

Любарский Б. Г., д. т. н., доцент кафедры «Электрический транспорт и тепловозостроение»,
 Шайда В. П., к. т. н., доцент кафедры «Электрические машины»,
 Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
 Буряковский С. Г., к. т. н., доцент кафедры «Автоматизированные системы электрического транспорта».
 Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, г. Харьков

СИСТЕМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ МОЩНОСТИ С КОМБИНИРОВАННЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

В настоящее время в большинстве автономных транспортных средств источником энергии являются энергетические установки на основе двигателей внутреннего сгорания.

Известно, что энергетические установки на основе двигателей внутреннего сгорания обеспечивают оптимальный экономный режим работы только в одном мощностном, скоростном или температурном режиме, в остальных режимах их энергетическая эффективность (расход топлива) значительно, иногда в несколько раз, ниже, чем в оптимальном режиме. Поэтому наибольшие перспективы в области экономии энергоресурсов представляет направление, которое позволит обеспечить работу двигателя внутреннего сгорания в оптимальном режиме при любых режимах движения транспортного средства. Для этого необходимо оборудовать транспортное средство накопителем энергии, который обеспечит следующие основные функции;

1. Экономную работу двигателя внутреннего сгорания (пуск, обеспечение работы вспомогательных систем питания, смазки и охлаждения, обеспечение оптимального теплового режима).
2. Накопление энергии, выработанной двигателем внутреннего сгорания, для возможностей дальнейшей передачи к движителю согласно режимам движения транспортного средства, с целью обеспечения необходимых динамических возможностей (ускорений при разгоне).
3. Накопление энергии при торможении транспортного средства с целью повторного использования при разгоне или для обеспечения работы других систем.

В настоящее время для транспортных средств наибольшее распространение получили накопители следующих видов.

Электрохимические. На основе аккумуляторных батарей — свинцово-кислотные, гелиевые, литий-ионные и литий-полимерные. Они обеспечивают длительное хранение накопленной энергии, имеют приемлемые массогабаритные и стоимостные показатели. Однако процесс их заряда достаточно сложен и длителен, поэтому мощностные показатели (особенно в процессе заряда) достаточно низкие.

Конденсаторные. На основе суперконденсаторов — ионисторов. Такие накопители характеризуются хорошими массогабаритными и достаточными мощностными показателями, но в настоящее время имеют довольно высокую стоимость.

Механические. На основе вращающихся маховиков. Главным их преимуществом является высокая удельная мощность при приемлемых массогабаритных показателях. Основным недостаток — высокая утечка энергии при ее длительном хранении и отсутствие широкой номенклатуры реализованных конструкций. Кроме того, реализация накопителей данного типа на малых транспортных средствах является довольно сложной.

Пневматические. На основе баллонов со сжатым воздухом, компрессора и пневмодвигателя.

Для сравнения различных типов накопителей энергии предлагается провести их сравнительный анализ на основе трех показателей:

- удельные энергетические затраты, определяемые как стоимость 1 кВт • ч накопленной энергии на транспортном средстве за 20 лет эксплуатации с учетом утилизации;
- удельные мощностные затраты, определяемые как стоимость 1 кВт мощности накопителя энергии на транспортном средстве за 20 лет эксплуатации с учетом утилизации;
- потери энергии в накопителе (процентное соотношение) от максимальной запасенной энергии.

Удельные энергетические затраты, определяемые как стоимость 1 кВт • ч накопленной энергии на транспортном средстве за 20 лет эксплуатации с учетом утилизации, состоят из удельных затрат на создание накопителя e_c и удельных энергетических затрат на транспортировку e_t .

Удельные энергетические затраты за 20 лет эксплуатации с учетом утилизации представляют собой сумму удельных затрат на создание накопителя e_c и удельных энергетических затрат на транспортировку e_t .

Удельные затраты на создание накопителя за 20 лет эксплуатации с учетом утилизации пропорциональны произведению срока службы и стоимости накопителя на энергию, которую может запасти накопитель.

Мощности накопителей в режимах разряда и заряда различны, поэтому результаты расчетов приведены для режимов заряда и разряда отдельно.

Результаты расчетов приведены в таблицах 1-6.

ЕКОНОМІЯ ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

Таблица 1. Технические параметры накопителей энергии

Тип	Название	Емкость, кВт*ч, С	Емкость, МДж, W	Цена, \$	Масса, кг	Срок службы, год, T _с	Удельная цена за 20 лет эксплуатации, \$/кВт*ч, e _с	Удельная масса, кг/кВт*ч, ρ	Удельная цена при транспортировке для автобуса, \$/кг/кВт*ч, e _т	Удельная цена суммарная для автобуса, \$/кВт*ч, e _с
Механический	Lirex [1-4]	6	21,6	7 200	1300	20	1200	216	648	1864
Ионисторы	DB5U407W35060HA, SAMWHA [5]	0,0081	0,02916	18,1	0,0016	20	2234	0,1975	0,6	2235
Аккумулятор гелиевый AGM	Challenger A 12-200 [6]	2,4	8,64	440	60	12	305	25	75	380
Аккумулятор свинцово-кислотный	Bosch S5 Silver Plus [7]	1,2	4,32	140	22	3	329	18,3	54,9	383,9
Аккумулятор литий-полимерный (LiFePO4)	LM 36V / 10Ah [8]	0,36	1,3	272	4	5	3100	11,1	33,3	3133,3
Пневматический	Стальной резервуар объемом 1 м ³ массой 250 кг со сжатым воздухом под давлением 50 атмосфер [9; 10]	5,556	20	2 000	300	20	360	54	162	522

