

УДК 621.355, 629.34, 656.131

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ СИЛОВОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С УЧЕТОМ НАГРУЗОЧНЫХ ЦИКЛОВ ДВИЖЕНИЯ

Н.И. Щуров, С.А. Внуков

Новосибирский государственный технический университет

Основной проблемой проектирования тягового привода являются нестабильный уровень нагрузок электромобиля, большое количество разгонов и торможений, а также реверсивная работа тягового двигателя. Цель – разработка энергоэффективного привода на основе ездового цикла для электромобиля.

В данной работе был проведен анализ ездового цикла WLTC, рассмотрены его основные характеристики на базе тестовых процедур при различных рабочих условиях. Выбрана мощность тягового электродвигателя (ТЭД) на базе характеристик выбранного транспортного средства (ТС), построены тяговые характеристики при различных параметрах ускорения, выбрана конкретная модель тягового двигателя. Выполнено моделирование тягового привода на основе цикла движения WLTC в программной среде “Matlab Simulink”, описаны основные блоки модели, выведены зависимости, подтверждающие адекватность математического моделирования. Выбран подходящий накопитель энергии на основе сравнительной таблицы аккумуляторных батарей.

В конечном счете было выполнено моделирование силовой энергоустановки электромобиля с учетом нагрузочного цикла WLTC, при различных входных параметрах и условиях.

Ключевые слова: силовая энергоустановка, тяговый привод, моделирование, ездовой цикл WLTC, тяговые характеристики, энергия.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-56–67

Введение

Нарастающее производство электромобилей в мировой практике влечет за собой увеличение количества требований к поддержанию уровня экологичности и экономичности при эксплуатации. Основные преимущества использования гибридных транспортных средств: снижение топливных расходов и выбросов вредных веществ в атмосферу. Данные факторы характерны и актуальны для городского электрического транспорта. Основным конструктивным решением данных проблем является разработка энергоэффективного привода [1].

Электропривод транспортного средства является электротехническим устройством, которое включает в себя наличие силовой энергоустановки, способной обеспечить все режимы движения электротранспортного средства. Силовая энергоустановка содержит: тяговый электродвигатель (ТЭД), аккумуляторный блок питания, систему управления батареями, контроллер и датчики, подающие сигналы на двигатель, преобразователь электрической энергии и устройство распределения мощности [2].

В качестве бортового накопительного устройства для электромобиля, как правило, применяются литий-ионные аккумуляторы, однако могут использоваться суперконденсаторы и топливные элементы [3].

Во время процесса зарядки аккумуляторной батареи происходит контроль таких параметров, как напряжение, ток, температура и текущее состояние уровня заряда [4].

Анализ циклов движения позволяет оценить процессы деградации накопительного устройства при нормальных условиях эксплуатации. В рамках исследования используются сертифицированные циклы движения с учетом измерения параметров мгновенного тока или скорости для наиболее точного математического описания в результате пересчета. Основными признаками циклов движения являются местоположение и тип транспортного средства [5].

Для дальнейших расчетов в качестве прототипа был выбран ездовой цикл WLTC, который является наиболее приоритетным для описания реальных процессов, протекающих в тяговом приводе транспортного средства. Данный цикл широко описывает нагревательные процессы силовой установки, а также имеет комплексный подход к контролю уровня деградации накопительного элемента. Моделирование силовой энергоустановки отражает действительность при эксплуатации электромобиля [6].

1. Всемирный цикл WLTC

Данный цикл движения WLTC характеризуется проведением различных тестовых испытаний при эксплуатации легковых автомобилей. Существуют альтернативные версии данному циклу: NEDC (Европейский цикл), FTP-75 (Американский цикл) и JC08 (Японский цикл) [7].

Разработка программы проведения испытаний (тестовых циклов движения) для транспортных средств началась в 2007 году. Основными критериями проведения тестовых испытаний являлись: низкий диапазон температур окружающей среды, низкий уровень атмосферного давления, наличие охлаждающих систем и эксплуатация при нормальных рабочих условиях. В результате были выдвинуты строгие требования по снижению уровня выбросов углекислого газа (CO_2). На рис. 1 представлена диаграмма ездового цикла WLTC.

