

УДК 65-83

Е.А. Смотров, канд. техн. наук,
Д.В. Вершинин, А.Ю. Сусленко

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕГКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ МОТОР-КОЛЕСО

Аннотация. Посвящена исследованию характеристик макетного образца легкого электротранспортного средства с целью оценки эффективности работы его подсистем, поиска решений и перспективных путей развития проекта.

Е. О. Смотров, канд. техн. наук,

Д. В. Вершинин, О. Ю. Сусленко

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕГКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ З ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ МОТОР-КОЛЕСО

Анотація. Присвячено дослідженню характеристик макетного зразка легкого електротранспортного засобу з метою оцінки ефективності роботи його підсистем, пошуку рішень і перспективних шляхів розвитку проекту.

Е. А. Smotrov, PhD,

D. V. Vershinin, A. Y. Suslenko

INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF LIGHT-TRANSPORT MEANS WITH ELECTRIC MOTOR-WHEEL

Abstract. This article is devoted to research characteristics of experimental model of light electric vehicles to assess the performance of its subsystems, and to find solutions and promising ways of project's development.

В рамках сотрудничества с ЗАО «Инкар-М» по созданию экологически чистого транспорта, ГП НТЦ «Станкосерт» уже несколько лет ведется разработка электрооборудования легкого электротранспортного средства для экологически чистых зон. Данная статья освещает первые результаты, полученные экспериментальным путем на действующем макетном образце легкого электротранспортного средства (ЛЭТС) (см. рис. 1), созданного в ходе программы работ по разработке такого средства.

На рис.1 изображен макетный образец ЛЭТС со следующими расчетными характеристиками:

- количество пассажирских мест – 6;
- снаряженная масса – 900 кг;
- максимальная скорость передвижения – 25 км/ч;
- емкость аккумуляторной батареи (АБ) – 60 Ач;
- дистанция пробега на одной зарядке – 100 км;

В качестве двигателей были использованы мотор колеса (МК) номинальной мощностью 2,5 кВт, представляющие собой синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов и двумя рабочими зазорами [2,4,5] конструктивно встроенный в колесо автомобиля. Для управления двигателями колес разработан специализированный преобразователь (ПМК), осуществляющий алгоритм векторного управления с минимизацией реактивной составляющей тока двигателя. По результатам испытаний, описанным в [7], система МК + ПМК имеет астатические механические характеристики с возможностью задания ограничения момента на необходимом уровне. Управление ПМК осуществляется по интерфейсу RS-485.

© Смотров Е.А., Вершинин Д.В.,
Сусленко А.Ю., 2011

В качестве источника энергии в ЛЭТС использована Li-Ion аккумуляторная батарея номинальным



Рис.1. Макетный образец ЛЭТС

напряжением 120 В и емкостью 60 Ач, снабженная блоком управления, осуществляющим мониторинг параметров каждой ячейки и батареи в целом и предотвращающим эксплуатацию АБ в таких режимах, как глубокий разряд, превышение максимального тока и т.д.

Для координации работы двигателей четырех колес была разработана система управления верхнего уровня (СУВУ), управляющая скоростями и моментами на валах МК по алгоритмам, описанным в [3], по командам датчиков педалей газа, тормоза, и рулевого колеса. При нажатии педали газа привода получают небольшое задание скорости и задание тока зависящее от положения педали. Этим обеспечивается плавное трогание с места. При дальнейшем нажатии педали газа задание скорости возрастает, вплоть до максимальной скорости. При нажатии педали тормоза транспортное средство тормозит, рекуперировав энергию в аккумуляторную батарею, от угла нажатия пе-

дали зависит момент торможения, прикладываемый к колесам. Механический тормоз представлен дополнительной педалью и используется как аварийный. В дальнейшем планируется создание двухзонной педали, способной управлять как электрическим, так и механическим торможением в зависимости от усилия нажатия.

Для проведения экспериментальных исследований вышеуказанных подсистем на борту ЛЭТС была установлена система записи и анализа информации на базе 16 разрядного АЦП фирмы L-CARD, подключенного к ПК, блоков датчиков тока и напряжения и программного обеспечения Power Graph 3.3.

Функциональная схема включения электрооборудования ЛЭТС во время испытаний представлена на рис.2. Датчики тока и напряжения были установлены в следующих цепях:

- ток одной фазы каждого двигателя МК (ДТ П1Ф, ДТ П2Ф, ДТ П3Ф, ДТ П4Ф);
- ток потребления каждого ПМК (ДТ П1, ДТ П2, ДТ П3, ДТ П4);
- ток аккумуляторной батареи (ДТ АБ);
- напряжение аккумуляторной батареи (ДН АБ);
- сигнал скорости (напряжение пропорциональное скорости) ЛЭТС (СК).