Таблица 2. Удельные энергетические затраты e_с за 20 лет эксплуатации с учетом утилизации

Тип	Автомобиля, \$/кВт*ч, e _с	Автобуса, \$/кВт*ч, e _с	Грузового автомобиля, \$/кВт*ч, e _с	Тепловоза грузового, \$/кВт*ч, e _с	Тепловоза пассажирского, \$/кВт*ч, e _с	Электровоза постоянного тока грузового, \$/кВт*ч, e _с	Электровоза переменного тока грузового, \$/кВт*ч, e _с	Пассажирского электровоза двойного питания, \$/кВт*ч, e _с
Механический	3900	1848	1686	1470	1578	1349,04	1467,84	1891,2
Ионисторы	2236,469	2234,593	2234,444	2234,247	2234,346	2234,136	2234,245	2234,632
Аккумулятор гелиевый AGM	617,5	380	361,25	336,25	348,75	322,25	336	385
Аккумулятор свинцово-кислотный	557,75	383,9	370,175	351,875	361,025	341,627	351,692	387,56
Аккумулятор литий-полимерный (LiFePO4)	3238,75	3133,3	3124,975	3113,875	3119,425	3107,659	3113,764	3135,52
Пневматический	1035	522	481,5	427,5	454,5	397,26	426,96	532,8

Таблица 3. Технические параметры накопителей энергии

Тип	Название	Мощность, кВт	Емкость, кВт*ч, С	Частота работы, 1/час	Цена, \$	Срок службы, год, T _с	Масса, кг	Удельная мощностная цена разряда за 20 лет эксплуатации, \$/кВт, e	Удельная мощностная цена заряда за 20 лет эксплуатации, \$/кВт, e
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Механический	Lirex	350	6	58,3	7200	20	1300	20,57	20,57
Ионисторы	DB5U407W35060HA, SAMWHA	0,0675	0,008	8,33	18,1	20	0,0016	268,15	268,148

ЕКОНОМІЯ ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

Таблиця 3 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Аккумулятор гелиевый AGM	Challenger A 12-200	24/0,48	2,4	10/3,3	440	12	60	11	550
Аккумулятор, свинцово-кислотный	Bosch S5 Silver Plus	9,96/0,24	1,2	8,3/3,3	140	3	22	2,11	87,5
Аккумулятор литий-полимерный (LiFePO4)	LM 36V / 10Ah	0,54/0,18	0,36	1,5/0,5	272	5	4	125,9	377,8
Пневматический	Стальной резервуар объемом 1 м ³ массой 250 кг со сжатым воздухом под давлением 50 атмосфер	5,56	5,556	1	2000	20	300	359,7	359,7

Таблиця 4. Удельные мощностные затраты за 20 лет эксплуатации с учетом утилизации при разряде

Тип	Легкового автомобиля, \$/кВт, e _{ср}	Автобуса, \$/кВт, e _{ср}	Грузового автомобиля, \$/кВт, e _{ср}	Тепловоза грузового, \$/кВт, e _{ср}	Тепловоза пассажирского, \$/кВт, e _{ср}	Электровоза постоянного тока грузового, \$/кВт, e _{ср}	Электровоза переменного тока грузового, \$/кВт, e _{ср}	Пассажирского электровоза двойного питания, \$/кВт, e _{ср}
Механический	67,00	31,71	28,93	25,21	27,07	23,13	25,18	32,46
Ионисторы	268,44	268,22	268,20	268,18	268,19	268,16	268,16	268,22
Аккумулятор гелиевый AGM	42,25	18,50	16,63	14,13	15,38	12,73	14,10	19,00
Аккумулятор свинцово-кислотный	29,72	8,73	7,08	4,87	5,97	3,63	4,85	9,18
Аккумулятор литий-полимерный (LiFePO4)	218,52	148,15	142,59	135,19	138,89	131,04	135,11	149,63
Пневматический	1034,17	521,58	481,12	427,16	454,14	396,94	426,62	532,37

Таблиця 5. Удельные мощностные затраты за 20 лет эксплуатации с учетом утилизации при заряде