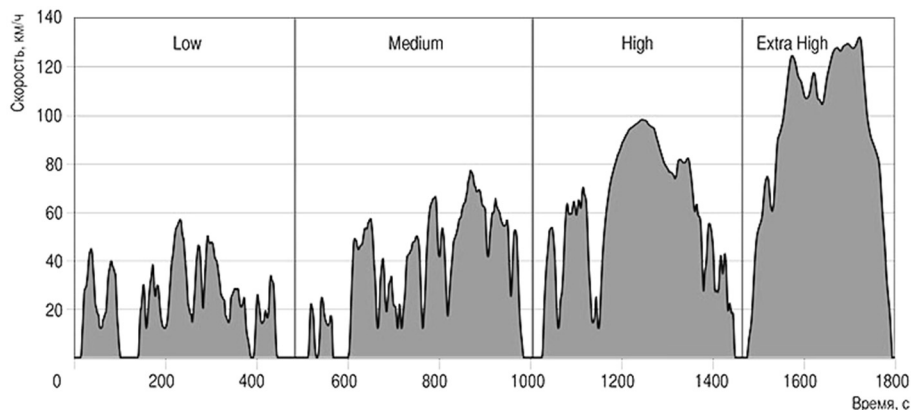


Рис. 1 – Ездовой цикл WLTC

Fig. 1 – WLTC driving cycle

Ездовой цикл движения WLTC состоит из четырех скоростных режимов: низкий – 56,5 км/ч; средний – 76,6 км/ч; высокий – 97,4 км/ч; очень высокий – 131,6 км/ч. Скоростные режимы «низкий» и «средний» описывают городское движение, а режимы «высокий» и «очень высокий» – движение за городом.

Цикл WLTC характерен для транспортных средств с массой до 3,5 т. Основной характеристикой является энерговооруженность – зависимость мощности тягового

электродвигателя от полной массы транспортного средства. Существует классификация в зависимости от значения максимальной скорости.

Подразделение по энерговооруженности осуществляется на три класса: до 22 Вт/кг; в пределах 22...34 Вт/кг; больше 34 Вт/кг. Это связано с отличительными особенностями автомобильного производства для каждой страны. Например, автомобильное производство Индии характеризуется относительно низкой стоимостью и низкой энергоэффективностью. У каждого класса энерговооруженности есть свой параметр максимального ускорения: $a_{\max} = 0,76 \text{ м/с}^2$ (меньше, чем показатель цикла NEDC – 0,833 м/с²); $a_{\max} = 0,96 \text{ м/с}^2$; $a_{\max} = 1,58 \text{ м/с}^2$ (больше, чем показатель цикла ARDC – 1,47 м/с²).

Для проведения дальнейших расчетов в качестве базового варианта был взят класс № 3, характеризующийся максимальной скоростью – $V_{\max} = 120 \text{ км/ч}$. К данному классу энерговооруженности относятся такие автомобили, как Chevrolet Niva (41 Вт/кг), Renault Kangoo (46 Вт/кг), Daewoo Matiz (49 Вт/кг) и Nissan March (52 Вт/кг). При дальнейшем исследовании мы будем использовать цикл движения только для данного класса.

2. Определение мощности электродвигателя и выбор конкретной модели

В качестве расчетного транспортного средства принят автомобиль Nissan March. Параметры выбранного ТС представлены в табл. 1.

Табл. 1 / Table 1

Характеристики ТС
Characteristics of the vehicle

Тип ТС	Полная масса, кг	Вместимость, чел.	Диаметр колеса, мм
Автомобиль Nissan March	1240	5	530

Мощность электродвигателя (ТЭД) определяется по формуле [8]

$$P = FV, \quad (1)$$

где F – тяговое усилие, кгс → Н; V – скорость ТС, км/ч.

Ускорение ТС определяется по формуле [9]

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

где $z = 1$ – количество электродвигателей (ТЭД); $\omega_0 = 12 + 0,0018V^2$ – удельное основное сопротивление движению для электромотоцикла, Н/кН; $m = 1240$ – масса ТС, кг; $\gamma = 0,15$ – коэффициент инерции вращающихся частей.

На основе аналитических расчетов были построены зависимости $P(V)$ при параметрах ускорения 2, 2,5 и 3 м/с² (hbc/ 2). Результаты тяговых расчетов сведены в табл. 2.

Если принимать во внимание максимальное пусковое ускорение 3 м/с², необходимая максимальная мощность при условии выхода на автоматическую характеристику в 60 км/ч составит 73 кВт.

Выбираем синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ) ОРИОН-18-2-04. Технические характеристики двигателя представлены в табл. 3.

