

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

DOI: 10.26730/1999-4125-2020-6-87-97

УДК 622+621.333+621.3.072

### РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОВЫХ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ

### DEVELOPMENT OF CRITERIA FOR ENSURING THE JOINT OPERATION OF ENERGY SOURCES FOR THE CREATION OF NEW QUARRY DUMP TRUCKS

**Бузунов Николай Викторович**<sup>1</sup>,  
канд. техн. наук, доцент, e-mail: buzunovnv@bmstu.ru  
**Buzunov Nikolay V.**<sup>1</sup>, C. Sc. in Engineering, Associate Professor,  
**Пирожков Роман Дмитриевич**<sup>1</sup>,  
аспирант, e-mail: pirozhkovrd@student.bmstu.ru  
**Pirozhkov Roman D.**<sup>1</sup>, graduate student,  
**Карташов Александр Борисович**<sup>1</sup>,  
канд. техн. наук, e-mail: kartashov@bmstu.ru  
**Kartashov Alexandr V.**<sup>1</sup>, C. Sc. in Engineering,  
**Дубинкин Дмитрий Михайлович**<sup>2</sup>,  
канд. техн. наук, доцент, e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru  
**Dubinkin Dmitry M.**<sup>2</sup>, C. Sc. in Engineering, Associate Professor

<sup>1</sup>Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана, 105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская улица, д. 5, стр. 1

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, 105005, Russian Federation, Moscow, 2nd Baumanskaya street, 5

<sup>2</sup>Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

<sup>2</sup>T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

#### **Аннотация:**

*Применение тяговых аккумуляторных батарей в составе гибридного транспортного средства обеспечивает значительную экономию топлива за счет рекуперации энергии при торможении и позволяет выбрать тяговый генератор с меньшей номинальной мощностью. При этом для транспортных средств специального назначения с высоким напряжением шины постоянного тока количество батарейных модулей и общая стоимость тяговой батареи значительно возрастают. Данная проблема может быть решена за счет применения двунаправленных DC/DC преобразователей между тяговой батареей и шиной постоянного тока.*

**Ключевые слова:** карьерный самосвал, горнопромышленный транспорт, тяжелая платформа, горные машины, накопитель электрической энергии.

#### **Abstract:**

*The use of traction batteries as part of a hybrid vehicle provides significant fuel savings due to energy recovery during braking and allows you to choose a traction generator with a lower nominal power. At the same time, for special purpose vehicles with high DC bus voltage, the number of battery modules and the total cost of the traction battery increase significantly. This problem can be solved by using bidirectional DC / DC converters between the*

*traction battery and the DC bus.*

**Key words:** *mining dump truck, mining transport, heavy platform, mining machine, mining, electrical energy storage.*

### **Введение.**

Разработка критериев обеспечения совместной работы источников энергии для создания новых карьерных самосвалов является актуальной, т. к. автомобильный транспорт нашел широкое применение в сравнении с другими видами транспортировки полезных ископаемых [1-2]. Достоинствами такого вида транспортировки являются высокая маневренность, преодоление больших уклонов и мобильность.

Существует три основные схемы организации тяговой системы транспортных средств с комбинированными энергоустановками [3-6]: последовательная, параллельная и смешанная. В состав схем могут входить двигатель внутреннего сгорания (ДВС), генератор, аккумуляторные батареи, конденсаторы, тяговый электродвигатель (ТЭД), выпрямители и преобразователи. Роль ДВС и генератора могут заменять топливные элементы.

Все электрические устройства в последовательной схеме подключаются к общей шине постоянного тока (DC-шине). ДВС не связан с колесами механически и имеет возможность выключения в процессе движения, в этом случае транспортное средство движется за счет энергии батарей. ДВС работает с неизменной частотой вращения, соответствующей оптимальному режиму. Если мощность, необходимая для движения, меньше развиваемой генератором, то избыток используется для подзарядки батарей. В случае нехватки мощности, развиваемой генератором, в работу вступают батареи. К достоинствам последовательной схемы можно отнести большую свободу компоновки, максимальную энергоэффективность рекуперации, а к недостаткам – значительные габариты и массу относительно других схем, потери энергии при ее преобразованиях.

В параллельной схеме ДВС и ТЭД имеют жесткую механическую связь с колесами. В подавляющем большинстве случаев ДВС значительную часть времени работает в оптимальном режиме. ТЭД включается в работу в ситуациях, когда двигатель не обеспечивает требуемую мощность. В случае обеспечения ДВС избытка мощности ТЭД переводится в генераторный режим. Достоинствами данной схемы являются меньшие размеры и масса по сравнению с последовательной схемой и меньшие потери энергии, а среди недостатков выделяют необходимость использования комплексных механических передач (электромашина, объединенная с элементом трансмиссии) и большую сложность компоновки по сравнению с последовательной схемой.

В смешанной схеме используются особенности параллельной и последовательной схем: ДВС соединяется механически с двумя электрическими машинами посредством передачи с двумя степенями свободы. Коробка передач в данном случае исключается. По преимуществам и недостаткам такая схема близка к параллельной и иногда рассматривается как ее разновидность.

В отсутствие тяговых батарей в последовательной схеме мощность приводного двигателя и тягового генератора определяется на основании самых сложных условий эксплуатации. Применение тяговых батарей позволяет уменьшить номинальную мощность генератора и приводного двигателя за счет параллельной работы указанных источников энергии при экстремальных условиях работы транспортного средства.

