

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ СИЛОВОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ КОЛЁСНОГО ДУМПЕРА

С. А. Внуков¹, А. А. Штанг¹, Р. Н. Латышев¹

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20,
г. Новосибирск, 630073, Россия

Аннотация: в результате разработки электропривода для транспортного средства (ТС) возникает ряд следующих проблем, а именно: 1) варьируемые показатели нагрузок при эксплуатации ТС; 2) многочисленные запуски и остановки тягового электрического двигателя (ТЭД), приводящие к колоссальным энергетическим затратам; 3) возникающий реверс при работе двигателя. Основной целью данного исследования является проектирование электропривода для ТС с точки зрения эффективности, экологичности и экономичности. Выполнен расчёт мощности ТЭД в соответствии с техническими характеристиками ТС. Получены зависимости мощности от скорости с использованием различных значений ускорения. С опорой на полученную расчётную мощность ТЭД была выбрана соответствующая модель. Составлена имитационная математическая модель (ИММ) электропривода в программном комплексе «Matlab Simulink», представлено подробное описание модельных блоков, получены графики переходных процессов, отражающие эффективность разработанного электропривода. Выполнен расчёт накопителя энергии, выбрана подходящая модель на основе проведённого анализа аккумуляторных батарей. В итоге была разработана ИММ электропривода для ТС, в которой можно менять входные параметры (ток, напряжение, скорость). Данная модель полностью отражает оптимальную работу тягового электропривода с точки зрения энергоэффективных показателей.

Ключевые слова: колёсный думпер, тяговые характеристики, энергия, горнодобывающая промышленность, карьерный самосвал, экскаватор, погрузчик, имитационная математическая модель (ИММ), электропривод, тяговый электрический двигатель (ТЭД), мощность.

Для цитирования: Внуков С. А., Штанг А. А., Латышев Р. Н. Моделирование эффективной силовой энергоустановки колёсного думпера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10-1. – С. 345–360. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_345.

Simulation of efficient power installation of wheeled dumper

S.A. Vnukov¹, A.A. Shtang¹, R.N. Latyshev¹

¹ Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Russia

Abstract: as a result of the development of an electric drive for a vehicle, a number of the following problems arise, namely: 1) variable load indicators during the operation of the vehicle; 2) numerous starts and stops of the traction electric motor, resulting in enormous energy costs; 3) resulting reverse during engine operation. The main purpose of this study is to design an electric drive for the vehicle in terms of efficiency, environmental friendliness and economy. Calculation of the electric motor power was performed in accordance with the technical characteristics of the vehicle. Power-velocity dependencies are obtained using

different acceleration values. Based on the obtained design power of the electric motor, the corresponding model was selected. A simulation mathematical model of the electric drive was compiled in the «Matlab Simulink» software system, a detailed description of model units is presented, transient diagrams are obtained that reflect the effectiveness of the developed electric drive. The energy storage was calculated, a suitable model was selected, based on the analysis of the batteries. As a result, the simulation mathematical model of the electric drive for the vehicle was developed, in which the input parameters (current, voltage, speed) can be changed.

Key words: wheeled dumper, traction characteristics, energy, mining industry, pit dump truck, excavator, loader, simulation mathematical model, electric drive, traction electric motor, power.

For citation: Vnukov S. A., Shtang A. A., Latyshev R. N. Simulation of efficient power installation of wheeled dumper. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10-1):345–360. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_345.

1. Введение

Проведение масштабных работ на строительных объектах, горных вышенностях влечёт за собой использование ТС различного типа. В основном горнодобывающая промышленность характеризуется применением карьерных самосвалов и колёсных думперов. Также используются погрузчики и экскаваторы, необходимые для проведения основных и дополнительных строительных работ. Сфера электрического транспорта напрямую касается данного развивающегося направления [1].

Разработанный тяговый привод ТС способен работать в нескольких режимах движения: тяга, выбег, электрическое торможение. Рекуперативное торможение является видом электрического торможения, в результате которого при работе ТЭД в генераторном режиме электроэнергия применяется для заряда аккумуляторных батарей, либо происходит её возврат в питающую сеть, что эффективно при проведении объёмных горнодобывающих работ [2].

Основными накопителями энергии, применяемыми на ТС, являются: буферные накопители электроэнергии, суперконденсаторы, топливные элементы. В данном исследовании исполь-

зуется сборка, состоящая из литий-ионных аккумуляторов 18650 [3].

Использование при работе тягового привода системы управления позволяет обеспечить регулирование основных параметров: измерение вольтамперных характеристик, поддержание стабильного уровня температуры установки, контроль состояния заряда батареи [4].

Имитационная модель тягового электропривода, с точки зрения энергоэффективности, раскрывает масштабность применения электрического транспорта во многих сферах. ТС, используемые в сфере горнодобывающей промышленности, могут повысить свои энергетические показатели, а также снизить расход топлива при их эксплуатации [5].

Моделирование силовой энергоустановки отражает действительность при эксплуатации ТС. Характеристики, полученные в результате моделирования, широко описывают нагревательные процессы силовой установки, что даёт возможность применения комплексного подхода к контролю уровня деградации накопительного элемента. Для дальнейших расчётов в качестве прототипа была выбрана модель колёсного думпера «1001 | Wacker Neuson» [6].

Горнодобывающая промышленность в современном представлении отражает колоссальный рост в развитии электрического транспорта. Переход от стандартного двигателя внутреннего сгорания (ДВС) к электродвигателю (ЭД) влечёт за собой улучшение энергоэффективных показателей, снижение топливных расходов, что крайне важно для развития горнодобывающего производства. В связи с огромным количеством выбросов вредных веществ при эксплуатации горного ТС актуальным становится переход на использование электроприводного оборудования (система управления, электрическая схема).

2. Колёсный думпер: область применения, особенности конструкции, преимущества

Колёсный думпер, по своей сути, является «сочленённым самосвалом» и имеет отличительные особенности (технические характеристики) и области применения, которые выгодно отличают его от обычных карьерных самосвалов.