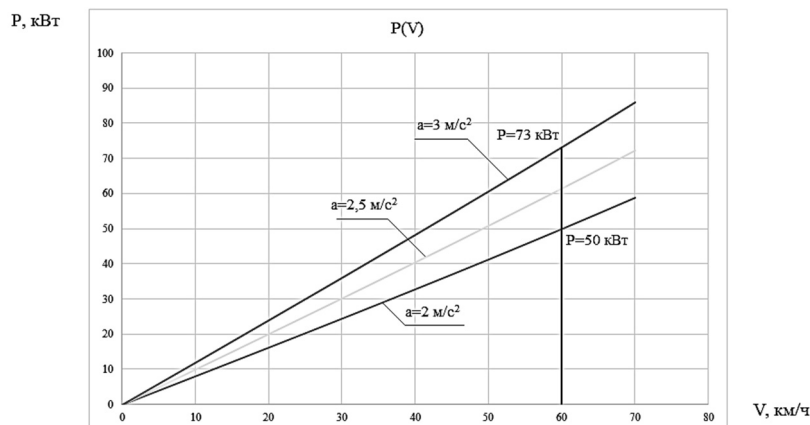
Рис. 2 – Зависимость $P(V)$ при различных значениях ускоренияFig. 2 – Dependence $P(V)$ for various values of acceleration

Табл. 2 / Table 2

Результаты расчета зависимостей $P(V)$ Results of $P(V)$ dependences calculation

V , км/ч	ω_0 , Н/кН	F , кГс			P , 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

Табл. 3 / Table 3

Технические характеристики синхронного двигателя с постоянными магнитами

Specifications of the permanent magnet synchronous motor

Технические характеристики "ОРИОН-18-2-04"	Ед. изм.	Значение
Пиковый (пусковой) момент (2...3 с) M_u	Н·м	1352
Номинальный момент (вод., возд. охл.) M_c	Н·м	338
Номинальная мощность (вод., возд. охл.) P_c	кВт	67,5
Номинальное напряжение $U_{ном}$	В	500
КПД (при номинальной мощности) E_{ff}	%	97,6
Диаметр ротора D_r	мм	240

Окончание табл., 3 / The End Table 3

Технические характеристики “ОРИОН-18-2-04”	Ед. изм.	Значение
Диаметр статора D_s	мм	356
Длина активной стали B_m	мм	120
Длина статора с обмоткой L_s	мм	210
Тепловая мощность (пиковая) P_{U1}	кВт	3896
Тепловая мощность (номинальная, вод. охл.) P_{C1}	Вт	974
Константа момента (20 °С) K_T	Н·м/А	1,45
Константа двигателя (20 °С) K_m	$H \cdot m \sqrt{\text{Вт}}$	10,83
Масса электромагнитной системы m_{em}	кг	63,0
Масса двигателя (корпусное исполнение) m	кг	105

3. Моделирование тягового привода на основе цикла движения WLTC

Для расчета и построения кривых движения в качестве исходных данных выбран перегон, имеющий нулевой уклон на протяжении всей длины и не имеющий кривых участков [10].

Для снижения трудоемкости вычислений была создана имитационная математическая модель, позволяющая определить энергетику движения ТС. В качестве блока управления был смоделирован цикл движения WLTC. Общий вид модели с пояснениями представлен на рис. 3 [11].