Для специальных транспортных средств характерно применение тяговых электродвигателей с высоким номинальным напряжением на шине постоянного тока (более 600 В) [2-6], что и является определяющим для номинального напряжения тягового генератора. При этом номинальное напряжение отдельных батарейных модулей, наиболее часто встречающихся в составе транспортных средств специального назначения, достаточно мало по сравнению с указанным напряжением шины постоянного тока и составляет порядка 150-200 В. Обеспечение параллельной работы тяговой батареи и генератора на общую нагрузку в таком случае возможно за счет увеличения числа батарейных модулей, что в общем случае оказывается избыточным и приводит к необоснованному увеличению массы и стоимости тяговой батареи.

Решение данной проблемы может заключаться в использовании двунаправленного DC/DC преобразователя [2, 3, 6], который применяется для подключения тяговой батареи к шине постоянного тока. Количество батарейных модулей в составе тяговой батареи в данном случае определяется только величиной тока, необходимого для обеспечения пиковой мощности тягового привода в тяжелых условиях при совместной работе с генератором, а не номинальным напряжением DC-шины. DC/DC преобразователь в данной схеме обеспечит:

- при работе тяговой батареи на разряд: формирование необходимого для параллельной работы напряжения со стороны батареи без регулирования напряжения со стороны контроллера генератора, что значительно усложнило бы алгоритм верхнего уровня управления;

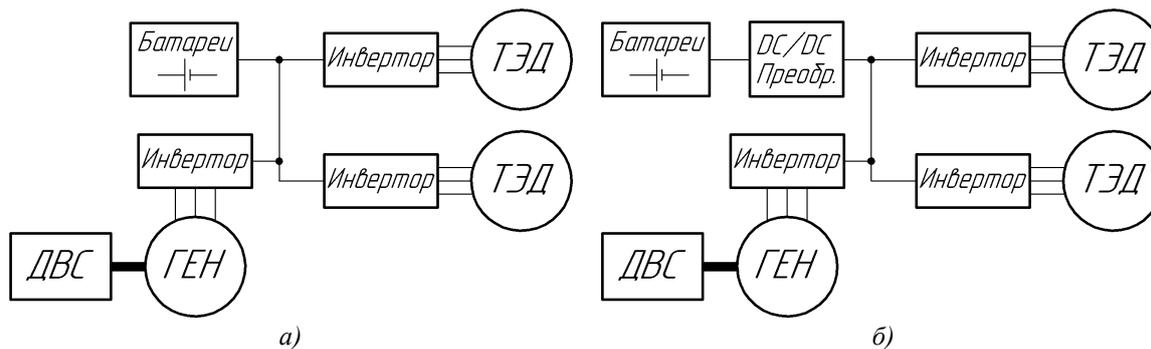


Рис. 1. Условная схема тягового привода:  
 а – без DC/DC преобразователя; б – в составе с DC/DC преобразователем  
 Fig. 1. Conditional scheme of the traction drive:  
 а – without DC / DC converter; б – as part of a DC/DC converter

Таблица 1. Характеристики ТЭД  
 Table 1. Characteristics of TED

Температура охлаждающей жидкости +40°C		
Длит. момент, Н·м	Длит. мощность, кВт	Номинальный ток, А
1510	380	522
Температура охлаждающей жидкости +40°C/+65°C		
Номинальная частота вращения, об/мин	Максимальная частота вращения, об/мин	Максимальный момент, Н·м
2400	4000	2135

Таблица 2. Характеристики генератора  
 Table 2. Characteristics of the generator

Параметры	Теоретические значения (600 В <sub>ДС</sub> , 45°C)	Теоретические значения (750 В <sub>ДС</sub> , 45°C)
Длительная механическая мощность	225 кВт	281 кВт
Длительный момент	1852 Н·м	1852 Н·м
Номинальный диапазон частоты вращения	0-3400 об/мин	

Таблица 3. Характеристики блока батарей  
 Table 3. Characteristics of the battery pack

Microvast 6C+2B		
Параметры	Значения	
Номинальное напряжение/Емкость	556,6 В/140 Ач (78 кВтч)	
Рабочее напряжение	400 В ~ 677,6 В	
Конфигурация модуля	7p66s/1C, 7p44s/1B	
Конфигурация системы	264s14p	
Тип ячеек		
Зарядка при 25°C	Макс. пост ток	480 А
	Макс. пик. ток	500 А < 10 с
Разрядка при 25°C	Макс. пост ток	365А (20% ~ 100% SOC)
	Макс. пик. ток	500 А < 10 с

- при работе тяговой батареи на заряд: ограничение тока заряда батареи исходя из текущих возможностей генератора (с учетом мощности, отдаваемой на привод) без снижения со стороны контроллера генератора напряжения на шине постоянного тока.

### Моделирование гибридного последовательного тягового привода

Последовательная схема подходит для применения в тяжелой технике по причине своей простоты и компоновочных возможностей. В данной работе рассматривается последовательная схема, представленная на рис. 1.

Как уже было отмечено, генератор, ТЭД и батареи подключаются к общей шине. У данного решения есть следующие ограничения – при использовании общей шины несколькими

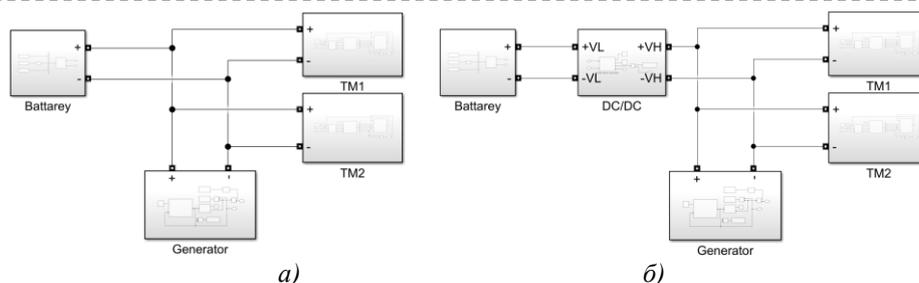


Рис. 2. Блок-схема математической модели тяговой системы в среде Simulink:  
а – без DC/DC преобразователя, б – в составе с DC/DC преобразователем

