

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕГРАДАЦИИ ЛИТИЕВОГО АККУМУЛЯТОРА САМОСВАЛА С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

Н. И. Щуров¹, С. И. Дедов¹, А. А. Штанг¹, У. Сяоган²

¹ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия,

² Харбинский научно-технический университет, Харбин, Китай

Аннотация: В работе приведены результаты модельного эксперимента по оценке деградации тяговой аккумуляторной батареи на базе литий-железо-фосфатных ячеек, входящей в состав тягового электропривода полностью электрического карьерного самосвала. Рассмотрены возможные варианты исполнения тягового привода карьерного самосвала, определен тренд применения литиевых ячеек в качестве бортового источника энергии. Приведены основные механизмы и причины уменьшения доступной емкости литиевых источников энергии с их последующим окончанием срока службы. Для оценки величин деградации литиевого аккумулятора и выявления наиболее ресурсосберегающих режимов работы выполнен синтез имитационной модели тягового привода электрического карьерного самосвала с литий-железо-фосфатным аккумулятором. В качестве нагрузочного цикла использовались записи реальных режимов движения карьерного самосвала и дорожного полотна. За испытуемую принята модель ZT118 компании Zoomlion со снаряженной и максимальной массой 37 и 118 т соответственно. Эксплуатация до окончания срока службы аккумулятора моделировалась при различных режимах работы с разной глубиной разряда – 18%, 36% и 72%. Выявлено, что наиболее ресурсосберегающим для литиевого аккумулятора является кратковременный подзаряд после каждого этапа спуска-подъема. По сравнению с длительным использованием и подзарядом при полном разряде или окончании рабочей смены, предложенный режим работы увеличивает дальность пробега до окончания срока службы аккумулятора на 140 тыс. км, что составляет 38%.

Ключевые слова: карьерный самосвал, электротранспорт, литиевый аккумулятор, химический источник тока, литий-железо-фосфат, деградация, рекуперация энергии.

Для цитирования: Щуров Н. И., Дедов С. И., Штанг А. А., Сяоган У. Моделирование процессов деградации литиевого аккумулятора самосвала с электрическим приводом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10-1. – С. 76–90. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_76.

Simulation of lithium battery degradation processes of the dump truck with electric drive

N. I. Shchurov¹, S. I. Dedov¹, A. A. Shtang¹, Wu Xiaogang²

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia,

² Harbin University of Science and Technology, Harbin, China

Abstract: The paper presents the results of a model experiment to assess the traction battery

degradation based on lithium-iron-phosphate cells, which is a part of electric dump truck traction drive. Possible versions of an electric dump truck traction drive are considered, a trend of using lithium cells as an onboard energy source is determined. The main mechanisms and reasons for the decrease lithium energy sources available capacity with their subsequent end of service life are given. To assess the extent of lithium battery degradation and identify the most resource-saving operating modes, the model of electric dump truck traction drive with lithium-iron-phosphate battery was synthesized. As a load cycle, records of real mining dump truck movement modes and the roadway were used. The ZT118 from Zoomlion with a curb weight and a maximum weight of 37 and 118 tons respectively was taken as the test model. Operation until the end of battery life was modeled under various operating modes with different depth of discharge – 18%, 36% and 72%. It has been found that the most resource-saving for a lithium battery is a short-term recharge after each stage of descent and ascent. Compared to long-term use and recharging at full discharge or the end of work shift, the proposed mode of operation increases the range until the end of battery life by 140 thousand km, which is 38%.

Key words: mining dump truck, electric transport, lithium battery, chemical current source, lithium iron phosphate, degradation, energy recovery.

For citation: Shchurov N.I., Dedov S.I., Shtang A.A., Wu Xiaogang. Simulation of lithium battery degradation processes of the dump truck with electric drive. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10-1):76–90. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_76.

1. Введение

Актуальным направлением развития горной транспортной техники является электрификация тягового привода с целью повышения энергоэффективности, маневренности и сокращения вредных выбросов. Самосвалы, применяемые в горнодобывающей промышленности для перевозки руды на дробильно-обогащительные фабрики и вскрыши в отвалы, относятся к классу транспортных средств с наибольшим потреблением топлива [1].

Большинство крупнотоннажных самосвалов имеют дизель-электрический тяговый привод без бортовой тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ) или внешнего источника питания. Также применяются самосвалы в сочетании с внешним питанием от троллейных линий [2, 3], однако они не получили широкого распространения из-за постоянного изменения конфигурации карьера.

В связи с быстрым развитием технологии литий-ионных батарей альтернативой традиционному дизель-элек-

трическому тяговому приводу является полностью электрический привод, для которого бортовым источником энергии является аккумуляторная сборка. Электрический карьерный самосвал полностью приводится в движение от бортовых ТАБ. Он не требует сжигания дизельного топлива и может возвращать часть энергии в накопитель при рекуперативном торможении с высокой эффективностью и без загрязнения окружающей среды [4, 5].

Ввиду ограничений габаритных показателей для установки ТАБ, а также их энергоемкости, при перемещении руды со дна карьера наверх после нескольких циклов загрузки – транспортировки – разгрузки требуется подзарядка в течение 20–25 мин [6]. Общее снижение производительности зависит от режима работы и величины зарядного тока. Исключением являются предприятия, где транспортировка груза осуществляется сверху вниз, что значительно увеличивает объем возможной для рекуперации энергии, вследствие чего повыша-

ется энергетическая и экономическая эффективность.

Новейшие модели электрических самосвалов оборудуют литий-железо-фосфатными (LFP) либо литий-никель-марганец-кобальт-оксидными (NMC) аккумуляторами энергоемкостью от 500 кВт·ч [7]. Это в большой степени определяет первоначальную стоимость самосвала и затраты на последующие замены ТАБ по причине старения. Поэтому вопрос об увеличении срока службы аккумулятора является актуальным.

Различают следующие механизмы старения аккумулятора:

- **Увеличение слоя твердого электролита (Solid-electrolyte interphase, SEI).** Данный слой увеличивается даже в состоянии покоя аккумуляторной ячейки (т. н. календарное старение) при высоких уровнях заряда (State of charge, SOC), а его ускоренному образованию способствуют высокие температуры и большие токи заряда-разряда [8, 9].