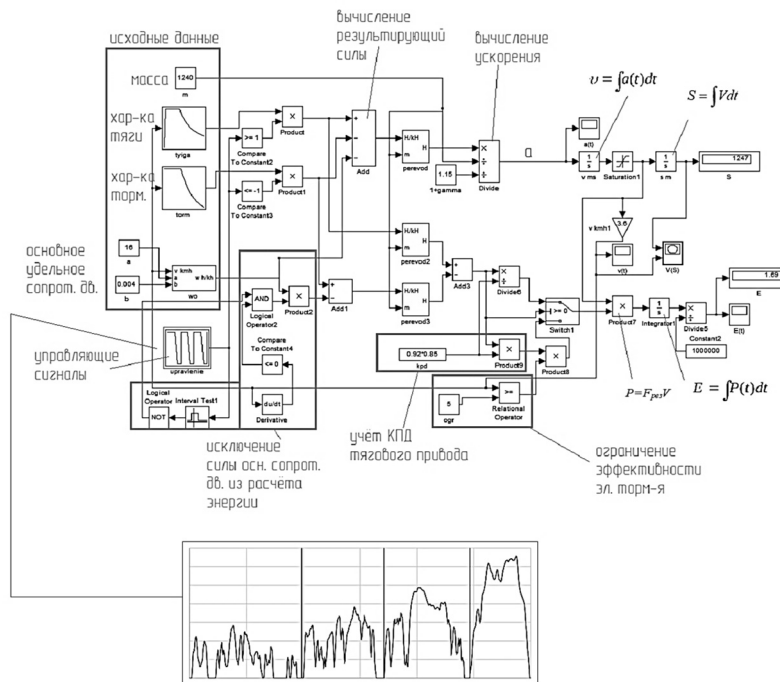


Рис. 3 – Общий вид имитационной математической модели на основе цикла движения WLTC

Fig. 3 – General view of the simulation mathematical model based on the WLTC motion cycle

Вычисление ускорения ТС а массой m основано на втором законе Ньютона $F_{\text{рез}} = (1 + \gamma)ma$, при этом в зависимости от режима движения $F_{\text{рез}}$ принимает значения:

- $F_{\text{тяг}} - W_0$ в режиме тяги;
- $-W_0$ в режиме выбега;
- $-(B_{\text{торм}} + W_0)$ в режиме торможения,

где $F_{\text{тяг}}$ и $B_{\text{торм}}$ – силы тяги и торможения, развиваемые в ТЭД; W_0 – основное сопротивление движению.

Задание сил тяги и торможения в блоках показано в табл. 4 и 5.

Таблица 4 / Table 4

Результаты расчета силы тяги
Results of the calculation of the traction force

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

Таблица 5 / Table 5

Результаты расчета силы торможения
Results of the calculation of the braking force

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

Вычисление силы удельного основного сопротивления движению показано на рис. 4.

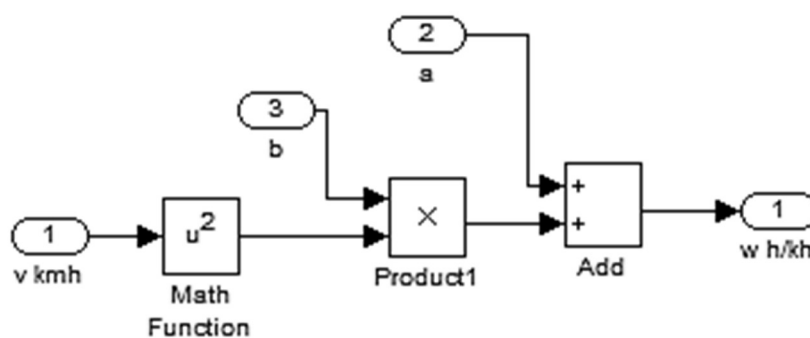


Рис. 4 – Задание характеристик тяги и торможения

Fig. 4 – Setting the characteristics of traction and braking

Перевод единиц измерения для сил свернут в блок, представленный на рис. 5.

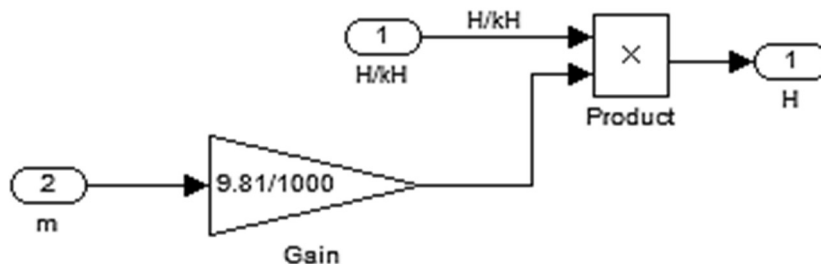


Рис. 5 – Перевод единиц измерения

Fig. 5 – Conversion of measurement units

С помощью данных блоков моделирования происходит вычисление ускорения по формуле $a = F_{\text{рез}} / (1 + \gamma)m$.

Переключение режимов тяги и торможения происходит с помощью последовательности 1 и -1 из блока “управление”. В его основе лежит математическое описание цикла движения WLTC, заданное в четырех скоростных этапах. Его содержимое представлено в табл. 6.