Fig. 2. Block diagram of the mathematical model of the traction system  
in the Simulink environment:

a – without DC / DC converter, б – in combination with DC / DC converter

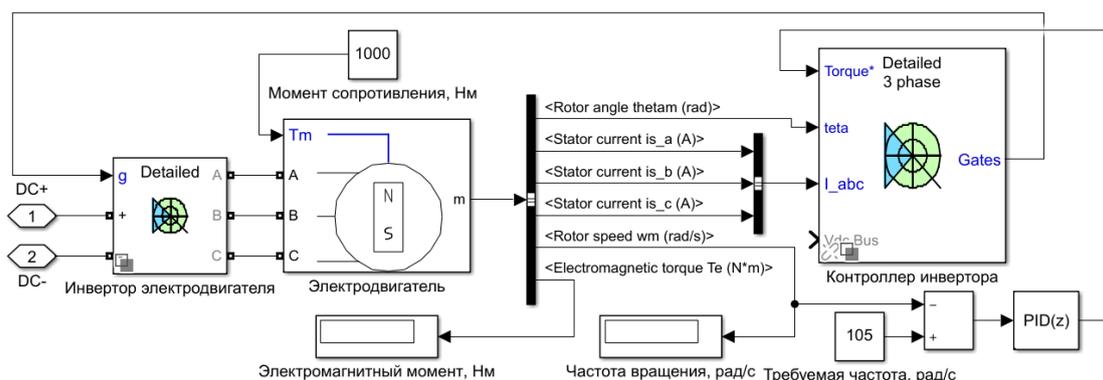


Рис. 3. Блок-схема модели тягового привода  
Fig. 3. Block diagram of the traction drive model

устройствами, соединенными параллельно, невозможно управлять потоками мощности между ними. Они определяются внутренним сопротивлением этих устройств, в общем случае зависящем от множества параметров. Для обеспечения ТЭД энергией в полном объеме необходимо точное совпадение напряжений генератора и батарей, при этом усложняются алгоритмы управления напряжением генератора.

У всех типов батарей совместно со снижением уровня заряда наблюдается уменьшение напряжения. В связи с этим напряжение работы генератора необходимо также снижать по мере разрядки батарей для обеспечения совместной работы генератора и батарей на общую нагрузку. Вместе со снижением напряжения на шине постоянного тока будет падать мощность ТЭД, что может привести к невозможности продолжения движения при работе в тяжелых условиях.

Данная проблема преодолевается за счет использования двухсторонних преобразователей постоянного тока (DC/DC преобразователей). Их использование позволяет объединить устройства, имеющие различные номинальные напряжения, и контролировать потоки электрических мощностей в системе [5].

Существует множество различных реализаций DC/DC преобразователей. КПД существующих схем превышает 90% [6-9]. Для

некоторых преобразователей КПД может составлять 96-98% при мощности 100 кВт [120].

### Прототип

Применение приведенной схемы планируется на перспективном карьерном автосамосвале с колесной формулой 4x4, полная масса самосвала составляет 50 т, снаряженная масса составляет 25 т. К тяговому приводу самосвала предъявляются следующие требования на основе моделирования рабочего цикла [13-16]:

- номинальная мощность, не менее 220 кВт;
- пиковая мощность, не менее 350 кВт;
- максимальная частота вращения ТЭД, 3335 об/мин;
- момент на максимальной частоте, 743 Нм.

На основе требований выбраны следующие устройства: ТЭД в составе передней и задней осей, ДВС, генератор и блок батарей. В качестве ТЭД используются электродвигатели EM-PMI540-T1500-2400-DUAL. В таблице 1 Таблица 1 представлены характеристики электродвигателей. В качестве генератора используется электродвигатель LSM280A-HV, максимальный ток которого составляет 350 А, другие характеристики генератора представлены в таблице 2. В качестве блока батарей используются литий-титанатные (LpTO) аккумуляторы Microvast 6С+2В, характеристики аккумуляторов

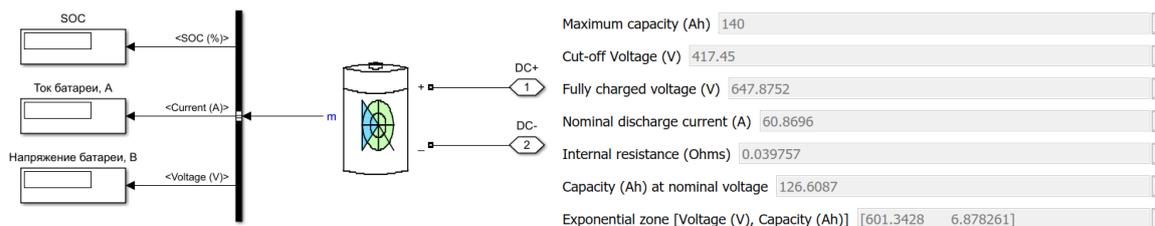


Рис. 4. Модель тяговой батареи  
 Fig. 4. Traction Battery model

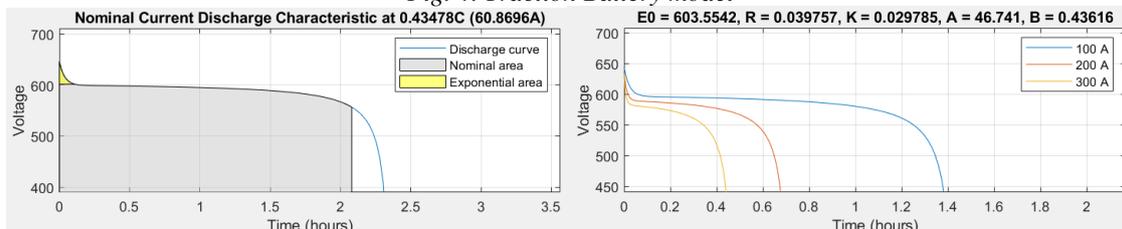


Рис. 5. Характеристики разряда тяговой батареи  
 Fig. 5. Characteristics of the traction battery discharge