- **Покрытие литием отрицательного электрода.** Побочная реакция, при которой металлический литий образуется на поверхности отрицательного электрода вместо интеркалирования в него. Основной причиной такого процесса является быстрый заряд при малых температурах, причем чем ниже температура, тем активнее процесс покрытия [10, 11].

- **Разрушение частиц.** Вызвано работой при экстремальных температурах, как выше комнатной, так и ниже нуля. Большая токовая нагрузка приводит к механическому перенапряжению структуры ячейки и более высокой вероятности разрушения. Кроме этого, на подверженность разрушению влияет высокое содержание кремния и/или большой размер частиц электрода [12].

- **Структурное изменение и разложение положительного электрода.**

Все ранее описанные деградиционные механизмы оказывают влияние на структуру положительного электрода при повышенных температурах [13, 14].

В настоящее время прослеживается рост числа современных научных работ, направленных на рассмотрение возможности и ограничений применения литиевых аккумуляторов в составе тягового привода карьерной техники. Так, в работе L. Lindgren и др. [1] проведен сравнительный анализ дизельной установки, дизельной установки с возможностью подключения к троллейным линиям и аккумуляторной установки. Результаты моделирования работы установок на базе реальных заездов показали повышение производительности у аккумуляторных самосвалов на 16% и снижение себестоимости тонны перевезенной продукции на 44% по сравнению с дизель-электрическим аналогом.

В работе Y. Feng и др. [15] рассмотрен эффект от внедрения аккумуляторных батарей в состав дизельной установки самосвала. Согласно результатам, незначительное снижение грузоподъемности и производительности полученного гибридного привода нивелируется уменьшением расхода топлива на 9% и чистых эксплуатационных расходов — на 4,8%.

В исследовании P. J. Terblanche и др. [16] проведена оценка потенциала для применения бортовых систем рекуперирования энергии с целью снижения затрат на транспортировку при добыче открытым способом. Результаты показывают, что внедрение накопительного блока на базе литий-железо-фосфатных аккумуляторов обеспечит существенное снижение затрат на подъем горных пород. Также подобное решение актуально для модернизации уже используемых карьерных самосвалов.

Карьерные самосвалы представляют собой тип транспортных средств, подвергающихся значительным нагрузкам с точки зрения массогабаритных показателей, что усложняет электрификацию. Однако совокупность высокой ежедневной наработки, возможность объединения транспортной системы в общую инфраструктуру и короткие по продолжительности циклы движения с возможностью рекуперации энергии демонстрирует высокую рентабельность подобного технического решения. Таким образом, исследование режимов работы большегрузных электрических самосвалов с учетом горнотехнических условий эксплуатации позволит определить ресурсосберегающие режимы работы ТАБ и методики расчета энергоемкости снаряжаемых аккумуляторных батарей.

2. Методика исследований

В настоящее время большинство карьерных самосвалов дизель-электрические, и следовательно, большая часть привода совпадает с полностью электрическим аналогом. В качестве основного источника энергии выступает ТАБ, а для торможения исключается тормозной резистор, т. к. рекуперированная энергия возвращается в аккумулятор, а в экстренных случаях используются механические тормоза.

В качестве модели исследуемого карьерного самосвала принята модель ZT118 компании Zoomlion (Китай). В приводе электрического аналога исключены стандартный дизельный двигатель и механическая трансмиссия. Вместо этих узлов установлены два тяговых электродвигателя (ТЭД) мощностью 250 кВт (основной) и 170 кВт (вспомогательный). Электронный контроллер управляет приводом, и по возможности (при движении порожняком) один из двигателей отключается для

экономии энергии. Источником энергии является накопительный блок на базе LFP-аккумуляторов общей энергоемкостью 525 кВт·ч и массой 4 т. Снаряженная масса карьерного самосвала — 37 т, полная масса не превышает 118 т, максимальный преодолеваемый уклон — 36%, максимальная скорость — 50 км/ч.

Для верификации модели были использованы данные, записанные бортовой системой мониторинга при работе дизель-электрических самосвалов, представленных в работе [1]. Всего идентифицировано 13 ездовых циклов с одинаковыми перепадами высот и расстоянием вождения. На рис. 1 и 2 приведены усредненные профили высоты и скорости движения карьерного самосвала. Максимальная величина уклона составила 22%, дальность пунктов погрузки и разгрузки 4,4 км.

На рис. 3 представлена диаграмма потоков энергии для самосвала с полностью электрическим приводом. Зарядные станции полностью заряжают ТАБ в течение 30–45 мин. Подзаряд может осуществляться в моменты загрузки и разгрузки руды, а также в перерывах между сменами.

В общем случае энергия, накопленная в ТАБ, расходуется на передвижение самосвала с требуемой динамикой, вспомогательные нужды, преодоление сил сопротивления качению и аэродинамического сопротивления, а также на увеличение потенциальной энергии (в момент подъема) и потери в самом аккумуляторе, ТЭД, преобразователях и механической передаче. В момент спуска часть потенциальной энергии возвращается обратно в ТАБ при рекуперативном торможении.