Основные отличия колёсного думпера — компактность (малые габариты) и узкий спектр выполняемых работ. В основном его применение заключается в транспортировке различных сыпучих и жидких грузов на строительных объектах на относительно небольшие расстояния (1 — 5 км) [7].

Думпер оснащается компактным самосвальным кузовом, представленным в виде ковша или бункера. Именно по кузову можно отличить думпер от стандартного самосвала. Кузов думпера расположен в переднем секторе, а кабина водителя имеет заднее расположение.

Основными входными параметрами для дальнейших тяговых расчётов и моделирования тягового электропривода думпера являются: полная масса,

скорость, вместимость, диаметр колеса. Модель колёсного думпера «1001 | Wacker Neuson» приведена на рис. 1.

Существует классификация думперов по грузоподъёмности (г/п). Микродумперы — машины, обладающие г/п до 850–1000 кг. В основном это мототележки, так как панель управления думпером имеет заднее расположение. В силу небольших размеров (компактности) конструктивное исполнение думпера имеет малое количество узлов и агрегатов, которые встречаются в стандартном карьерном самосвале: гидростатическая трансмиссия, сложная гидросистема. Мини- и миди-думперы имеют г/п от 850 до 8000 кг. Это самые распространённые думперы для проведения горнодобывающих работ. Макси-думперы обладают г/п свыше 8000 кг. Они являются мощными полноразмерными машинами и в основном предназначаются для работ на крупных объектах и возвышенностях.

Думперы могут эффективно работать вместе с погрузчиками и экскаваторами на различных строительных объектах. Цикл погрузки материала обычно занимает небольшое количество времени. Поэтому за счёт применения думпера на строительных работах можно повысить производи-



Рис. 1. Колёсный думпер «1001 | Wacker Neuson»

Fig. 1. Wheeled dumper «1001 | Wacker Neuson»

тельность, эффективность и показатели топливной экономичности.

Думперы, в отличие от карьерных самосвалов, наносят меньшее механическое повреждение верхнему слою почвы на строительных объектах, а также не разрушают элементы инфраструктурных коммуникаций.

Эксплуатация думпера возможна при различных климатических условиях. Существует возможность замены навесного оборудования: подметальные щётки, поливомоечные установки, устройства для монтирования снежных отвалов. Думперы являются многофункциональными машинами, которые могут выполнять ряд других работ в дополнение к основной.

3. Расчёт мощности ТЭД, выбор марки электродвигателя

За прототип ТС принят колёсный думпер «1001 | Wacker Neuson». Параметры выбранного ТС представлены в табл. 1.

Мощность ТЭД определяется согласно следующей формуле [8]:

$$P = F \cdot V, \quad (1)$$

где F — сила тяги, кГс \rightarrow Н; V — скорость ТС, км/ч.

Ускорение ТС вычисляется согласно формуле [9]

$$a = \frac{F \cdot z - \omega_0 \cdot m}{102 \cdot (1 + \gamma) \cdot m}, \quad (2)$$

где $z = 1$ — количество ТЭД; $\omega_0 = 12 + 0,0018 \cdot V^2$ — удельный показатель основного сопротивления движению,

применяемый на колёсном думпере, Н/кН; $m = 1261$ — масса ТС, кг; $\gamma = 0,15$ — коэффициент инерции вращающихся частей.

Опираясь на расчёты, полученные выше, были получены графики зависимостей $P(V)$, изображённые на рис. 2, при различных значениях ускорения: 2, 2,5, 3 м/с². Результаты вычислений приведены в табл. 2.

С учётом наибольшего показателя ускорения при пуске (3 м/с²) эталонное значение мощности при выходе на автоматическую характеристику (60 км/ч) составляет 73 кВт.

В качестве прототипа была выбрана модель синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) — «ОРИОН-18-2-04». Функциональные свойства ТЭД приведены в табл. 3.

4. Обсуждение результатов выполненных расчётов

Для разработки энергоэффективного привода для колёсного думпера, помимо подбора ЭД, необходимо разработать силовую схему электрических компонентов, систему управления для подачи сигналов воздействия на электропривод, определить элементную базу, состоящую из набора силовых полупроводниковых приборов и накопителей энергии, а также датчиков тока, напряжения, скорости.

Электропривод — система, состоящая из механических и электрических компонентов, способных выполнять преобразование механической энергии в электрическую, и наоборот, а также запускать или останавливать двигатель ТС.

Таблица 1
Характеристики ТС
Characteristics of the vehicle

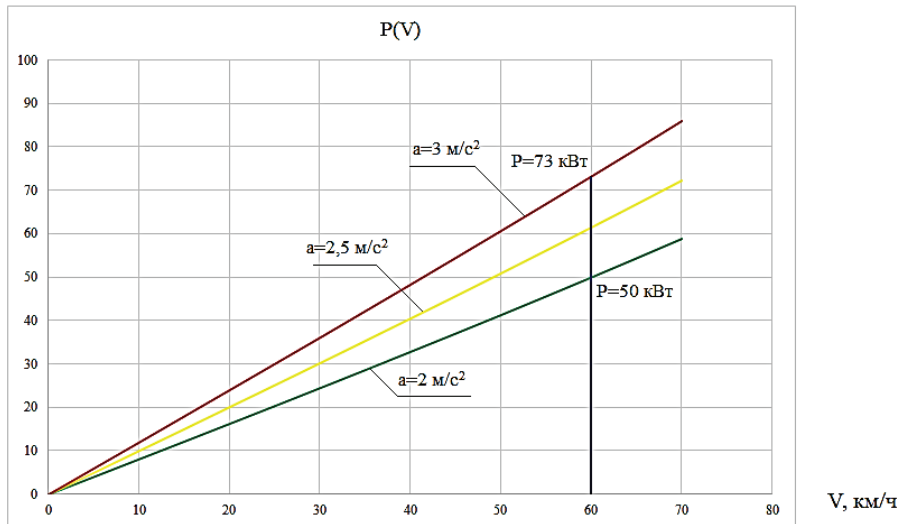
Тип ТС	Вес, кг	Вместимость, чел.	Колёсная база, мм
Колёсный думпер «1001 Wacker Neuson»	1261	1-2	1500