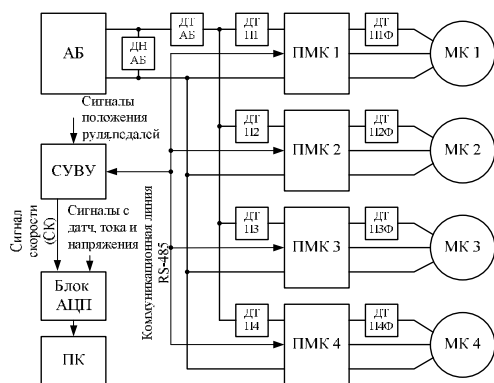


Рис.2. Функциональная схема подключения подсистем электрооборудования ЛЭТС в ходе испытаний

В ходе предварительных испытаний были осуществлены ряд заездов ЛЭТС с полной зарядкой АБ по асфальтной дороге среднего качества. Максимальный ток фазы МК в режиме разгона был ограничен уровнем 40 А (50 А в режиме торможения), что соответ-

ствует моменту 75,2 Н·м (94 Н·м) на каждое колесо ЛЭТС.

В ходе проведения испытания было решено осциллографировать данные с вышеупомянутых датчиков в течение циклически повторяемого режима движения (разгон, установившееся движение, торможение) [1].

Обозначения на рис. 3:

1. Ток потребления привода № 1 (ДТ П1).
- 2,3,4. Аналогично привода № 2 (ДТ П2), № 3 (ДТ П3), № 4 3 (ДТ П4).
5. Ток фазы привода № 1 (ДТ П1Ф).
- 6,7,8. Аналогично № 2 (ДТ П2Ф), № 3 (ДТ П3Ф), № 4 (ДТ П4Ф).
- 9,10. Ток (ДТ АБ) и напряжение АБ (ДН АБ).
11. Скорость движения ЛЭТС (СК).
12. Зона колебаний момента МК при разгоне.
13. Токи потребления приводов при равномерном движении.
14. Фазные токи приводов при равномерном движении.

Анализируя графики рис.3, можно отметить.

1. Транспортное средство разгоняется за время 6,8 с до скорости 25 км/ч. Скорость возрастает линейно, что свидетельствует о слабом влиянии составляющих статического момента зависящих от скорости (лобового сопротивления ЛЭТС). Ускорение меняется мало и составляет 1,02 м/с², что соответствует нормам комфортного ускорения транспортного средства.

2. Транспортное средство замедляется за время 3,6 с со скорости 22 км/ч до полной остановки. При этом ПМК переводят двигатели во второй квадрант, создавая момент, замедляющий движение ЛЭТС, а также рекуперирующий энергию в аккумуляторную батарею. Нелинейность тока двигателей при торможении обусловлена человеческим фактором (плавное нажатие на педаль).

3. При установившемся движении транспортного средства со скоростью 25,8 км/ч протекал ток 22,8 А.

Используя полученные данные, проведем оценку основных энергетических показателей электропривода транспортного средства. Данные занесем в таблицу. Для оценки момента на валу мотор колес было использовано соотношение для вычисления электромагнитного момента двигателя:

$$M_e = C_m \cdot I_\phi. \quad (1)$$

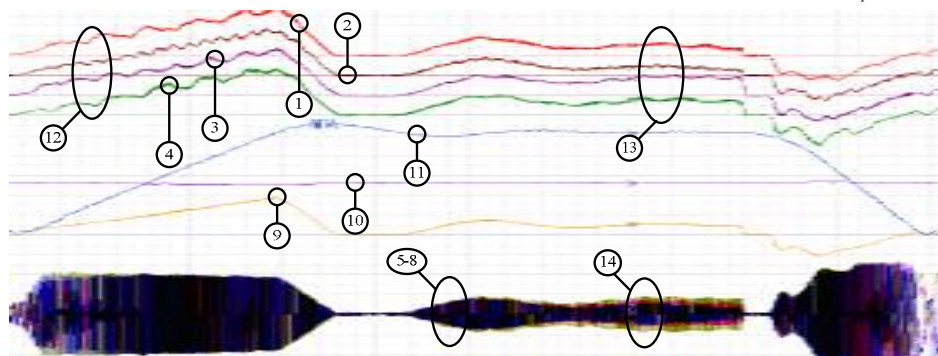


Рис.3. Осциллограмма цикла движения ЛЭТС

1. Основные энергетические показатели электропривода транспортного средства

I_{dc}	U_{dc}	V	I_f	n	P_{dc}	M	P_{mex}	КПД
A	B	км/ч	A	об/мин	$Вт$	$H^*м$	$Вт$	%
Режим разгона								
65,4	126,5	24,9	38,5	249,0	8273,1	289,5	7549,1	91,2
40,5	128,5	15,3	40,0	153,0	5204,3	300,8	4819,3	92,6
23,0	128,9	7,9	40,0	79,0	2964,7	300,8	2488,4	83,9
17,0	129,0	5,3	40,0	53,0	2193,0	300,8	1669,4	76,1
12,9	129,8	2,9	40,0	29,3	1671,8	300,8	922,9	55,2
Режим движения								
17,7	128,8	25,8	10,0	258,0	2279,8	75,2	2031,7	89,1
17,4	128,7	15,1	9,8	151	2091,7	74,8	1800,5	86,1
13,8	128,6	5,1	9,5	51	1775,8	73,9	1356,7	76,4
Режим торможения								
51,9	133,5	21,2	45,0	212,0	6928,7	338,4	7512,5	92,2
28,9	132,5	11,5	50,0	115,0	3829,3	376,0	4527,9	84,6
6,7	131,2	5,2	50,0	52,3	872,5	376,0	2059,2	42,4

Применение этой формулы для определения момента имеет некоторую неточность, так как не учитывает потери в стали и меди двигателя, вследствие чего рассчитанные КПД несколько завышены. Для оценки КПД электропривода ЛЭТС необходимо знать полный статический и динамический момент нагрузки. Такое разделение также позволит оценить количество энергии, затраченной на создание динамического момента, и соответственно может быть возвращено в источник при торможении. На рис.4 показаны графики зависимости КПД электропривода от скорости движения ЛЭТС. Эта информация необходима для определения требований к рекуператору.

Рассмотрев более детально рис.3, можно оценить статический момент ТС. Анализируя бестоковую паузу после разгона ТС, рассчитаем момент сопротивления движению. По графикам определим:

$$V_1 = 27,6 \text{ м/с}, V_2 = 25,8 \text{ м/с}, \Delta t = 1,625 \text{ с}$$

Известны, радиус колеса $R = 265 \text{ мм}$, масса ЛЭТС $m = 900 \text{ кг}$, отсюда:

$$M_c = \frac{F}{R} = \frac{m \cdot a}{R} = \frac{m \cdot (V_1 - V_2)}{R \cdot (t_1 - t_2)} = 74,5 \text{ Нм} \quad (2)$$

Полученный статический момент включает в себя сумму моментов всех усилий, приведенных к колесам ЛЭТС. Анализируя фазу разгона на рис.3, получим динамический момент, созданный двигателями для разгона ЛЭТС:

$$V_1 = 1,56 \text{ м/с}, V_2 = 25,15 \text{ м/с}, \Delta t = 6,5 \text{ с}, m = 900 \text{ кг}$$

$$M_d = \frac{m \cdot (V_1 - V_2)}{R \cdot (t_1 - t_2)} = 230,5 \text{ Нм} \quad (3)$$

Сумма статического и динамического момента с некоторой точностью равна суммарному электромагнитному моменту двигателей:

$$M_{\text{сум}} = M_c + M_d = 230,5 + 74,5 = 305 \text{ Нм} \Rightarrow M_{\text{сум}} \approx M_e = 300 \text{ Нм} \quad (4)$$

Неточность равенства объясняется конечной точностью измеряющих датчиков.

Для оценки дистанции пробега и среднего потребления усредним ток, потребленный от АБ за цикл движения, и вычислим среднюю скорость ТС в цикле. Средствами ПО PowerGraph получим:

$$I_{cp} = 14 \text{ А}, V_{cp} = 20,3 \text{ км/ч.}$$

При емкости батареи 60Ач возможно оценить пробег на одной зарядке, достигнутый на этом транспортном средстве при движении в городском режиме.

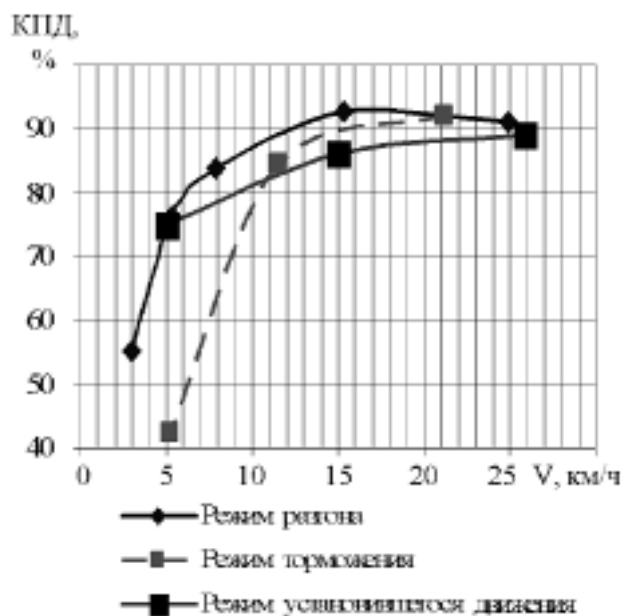


Рис. 4 График зависимости КПД электропривода от скорости движения ЛЭТС в различных режимах работы