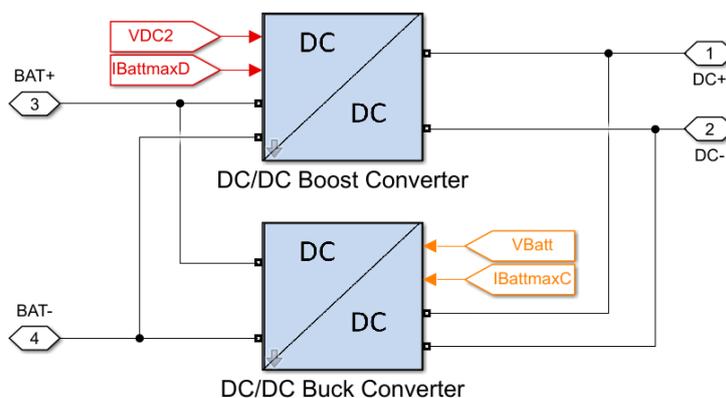


Рис. 6. Блок-схема двунаправленного DC/DC-преобразователя  
 Fig. 6. Block diagram of a bidirectional DC/DC converter

представлены в таблице 3.

#### Имитационная математическая модель

Математическая модель описанной гибридной тяговой системы в исполнении без DC/DC преобразователя и в составе с DC/DC преобразователем получена в среде MATLAB Simulink. Блок-схема модели представлена на рисунке 2.

Представленная модель состоит из блоков: двух ТЭД, генератора, DC/DC преобразователя и батареи. Подсистемы подсоединены к общей шине постоянного тока.

В блоке генератора содержится математическая модель управляемого источника постоянного напряжения.

В блоках ТЭД содержатся математические модели инвертора, векторного контроллера ТЭД и модель синхронного электродвигателя с постоянными магнитами (рис. 3).

В подсистеме блока батареи содержится математическая модель литий-ионной (LiIon) батареи, в которой учитываются процессы заряда и

разряда батареи. Соответствующая блок-схема и основные параметры батареи представлены на рис. 4, а характеристики разряда приведена на рис. 5.

Для моделирования работы двунаправленного DC/DC-преобразователя используются представленные в работе [6] схемы виртуальных buck- и boost- преобразователей (рис. 6).

Блок «DC/DC Buck Converter» представляет собой упрощенную модель последовательного стабилизатора понижающего типа. Данное виртуальное устройство предназначено для ограничения тока заряда тяговой батареи без регулирования напряжения в шине постоянного тока. Блок «DC/DC Boost Converter» является моделью повышающего стабилизатора и предназначен для согласования текущих напряжений шины постоянного тока и тяговой батареи при разряде.

#### Вычислительные эксперименты

Для оценки необходимости применения DC/DC преобразователя в используемой схеме проводятся следующие эксперименты.

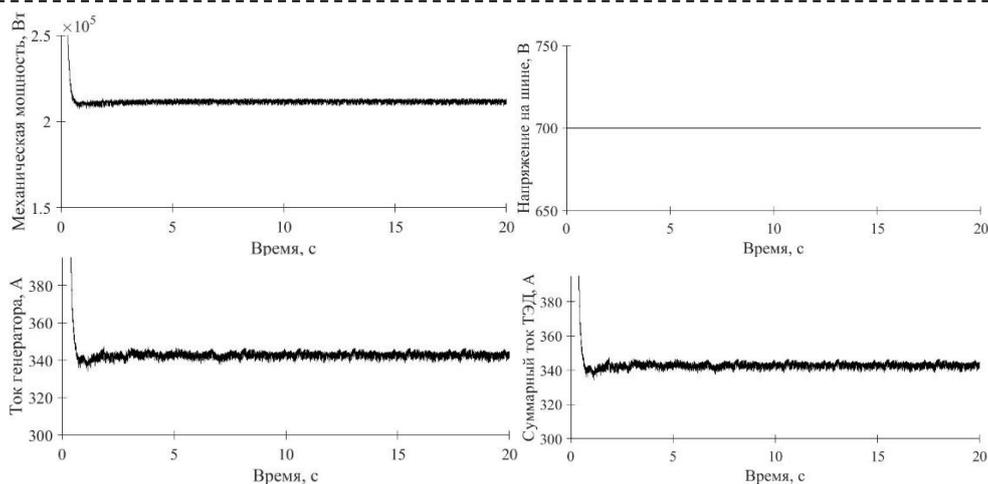


Рис. 7. Исследуемые параметры при работе привода без батареи  
Fig. 7. Test parameters when the drive is operated without a battery