Таблица 2

Результаты расчёта зависимостей $P(V)$ Results of calculation of dependencies $P(V)$

V_i , км/ч	ω_{0i} , Н/кН	F_i , кГс			P_i , кВт		
		$a = 2 \text{ м/с}^2$	$a = 2,5 \text{ м/с}^2$	$a = 3 \text{ м/с}^2$	$a = 2 \text{ м/с}^2$	$a = 2,5 \text{ м/с}^2$	$a = 3 \text{ м/с}^2$
0	12	298	369	440	0	0	0
5	12,045	298	369	440	4,057	5,02	5,984
10	12,18	299	370	440	8,119	10,05	11,97
15	12,405	299	370	441	12,19	15,08	17,97
20	12,72	299	370	441	16,27	20,13	23,98
25	13,125	300	371	442	20,38	25,19	30,01
30	13,62	300	371	442	24,5	30,28	36,06
35	14,205	301	372	443	28,65	35,4	42,14
40	14,88	302	373	444	32,84	40,55	48,25
45	15,645	303	374	445	37,06	45,73	54,4
50	16,5	304	375	446	41,32	50,96	60,59
55	17,445	305	376	447	45,63	56,23	66,82
60	18,48	306	377	448	49,99	61,55	73,11
65	19,605	308	379	450	54,4	66,92	79,45
70	20,82	309	380	451	58,87	72,36	85,85

P, кВт

Рис. 2. Зависимость $P(V)$ при различных значениях ускоренияFig. 2. Constraint $P(V)$ at different acceleration values

Основными компонентами силовой электрической части колёсного думпера являются: гибридная энергоустановка, преобразователь, тяговый электрический привод.

Электрическая схема силовой цепи, как правило, состоит из ТЭД, автоматического выключателя, защищающего цепь от короткого замыкания, тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ), буфер-

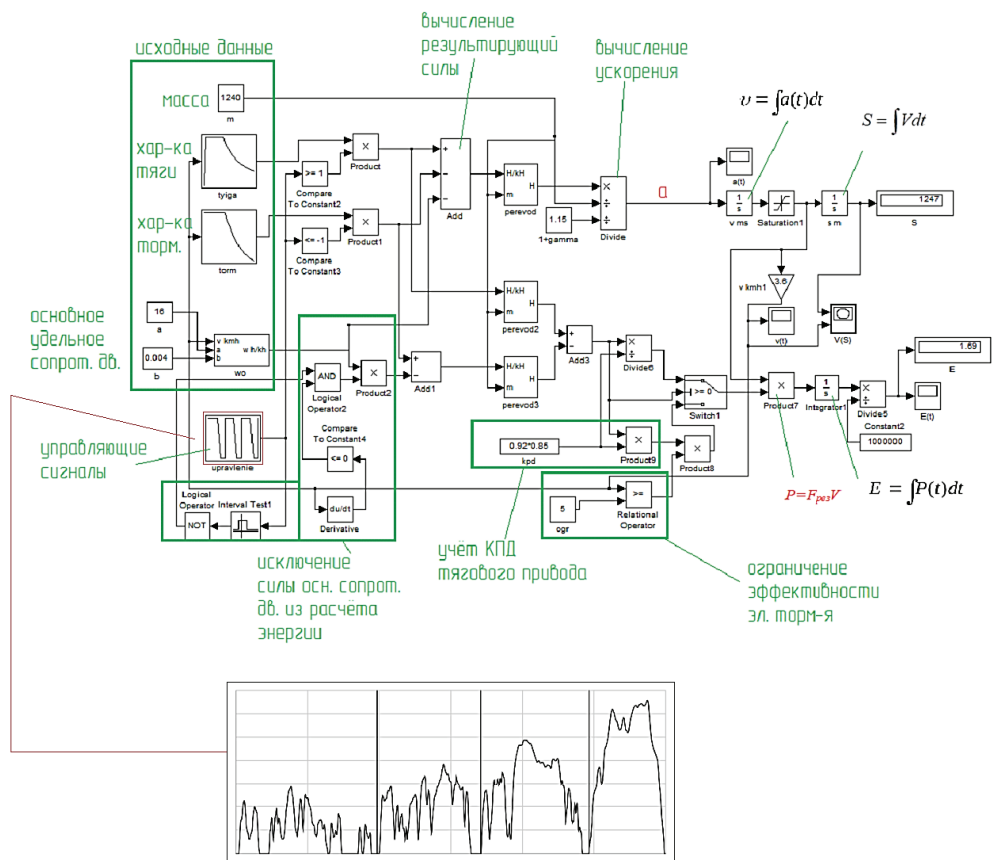


Рис. 3. Структура имитационной модели тягового привода
 Fig. 3. Traction Drive Simulation Model Structure

Таблица 3

Технические характеристики СДПМ

Table 3. Specifications of synchronous motor with permanent magnets (SMPM)

Технические характеристики «ОРИОН-18-2-04»	Ед. изм.	Значение
M_U , пиковый (пусковой) момент (2... 3 сек.)	Н·м	1352
M_C , номинальный момент (вод., возд. охл.)	Н·м	338
P_C , номинальная мощность (вод., возд. охл.)	кВт	67,5
$U_{НОМ}$, номинальное напряжение	В	500
$\eta_{ТЭД}$ (номинальный показатель)	%	97,6
d_r (роторный диаметр)	м	0,24
d_s (статорный диаметр)	м	0,356
B_m , длина активной стали	мм	120
L_s , длина статора с обмоткой	мм	210
$P_{UТ}$, тепловая мощность (пиковая)	кВт	3896
$P_{CТ}$, тепловая мощность (номинальная, вод. охл.)	Вт	974
K_T , константа момента (20°C)	Н·м/А	1,45