Пройденное расстояние за тестовый цикл

$$S = V_{\text{до}} \cdot t_c = 24,6 \cdot 5,622 = 138,3 \text{ м}$$

Следовательно, потребляя в среднем ток порядка 14 А, транспортное средство может проехать 4,28 часа со средней скоростью 20,3 км/ч, при этом дистанция пробега составит 86,8 км.

Таким образом, экспериментально была подтверждена эффективность работы электропривода в режимах и условиях, близких к реальным условиям эксплуатации. Результаты этого исследования показали некоторые проблемы в работе СУВУ, связанные с определением положения руля, которые приводят к не равномерному распределению момента подводимого к колесам ЛЭТС при движении с постоянной скоростью, и, возможно, к дополнительным потерям.

Был обнаружен колебательный процесс потребляемых и фазных токов каждого привода, что свидетельствует о недостаточной жесткости подвески ЛЭТС и колебаниях усилий при поездке. Следует изучить связи между колесами ЛЭТС через дорожное покрытие и исключить или минимизировать эти колебания средствами регулирования.

В то же время было установлено, что в целом довольно большой статический момент, связанный не только с потерями на трение, но и с реактивным моментом двигателей МК и потерями в стали, не позволяет добиваться желаемых показателей пробега. Природу этого статического момента и способы его минимизации следует исследовать дополнительно.

Более подробные исследования процесса торможения также показали неспособность АБ эффективно рекуперировать энергию без снижения ресурса АБ. Для устранения этого недостатка планируется добавить в состав ЛЭТС энергонакопительную рекуперационную установку на базе суперконденсаторов [6], которая должна снижать пиковые нагрузки на АБ, повышать срок ее эксплуатации, а также улучшать эффективность использования энергии, и как следствие, увеличивать пробег ЛЭТС.

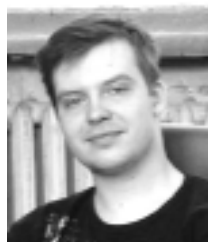
Список использованной литературы

1. ГОСТ 20306-90 Автотранспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. Дата введения 01.01.1992. Москва.
2. Вершинин Д.В. Электропривод мотор-колеса электротранспортного средства / Д.В.Вершинин, В.А.Войтенко, Е.А.Смотров // *Электромашинобуд. та електрообладн.* – 2009. – Вип. 74. – С.25-30.
3. Вершинин Д.В. Некоторые особенности построения системы управления многодвигательного электротранспортного средства / Д.В.Вершинин, В.А.Войтенко, Е.А.Смотров // *Электромашинобуд. та електрообладн.* – 2010. – Вип. 75. – 12-21.
4. Выбор кинематической схемы электрического транспортного средства / Д.В.Вершинин, О.Г.Дашко, Е.А.Смотров, Ю.П.Кривоспицкий // *Приводная техника.* – К.: ООО НПФ "ОБРИС". – 2009. – Вып. – 81. – С.32-37.
5. Пат. 2405686 Российская Федерация МПК В60L 11/00. Электротранспортное средство / Д.В.Вершинин, О.Г. Дашко, Е.А. Смотров: заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество научно-производственное предприятие «Инкар-М». – № 2009125452/11; заяв.3.07.2009; опубл. 10.01.2010. Бюл. № 34.
6. Смотров Е.А. Некоторые аспекты работы автономного источника питания электротранспортного средства / Д.В.Вершинин, В.А.Войтенко, Е.А. Смотров // *Электротехніч. та комп'ютерні системи.* – 2010. – № 01 (77). – С.6-12.
7. Структура электрооборудования многодвигательного электротранспортного средства / Д.В.Вершинин, О.Г.Дашко, Е.А.Смотров, Ю.П.Кривоспицкий // *Приводная техника.* – К.: ООО НПФ "ОБРИС"– 2010. – Вып. 87. – С.2-6. С.6-12.

Получено 05.07.2011



Смотров
Евгений Александрович,
канд. техн. наук, вед. инженер
ГП НТЦ «Станкосерт»
тел. 048-728-85-05



Вершинин
Дмитрий Вениаминович,
инж.-исследователь
ОСКБ Специальных Станков.
тел. 048-728-85-05



Сусленко
Александр Юрьевич,
студент магистратуры,
каф. компьют. систем управления
Одесск. нац.
политехн. ун-та