0/102,6 106,4/53,1 65,6/32,8 16,7	136,6/84,9 71,0/35,4 65,6/32,8 16,7	101,0/67,2 35,4/17,7 65,6/32,8 16,7
3	Число циклов работы в сутки (челноковая/односторонняя схема), $n_{\text{цч}}/n_{\text{цo}}$	6,3/10,5	7,9/12,7	10,7/16,0
4	Средняя производительность ОК и ЛК, т/ч: – при выемке угля в цикле $\bar{Q}_в$ – при зарубке исполнительного органа в цикле $\bar{Q}_з$ – при зачистке машинной дороги $\bar{Q}_{зач}$	648 150 252	972 150 252	1920 150 252



мощности имеют ступенчато изменяющуюся форму, повторяющую в другом масштабе диаграммы производительности.

Далее, с учетом принятых ранее допущений, принимаем, что технология выполнения работы ОК при выемке ленты угля и зарубке исполнительного органа одинаковы для челноковой и односторонней схем работы комбайна и поэтому

$$\bar{Q}_{в1} = \bar{Q}_{в2} \text{ и } \bar{P}_{в1} = \bar{P}_{в2} = \bar{P}_{в};$$

$$\bar{Q}_{з1} = \bar{Q}_{з2} \text{ и } \bar{P}_{з1} = \bar{P}_{з2} = \bar{P}_{з}.$$

Электрическая энергия, потребляемая электроприводом конвейера за цикл работы ОК, и удельный расход электрической энергии (ЭЭ) конвейера за цикл работ при челноковой и односторонней схемах работы ОК определяется по методике [14].

### Результаты исследований

Исследование проведено для типowego высокопроизводительного очистного участка шахты «Апардинская» ООО ЮжКузбассуголь. Очистной забой участка оснащен механизированным комплексом Глинник 21/45 со следующим основным оборудованием: очистной комбайн KSW-1140, скребковый конвейер АНЖЕРА-34, перегружатель ПСН3100, участковый телескопический ленточный конвейер 2ПТ120, имеющий номинальную длину 450 м и двухдвигательный АЭП суммарной мощностью 500 кВт. Применены два приводных блока, каждый из которых включает электродвигатель ВАОК-450 (мощность 250 кВт), редуктор Ц2-630, гидромuftу Т9С. Предложен электропривод УЛК с двумя приводными блоками, каждый из которых включает СДПМ ТВVF 250/40УС (мощность 250 кВт) и соединительную муftу, обеспечивающий необходимые момент и угловую скорость ведущего барабана конвейера без применения редуктора.

По изложенной методике определены параметры режимов работы и производительности комбайна и УЛК за цикл работы для челноковой и односторонней схем работы ОК, представленные в таблице, при значениях сопротивляемости угля резанию 300, 200, 100 кН/м.

По полученным параметрам потока угля, поступающего на вход ЛК (см. таблицу), рассчитываем энергетические параметры УЛК.

Номинальная длина ЛК  $L_{лн} = 450$  м, длина участка укорочения ленты  $L_{ук} = 50$  м, число укорочений ленты ЛК равно  $n_{ук} = L_{лн} / L_{ук} = 9$ .

При определении КПД двухдвигательного электропривода УЛК по формуле (2) учитывался разный состав элементов приводного блока для АЭП и СДПМ. КПД асинхронного электропривода определялся при  $n_1 = n_2 = n_3 = 2$ , а КПД электропривода конвейера с СДПМ при  $n_1 = 2$ ,  $\eta_p = \eta_m = 1$ .

При сравнительном определении энергетических характеристик приводов номинальные параметры их элементов следующие:

$$\eta_{ад.ном} = 0,943; \eta_{сдпм.ном} = 0,957;$$

$$\eta_p = 0,97; \eta_{м.ном} = 0,98.$$

Дополнительно принято, что для гидравлической муftы  $\eta_m = \eta_{м.ном} = \text{const}$ .

Зависимости КПД асинхронного электропривода и СДПМ от коэффициента загрузки по производительности УЛК определены по (2), с учетом (3), (6).