3. Описание разработанной модели старения аккумулятора

Выделяют несколько показателей, характеризующих работоспособность

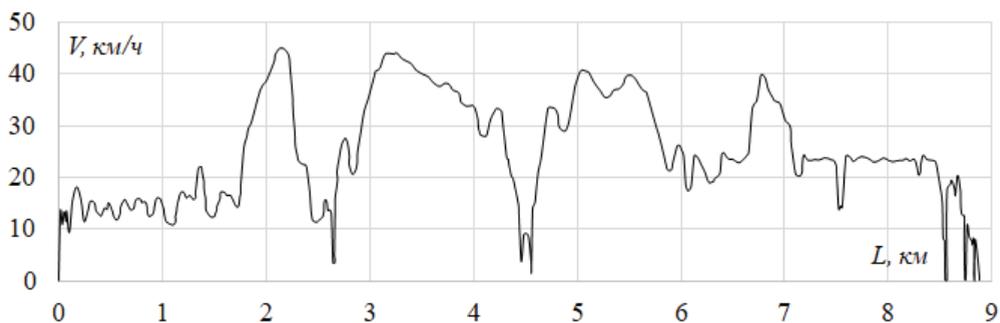


Рис. 1. Скоростная диаграмма
Fig. 1. Speed chart

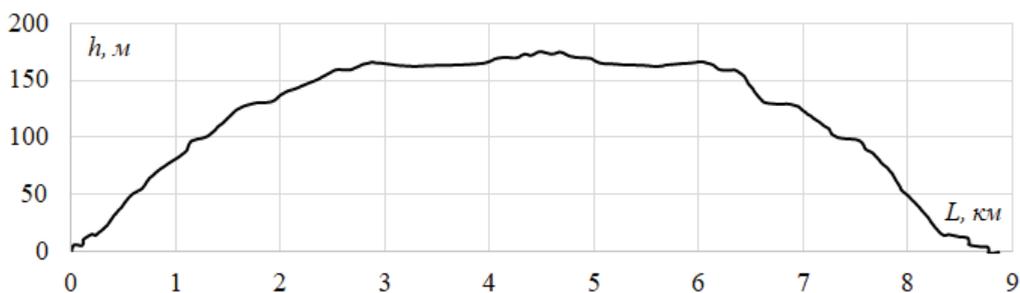


Рис. 2. Относительная высота
Fig. 2. Relative height

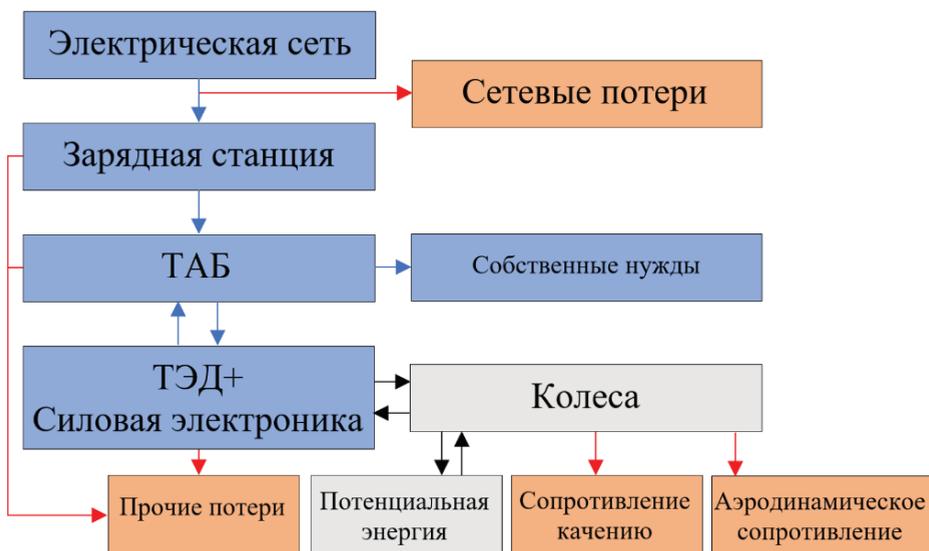


Рис. 3. Поток энергии в тяговом приводе электросамосвала
Fig. 3. Energy flows in the traction drive of an electric dump truck

и уровень деградации ТАБ. Уровень заряда аккумулятора является мерой количества заряда в батарее по сравнению с количеством, которое она может удерживать при максимальном или номинальном заряде. На максимальный уровень могут влиять такие факторы, как температура и степень деградации батареи. Таким образом, состояние батареи (State of health, SOH) является еще одним важным аспектом тягового привода. SOH — показатель степени деградации батареи; он используется для прогнозирования срока службы и прогнозирования состояния отказа. SOH определяется из следующего соотношения:

$$SOH = \frac{Q_P}{Q_F} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где Q_P — текущая доступная емкость ТАБ; Q_F — емкость ТАБ в первоначальном состоянии.

Для унификации токовой нагрузки для ячеек и сборных модулей различной энергоемкости обычно используют величину тока, приведенную к емкости ТАБ:

$$I = \frac{I_{ТАБ}}{Q_P}, \text{ С} \quad (2)$$

Для определения и оценки величины деградации литиевой ТАБ в программно-вычислительной среде MATLAB Simulink разработана модель старения накопителя энергии электросамосвала (рис. 4), включающая в себя:

- Подсистему “П1”, задающую скорость движения электросамосвала на основе диаграммы, представленной на рис. 1, а также текущего состояния ТАБ;

- Подсистему “П2”, в которой осуществляется тяговый расчет реализуемой мощности ТЭД с учетом сопротивления движению и коэффициент полезного действия (КПД) установки;

- Подсистему “П3”, определяющую режим работы и величину тока аккумулятора на основе его уровня заряда (SOC);

- Электрическую цепь, формирующую величину тока на аккумуляторе, полученную в подсистеме “П3”.

В подсистеме “П1”, показанной на рис. 5, переключается режим работы схемы в зависимости от сигнала состояния аккумулятора — State. Нулевой сигнал свидетельствует о режиме заряда ТАБ, сигнал, равный единице — о режиме разряда. Скоростная диаграмма задана поточечно с помощью блока Lockup Table “V(t)”, и воспроизводится заново после окончания либо при возобновлении движения после заряда ТАБ.

В подсистеме “П1” определяется текущая масса электросамосвала в зависимости от направления движения, задаваемого сигналом «D». Цикл состоит из двух режимов — подъем с полной загрузкой в течение 800 с ($D < 1$) и спуск порожняком в течение 720 с ($D > 1$).