Окончание табл. 3

Технические характеристики «ОРИОН-18-2-04»	Ед. изм.	Значение
K_m , константа двигателя (20°C)	Н·м/ВТ	10,83
m_{em} , масса электромагнитной системы	кг	63,0
m , масса двигателя (корпусное исполнение)	кг	105

ного накопителя энергии, представленного батареей суперконденсаторов с регулятором, транзисторного ключа трёхфазного преобразователя, отвечающего за регулирование подводимой к двигателю энергии, конденсатора и дросселя фильтра. Для обеспечения приёма энергии электрического торможения в случае, если оба накопителя энергии заполнены, предусмотрен тормозной резистор. Заряд ТАБ предусмотрен внешним зарядным устройством (ЗУ), представляющим из себя преобразователь типа АС/DC. Для распределения нагрузки по току, а также предотвращения короткого замыкания в электрическую схему встроены диод, выполняющий защитную функцию.

Автоматизация технологических процессов, связанных со статическими и динамическими показателями при работе тягового электрического привода является основной задачей системы управления. Динамический режим работы включает в себя многочисленные пуски и торможения при эксплуатации ТС. Статический режим работы характеризуется стабильностью работы при эксплуатации ТС, независимо от внешних факторов и рабочих условий. Изменение энергетических показателей напрямую связано с наличием внешнего воздействия, например, изменение путевой структуры (подъём, спуск, криволинейное движение). Внешние факторы могут приобретать скачкообразный характер в зависимости от применения рабочих режимов.

Учитывая все вышесказанные компоненты, а также зная входные параметры для ТС, можно провести моделирование

тягового электрического привода в программной среде «Matlab Simulink». Данная модель позволит изменять расчётные параметры, а также получить графики переходных процессов при движении ТС, чтобы оценить эффективность разработанного электропривода.

5. Моделирование тягового привода колёсного думпера

Входным параметром для моделирования является перегон с нулевым показателем уклона на всём участке длины без криволинейных траекторий. Основным результатом моделирования являются кривые движения, полученные на осциллограммах модели [10].

Математическое моделирование позволяет сократить время, затрачиваемое на проведение расчётов, при этом оно полностью отражает энергоэффективность ТС. Изображение математической модели с подробным описанием приведено на рис. 3 [11].

Второй закон Ньютона позволяет вычислить показатель $F_{рез}$ с наличием входных параметров (ускорение a и масса m) $\rightarrow F_{рез} = (1+\gamma) \cdot m \cdot a$; опираясь на различные режимы движения, $F_{рез}$ принимает значения:

- $F_{тяг} - W_0$ в тяговом режиме;
- W_0 в режиме выбега;
- $(B_{торм} + W_0)$ в режиме сопротивления движению, где $F_{тяг}$ и $B_{торм}$ — показатели тягового усилия и сопротивления движению, которые достигаются при работе электродвигателя, W_0 — основное сопротивление движению.

Расчёт значений тягового усилия и сопротивления движению представлен в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Результаты вычисления тягового усилия
Results of traction force calculation

Наименование параметра	Значение										
	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
V , км/ч	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
$F_{\text{тяги}}$ Н	286	267	250	235	222	210	200	190	182	174	167

Таблица 5

Результаты расчёта силы торможения
Results of calculation of braking force

Наименование параметра	Значение							
	90	95	100	105	110	115	120	
V , км/ч	90	95	100	105	110	115	120	
$F_{\text{торм}}$ Н	200	189	180	171	164	156	150	

Расчёт усилия (удельного основного сопротивления движению) представлен на рис. 4.

Блок пересчёта единиц измерения усилий представлен на рис. 5.

Расчёт ускорения, представленный в блоках модели, основан на формуле $\rightarrow a = F_{\text{рез}} / (1+\gamma) \cdot m$ [12].

Смена рабочих режимов (тяговое усилие / сопротивление движению) выполняется в блоке «upravlennie». Содержимое данного блока представлено в табл. 6.

В данной имитационной математической модели интегрированы блоки, отвечающие за выполнение расчётов энергии (см. рис. 4).

Оптимальную работу привода показывает приведённая характеристика ускорения (рис. 6), в которой показатель ускорения совпадает с расчётной величиной [13].

Данный график свидетельствует о том, что разница показателей эксперимента и модели составляет 8%. Это означает, что адекватность полученных

результатов не ниже 92%. Это объясняется тем, что в модели не учтён контроль температуры накопителя электрической энергии. Температура эксплуатации аккумулятора находится в пределах от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ (LiFePO_4). Модель, построенная на экспериментальных исследованиях, учитывает эти факторы.

В результате выполненного расчёта были получены следующие показатели: $V_{\text{max}} = 120$ км/ч — максимальная скорость ТС;

Величина выбега — 20%;

$E = 1,225$ МДж = 0,34 кВт·ч — энергия ТС (рис. 7).

В результате путь, пройденный ТС, составляет 819 м (рис. 8) [14].

6. Расчёт и выбор модели аккумуляторной батареи

Параметры имитационной модели, вычисленные в результате её работы, необходимы для расчёта накопителя электрической энергии [15].