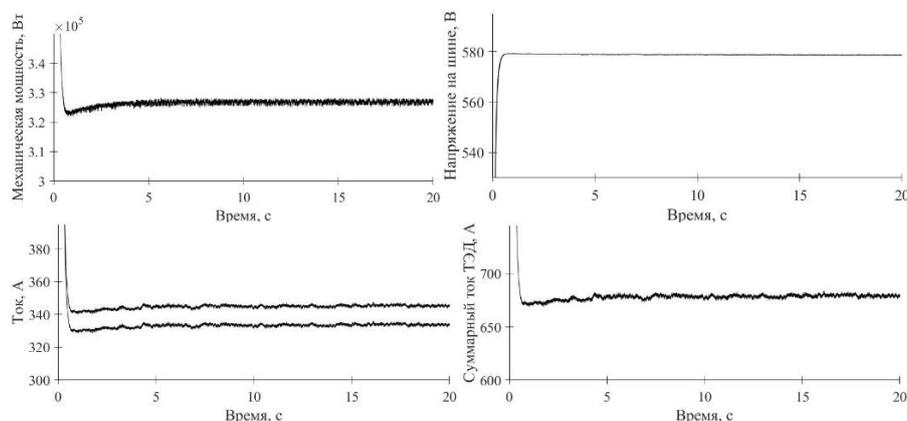


Рис. 8. Параметры привода без DC/DC преобразователя и зарядом батареи 90%  
Fig. 8. The parameters of the drive without DC/DC Converter and a battery 90%

Оценивается работа тягового привода при работе двигателей в режиме постоянной мощности в течение 20 секунд. При моделировании контролируется ток отдачи генератора на уровне не более длительного допустимого тока генератора в соответствии с таблицей 2. Вычислительные эксперименты проводятся для случаев работы привода без батареи, с низким уровнем заряда батареи и с высоким уровнем заряда батареи. В результате вычислительных экспериментов оцениваются потоки мощности в приводе.

#### Работа без батареи

Первый эксперимент предполагает работу генератора на тяговый привод без использования батареи и DC/DC преобразователя. В качестве графической интерпретации результатов моделирования (рис. 7) выступают ток генератора, суммарный ток ТЭД, напряжение на DC-шине и механическая мощность, развиваемая ТЭД.

Нагрузка на валах электродвигателей составляет 1000 Н·м, частота вращения электродвигателей составляет 1000 об/мин, а развиваемая двумя двигателями мощность равна 210 кВт.

#### Работа привода без DC/DC преобразователя

В данных вычислительных экспериментах без DC/DC преобразователя рассматривается работа привода, при которой проводится выравнивание напряжений батареи и генератора. Во всех экспериментах частота вращения валов электродвигателей поддерживается равной 1000 об/мин.

В текущем эксперименте нагрузка на валах электродвигателей составляет 1550 Н·м, развиваемая двумя двигателями мощность составляет 327,5 кВт, начальный уровень заряда батареи равен 90%, напряжение на шине постоянного тока поддерживалось на уровне 578 В с целью обеспечения длительно допустимых токов отдачи батареи и генератора.

Графическая интерпретация результатов эксперимента представлена на рис. 8.

Третий эксперимент начинался с заряда батарей в 30%. При этом преодолеваемый момент сопротивления на каждом электродвигателе составлял 1460 Н·м, развиваемая двумя

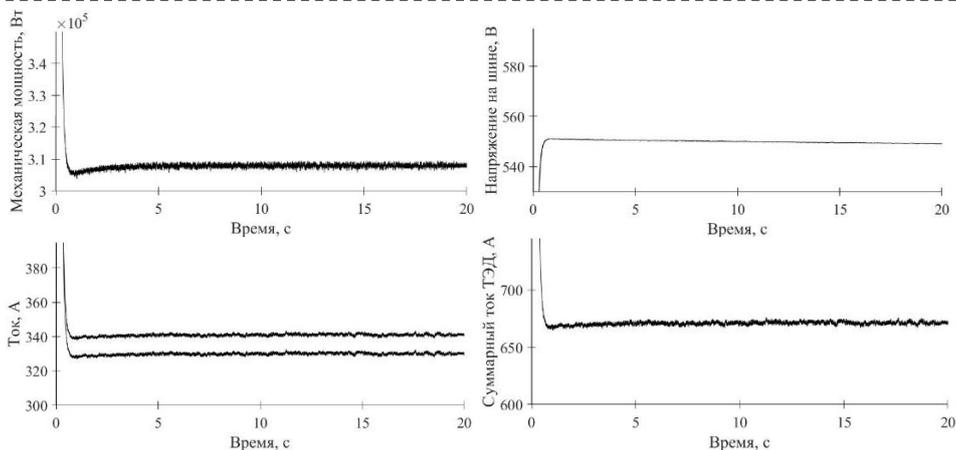


Рис. 9. Параметры привода без DC/DC преобразователя и зарядом батареи 30%  
 Fig. 9. The parameters of the drive without DC/DC Converter and a battery 30%

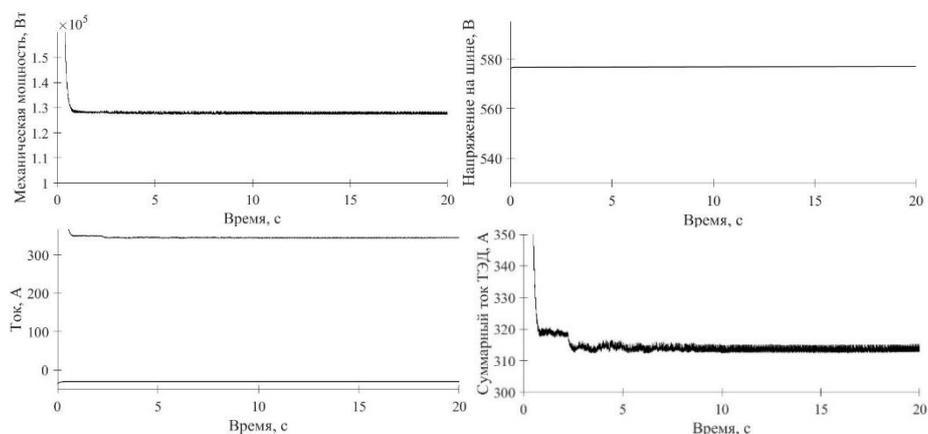


Рис. 10. Исследуемые параметры при работе привода без выравнивания напряжений и начальном уровне заряда батареи 10%