На рис. 2 представлены зависимости КПД элементов электропривода и КПД двухдвигательного электропривода ленточного конвейера от коэффициента загрузки конвейера.

Из данных, представленных на рис. 2, а, следует, что в диапазоне изменения коэффициента загрузки конвейера от 1,0 до 0,3 КПД СДПМ практически равен номинальному (линия 1), КПД асинхронного электродвигателя (линия 2) плав-

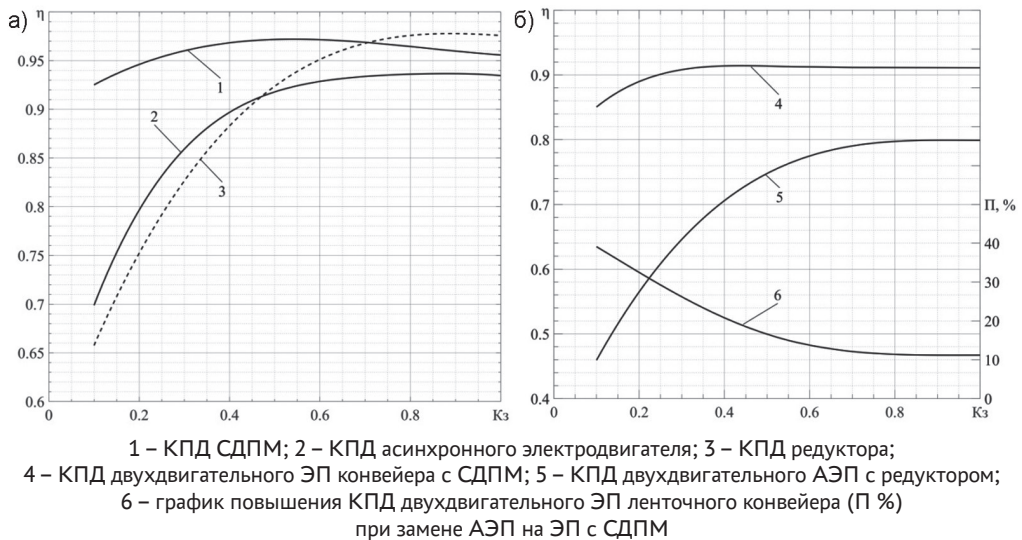


Рис. 2. Зависимости КПД элементов электропривода (а) и КПД двухдвигательного электропривода ленточного конвейера (б) от коэффициента загрузки конвейера

Fig. 2. Dependences of the efficiency factor of electric drive elements (a) and the efficiency factor of a double-motor electric drive of a belt conveyor (b) on the conveyor load factor

но уменьшается от номинального до 0,86, а КПД редуктора (линия 3) также плавно уменьшается от номинального до 0,84. При дальнейшем уменьшении коэффициента загрузки конвейера от 0,3 до 0,1 КПД СДПМ снижается до 0,91, асинхронного электродвигателя до 0,70, редуктора до 0,65.

Таким образом, СДПМ имеет больший КПД, чем асинхронный электродвигатель, на 1,5 – 9,5% при уменьшении коэффициента загрузки электродвигателей от 1,0 до 0,3.

Из анализа зависимостей рис. 2, б следует, что КПД двухдвигательного АЭП с редуктором (линия 5) при снижении коэффициента загрузки от 1,0 до 0,5 плавно снижается от 0,8 до 0,75 и при дальнейшем снижении коэффициента загрузки до 0,1 интенсивно падает до 0,45. КПД двухдвигательного ЭП конвейера с СДПМ (линия 4) при снижении коэффициента загрузки от 1,0 до 0,3 практически постоянен и равен 0,88 – 0,90. При дальнейшем снижении коэф-

фициента загрузки до 0,1 КПД электропривода с СДПМ снижается до 0,84. Полученные зависимости (см. рис. 2, б) позволили количественно оценить повышение КПД двухдвигательного электропривода ленточного конвейера (П%) при замене АЭП на двухдвигательный ЭП конвейера с СДПМ (линия 6) и работе конвейера с разным коэффициентом загрузки (постоянной производительностью конвейера). Из анализа рис. 2, б (линия 6) следует, что при снижении коэффициента загрузки от 1,0 до 0,1 КПД конвейера с применением электропривода с СДПМ повышается от 12,2 до 45,0%.