В подсистеме “П2”, показанной на рис. 6, выполняется расчет мощности тяги и торможения тягового электродвигателя на основе заданного цикла движения с учетом изменяющегося уклона. Уравнение движения электросамосвала имеет следующий вид:

$$F = W_0 + W_i + W_s + W_k + W_j, \quad (3)$$

$$W_0 = w_0 G,$$

$$W_i = giG,$$

$$W_j = (1 + \gamma) \cdot a \cdot G,$$

где F — сила тяги, H ; W_0 — основное сопротивление движению, H , которое складывается из сил сопротивления в подшипниковых узлах колес и трения качения; w_0 — удельный коэффициент сопротивления движению, для

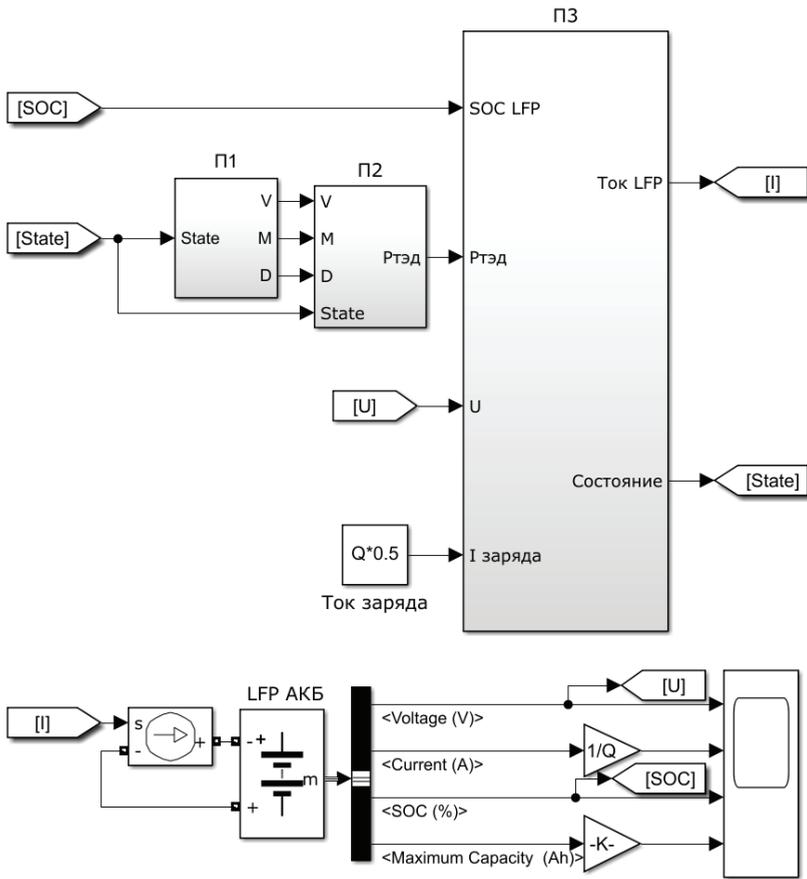


Рис. 4. Модель старения ТАБ электросамосвала
 Fig. 4. Battery aging model of an electric dump truck

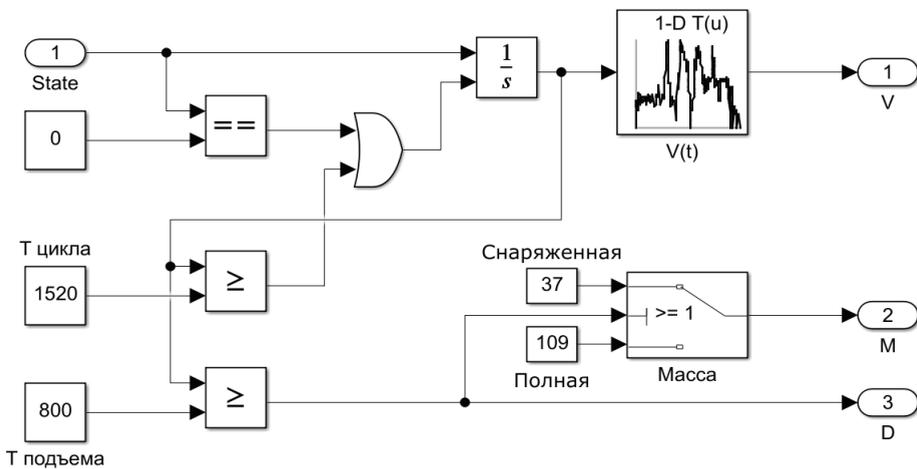


Рис. 5. Подсистема "П1"
 Fig. 5. Subsystem "P1"

движения по грунтовому укатанному проезду принят равным 500 Н/м , G — масса электросамосвала, m ; W_i — сопротивление от уклона, H, g — ускорение свободного падения, м/с^2 , i — уклон дороги, %, при моделировании задается блоком Lockup Table « $w_i(t)$, Н/т », поточно формирующим уклон дороги на основе рис. 2, повторное воспроизведение осуществляется аналогично скоростной диаграмме; W_g — сопротивление воздушной среды, H , для карьерного автотранспорта данным сопротивлением пренебрегают; W_k — сопротивление от кривизны дороги, H , при моделировании не учитывалось; W_j — сила инерции, H, γ — коэффициент, учитывающий долю массы электросамосвала, участвующую во вращательном движении. При движении с грузом и порожняком принят равным $0,03$ и $0,08$ соответственно, a — ускорение электросамосвала, м/с^2 .

Таким образом, расчет силы тяги выполняется по формуле:

$$F = (500 + gi + (1 + \gamma) \cdot a) \cdot G, \quad (4)$$

Блок умножения «а выб» рассчитывает ускорение замедления электросамосвала $a_{\text{выб}}$, м/с^2 , при выбеге по формуле (3):

$$a_{\text{выб}} = \frac{9,81 \cdot (500 + gi)}{1000}. \quad (5)$$

Мощность двигателя в режимах тяги (4) и торможения (5) рассчитываются из соотношений:

$$P_{\text{тяги}} = \frac{F_{\text{тяги}} \cdot V}{3,6 \cdot \eta_{\text{ТЭД}} \cdot \eta_{\text{ПР}} \cdot \eta_{\text{МП}}}, \text{Вт}, \quad (6)$$

$$P_{\text{торм}} = \frac{F_{\text{торм}} \cdot V \cdot \eta_{\text{ТЭД}} \cdot \eta_{\text{ПР}} \cdot \eta_{\text{МП}}}{3,6}, \text{Вт}, \quad (7)$$

где $\eta_{\text{ТЭД}}$ — КПД тягового электродвигателя, $\eta_{\text{ПР}}$ — КПД импульсного преобразователя, $\eta_{\text{МП}}$ — КПД механической передачи.

Рассчитанная величина ускорения сравнивается с ускорением замедления при выбеге. Если $a < a_{\text{выб}}$, то выходная мощность рассчитывается из режима торможения, при $a > a_{\text{выб}}$ — из режима тяги.