Энергия аккумулятора определяется по формуле (3) [16]:

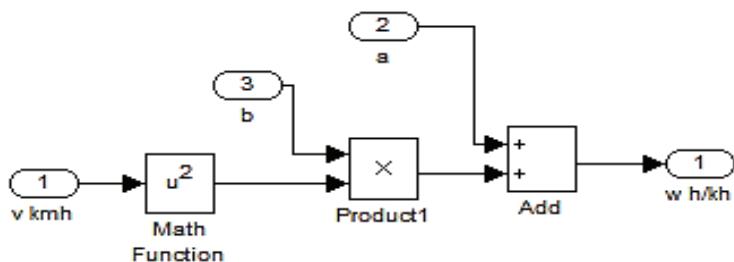


Рис. 4. Блок вычислений тягового усилия и сопротивления движению
 Fig. 4. Specifying the thrust and braking characteristics

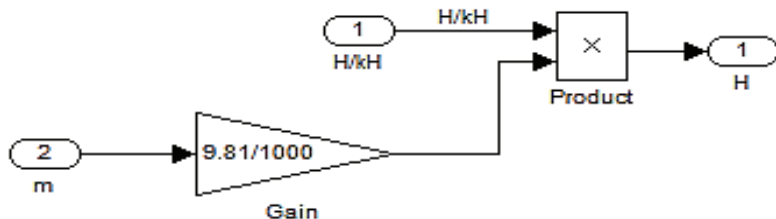


Рис. 5. Блок пересчёта единиц измерения усилий
 Fig. 5. Measure Units Recalculation

Таблица 6
 Переключение режимов тяги и торможения
 Switching of thrust and braking modes

Скоростные этапы	Последовательность
0	1
18	1
28	-1
40	-1

$$W_{HЭ} = \frac{L}{S} \cdot E, \quad (3)$$

где $L = 200$ — дальность хода, км; $S = 0,819$ — дистанция, преодолённая ТС, км; $E = 0,34$ — энергетический показатель, кВт·ч.

Соответственно $\rightarrow W_{HЭ} = 83$ кВт·ч.

Самый высокий показатель удельной плотности энергии среди различных накопителей электрической энергии имеют аккумуляторы на основе лития, о чём свидетельствует табл. 7. Например, литий-кобальтовые накопители имеют высокие показатели удельной плотности энергии (160–200 Вт·ч/кг), но максимальный ток нагрузки будет меньше, чем у литий-ферро-фосфат-

ных аккумуляторов (3С — у LiCoO_2 , 5С — у LiFePO_4). Ещё одним достоинством такого типа аккумулятора является высокий жизненный цикл (Т — у LiCoO_2 , 2Т — у LiFePO_4) [17].

Уровень напряжения на накопителе энергии соответствует напряжению на двигателе ($U=500$ В).

Ёмкость аккумулятора вычисляется по формуле [18]

$$C_{HЭ} = \frac{W_{HЭ}}{U}, \quad (4)$$

соответственно $\rightarrow C_{HЭ} = 166$ А·ч [18].

Наиболее подходящим вариантом будет сборочный комплекс аккумулятора, состоящий из ячеек модели 18650.

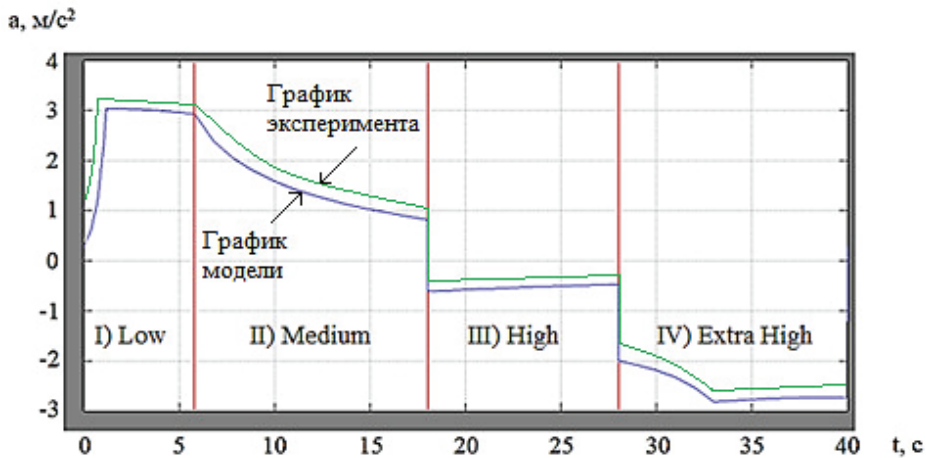


Рис. 6. График зависимости ускорения от времени $a(t)$ (эксперимент/модель)
 Fig. 6. Diagram «Acceleration vs Time Plot» $a(t)$ (experiment/model)

Таблица 7

Технические параметры аккумуляторов
Battery specifications

Характеристика	SLA (PbSO ₄)	Никель-кадмиевые	Никель-металлогидридные	Li-ion		
				Литий-кобальтовые	Литий-марганцевые	Литий-феррофосфатные
1. e , Вт·ч/кг [$\cdot 10^3$]	0,03-0,05	0,045-0,08	0,06-0,12	0,16-0,2	0,1-0,135	0,09-0,12
2. Длительность зарядки (быстрой)	480-960 мин	~ 60 мин	120-240 мин	120-240 мин	> 60 мин	> 60 мин
3. SOC ($k=0,8$) [$\cdot 10^3$]	0,3-0,4	1,1	0,4-0,6	0,6-1,1	0,6-1,1	1,1-2,1
4. $U_{ном}$	2,1 В	1,3 В	1,3 В	3,7 В	3,9 В	3,4 В
5. I_{max}	5C (0,2C)	20C (1C)	5C (0,5C)	>3C (<1C)	>30C (<10C)	>30C (<10C)

Параметры элемента 18650 литий-ионного накопителя энергии (Li-ion) приведены в табл. 8 [19, 20].

Количество элементов накопителя энергии рассчитывается по следующей формуле [21, 22]:

$$N = \frac{U}{U_{ном}}, \quad (5)$$

соответственно $\rightarrow N=152$ элемента.

Для подбора схемы BMS необходимо учесть два параметра:

- 1) состав схемного подключения;
- 2) показатель сопротивления/мощности.

Схемы BMS могут иметь общий каналный вход (SOC) либо отдельно подключаться (различные порты для соединения) [23, 24].