При определении удельного расхода электроэнергии УЛК, согласно разработанной методике, по диаграммам производительности УЛК (см. рис. 1) с параметрами, представленными в таблице, определялись параметры потребляемой электроэнергии электроприводом УЛК с учетом изменения КПД электропривода, а затем по методике [13, 14] рас-



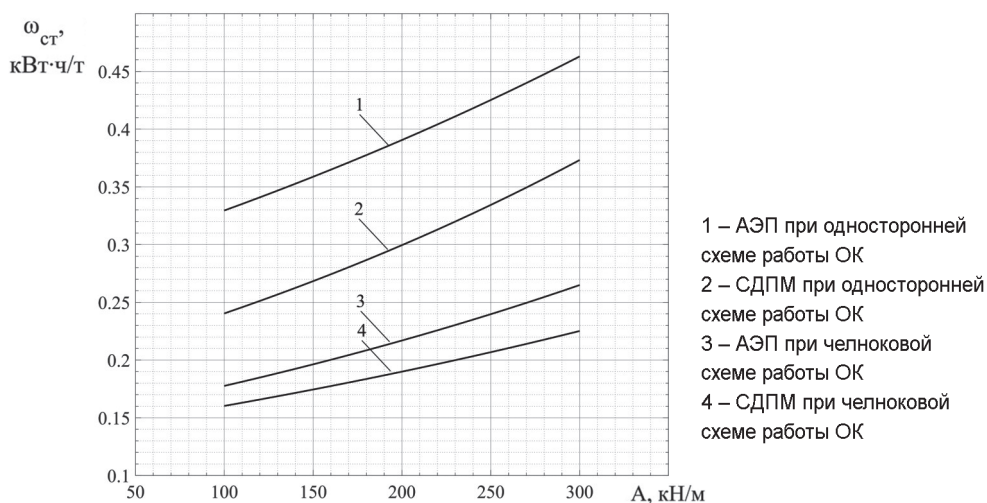


Рис. 3. Зависимости удельного расхода электроэнергии электроприводом УЛК от сопротивляемости пласта угля резанию

Fig. 3. Dependences of the specific energy consumption of the SBC electric drive on the resistance of the coal seam to cutting

считывался удельный расход электроэнергии систем электропривода для челноковой и односторонней схем работы ОК.

На рис. 3 представлены зависимости удельного расхода электроэнергии электроприводом УЛК за период отработки очистным участком 450 м выемочного столба от сопротивляемости пласта угля резанию для двухдвигательного АЭП и двухдвигательного электропривода с СДПМ при работе ОК по челноковой и односторонней схемам.

Из анализа данных рис. 3 следует, что с увеличением сопротивляемости пласта угля резанию от 100 до 300 кН/м удельный расход электроэнергии электропривода УЛК увеличивается для двухдвигательного АЭП на 27,7 – 36,6% ОК (рис. 3, а, в), а для двухдвигательного электропривода с СДПМ на 22,0 – 26,9% ОК (рис. 3, б, в) из-за снижения производительности ОК и потока угля, поступающего на УЛК и, как следствие, снижения коэффициента загрузки электропривода и КПД конвейера.

Применение двухдвигательного электропривода с СДПМ для УЛК позволяет снизить удельный расход электроэнергии ЭП в сравнении с двухдвигательным АЭП на 40 – 42% при односторонней схеме работы ОК (рис. 3, кривые 1, 2) и на 29 – 40% при челноковой схеме работы ОК (рис. 3, кривые 3, 4), вследствие значительно меньшего снижения КПД электропривода с СДПМ при снижении коэффициента загрузки конвейера.

Безредукторный электропривод УЛК с СДПМ кроме повышения КПД и снижения потребления электрической энергии имеет ряд других преимуществ в сравнении с АЭП: снижение материалоемкости изготовления; повышение ресурса и ремонтпригодности привода; снижение затрат на эксплуатацию; повышение надежности привода.