Fig. 10. Test parameters when the drive is operated without voltage equalization and the initial battery charge level is 10%

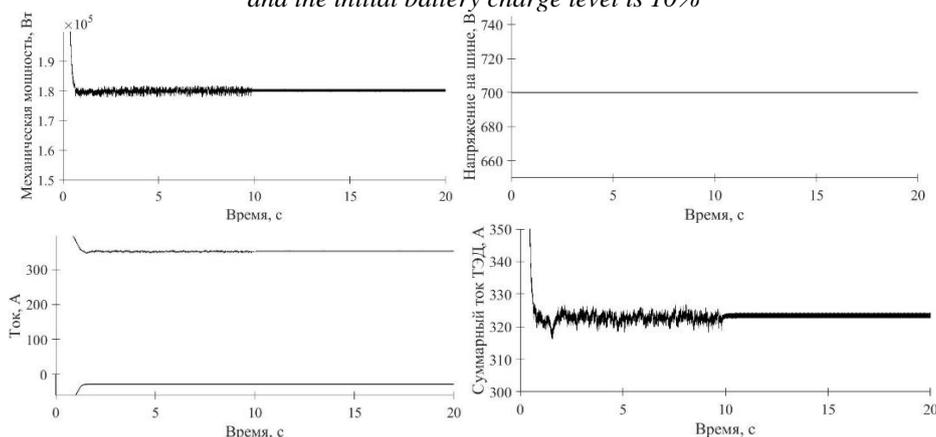


Рис. 11. Исследуемые параметры при работе привода с DC/DC преобразователем в режиме заряда батареи с начальным уровнем заряда 10%

Fig. 11. Test parameters when the drive operates with a DC / DC converter in battery charge mode with an initial charge level of 10%

двигателями мощность была равна 307,5 кВт, а напряжение на шине постоянного тока снизилось до порядка 550 В. Графическая интерпретация результатов эксперимента представлена на рис. 9.

В следующем эксперименте управление

напряжением генератора осуществляется с целью поддержания тока заряда батареи не более 30 А. Графическая интерпретация результатов эксперимента представлена на рис. 10.

Нагрузка на валах электродвигателей

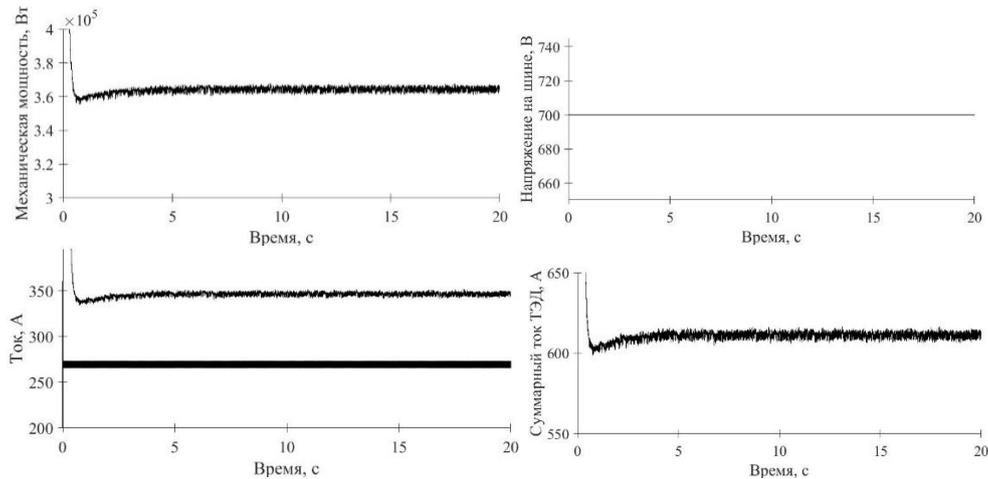


Рис. 12. Параметры привода с DC/DC преобразователем при заряде батареи с начальным уровнем заряда 90%

Fig. 12. Parameters of the drive with a DC / DC converter when the battery is charged with an initial charge level of 90%

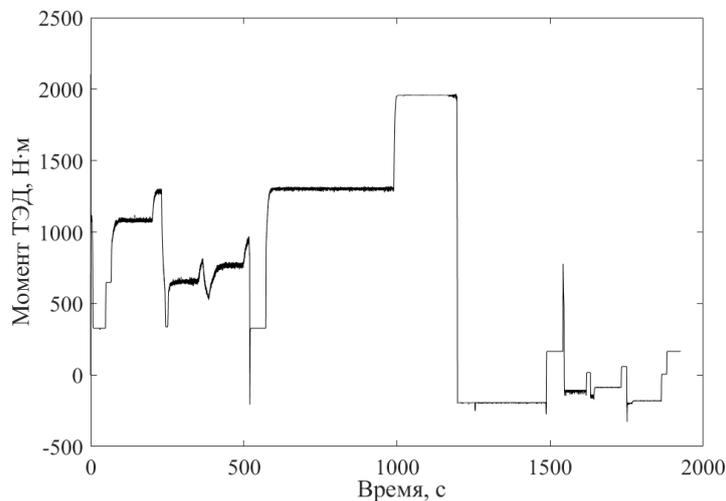


Рис. 13. Зависимость момента приводного двигателя от времени движения

Fig. 13. Dependence of the drive motor torque on the driving time

составляет 600 Н·м, развиваемая двумя двигателями мощность составляет 127,5 кВт, уровень заряда батареи в начальный момент времени составляет 10%. В данном случае напряжение на DC-шине составило 577 В.