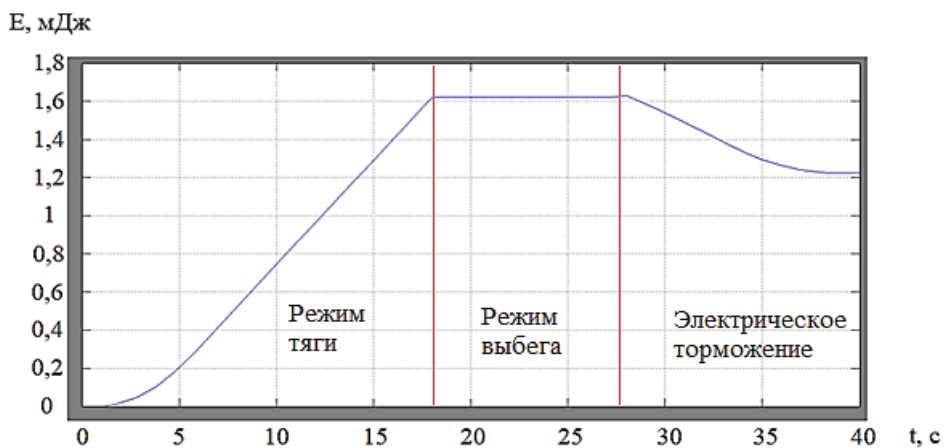


Рис. 7. График зависимости энергии от времени $E(t)$

Fig. 7. Diagram «Energy vs Time Plot» $E(t)$

Таблица 8

Элемент литий-ионного аккумулятора модели 18650

Cell Li-ion 18650 2600 mAh

Техническая характеристика	Величина
$U_{\text{ном}}$	3,3 В
e	200 Вт·ч/кг
I_{max} (при разряде)	7,2 А
I_{max} (при заряде)	1,2 А
r	$\leq 30 \text{ m}\Omega$
Срок жизни	600 циклов/ёмкость 80%

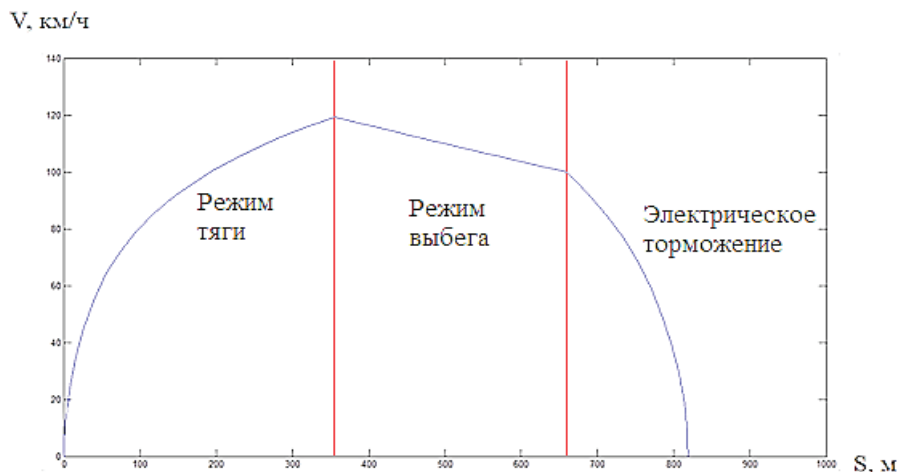


Рис. 8. График зависимости скорости от пройденного пути $V(S)$

Fig. 8. Diagram «Speed vs Distance» $V(S)$

7. Заключение

Были получены следующие результаты в ходе проведённого исследования:

– выполнен обзор и анализ особенностей и характеристик колёсного думпера: область применения, особенности конструкции, преимущества. Подробно описана классификация думперов по показателю грузоподъёмности (г/т). В качестве расчётного ТС была принята модель колёсного думпера «1001 | Wacker Neuson»;

– рассчитан показатель мощности ТЭД ($P=67,5$ кВт), получен график зависимости мощности от скорости $P(V)$, проведён выбор модели электродвигателя (СДПМ) – «ОРИОН-18-2-04»;

– смоделирован тяговый привод колёсного думпера, составлена имитационная модель в программном комплексе математического моделирования «Matlab Simulink», раскрыто математическое содержание модельных блоков, на осциллограммах выведены графики зависимостей ускорения/энергии от времени $a(t)/E(t)$, скорости от пути $V(S)$. В результате расчётов были получены следующие показатели: максимальная скорость ТС ($V_{max} = 120$ км/ч), величина выбега (20%), энергия ($E = 1,225$ МДж), путь, пройденный ТС ($S=819$ м);

– для преодоления дистанции в 200 км на ТС необходимо установить

накопитель электрической энергии объёмом 83 кВт·ч, ёмкостью 166 А·ч. Был выбран накопитель энергии на основе сборочной конструкции, состоящей из элементов модели 18650.

Данные результаты выполненного исследования подтверждают адекватность модели и подчёркивают её эффективность при эксплуатации ТС. Всё это способствует упрощению самой главной задачи в сфере горнодобывающего производства – перемещения (транспортировки) горных масс при открытой разработке месторождений с наибольшей эффективностью и максимальной экономией затраченного времени.

Проектирование электрической части подвижного состава (ПС) является составной частью проектирования ТС в целом и поэтому в определённой мере подвержено влиянию схемных решений, принятых при проектировании механической части, и наоборот.

Спроектированная система электрического оборудования должна обеспечивать надёжную работу ТС в целом, а также соответствовать нормам безопасности при эксплуатации. Совокупность этих параметров образует эффективный привод с точки зрения энергетических и экономических показателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щуров Н. И., Мятёж С. В., Малозёмов Б. В. Анализ и расчёт неактивной мощности в сети питания электропотребителей рудничного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – 2022. – № 12/2. – С. 270–283. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_270.

2. Малозёмов Б. В., Мятёж С. В., Щуров Н. И. Повышение количества рабочих зон в трёхфазном выпрямителе переменного тока // Электротехника. – 2021. – № 6. – С. 56–60.