### Выводы

1. Разработана аналитическая методика расчета удельного расхода электрической энергии, потребляемой двухдвигательным АЭП и электроприводом

с СДПМ участкового ленточного конвейера, при изменении параметров потока транспортируемого угля, с учетом зависимости КПД электропривода от коэффициента его загрузки для челноковой и односторонней схем работы ОК.

2. Установлены зависимости КПД элементов ЭП ленточного конвейера от коэффициента загрузки конвейера и показано, что в диапазоне снижения коэффициента загрузки конвейера от 1,0 до 0,3 КПД СДПМ практически равен номинальному, а КПД асинхронного электродвигателя плавно уменьшается от номинального до 0,86, КПД редуктора также плавно уменьшается от номинального до 0,84. При дальнейшем уменьшении коэффициента загрузки конвейера от 0,3 до 0,1 КПД СДПМ снижается до 0,91, асинхронного электродвигателя до 0,70, редуктора до 0,65. Таким образом, СДПМ имеет больший КПД, чем асинхронный электродвигатель, на 1,5–9,5 % при уменьшении коэффициента загрузки электродвигателей от 1,0 до 0,3.

3. Установлены зависимости КПД двухдвигательного ЭП ленточного конвейера от коэффициента загрузки конвейера и показано, что КПД двухдвигательного АЭП с редуктором при снижении коэффициента загрузки от 1,0 до 0,5 плавно снижается от 0,8 до 0,75 и при дальнейшем снижении коэффициента загрузки до 0,1 интенсивно падает до 0,45. КПД двухдвигательного электропривода с СДПМ при снижении коэффициента загрузки от 1,0 до 0,3 практически постоянен и равен 0,88–0,90 и при дальнейшем снижении коэффициента загрузки до 0,1 КПД снижается

до 0,84. При замене двухдвигательного АЭП на двухдвигательный электропривод конвейера с СДПМ и работе конвейера в продолжительном режиме с разным постоянным коэффициентом загрузки (постоянной производительностью конвейера) КПД электропривода конвейера повышается от 12,2% до 45,0% с понижением коэффициента загрузки от 1,0 до 0,1.

4. Установлены зависимости удельного расхода электроэнергии электроприводом УЛК, за период отработки очистным участком 450 м выемочного столба, от сопротивляемости пласта угля резанию для двухдвигательного АЭП и двухдвигательного электропривода с СДПМ при работе ОК по челноковой и односторонней схемам.

5. Показано, что с увеличением сопротивляемости пласта угля резанию от 100 до 300 кН/м удельный расход электроэнергии электропривода УЛК увеличивается для двухдвигательного АЭП на 27,7–36,6, а для двухдвигательного электропривода с СДПМ — на 22,0–26,9% из-за снижения коэффициента загрузки и КПД электропривода конвейера при снижении производительности ОК и потока угля, поступающего на УЛК. Применение двухдвигательного электропривода с СДПМ для УЛК позволяет снизить удельный расход электроэнергии электропривода в сравнении с двухдвигательным АЭП на 40–42% при односторонней схеме работы ОК и на 29–40% при челноковой схеме работы ОК, вследствие значительно меньшего снижения КПД электропривода с СДПМ при снижении коэффициента загрузки конвейера.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов В. И., Хмелинский А. А., Мефодьев С. Н. Современные подходы к компоновке оборудования для добычи угля на пологих пластах // Уголь. — 2019. — № 6. — С. 36–40. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-6-36-40.