Таблица 6 / Table 6

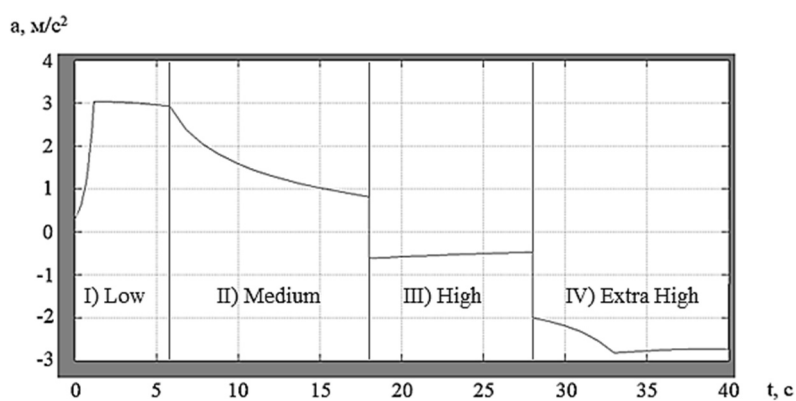
Переключение режимов тяги и торможения

Switching traction and braking modes

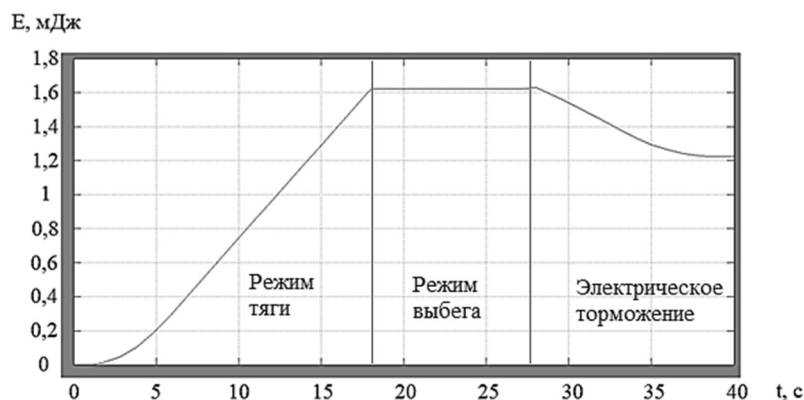
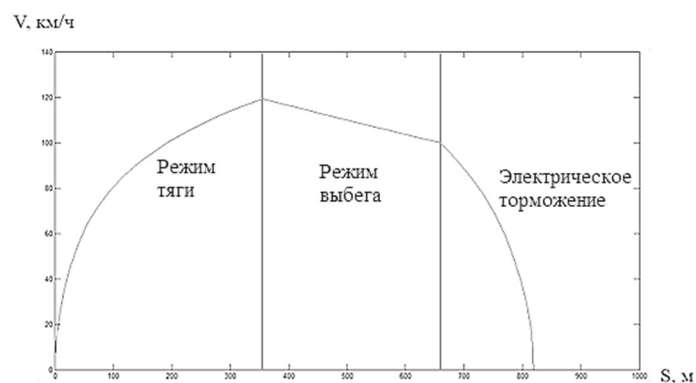
Скоростные этапы	Последовательность
0	1
18	1
28	-1
40	-1

В данной имитационной математической модели введены блоки (рис. 4) для проведения энергетических расчетов.

Адекватность модели подтверждает полученный график ускорения (рис. 6), согласно которому величина ускорения соответствует расчетному.

Рис. 6 – График $a(t)$ Fig. 6 – Plot $a(t)$

Проведенный расчет показывает, что для достижения максимальной скорости в 120 км/ч, выбега (20 %) и остановки потребуется 1,225 МДж (или 0,34 кВт · ч) энергии (рис. 7). При этом ТС пройдет путь в размере 819 м (рис. 8).

Рис. 7 – График $E(t)$ Fig. 7 – Plot $E(t)$ Рис. 8 – Кривая движения $V(S)$ Fig. 8 – Motion curve $V(S)$

4. Выбор накопителя энергии

Расчет энергии накопителя с помощью параметров, полученных в результате моделирования, выглядит следующим образом.

Для обеспечения запаса хода в 200 км потребуется накопитель энергии объемом в $(200/0,819)0,34 = 83$ кВт · ч, где $L = 200$ км – запас хода ТС, $S = 0,819$ км – расстояние, пройденное ТС, $E = 0,34$ кВт · ч – энергия ТС.