#### Работа привода с DC/DC преобразователем

На рис. 11 представлены результаты моделирования при использовании DC/DC преобразователя, работающего на заряд батареи с начальным уровнем заряда 10%. Ток заряда батареи контролируется DC/DC преобразователем и составляет 30 А независимо от напряжения на шине постоянного тока (составляет 700 В). При этом преодолеваемый момент сопротивления на каждом электродвигателе составлял 850 Н·м, а развиваемая двумя двигателями мощность была равна 180,2 кВт.

Последний эксперимент предполагал совместную работу DC/DC преобразователя и

генератора на общую нагрузку при заряде батарей 90%. Результаты представлены на рис. 12. Напряжение на шине постоянного тока также составляло 700 В, момент сопротивления на каждом электродвигателе составлял 1730 Н·м, а развиваемая суммарная мощность была равна 365,8 кВт.

#### Заключение

По результатам ранее проведенных расчетных исследований [17] для рассматриваемого транспортного средства была сформирована зависимость момента одного из приводных двигателей от времени движения (рис. 13).

На участке  $\omega_{max}$  частота вращения двигателя составляла 78,9 рад/с. При этом суммарная мощность двух двигателей равна 207,86 кВт. В таблице 4 представлено сравнение мощностей, которые могут быть получены при различных режимах работы бортовых источников энергии гибридного транспортного средства как с

Таблица 4. Мощности бортовых источников энергии  
 Table 4. Power of on-board power sources

Режим работы	Максимальная длительная мощность, кВт
DC/DC преобразователь и генератор на ТЭД, заряд батарей 90%	365,8
Генератор и батарея на ТЭД (начальный уровень заряда 90%)	327,5
Генератор и батарея на ТЭД (начальный уровень заряда 30%)	307,5
Генератор на ТЭД (без батареи)	210
Мощность по типовому циклу	207,86
DC/DC преобразователь на заряд батареи (ток заряда 30 А, начальный заряд 10%) и генератор на ТЭД	180,2
Генератор на ТЭД и заряд батареи (ток заряда 30 А, начальный уровень 10%)	127,5

использованием DC/DC преобразователя, так и без применения данного устройства.

Из представленных данных можно сделать следующие выводы:

- применение DC/DC преобразователя позволяет получить большую мощность как при высоком, так и при низком уровне заряда батареи;

- данное устройство позволяет отключить разряженную батарею от DC-шины без механических выключателей, при этом генератором будет обеспечиваться необходимая для движения мощность;

- при низком заряде батареи DC/DC преобразователь позволяет обеспечивать заряд малым током, при этом генератор может обеспечивать мощность, необходимую для движения с несколько меньшей скоростью по сравнению с типовым циклом движения.

По результатам представленных виртуальных экспериментов подтверждена возможность применения двунаправленного DC/DC преобразователя для согласования напряжений

шины постоянного тока и тяговой батареи вне зависимости от текущего уровня заряда. При этом возможно упрощение алгоритмов управления напряжением генератора, которое не будет зависеть от текущего состояния батареи.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-11-2020-031 от 14.12.2020г. с ПАО «КАМАЗ» по комплексному проекту «Создание высокотехнологичного производства семейства роботизированных карьерных самосвалов грузоподъемностью до 90 т с электромеханической трансмиссией на основе цифровых технологий», при участии ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» в части выполнения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубинкин Д. М. Обоснование необходимости создания тяжелых платформ для открытых горных работ // Горное оборудование и электромеханика – 2020. – № 4 (150). – С. 59-64.
2. Дубинкин Д. М. Современное состояние техники и технологий в области автономного управления движением транспортных средств угольных карьеров // Горное оборудование и электромеханика – 2019. – № 6 (146). – С. 8-15.
3. Yaroslavcev M. V., Energoeffektivnyj tyagovyj privod gorodskogo bezrel'sovogo transporta [Energy efficient traction drive for urban vehicles]: diss. ...PhD (Eng), 05.09.03. Novosibirsk State Technical University, 2016, 157 p.
4. Siang F. T., Chee W. T., A review of energy sources and energy management system in electric vehicles // Renewable and Sustainable Energy Reviews 20. 2013. P. 82-102.
5. Lajunen A., Sainio P., Laurila L., Pippuri-Mäkeläinen J. and Tammi K. 2018 Overview of powertrain electrification and future scenarios for non-road mobile machinery, Energies 11.
6. Yimin Gao, M. Ehsani and J. M. Miller, "Hybrid Electric Vehicle: Overview and State of the Art," Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2005. ISIE 2005., Dubrovnik, Croatia, 2005, pp. 307-316, doi: 10.1109/ISIE.2005.1528929.