2. Мешков А. А., Волков М. А., Ордин А. А., Тимошенко А. М., Ботвенко Д. В. О рекордной длине и производительности очистного забоя шахты имени В.Д. Ялевского // Уголь. — 2018. — № 7. — С. 4–7. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-7-4-7.
3. Petrov V., Kuznetsov N., Morozov I. Experimental studies of energy technology indicators during ore crushing at a processing plant / Proceedings of IEEE International Conference on Advent Trends in Multidisciplinary Research and Innovation, ICATMRI 2020. Buldhana, India, 2020, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICATMRI51801.2020.9398320.
4. Malafeev S. I., Zakharov A. V., Safronenkov Yu. A. A new series of asynchronous frequency-controlled motors for mining excavators // Russian Electrical Engineering. 2019, vol. 90, pp. 299–303. DOI: 10.3103/S1068371219040060.
5. Карпенко С. М., Карпенко Н. В., Безгинов Г. Ю. Прогнозирование электропотребления на горнопромышленных предприятиях с использованием статистических методов // Горная промышленность. — 2022. — № 1. — С. 82–88. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-82-88.
6. Ордин А. А., Метельков А. А. К вопросу об оптимизации длины и производительности комплексно-механизированного очистного забоя угольной шахты // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2013. — № 2. — С. 100–112.
7. Казаченко Г. В., Кислов Н. В., Басалай Г. А. Основы расчета затрат мощности и производительности очистных и проходческих комбайнов // Горные машины и оборудование. — Минск: БНГУ, 2015. — 75 с.
8. Воронин В. А., Непша Ф. С. Имитационное моделирование электропривода очистного комбайна для оценки показателей энергоэффективности системы электроснабжения // Записки Горного института. — 2020. — Т. 246. — С. 633–639. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.5.
9. Плотников В. П. Вывод формулы для расчета производительности очистных комбайнов со штрековым, барабанным или корончатым исполнительным органом // Уголь. — 2009. — № 9. — С. 6–7.
10. Раков Д. Н., Могила В. С., Дробов А. В., Галушко В. Н. Анализ влияния различных факторов на рабочие характеристики асинхронного двигателя // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. — 2017. — № 1. — С. 10–13.
11. Беляевский Р. В. Анализ влияния коэффициента загрузки асинхронных двигателей на потребление реактивной мощности // Вестник КузГТУ. — 2010. — № 6. — С. 66–69.
12. Браславский И. Я., Ишматов З. Ш., Поляков В. Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. — М.: Издательский центр Академия, 2004. — 248 с.
13. Галкин В. И., Шешко Е. Е., Дьяченко В. П. Обоснование конструктивных параметров криволинейных участков ленточных конвейеров для горной промышленности // Горный журнал. — 2018. — № 12. — С. 69–73. DOI: 10.17580/gzh.2018.12.14.
14. Бабокин Г. И. Исследование влияния длины отработываемого столба на удельный расход электрической энергии очистного механизированного участка // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 5. — С. 155–169. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_5\_0\_155.
15. Junejo A. K., Xu W., Mu C., Ismail M. M., Liu Y. Adaptive speed control of PMSM drive system based a new sliding mode reaching law // IEEE Transactions on Power Electronics. 2020, vol. 35, pp. 12110–12121. DOI: 10.1109/TPEL.2020.2986893.
16. Семькина И. Ю., Тарнецкая А. В. Система управления электроприводом ленточного конвейера на базе безредукторного синхронного мотор-барабана // Горное оборудование и электромеханика. — 2019. — № 1. — С. 47–53. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-1-47-53.
17. Lian C., Xiao F., Gao S., Liu J. Load torque and moment of inertia identification for permanent magnet synchronous motor drives based on sliding mode observer // IEEE Transactions on Power Electronics. 2019, vol. 34, pp. 5675–5683. DOI: 10.1109/TPEL.2018.2870078.
18. Ren B., Xie C., Sun X., Zhang Q., Yan D. Parameter identification of a lithiumion battery based on the improved recursive least square algorithm // IET Power Electronics. 2020, vol. 13, pp. 2531–2537. DOI: 10.1049/ietpel.2019.1589.
19. Фираго Б. И., Александровский С. В. Энергетические показатели синхронного частотно-регулируемого электропривода // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергообъединений СНГ. — 2018. — Т. 61. — № 4. — С. 287–298. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-4-287-298.
20. Ma S. H. Study on the application of permanent magnet synchronous motors in underground belt conveyors // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017, vol. 283, article 012006. DOI: 10.1088/1757-899X/283/1/012006.