3. Малозёмов Б. В., Трухин Ф. В. Повышение эффективности и надёжности тягового двигателя троллейбуса // Интеллектуальный потенциал Сибири (РНСК): Сб. науч. тр. 26-й регион. науч. студ. конф., Новосибирск, 22–24 мая 2018 г.: в 2 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 2. – С. 650–652.

4. Дедов С. И., Бороненко А. О., Штанг А. А. Определение параметров последовательной гибридной установки на основе ездовых циклов // Интеллектуальный потен-

циал Сибири (РНСК): Сб. науч. тр. 26-й регион. науч. студ. конф., Новосибирск, 22–24 мая 2018 г.: в 2 ч. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. — Ч. 2. — С. 587–588.

5. Внуков С. А., Щуров Н. И. Сравнительный анализ накопителей энергии для гибридного транспорта // Наука. Технологии. Инновации: Сб. науч. тр. 16-й Всерос. науч. конф. молодых учёных, Новосибирск, 5–8 дек. 2022 г. : в 11 ч. — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2022. — Ч. 5. — С. 135–137.

6. Внуков С. А., Бирюков В. В. Электрические тяговые двигатели // Научный форум: тенденции развития науки и общества: Сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 29 окт. 2021 г. — Кемерово: Зап.-Сиб. науч. центр, 2021. — С. 44–46.

7. Bobozhonov M. K., Eshmurodov Z. O., Tasheva Kh. T. Study of the efficiency of conveyors of mining transport systems of mining complexes // Uzbek Journal of Problems of informatics and energy. 2018, vol. 1, pp. 84–89.

8. Bobozhonov M. K., Eshmurodov Z. O., Ismoilov M. T. Research of Dynamic Properties of Electric Drives of Mining Complexes // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. 2019, vol. 6, pp. 9200–9207.

9. Afzali P., Keynia F. and Rashidinejad M. A new model for reliability-centered maintenance prioritisation of distribution feeders // Energy. 2019, vol. 171, pp. 701–709.

10. Gupta G. and Mishra R. P. Identification of critical components using ANP for implementation of reliability centered maintenance // Procedia CIRP. 2018, vol. 69, pp. 905–909.

11. Hashemi M., Asadi M. and Zarezadeh S. Optimal maintenance policies for coherent systems with multi-type components // Reliability Engineering and System Safety. 2020, vol. 195, p. 106674.

12. Melani A. H. A., Murad C. A., Netto A. C., de Souza G. F. M. and Nabeta S. I. Criticality-based maintenance of a coal-fired power plant // Energy. 2018, vol. 147, pp. 767–781.

13. Мусатова Е. В. Управление материальными запасами на промышленных предприятиях // Молодой учёный. — 2018. — № 29. — С. 74–76.

14. Герасимова Т. А., Иванчук А. О., Плютов Ю. А. Формирование структуры погрузочно-транспортного комплекса для горных предприятий // Успехи современного естествознания. — 2022. — № 8. — С. 114–119.

15. Губарева Д. Ю. Пути снижения себестоимости перевозки горной массы в филиале «Антоновское рудоуправление» АО «Кузнецкие ферросплавы» // Исследования молодых учёных: Материалы XII Междунар. науч. конф. (Казань, июль 2020 г.). — Казань: Молодой учёный, 2020. — С. 22–24.

16. Чендырёв М. А., Журавлёв А. Г. Техничко-экономические параметры транспортирования горной массы из карьера автомобильным наклонным карьерным подъёмником // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Чёрная металлургия». — 2018. — № 1. — С. 133–142.

17. Beresteanu Ariel and Federico Zinchenko. Efficiency Gains in Rank-ordered Multinomial Logit Models // Oxford Bulletin of Economics and Statistics. 2018, vol. 80, pp. 122–134.

18. Davis Lucas. How Much are Electric Vehicles Driven // Applied Economic Letters. 2019, vol. 26, pp. 1497–1502.

19. McConnell Virginia. The Role of State Policies under Federal Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Emissions Standards // Energy Policy. 2019, vol. 126, pp. 507–517.

20. Zhou Yiyi and Shanjun Li. Dynamics of Technology Adoption and Critical Mass in the Market for Electric Vehicles // Journal of Industrial Economics. 2018, vol. 2, pp. 423–480.

21. Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Tynchenko Y. A., Qi M. Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport

by Optimizing Battery Consumption // *Energies*. 2023, vol. 16, p. 729. DOI: 10.3390/en16020729.

22. Porsev E. G., Druzhinina N. S. Electric corona discharge as a basis for managing the quality of solid cereals // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2018, Novosibirsk, 12–14 Dec. 2018, vol. 560, art. 012172. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012172.

23. Porsev E. G., Konyukhov V. Y. Perspective algorithms for the effective use of electro-osmosis for automatic installations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2018, Novosibirsk, 12–14 Dec. 2019, vol. 560, art. 012174. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012174.

24. Щуров Н. И., Внукон С. А. Моделирование эффективной силовой энергоустановки электромобиля с учётом нагрузочных циклов движения // Доклады АН ВШ РФ. – 2023. – № 2 (59). – С. 56–67. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-56-67. **VIAB**

REFERENCES

1. Shchurov N. I., Myatezh S. V., Malozyomov B. V. Analysis and calculation of inactive power in the power supply network of electric consumers of mine transport. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 12/2, pp. 270–283. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_270

2. Malozyomov B. V., Myatezh S. V., Shchurov N. I. Increasing the number of working zones in a three-phase AC rectifier. *Electrical*. 2021, no. 6, pp. 56–60. [In Russ].

3. Malozyomov B. V., Trukhin F. V. Increasing the efficiency and reliability of the trolleybus traction engine. *Intellectual potential of Siberia (RNSK): Sat. scientific. tr. 26th region. scientific. studio conf., Novosibirsk, May 22–24, 2018*. Novosibirsk, Publishing House of NSTU. 2018, part 2, pp. 650–652. [In Russ].