Тип	Легкового автомобиля, \$/кВт, e _{ср}	Автобуса, \$/кВт, e _{ср}	Грузового автомобиля, \$/кВт, e _{ср}	Тепловоза грузового, \$/кВт, e _{ср}	Тепловоза пассажирского, \$/кВт, e _{ср}	Электровоза постоянного тока грузового, \$/кВт, e _{ср}	Электровоза переменного тока грузового, \$/кВт, e _{ср}	Пассажирского электровоза двойного питания, \$/кВт, e _{ср}
Механический	67,00	31,71	28,93	25,21	27,07	23,13	25,18	32,46
Ионисторы	268,44	268,22	268,20	268,18	268,19	268,16	268,18	268,22
Аккумулятор гелиевый AGM	2112,50	925,00	831,25	706,25	768,75	636,25	705,00	950,00
Аккумулятор свинцово-кислотный	1233,33	362,50	293,75	202,08	247,92	150,75	201,17	380,83
Аккумулятор литий-полимерный (LiFePO4)	655,56	444,44	427,78	405,56	416,67	393,11	405,33	448,89
Пневматический	1034,17	521,58	481,12	427,16	454,14	396,94	426,62	532,37

Таблиця 6. Потери энергии в накопителе в процентах от максимальной запасенной энергии

Тип	Потери, %
Механический	2
Ионисторы	0,018
Аккумулятор гелиевый AGM	0,028
Аккумулятор свинцово-кислотный	0,028
Аккумулятор литий-полимерный (LiFePO4)	0,028
Пневматический	0,00034

Свинцово-кислотные аккумуляторы энергии обладают наилучшими показателями удельных энергетических затрат (минимальных) практически для всех типов транспортных средств, кроме автомобиля, однако их удельные мощностные затраты в режиме заряда значительно хуже других типов накопителей, хотя обладают лучшими показателями в режиме разряда. Лучший показатель удельных мощностных затрат в режиме заряда у механических накопителей, что позволяет их использовать в режиме рекуперативного торможения. Хранить энергию лучше всего в пневматических накопителях, однако довольно хорошие результаты имеют ионисторы и аккумуляторы.

Как следует из краткого обзора, ни один из данных типов накопителей не является оптимальным. Поэтому мы считаем необходимым применение комбинированных накопителей энергии, состоящих из двух или трех рассмотренных выше типов, что позволит реализовать преимущества каждого из типов, нивелировав их недостатки. Управление перетоками мощности между элементами тяговой передачи

предлагается производить на основе интеллектуальной системы управления, контролирующей работу как накопителей, так и двигателя внутреннего сгорания и движителей.

Таким образом, необходимо провести:

- анализ существующих типов накопителей энергии для транспортных средств, определить их области применения для различных типов транспорта;
- разработку ключевых основ с целью выбора структуры комплексного накопителя энергии для транспортных средств и его составляющих;
- разработку интеллектуальной системы управления тяговым электроприводом.

Локомотив

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

2. Лобарский Б. Г. Концептуальный проект пригородного электропоезда с инерционным накопителем энергии / Б. Г. Лобарский, В. И. Омеляненко, Л. В. Оверьянова, Е. С. Рыбов // *Международный информационный научно-технический журнал Локомотив-ин-форм*, 2013. — № 11. — С. 6-11.
2. Оверьянова Л. В. Определение параметров и оценка свойств электромеханических инерционных накопителей энергии для пригородных электропоездов. На правах рукописи : дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук по специальности 05.22.09 — Электротранспорт. — Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 2014.
3. Lenhard D. Elektrische Ausüstung des Triebwagens LIREX Baureihe 618/619 für DB Regio / D. Lenhard, B. Engel, J. Langwost, C. Söffker // *Elektrische Bahnen* 8. — 2000. — P. 279-289.
4. Winthuhn M. Schwungradspeicher in Dieseltriebfahrzeugen / M. Winthuhn // *Elektrische bahnen*. — 2002. — № 3. — P. 110-113.
5. [Электронный ресурс] — Режим доступа : URL: <http://nie.orc>
6. [Электронный ресурс] — Режим доступа : URL: <http://www.kosmodrom.com.ua/> prodlist.php?name=%C8%E9%ED%E8%F1%F2%EE%F0&page=0
7. [Электронный ресурс] — Режим доступа : URL: http://cm.abulizam.op.in.ua/gdex.php?option=com_virtuemart&view=productdetail&s&virtuemart_product_id=10568&virtuemart_category_id=12&Itemid=62
8. [Электронный ресурс] — Режим доступа : URL: http://exist.ua/ca/v/nicat/Ca/ta/log.aspx?section=58&cid=8&gcid=CjwKEAIAxNi1BRD88r2aczqB2zsSjABv2B96yXgii3b_Y8Gj4Pri5GNvEhAzVZauT9GNu7_LXbfoCoCMjw_wcB№8,F=I_492_12|_615_85r235|_1_0_1
9. [Электронный ресурс] — Режим доступа : URL: <http://ecoelectro.com.ua/battery-lifepo4-lm-36v-10ah.html>
10. [Электронный ресурс] — Режим доступа : URL: <http://imlab.narod.ru/Energy/> Assum ula tio n/Assimulation.html

Материал получен 20.07.2015