21. Qixun Zhou, Hao Gong, Guanghui Du, Yingxing Zhang, Hucheng He Distributed permanent magnet direct-drive belt conveyor system and its control strategy // *Energies*. 2022, vol. 15, article 8699. DOI: 10.3390/en15228699.
22. Brodny J., Alszar S., Krystek M., Tutak M. Availability analysis of selected mining machinery // *Archives of Control Sciences*. 2017, vol. 27(LXIII), no. 2, pp. 197 – 209. DOI: 10.1515/ACSC-2017-0012.
23. Stecula K., Brodny J., Tutak M. Informatics platform as a tool supporting research regarding the effectiveness of the mining machines work // *CBU International Conference on Innovations in Science and Education*. 2017, pp. 1215 – 1219. DOI: 10.12955/cbup.v5.1099.
24. Ning Wang, Zongguo Wen, Mingqi Liu, Jie Guo Constructing an energy efficiency benchmarking system for coal production // *Applied Energy*. 2016, vol. 169, pp. 301 – 308. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.030. **PLAS**

## REFERENCES

1. Efimov V. I., Hmelinskiy A. A., Mefodiev S. N. Modern approaches to configuration of longwall equipment for coal mining on flat seams. *Ugol'*. 2019, no. 6, pp. 36 – 40. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-6-36-40.
2. Meshkov A. A., Volkov M. A., Ordin A. A., Timoshenko A. M., Botvenko D. V. On record length and productivity of highwall mining the V.D. Yalovsky mine. *Ugol'*. 2018, no. 7, pp. 4 – 7. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-7-4-7.
3. Petrov V., Kuznetsov N., Morozov I. Experimental studies of energy technology indicators during ore crushing at a processing plant. *Proceedings of IEEE International Conference on Advent Trends in Multidisciplinary Research and Innovation, ICATMRI 2020*. Buldhana, India, 2020, pp. 1 – 4. DOI: 10.1109/ICATMRI51801.2020.9398320.
4. Malafeev S. I., Zakharov A. V., Safronenkov Yu. A. A new series of asynchronous frequency-controlled motors for mining excavators. *Russian Electrical Engineering*. 2019, vol. 90, pp. 299 – 303. DOI: 10.3103/S1068371219040060.
5. Karpenko S. M., Karpenko N. V., Bezginov G. Yu. Forecasting power consumption at mining enterprises using statistical methods. *Russian Mining Industry Journal*. 2022, no. 1, pp. 82 – 88. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-82-88.
6. Ordin A. A., Metelkov A. A. On the issue of optimizing the length to productivity of a complex-mechanized coalmine working face. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaymykh*. 2013, no. 2, pp. 100 – 112. [In Russ].
7. Kazachenko G. V., Kislov N. V., Basalay G. A. Basics of calculating power costs and productivity of shearers and roadheaders. *Gornye mashiny i oborudovanie* [Mining machines and equipment], Minsk, BNGU, 2015, 75 p.
8. Voronin V. A., Nepsha F. S. Simulation modeling of the electric drive of a shearer for assessing the energy efficiency indicators of the power supply system. *Journal of Mining Institute*. 2020 vol. 246, pp. 633 – 639. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.5.
9. Plotnikov V. P. Derivation of a formula for calculating the productivity of shearers with a drift, drum or crown executive body. *Ugol'*. 2009, no. 9, pp. 6 – 7. [In Russ].
10. Rakov D. N., Mogila V. S., Drobov A. V., Galushko V. N. Analysis of influence of various factors on the working characteristic of asynchronous motors. *Bulletin of BSUT: science and transport*. 2017, no. 1, pp. 10 – 13. [In Russ].
11. Belyaevsky R. V. Analysis of the influence of the load factor of asynchronous motors on reactive power consumptio. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2010, no. 6, pp. 66 – 69. [In Russ].
12. Braslavskiy I. Ya., Ishmatov Z. Sh., Polyakov V. N. *Energoberegayushchiy asinkhronniy elektropivod* [Energy-saving asynchronous electric drive], Moscow, 2004, 248 p.
13. Galkin V. I., Sheshko E. E., Dyachenko V. P. Justification of the design parameters of curved sections of belt conveyors for the mining industry. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 12, pp. 69 – 73. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.12.14.
14. Babokin G. I. Influence of longwall length on specific power consumption. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 5, pp. 155 – 169. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_5\_0\_155.
15. Junejo A. K., Xu W., Mu C., Ismail M. M., Liu Y. Adaptive speed control of PMSM drive system based a new sliding-mode reaching law. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2020, vol. 35, pp. 12110 – 12121. DOI: 10.1109/TPEL.2020.2986893.