В подсистеме «ПЗ», показанной на рис. 7, полученная мощность преобразуется в величину тока, потребляемого или рекуперированного в аккумулятор. Функциональный блок «StateGen» определяет состояние аккумулятора: при выполнении нагрузочного цикла величина State = 1, пока не будет пройден путь, эквивалентный четырем подъемам — спускам электросамосвала (количество обусловлено энергоемкостью ТАБ), либо пока аккумулятор полностью не разрядится (SOC=0%). По достижении одного из условий State изменяет свое значение на 0, и выполняется полный заряд аккумулятора током 1С.

На основе реализуемой мощности ТЭД и собственных нужд выполняется расчет величины тока основного аккумулятора I_{LFP} А:

$$I_{\text{LFP}} = \frac{P_{\text{ТЭД}} + P_{\text{сн}}}{U}, \quad (8)$$

где $P_{\text{ТЭД}}$ — мощность, реализуемая ТЭД, Вт; $P_{\text{сн}}$ — мощность собственных нужд и вспомогательных цепей (силовые цепи компрессора кондиционера, обогревателя, системы управления батареей, усилитель руля, приборная панель водителя, освещение и др.), Вт; U — напряжение ТАБ, В.

В табл. 1 представлены основные параметры ТАБ в среде MATLAB Simulink. Количество циклов при различных токах заряда — разряда и температурах приняты согласно результатам ранее проведенных деградационных испытаний.

В табл. 2 приведены основные энергетические показатели нагрузочного цикла. На рис. 8 приведены полученные диаграммы изменения величин

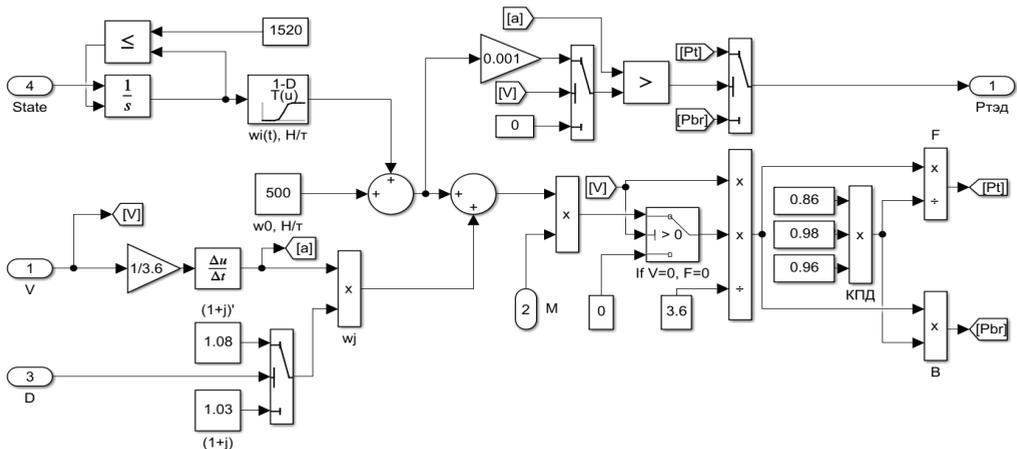


Рис. 6. Подсистема “П2”
 Fig. 6. Subsystem “P2”

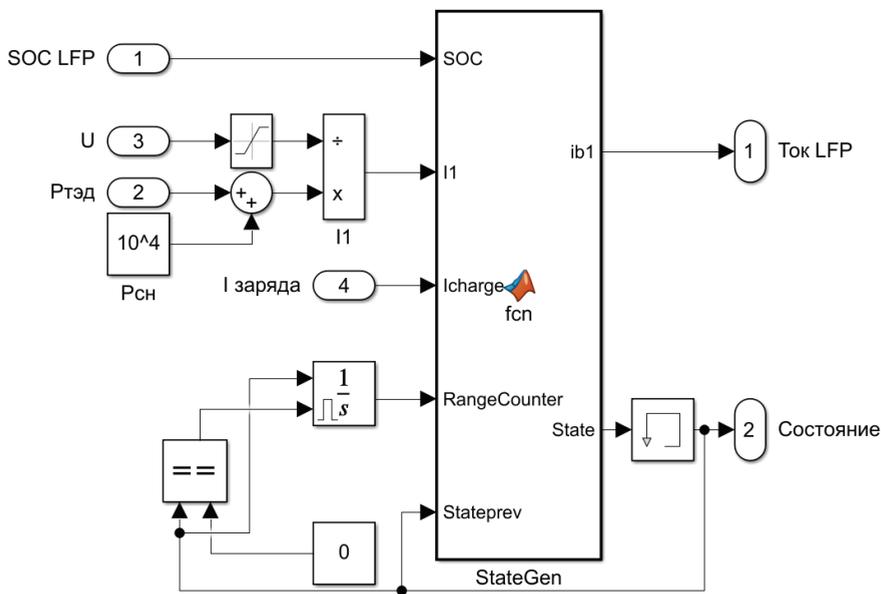


Рис. 7. Подсистема “П3”
 Fig. 7. Subsystem “P3”

напряжения и тока, уровня заряда SOC и доступной емкости ТАБ.

4. Результаты моделирования

Срок службы литиевых (EOL, end of life) аккумуляторов определяется доступной емкостью, уменьшаю-

щейся по мере использования. Окончанием срока службы, как правило, принимается момент достижения 80% от номинальной емкости аккумулятора по причине быстрого ухудшения энергетических показателей при дальнейшем использовании [17].