На основе сравнительной табл. 7 различных типов наиболее используемых аккумуляторных батарей наибольшую удельную плотность энергии имеют литий-ионные аккумуляторы на основе кобальта лития (150...190 Вт · ч/кг), однако пиковый ток нагрузки составляет всего 3С в отличие от 5С у литий-феррофосфатных (LiFePO_4) аккумуляторов. Еще одним плюсом литий-феррофосфатных аккумуляторов является в 2 раза больший жизненный цикл. Поэтому выбранный тип тяговой аккумуляторной батареи – LiFePO_4 .

Таблица 7 / Table 7

Технические параметры аккумуляторов
Technical parameters of batteries

Характеристика	SLA (PbSO ₄)	Никель- кадмиевые	Никель- металлогид- ридные	Литий-ионные		
				LiCoO ₂	LiMn ₂ O ₄	LiFePO ₄
1. Удельная плотность энергии, Вт·ч/кг [$\times 10^3$]	0,03...0,05	0,045...0,08	0,06...0,12	0,15...0,19	0,1...0,135	0,09...0,12
2. Время быстрой зарядки	8...16 ч	Обычно 1 ч	2...4 ч	2...4 ч	1 ч или менее	1 ч или менее
3. Жизненный цикл (80 % разряда) [$\times 10^3$]	0,2...0,3	1,0	0,3...0,5	0,5...1,0	0,5...1,0	1,0...2,0
4. Напряжение в элементе (номинальное)	2 В	1,2 В	1,2 В	3,6 В	3,8 В	3,3 В
5. Пиковый ток нагрузки (лучшие результаты)	5С (0,2С)	20С (1С)	5С (0,5С)	> 3С (< 1С)	> 30С (< 10С)	> 30С (< 10С)

При напряжении аккумуляторной батареи в 500 В, равном напряжению питания ТЭД, необходимая емкость накопителя составит $83\,000/500 = 166\text{ А} \cdot \text{ч}$ [12].

Обеспечить подобную емкость может сборка аккумуляторной батареи на базе стандартных ячеек формата 18650. Технические характеристики Li-ion ячейки 18650 Li-ion 2600 mAh представлены в табл. 8.

Таблица 8 / Table 8

Ячейка Li-ion 18650 2600 mAh
Cell Li-ion 18650 2600 mAh

Параметр	Значение
Номинальное напряжение	3,2 В
Плотность энергии	195 Вт · ч/кг
Максимальный ток разряда	7,5 А
Максимальный ток заряда	1,25 А
Внутреннее сопротивление	$\leq 30\text{ м}\Omega$
Срок жизни	600 циклов/емкость 80 %

Для обеспечения напряжения в 500 В потребуются сборка из $500/3,2 = 156$ ячеек 18650. При этом общая масса будет составлять 318 кг.

Выбор нужной BMS определяется двумя параметрами: 1) схемное решение (конструктивное исполнение); 2) уровень нагрузки (мощности). Классификация BMS: 1) общий порт подключения (циклы заряд/разряд); 2) отдельный порт подключения (разные разъемы).

Выводы

В данном исследовании были выполнены следующие этапы:

– проведен анализ всемирного цикла WLTC, описаны общие показатели классов энерговооруженности. В качестве расчетного был принят класс № 3, имеющий энерговооруженность больше 34 Вт/кг, максимальное ускорение 1,58 м/с², максимальную скорость 120 км/ч;

– выполнен расчет мощности двигателя (67,5 кВт), построена зависимость мощности от скорости $P(V)$, выбрана конкретная модель двигателя (СДПМ) “ОРИОН-18-2-04”;

– смоделирован тяговый привод на основе всемирного цикла WLTC, составлена имитационная модель в программной среде “Matlab Simulink”, представлено математическое описание энергетических блоков модели, получены зависимости ускорения и энергии от времени, зависимость скорости от пути. Для достижения максимальной скорости 120 км/ч, выбега (20 %) и остановки потребуется 1,225 МДж (или 0,34 кВт · ч) энергии. При этом транспортное средство пройдет расстояние 819 м;

– выбран накопитель энергии, для обеспечения запаса хода в 200 км потребуется накопитель энергии объемом в 83 кВт · ч. Необходимая емкость накопителя составила 166 А · ч. В качестве прототипа была принята сборка аккумуляторной батареи на основе ячеек 18650.