4. Dedov S. I., Boronenko A. O., Shtang A. A. Determining the parameters of a sequential hybrid installation based on driving cycles. *Intellectual potential of Siberia (RNSK): Sat. scientific. tr. 26th region. scientific. studio conf., Novosibirsk, May 22–24, 2018*. Novosibirsk, Publishing House of NSTU. 2018, part 2, pp. 587–588. [In Russ].

5. Vnukov S. A., Shchurov N. I. Comparative analysis of energy storage devices for hybrid transport. *Science. Technologies. Innovation: Sat. scientific. tr. 16th All Things. scientific. conf. young scientists, Novosibirsk, December 5–8, 2022*. Novosibirsk, Publishing House of NSTU. 2022, part 5, pp. 135–137. [In Russ].

6. Vnukov S. A., Biryukov V. V. Electric traction engines. *Scientific forum: trends in the development of science and society: sat. materials international scientific-practical. conf., Kemerovo, October 29, 2021*. Kemerovo, Zap.-Sib. scientific. Center. 2021, pp. 44–46. [In Russ].

7. Bobozhonov M. K., Eshmurodov Z. O., Tasheva Kh. T. Study of the efficiency of conveyors of mining transport systems of mining complexes. *Uzbek Journal of Problems of informatics and energy*. 2018, vol. 1, pp. 84–89.

8. Bobozhonov M. K., Eshmurodov Z. O., Ismoilov M. T. Research of Dynamic Properties of Electric Drives of Mining Complexes. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. 2019, vol. 6, pp. 9200–9207.

9. Afzali P., Keynia F. and Rashidinejad M. A new model for reliability-centered maintenance prioritisation of distribution feeders. *Energy*. 2019, vol. 171, pp. 701–709.

10. Gupta G. and Mishra R. P. Identification of critical components using ANP for implementation of reliability centered maintenance. *Procedia CIRP*. 2018, vol. 69, pp. 905–909.

11. Hashemi M., Asadi M. and Zarezadeh S. Optimal maintenance policies for coherent systems with multi-type components. *Reliability Engineering and System Safety*. 2020, vol. 195, p. 106674.

12. Melani A. H. A., Murad C. A., Netto A. C., de Souza G. F. M. and Nabeta S. I. Criticality-based maintenance of a coal-fired power plant. *Energy*. 2018, vol. 147, pp. 767–781..
13. Musatova E. V. Material management at industrial enterprises. *Young scientist*. 2018, no. 29, pp. 74–76. [In Russ].
14. Gerasimova T. A., Ivanchuk A. O., Plyutov Yu. A. Formation of the structure of the loading and transportation complex for mining enterprises. *Successes of modern natural science*. 2022, no 8, pp. 114–119. [In Russ].
15. Gubareva D. Yu. Ways to reduce the cost of transportation of rock in the branch “Antonov’s mine management” JSC “Kuznetsk ferroalloys”. *Research of young scientists: materials of XII International. scientific. conf. (Kazan, July 2020)*. Kazan, Young Scientist. 2020, pp. 22–24. [In Russ].
16. Chendyrev M. A., Zhuravlev A. G. Technical and economic parameters for transporting rock from a quarry by means of an automobile inclined quarry lift. *Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information “Black Metallurgy”*. 2018, no. 1, pp. 133–142. [In Russ].
17. Beresteanu Ariel and Federico Zinchenko. Efficiency Gains in Rank-ordered Multinomial Logit Models. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*. 2018, vol. 80, pp. 122–134.
18. Davis Lucas. How Much are Electric Vehicles Driven. *Applied Economic Letters*. 2019, vol. 26, pp. 1497–1502.
19. McConnell Virginia. The Role of State Policies under Federal Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Emissions Standards. *Energy Policy*. 2019, vol. 126, pp. 507–517.
20. Zhou Yiyi and Shanjun Li. Dynamics of Technology Adoption and Critical Mass in the Market for Electric Vehicles. *Journal of Industrial Economics*. 2018, vol. 2, pp. 423–480.
21. Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Tynchenko Y. A., Qi M. Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption. *Energies*. 2023, vol. 16, p. 729. DOI: 10.3390/en16020729.
22. Porsev E. G., Druzhinina N. S. Electric corona discharge as a basis for managing the quality of solid cereals. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2018, Novosibirsk, 12–14 Dec. 2018*. 2019, vol. 560, art. 012172. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012172.
23. Porsev E. G., Konyukhov V. Y. Perspective algorithms for the effective use of electro-osmosis for automatic installations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2018, Novosibirsk, 12–14 Dec. 2018*. 2019, vol. 560, art. 012174. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012174.
24. Shchurov N. I., Vnukov S. A. Modelirovanie effektivnoi silovoi energoustanovki elektromobilya s uchetom nagruzochnykh tsiklov dvizheniya [Simulation of effective electric vehicle power plant taking into account load cycles of motion]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*. 2023, no. 2 (59), pp. 56–67. [In Russ]. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-56-67.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Внуков Сергей Александрович¹ – ассистент, e-mail: abakan.1998@mail.ru, ORCID: 0009-0003-6219-519X;

Штанг Александр Александрович¹ – канд. техн. наук, доцент, e-mail: shtang@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0001-9772-1784;

*Латышев Роман Николаевич*¹ — ассистент, младший научный сотрудник научно-исследовательской части, e-mail: latyshev@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-3920-8728;

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия.

Для контактов: *Внуков С. А.*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Vnukov S.A.*¹, assistant, e-mail: abakan.1998@mail.ru, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, ORCID: 0009-0003-6219-519X;

*Shtang A. A.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: shtang@corp.nstu.ru, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia;

*Latyshev R. N.*¹, Assistant, Junior Researcher of Research Unit, e-mail: latyshev @corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-3920-8728, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Получена редакцией 18.04.2023; получена после рецензии 04.09.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 18.04.2023; received after the review 04.09.2023; accepted for printing 10.10.2023.