Таблица 1

Параметры модели ТАБ на базе LFP аккумулятора
Parameters of LFP battery model

Параметр		Размерность	Величина
Номинальное напряжение, $U_{ном}$		В	614,4
Номинальная емкость, $Q_{ном}$		А·ч	855
Напряжение отсечки, $U_{мщ}$		В	460
Внутреннее сопротивление, $R_{ном}$		Ом	0,0072
Количество циклов при температуре окружающей среды $T_a = 24^\circ\text{C}$	$DOD = 100\%, I_{заряда} = 1C, I_{разряда} = 1C$	–	4200
	$DOD = 25\%, I_{заряда} = 1C, I_{разряда} = 1C$		10000
	$DOD = 100\%, I_{заряда} = 1C, I_{разряда} = 4C$		1500
	$DOD = 100\%, I_{заряда} = 4C, I_{разряда} = 1C$		250
Количество циклов при $T_a = 32^\circ\text{C}, I_{заряда} = 1C, I_{разряда} = 1C$		–	3800

Таблица 2

Параметры нагрузочного цикла
Load Cycle Options

Параметр		Размерность	Величина
Максимальная токовая нагрузка	в режиме тяги	С	2,1
	в режиме торможения		0,8
Удельный расход энергии при подъеме (загружен)		Вт·ч/(т·км)	203,9
Удельный расход энергии при спуске (разгружен)		Вт·ч/(т·км)	17
Энергия, затраченная на тягу $E_{тяг}$		Вт·ч	240,3
Энергия рекуперативного торможения $E_{торм}$		Вт·ч	40,1
Доля энергии рекуперации		%	6

Для определения ресурсосберегающих режимов работы ТАБ проведено имитационное моделирование следующих возможных случаев эксплуатации:

- 1 цикл подъема — спуска с разрядом ТАБ до 82% и зарядом до максимума в течение 640 с;
- 2 цикла подъема — спуска с разрядом ТАБ до 64% и зарядом до максимума в течение 1290 с;
- 4 цикла подъема — спуска с разрядом ТАБ до 28% и зарядом до максимума в течение 2601 с.

Полученные результаты деградации ТАБ в зависимости от пройденного

пути приведены на рис. 9. По результатам моделирования наибольшей скорости деградации подвержена ТАБ, эксплуатируемая согласно третьему случаю эксплуатации с 4-мя циклами подъема — спуска. При этом разница между дальностью пробега до окончания срока службы ТАБ между наиболее и наименее ресурсосберегающими режимами работы равна 140 км, что составило 38%.

Таким образом, периодические кратковременные этапы подзаряда после каждого спуска способствуют значительному увеличению срока службы

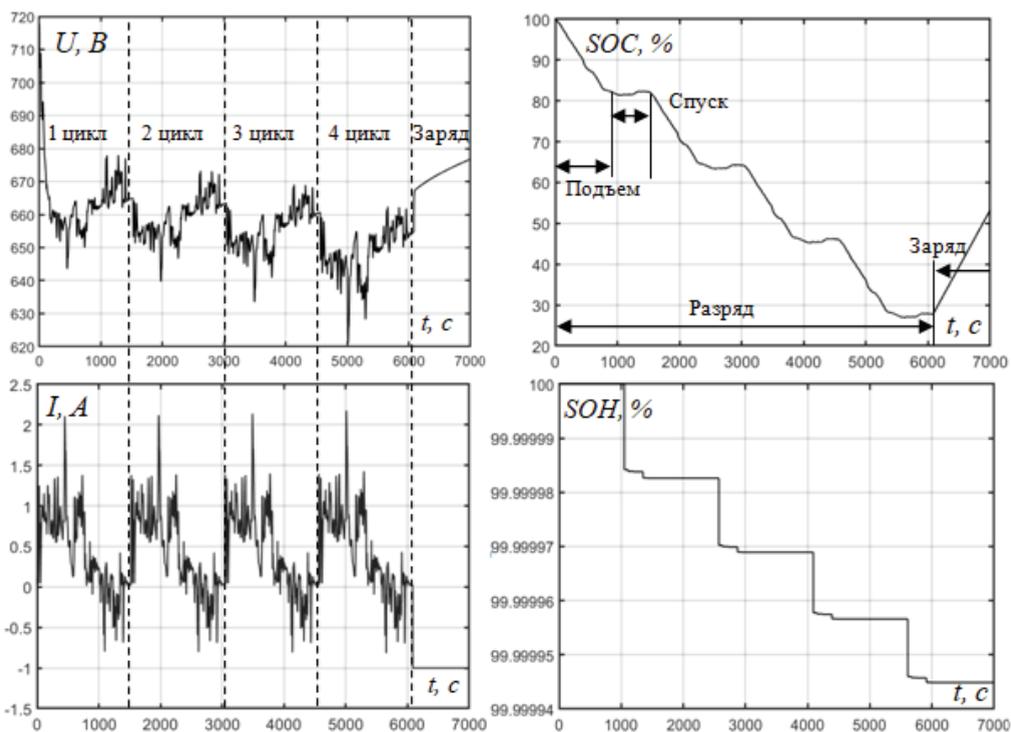


Рис. 8. Диаграммы изменения величин напряжения и тока, уровня заряда SOC и доступной емкости ТАБ

Fig. 8. Diagrams of changes in voltage and current values, SOC charge level and available battery capacity

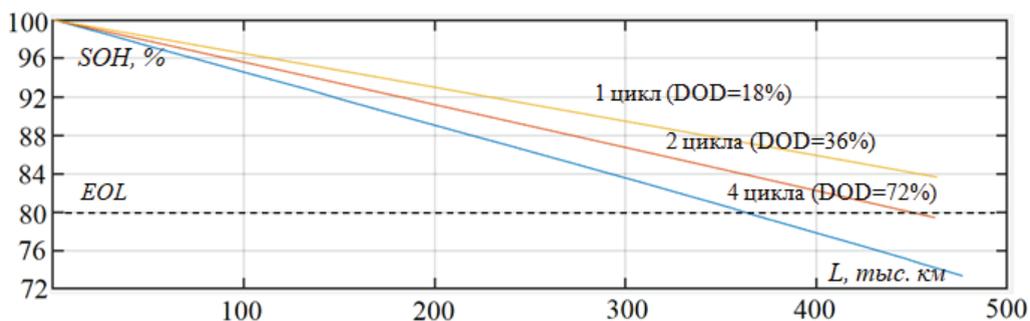


Рис. 9. Изменение доступной емкости ТАБ в зависимости от дальности пробега электросамосвала

Fig. 9. Change in the available capacity of the TAB depending on the range of the electric dump truck

без изменения конструкции электрического самосвала и корректировки суммарного времени простоя. Рацио-

нальным подходом является подзаряд во время остановок для загрузки и разгрузки руды.