ЛИТЕРАТУРА

1. Штанг А.А., Ярославцев М.В. Контактно-аккумуляторный манёвровый электровоз с накопителем энергии на основе литий-ионных аккумуляторов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 1. – С. 13–16.
2. Штанг А.А., Ярославцев М.В. Определение основных характеристик комбинированной энергетической установки для городского безрельсового транспорта // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 4 (33). – С. 111–120. – DOI: 10.17212/1727-2769-2016-4-111-120.
3. Щуров Н.И., Мятёж С.В., Малозёмов Б.В. Анализ и расчет неактивной мощности в сети питания электропотребителей рудничного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-2. – С. 270–283.
4. Щуров Н.И. Энергоэффективная силовая установка для автономных транспортных средств // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды Седьмой Всероссийской научно-практической конференции, Новокузнецк, 23–24 ноября 2016 г. – Новокузнецк, 2016. – С. 107–108.
5. Малозёмов Б.В., Мятёж С.В., Щуров Н.И. Повышение количества рабочих зон в трехфазном выпрямителе переменного тока // Электротехника. – 2021. – № 6. – С. 56–60.
6. Малозёмов Б.В., Трухин Ф.В. Повышение эффективности и надежности тягового двигателя троллейбуса // Интеллектуальный потенциал Сибири: 26-я Региональная научная студенческая конференция, Новосибирск, 22–24 мая 2018 г.: в 2 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 2. – С. 650–652.
7. Дедов С.И., Бороненко А.О., Штанг А.А. Определение параметров последовательной гибридной установки на основе ездовых циклов // Интеллектуальный потенциал Сибири: 26-я Региональная научная студенческая конференция, Новосибирск, 22–24 мая 2018 г.: в 2 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 2. – С. 587–588.
8. Дедов С.И. Анализ современных ездовых циклов и их актуальность при определении параметров гибридной энергетической установки // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов, Новосибирск, 4–8 дек. 2017 г.: в 10 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – Ч. 5. – С. 191–194.
9. Бирюков В.В., Панченко Ю.В. Повышение надёжности транспортного обслуживания городов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 3–4. – С. 34–36.
10. Бирюков В.В., Бахолдин Д.А. Электробус для внутригородских перевозок пассажиров // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 3–4. – С. 196–198.
11. Внуков С.А. Сравнительный анализ накопителей энергии для гибридного транспорта // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов 16 Всероссийской научной конференции молодых ученых, Новосибирск, 5–8 дек. 2022 г.: в 11 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. – Ч. 5. – С. 135–137.

12. Внуков С.А. Электрические тяговые двигатели // Научный форум: тенденции развития науки и общества: сборник материалов Международной научно-практической конференции, 29 окт. 2021 г. – Кемерово, 2021. – С. 44–46.

SIMULATION OF EFFECTIVE ELECTRIC VEHICLE POWER PLANT TAKING INTO ACCOUNT LOAD CYCLES OF MOTION

Shchurov N. I., Vnukov S. A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The main problems of this study include an unstable load level, a large number of accelerations and decelerations, as well as a reverse operation of the traction motor. The goal is to develop an energy efficient drive based on the driving cycle to solve the above problems.

In this work, an analysis of the WLTC driving cycle was carried out and its main characteristics were studied on the basis of test procedures under various operating conditions. The electric motor (EM) power is calculated based on the characteristics of the selected vehicle. Traction characteristics are built for various acceleration parameters and a specific engine model is selected. The traction drive was simulated based on the WLTC motion cycle in the “Matlab Simulink” software environment. The main model blocks are described and dependencies confirming the adequacy of mathematical modeling are displayed on oscilloscopes. A suitable energy storage device has been selected based on the battery comparison table.

Ultimately, the power plant of an electric car was simulated taking into account the WLTC load cycle, under various input parameters and conditions.