7. Al Sakka M., Van Mierlo J., Gualous H. DC/DC Converters for Electric Vehicles // *Electric Vehicles - Modelling and Simulations 2011* pp. 309-332.
8. S. Njoya Motapon, L. A. Dessaint and K. Al-Haddad, "A Comparative Study of Energy Management Schemes for a Fuel Cell Hybrid Emergency Power System of More Electric Aircraft," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013.
9. L. Solero, A. Lidozzi and J. A. Pomilio, "Design of multiple-input power converter for hybrid vehicles," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 5, pp. 1007-1016, Sept. 2005, doi: 10.1109/TPEL.2005.854020.
10. B. Destraz, Y. Louvriev and A. Rufer, "High Efficient Interleaved Multi-channel dc/dc Converter Dedicated to Mobile Applications," *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, Tampa, FL, 2006*, pp. 2518-2523, doi: 10.1109/IAS.2006.256893.
11. M. Elsied et al., "Efficient Power-Electronic Converters for Electric Vehicle Applications," *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Montreal, QC, 2015*, pp. 1-6, doi: 10.1109/VPPC.2015.7352941.
12. Eckardt, Bernd & Hofmann, A. & Zeltner, Stefan & Maerz, Martin. (2006). *Automotive Powertrain DC/DC Converter with 25kW/dm<sup>3</sup> by using SiC Diodes*.
13. Buzunov N. V., Kotiev G. O. and Padalkin B. V., 2019, Wheel vehicle dynamics real-time simulation for on-board stand-alone moving control system realization *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 534.
14. Kotiev G. O., Miroshnichenko A. V., Stduhin A. A. and Kositsyn B. B., 2019, Estimating operation modes for the individual wheel electric drive of the all-wheel drive vehicle with the use of the driving simulation *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 534.
15. Gorelov V. A., Butarovich D. O., Stduhin A. A. and Skotnikov G. I., 2019, Simulation-based identification of the parameters of a minibus hybrid powertrain *IOP Conf. Series: Material Science and Engineering* 534.
16. Volskaia V. N., Zhileykin M. M. and Zakharov A. Y., 2018, Mathematical model of rolling an elastic wheel over deformable support base *IOP Conf. Series: Material Science and Engineering (Electronic Materials)* 315.
17. Kartashov A. B. and Skotnikov G. I., 2020, Simulation based feasibility confirmation of using hybrid powertrain system in unmanned dump trucks *IOP Conf. Series: Material Science and Engineering* 819.

## REFERENCES

1. Dubinkin D. M. Justification of the need to create heavy platforms for open-pit mining. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2020, no.4 (150), pp. 59-64.
2. Dubinkin D. M. Current state of engineering and technology in the field of autonomous traffic control of coal mine vehicles // *Mining equipment and electromechanics* No. 6, 2019, p. 8-15.
3. Yaroslavcev M. V., *Energoeffektivnyj tyagovyy privod gorodskogo bezrel'sovogo transporta [Energy efficient traction drive for urban vehicles]: diss. ...PhD (Eng), 05.09.03. Novosibirsk State Technical University, 2016, 157 p.*
4. Siang F. T., Chee W. T., A review of energy sources and energy management system in electric vehicles // *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20. 2013. P. 82-102.
5. Lajunen A., Sainio P., Laurila L., Pippuri-Mäkeläinen J. and Tammi K., 2018, Overview of powertrain electrification and future scenarios for non-road mobile machinery *Energies* 11.
6. Yimin Gao, M. Ehsani and J. M. Miller, "Hybrid Electric Vehicle: Overview and State of the Art," *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2005. ISIE 2005.*, Dubrovnik, Croatia, 2005, pp. 307-316, doi: 10.1109/ISIE.2005.1528929.
7. Al Sakka M., Van Mierlo J., Gualous H. DC/DC Converters for Electric Vehicles // *Electric Vehicles - Modelling and Simulations 2011* pp. 309-332.
8. S. Njoya Motapon, L. A. Dessaint and K. Al-Haddad, "A Comparative Study of Energy Management Schemes for a Fuel Cell Hybrid Emergency Power System of More Electric Aircraft," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013.
9. L. Solero, A. Lidozzi and J. A. Pomilio, "Design of multiple-input power converter for hybrid vehicles," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 5, pp. 1007-1016, Sept. 2005, doi: 10.1109/TPEL.2005.854020.
10. B. Destraz, Y. Louvriev and A. Rufer, "High Efficient Interleaved Multi-channel dc/dc Converter Dedicated to Mobile Applications," *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, Tampa, FL, 2006*, pp. 2518-2523, doi: 10.1109/IAS.2006.256893.
11. M. Elsied et al., "Efficient Power-Electronic Converters for Electric Vehicle Applications," *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Montreal, QC, 2015*, pp. 1-6, doi:

10.1109/VPPC.2015.7352941.

12.Eckardt, Bernd & Hofmann, A. & Zeltner, Stefan & Maerz, Martin. (2006). Automotive Powertrain DC/DC Converter with 25kW/dm<sup>3</sup> by using SiC Diodes.

13.Buzunov N. V., Kotiev G. O. and Padalkin B. V., 2019, Wheel vehicle dynamics real-time simulation for on-board stand-alone moving control system realization IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 534.

14.Kotiev G. O., Miroshnichenko A. V., Stduhin A. A. and Kositsyn B. B., 2019, Estimating operation modes for the individual wheel electric drive of the all-wheel drive vehicle with the use of the driving simulation IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 534.

15.Gorelov V. A., Butarovich D. O., Stduhin A. A. and Skotnikov G. I., 2019, Simulation-based identification of the parameters of a minibus hybrid powertrain IOP Conf. Series: Material Science and Engineering 534.

16.Volskaia V. N., Zhileykin M. M. and Zakharov A. Y., 2018, Mathematical model of rolling an elastic wheel over deformable support base IOP Conf. Series: Material Science and Engineering (Electronic Materials) 315.

17.Kartashov A. B. and Skotnikov G. I., 2020, Simulation based feasibility confirmation of using hybrid powertrain system in unmanned dump trucks IOP Conf. Series: Material Science and Engineering 819.

Поступило в редакцию 10.12.2020

Received 10 December 2020