16. Semykina I. Yu., Tarnetskaya A. V. Control system for the electric drive of a belt conveyor based on a gearless synchronous motor-drum. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2019, no. 1, pp. 47 – 53. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-1-47-53.

17. Lian C., Xiao F., Gao S., Liu J. Load torque and moment of inertia identification for permanent magnet synchronous motor drives based on sliding mode observer. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019, vol. 34, pp. 5675 – 5683. DOI: 10.1109/TPEL.2018.2870078.

18. Ren B., Xie C., Sun X., Zhang Q., Yan D. Parameter identification of a lithium-ion battery based on the improved recursive least square algorithm. *IET Power Electronics*. 2020, vol. 13, pp. 2531 – 2537. DOI: 10.1049/ietpel.2019.1589.

19. Firago B. I., Aleksandrovsky S. V. Energetic factors of a frequency-controlled synchronous electric drive. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2018 vol. 61, no. 4, pp. 287 – 298. [In Russ]. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-4-287-298.

20. Ma S. H. Study on the application of permanent magnet synchronous motors in underground belt conveyors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, vol. 283, article 012006. DOI: 10.1088/1757-899X/283/1/012006.

21. Qixun Zhou, Hao Gong, Guanghui Du, Yingxing Zhang, Hucheng He Distributed permanent magnet direct-drive belt conveyor system and its control strategy. *Energies*. 2022, vol. 15, article 8699. DOI: 10.3390/en15228699.

22. Brodny J., Alszer S., Krystek M., Tutak M. Availability analysis of selected mining machinery. *Archives of Control Sciences*. 2017, vol. 27(LXIII), no. 2, pp. 197 – 209. DOI: 10.1515/ACSC-2017-0012.

23. Stecula K., Brodny J., Tutak M. Informatics platform as a tool supporting research regarding the effectiveness of the mining machines work. *CBU International Conference on Innovations in Science and Education*. 2017, pp. 1215 – 1219. DOI: 10.12955/cbup.v5.1099.

24. Ning Wang, Zongguo Wen, Mingqi Liu, Jie Guo Constructing an energy efficiency benchmarking system for coal production. *Applied Energy*. 2016, vol. 169, pp. 301 – 308. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.030.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бабокин Геннадий Иванович<sup>1</sup> – д-р техн. наук, профессор, профессор, e-mail: babokinginov@yandex.ru,

Шпрехер Дмитрий Маркович<sup>1,2</sup> – д-р техн. наук, доцент, профессор, e-mail: shpreher-d@yandex.ru,

Овсянников Дмитрий Сергеевич<sup>2</sup> – аспирант, e-mail: ovsyannikov\_d\_s@mail.ru,

<sup>1</sup> НИТУ МИСИС,

<sup>2</sup> Тульский государственный университет.

**Для контактов:** Шпрехер Д.М., e-mail: shpreher-d@yandex.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

G.I. Babokin<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor, e-mail: babokinginov@yandex.ru,

D.M. Shprekher<sup>1,2</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Professor, e-mail: shpreher-d@yandex.ru,

D.S. Ovsyannikov<sup>2</sup>, Graduate Student, e-mail: ovsyannikov\_d\_s@mail.ru,

<sup>1</sup> NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia,

<sup>2</sup> Tula State University, 300012, Tula, Russia

**Corresponding author:** D.M. Shprekher, e-mail: shpreher-d@yandex.ru.

Получена редакцией 27.04.2024; получена после рецензии 16.10.2024; принята к печати 10.12.2024.

Received by the editors 27.04.2024; received after the review 16.10.2024; accepted for printing 10.12.2024.