Keywords: electric power plant, traction drive, modeling, WLTC driving cycle, traction characteristics, energy

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-56–67

REFERENCES

1. Shtang A.A., Yaroslavtsev M.V. Kontaktno-akkumulyatornyi manevrovyyi elektrovoz s nako-pitelem energii na osnove litii-ionnykh akkumulyatorov [Battery-electric shunting locomotive with lithium-ion storage batteries]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta = Electronics and electrical equipment of transport*, 2016, no. 1, pp. 13–16.
2. Shtang A.A., Yaroslavtsev M.V. Opredelenie osnovnykh kharakteristik kombinirovannoi energeticheskoi ustanovki dlya gorodskogo bezrel'sovogo transporta [Evaluation of main parameters of road city transit vehicle hybrid powertrain]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 4 (33), pp. 111–120. DOI: 10.17212/1727-2769-2016-4-111-120.
3. Shchurov N.I., Myatezh S.V., Malozyomov B.V. Analiz i raschet neaktivnoi moshchnosti v seti pitaniya elektropotrebiteli rudnichnogo transporta [Analysis and calculation of inactive power in the power network of electric consumers of mining transport]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*, 2022, no. 12-2, pp. 270–283.
4. Shchurov N.I. [Energy efficient power plant for autonomous vehicles]. *Avtomatizirovannyi elektropriwod i promyshlennaya elektronika* [Automated electric drive and industrial electronics]. Proceedings of the Seventh All-Russian Scientific and Practical Conference. Novokuznetsk, 2016, pp. 107–108. (In Russian).
5. Malozyomov B.V., Myatezh S.V., Shchurov N.I. Povyshenie kolichestva rabochikh zon v trekhfaznom vypryamitele peremennogo toka [Increasing the number of working zones in a three-phase AC rectifier]. *Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering*, 2021, no. 6, pp. 56–60. (In Russian).
6. Malozyomov B.V., Trukhin F.V. [Increasing the efficiency and reliability of the trolleybus traction engine]. *Intellektual'nyi potentsial Sibiri* [Intellectual potential of Siberia]. 26th Regional Scientific Student Conference, Novosibirsk, May 22–24 2018. Novosibirsk, NSTU Publ., 2018, pt. 2, pp. 650–652. (In Russian).

7. Dedov S.I., Boronenko A.O., Shtang A.A. [Determining the parameters of a sequential hybrid installation based on driving cycles]. *Intellectual'nyi potentsial Sibiri* [Intellectual potential of Siberia]. 26th Regional Scientific Student Conference, Novosibirsk, May 22–24 2018. Novosibirsk, NSTU Publ., 2018, pt. 2, pp. 587–588. (In Russian).
8. Dedov S.I. [Analysis of modern driving cycles and their relevance in determining the parameters of a hybrid power plant]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii* [Science. Technologies. Innovation]. Collection of scientific papers, Novosibirsk, December 4–8, 2017. Novosibirsk, NSTU Publ., 2017, pt. 5, pp. 191–194. (In Russian).
9. Biryukov V.V., Panchenko Yu.V. Povyshenie nadezhnosti transportnogo obsluzhivaniya gorodov [Improving the reliability of transport services for cities]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka = Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2017, no. 3–4, pp. 34–36.
10. Biryukov V.V., Bakholdin D.A. Elektrobus dlya vnutrigorodskikh perevozok passazhirov [Electrobus for intra-city passenger transportation]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka = Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2017, no. 3–4, pp. 196–198.
11. Vnukov S.A. [Comparative analysis of energy storage devices for hybrid transport]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii* [Science. Technologies. Innovation]. Collection of scientific papers of the 16th All-Russian scientific conference of young scientists, Novosibirsk, December 5–8, 2022. Novosibirsk, NSTU Publ. 2022, pt. 5, pp. 135–137. (In Russian).
12. Vnukov S.A. [Electric traction engines]. *Nauchnyi forum: tendentsii razvitiya nauki i obshchestva* [Scientific forum: trends in the development of science and society]. Collection of materials of the International Scientific and Practical Conference, October 29, 2021. Kemerovo, 2021, pp. 44–46. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Щуров Николай Иванович – родился в 1947 году, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: энергосбережение на электрическом транспорте. Опубликовано 147 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20. E-mail: nischurov@mail.ru).

Schurov Nikolay Ivanovich (b. 1947) – Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Head of the Department of Electrical Complexes of Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on energy saving in electric transport. He is author of 147 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: nischurov@mail.ru).



Внуков Сергей Александрович – родился в 1998 году, ассистент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: силовая гибридная энергоустановка для электробуса. Опубликовано 10 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20. E-mail: abakan.1998@mail.ru).

Vnukov Sergey Alexandrovich (b. 1998) – Assistant of the Department of Electrical Complexes of Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on hybrid power plant for electric bus. He is author of 10 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: abakan.1998@mail.ru).

Статья поступила 25 мая 2023 г.
Received May 25, 2023

To Reference:

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. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-56–67.