5. Заключение

Проведено имитационное моделирование режимов работы LFP-аккумулятора с учетом уменьшения его емкости в связи с протеканием деградиционных процессов в программно-вычислительной среде Matlab Simulink для электросамосвала ZT118 компании Zoomlion. Для верификации синтезированной модели использованы диаграммы изменения скорости и профиля пути, полученные в результате реальных заездов карьерных самосвалов.

Проведена оценка трех различных эксплуатационных режимов, из которых определен наиболее ресурсосберегающий. Установлено, что для повышения срока службы LFP-аккумулятора

предпочтителен режим с кратковременными подзарядками после каждого цикла спуска — подъема. Поддержание глубины разряда порядка 20% позволяет продлить срок службы LFP аккумулятора на 38%, увеличивая при этом дальность хода на 140 тыс. км по сравнению с эксплуатационным режимом с максимальной глубиной разряда. Негативным фактором данного подхода является необходимость перевозить до 80% неиспользуемой емкости ТАБ. Однако, принимая во внимание массогабаритные показатели накопительного блока и загруженного самосвала (4 и 109 т соответственно), дополнительные потери на транспортировку незначительны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lindgren L., Grauers A., Ranggård J., Mäki R. Drive-Cycle Simulations of Battery-Electric Large Haul Trucks for Open-Pit Mining with Electric Roads // *Energies*. — 2022. — Vol. 15, № 4871. — P. 1–19. — DOI: 10.3390/en15134871.
2. Cruzat J. V., Valenzuela M. A. Modeling and evaluation of benefits of trolley assist system for mining trucks // *IEEE Trans. Ind. Appl.* — 2018, Vol. 54, — P. 3971–3981. — DOI: 10.1109/tia.2018.2823261.
3. Kartashov A., Harutyunyan G., Kosolapov A., Shkarupelov E. Justification of the concept of creating a perspective dump truck // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2020, Vol. 779, — P. 1–10. — DOI: 10.1088/1757-899x/779/1/012028.
4. Дедов С. И., Штанг А. А., Абрамов Е. Ю. Исследование деградации аккумуляторов в составе тяговой установки карьерных самосвалов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2022. — № 12. — С. 102–114. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_102.
5. Журавлев А. Г., Исаков М. В. Экспериментальные исследования работы карьерных автосамосвалов в условиях эксплуатации // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2020. — № 3. — С. 530–542. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-530-542.
6. Бигель Н. В. Разработка новых типов карьерной техники на ОАО «БЕЛАЗ» с применением альтернативных источников энергии // *Глобус* : [сайт]. [2020]. URL: <https://www.vnedra.ru/tehnika/spectekhnika/razrabotka-novyh-tipov-karernoj-tehniki-na-oao-belaz-s-primeneniem-alternativnyh-istochnikov-energii-10684/> (дата обращения: 10.03.2023).
7. Дубинкин Д. М., Карташов А. Б., Арутюнян Г. А., Бузунов Н. В., Кирилл П. С., Ялышев А. В. Современное состояние техники и технологий в области карьерных самосвалов с накопителями энергии // *Горное оборудование и электромеханика*. — 2020. — № 6 (152). — С. 31–42. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-6-31-42.

8. Edge J. S., O'Kane S., Prosser R., Kirkaldy N. D., Patel A. N., Hales A., Offer G. J. Lithium ion battery degradation: what you need to know // *Physical Chemistry Chemical Physics*. — 2021. — № 23 (14). — P. 8200–8221. DOI: 10.1039/d1cp00359c.

9. Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozymov B. V., Shtang A. A., Andriashin S. N. Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex // *Energies*. — 2021. — Vol. 14. iss. 23. — Art. 8072. — P. 1–33. DOI: 10.3390/en14238072.

10. Zhao Y., Yin Y. Hu, Choe S. Y. Electrochemical-thermal modeling of lithium plating/stripping of Li(Ni_{0.6}Mn_{0.2}Co_{0.2})O₂/ Carbon lithium-ion batteries at subzero ambient temperatures // *J. Power Sources*. — 2019. — Vol. 418. — P. 61–73. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.02.001.

11. Zhang Y., Li X., Su L., Li Z., Liaw B. Y., Zhang J. Lithium Plating Detection and Quantification in Li-Ion Cells from Degradation Behaviors // *ECS Trans*. — 2017. — Vol. 75. — P. 37–50. DOI: 10.1149/07523.0037ecst.

12. Rauhala T., Jalkanen K., Romann T., Lust E., Omar N., Kallio T. Low-temperature aging mechanisms of commercial graphite/LiFePO₄ cells cycled with a simulated electric vehicle load profile — A post-mortem study // *J. Energy Storage*. — 2018. — Vol. 20. — P. 344–356. DOI: 10.1016/j.est.2018.10.007.

13. Jung R., Strobl P., Maglia F., Stinner C., Gasteiger H. A. Temperature Dependence of Oxygen Release from LiNi_{0.6}Mn_{0.2}Co_{0.2}O₂ (NMC622) Cathode Materials for Li-Ion Batteries // *J. Electrochem. Soc*. — 2018. — Vol. 165. — P. 2869–2879. DOI: 10.1149/2.1261811jes.

14. Konishi H., Yuasa T., Yoshikawa M. Thermal stability of Li_{1-y}Ni_xMn_{(1-x)/2}Co_{(1-x)/2}O₂ layer-structured cathode materials used in Li-Ion batteries // *J. Power Sources* — 2011. — Vol. 196. — P. 6884–6888. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.01.016.

15. Feng Y., Dong Z., Yang J., Cheng R. Performance modeling and cost-benefit analysis of hybrid electric mining trucks // 12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA). — 2016. — P. 1–6. DOI: 10.1109/MESA.2016.7587102.

16. Terblanche P. J., Kearney M. P., Knights P. F. Potential of on-board energy recovery systems to reduce the costs of diesel–electric mine truck haulage // *Mining Technology*. — 2018. — P. 1–14. DOI: 10.1080/25726668.2018.1451611.

17. Щуров Н. И., Штанг А. А., Дедов С. И., Латышев Р. Н. Применение комбинированного накопителя энергии для увеличения срока службы аккумулятора электро-мобиля // *Электропитание*. — 2022. — № 2. — С. 24–33. **ИИАС**

REFERENCES

1. Lindgren L., Grauers A., Ranggård J., Mäki R. Drive-Cycle Simulations of Battery-Electric Large Haul Trucks for Open-Pit Mining with Electric Roads. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 4871. pp. 1–19. DOI: 10.3390/en15134871.

2. Cruzat J. V., Valenzuela M. A. Modeling and evaluation of benefits of trolley assist system for mining trucks. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2018. Vol. 54. pp. 3971–3981. DOI: 10.1109/tia.2018.2823261.

3. Kartashov A., Harutyunyan G., Kosolapov A., Shkarupelov E. Justification of the concept of creating a perspective dump truck. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 779. pp. 1–10. DOI: 10.1088/1757-899x/779/1/012028.

4. Dedov S. I., Shtang A. A., Abramov E. Yu. Investigation of battery degradation in the traction unit of mining dump trucks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022. no. 12. p. 102–114. [In Russ.] DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_102.
5. Zhuravlev A. G., Isakov M. V. Experimental studies of the operation of mining dump trucks under operating conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020. no. 3. p. 530–542. [In Russ.] DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-530-542.
6. Bigel N. V. Development of new types of mining equipment at JSC “BELAZ” using alternative energy sources. *Globus*: Available at: <https://www.vnedra.ru/tehnika/spectekhnika/razrabotka-novyh-tipov-karernoj-tehniki-na-oao-belaz-s-primeneniem-alternativnyh-istochnikov-energii-10684/>, 2020.
7. Dubinkin D. M., Kartashov A. B., Arutyunyan G. A., Buzunov N. V., Kirill P. S., Yalyshev A. V. Current state of engineering and technology in the field of mining dump trucks with energy storage. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020. no. 6 (152). p. 31–42. [In Russ.] DOI: 10.26730/1816-4528-2020-6-31-42.
8. Edge J. S., O’Kane S., Prosser R., Kirkaldy N. D., Patel A. N., Hales A., Offer G. J. Lithium ion battery degradation: what you need to know. *Physical Chemistry Chemical Physics* 2021. no. 23 (14). pp. 8200–8221. DOI: 10.1039/d1cp00359c.
9. Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Andriashin S. N. Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex. *Energies*. 2021. Vol. 14. iss. 23. Art. 8072. pp. 1–33. DOI: 10.3390/en14238072.
10. Zhao Y., Yin Y. Hu, Choe S. Y. Electrochemical-thermal modeling of lithium plating/stripping of Li(Ni_{0.6}Mn_{0.2}Co_{0.2})O₂/ Carbon lithium-ion batteries at subzero ambient temperatures. *J. Power Sources*. 2019. Vol. 418. pp. 61–73. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.02.001.
11. Zhang Y., Li X., Su L., Li Z., Liaw B. Y., Zhang J. Lithium Plating Detection and Quantification in Li-Ion Cells from Degradation Behaviors. *ECS Trans.* 2017. Vol. 75. pp. 37–50. DOI: 10.1149/07523.0037ecst.
12. Rauhala T., Jalkanen K., Romann T., Lust E., Omar N., Kallio T. Low-temperature aging mechanisms of commercial graphite/LiFePO₄ cells cycled with a simulated electric vehicle load profile A post-mortem study. *J. Energy Storage*. 2018. Vol. 20. P. 344–356. DOI: 10.1016/j.est.2018.10.007.
13. Jung R., Strobl P., Maglia F., Stinner C., Gasteiger H. A. Temperature Dependence of Oxygen Release from LiNi_{0.6} Mn_{0.2} Co_{0.2} O₂ (NMC622) Cathode Materials for Li-Ion Batteries. *J. Electrochem. Soc.* 2018. Vol. 165. pp. 2869–2879. DOI: 10.1149/2.1261811jes.
14. Konishi H., Yuasa T., Yoshikawa M. Thermal stability of Li_{1-y}NixMn_(1-x)/2Co_(1-x)/2O₂ layer-structured cathode materials used in Li-Ion batteries. *J. Power Sources*. 2011. Vol. 196. pp. 6884–6888. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.01.016.
15. Feng Y., Dong Z., Yang J., Cheng R. Performance modeling and cost-benefit analysis of hybrid electric mining trucks. *12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*. 2016. pp. 1–6. DOI: 10.1109/MESA.2016.7587102.
16. Terblanche P. J., Kearney M. P., Knights P. F. Potential of on-board energy recovery systems to reduce the costs of diesel–electric mine truck haulage. *Mining Technology*. 2018. P. 1–14. DOI: 10.1080/25726668.2018.1451611.
17. Shchurov N. I., Shtang A. A., Dedov S. I., Latyshev R. N. The use of a combined energy storage to increase the battery life of an electric vehicle. *Power supply*. 2022. no. 2. p. 24–33.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Щуров Николай Иванович*¹ — докт.техн.наук, профессор, e-mail: shhurov@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-5459-9544;

*Дедов Сергей Игоревич*¹ — ассистент, e-mail: dedov@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0003-4750-3927;

*Штанг Александр Александрович*¹ — канд. техн. наук, доцент, e-mail: shtang@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0001-9772-1784;

*Сяоган У*² — докт. техн. наук, профессор, e-mail: xgwu@hrbust.edu.cn, ORCID ID: 0000-0002-1830-0437;

¹ Новосибирский государственный технический университет.

² Харбинский научно-технический университет.

Для контактов: *Дедов С. И.*, e-mail: dedov@corp.nstu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Shchurov N. I.*¹, Dr. Sci. (Eng.), professor, e-mail: shhurov@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-5459-9544;

*Dedov S. I.*¹, assistant, e-mail: dedov@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0003-4750-3927;

*Shtang A. A.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: shtang@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0001-9772-1784;

*Wu Xiaogang*², Dr. Sci. (Eng.), professor, e-mail: xgwu@hrbust.edu.cn, ORCID ID: 0000-0002-1830-0437;

¹ Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Russia;

² Harbin University of Science and Technology;

Corresponding author: *Dedov S. I.*, e-mail: dedov@corp.nstu.ru.

Получена редакцией 18.04.2023; получена после рецензии 19.07.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 18.04.2023; received after the review 19.07.2023; accepted for printing 10.10.2023.

