

линейного генератора может рассматриваться как перспективная электрическая машина.

Литература

1. Land transport and marine technologies. "RTD activities supported under the Growth Programme (p.20, FPEC)", 2002.
2. Arshad W.M., Sadarangani C., Bäckström T., Thelin P. Finding an Appropriate Electrical Machine for a Free Piston Generator. Department of Electrical Engineering KTH, the Royal Institute of Technology, Stockholm, SWEDEN, 2002.
3. Liu Y., Leksell M., Arshad W.M., Thelin P. Influence of Speed and Current Profiles upon Converter Dimensioning and Electrical Machine Performance in a Free-Piston Generator. Department of Electrical Engineering KTH, the Royal Institute of Technology, Stockholm, SWEDEN, 2003.
4. Blarigan P.V. Advanced internal combustion electrical generator. Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review, 2001.
5. Blarigan P.V. Project Free-Piston Engine. 2011 DOE Vehicle Technologies Program Annual Merit Review, 2011.
6. www.sunpower.com
7. Atkinson C.M. and all Numerical Simulation of a Two-Stroke Linear Engine-Alternator Combination. SAE TECHNICAL PAPER SERIES, March, 1999.
8. Carter D., Wechner E. The Free Piston Power Pack: Sustainable Power for Hybrid The Free Piston Power Pack: Sustainable Power for Hybrid. Pempek Systems Pty. Ltd., Australia, 2003.
9. www.freepistonpower.com
10. Němeček O.V.P. Control of two-stroke free-piston generator. Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University Prague, Czech Republic, 2007.
11. Wang J., Howe D. Design Optimization of Radially Magnetized, Iron-Cored, Tubular Permanent-Magnet Iron-Cored, Tubular Permanent-Magnet. IEEE Transactions on magnetic, Vol.40, No.5, September 2004

Анализ рабочего процесса линейного генератора с возвратно-поступательным движением

Духанин В.И., к.т.н. доц. Кецарис А.А.

Университет машиностроения, МЗСА

8 (495) 223-05-23, don. 1312, ketsaris@mail.ru, 8 (499) 168-87-29, vidwork@mail.ru

Аннотация. В настоящей статье рассматривается интегральная силовая установка, состоящая из двигателя внутреннего сгорания со свободным поршнем и линейной электрической индукторной машины с возбуждением от постоянных магнитов на статоре. Исследуется генераторный режим работы линейной электрической индукторной машины. Сравниваются две системы расположения постоянных магнитов. Приводятся данные расчетов рабочих характеристик линейной электрической машины.

Ключевые слова: линейный электрический генератор, линейная синхронная электрическая машина с постоянными магнитами.

Введение

Интегральная силовая установка, состоящая из двигателя внутреннего сгорания со свободным поршнем и линейной электрической машины, рассматривается в настоящее время в качестве альтернативного бортового источника энергии для гибридных транспортных средств, а также как мобильный источник электроэнергии. Особенностью этого устройства является отсутствие жесткой механической связи в виде коленчатого вала, определяющей конструктивно заданную степень сжатия и параметры протекания термодинамического процесса сгорания топлива. Эти параметры определяются динамическим равновесием сил давления, действующих на поршни, сил трения, силы инерции и электродинамических сил, возникающих в линейной электрической машине вследствие индуцирования электрических то-

ков.

Экспериментальная установка для исследования линейной электрической машины спроектирована в двух исполнениях, показанных на рисунках 1 и 2.

На рисунке 1 показан общий вид экспериментальной установки, предназначенной для исследования линейной электрической машины с приводом от стороннего первичного механического силового привода (асинхронного двигателя с кривошипным преобразователем). Это исследование предполагается провести на первом этапе.

На рисунке 2 изображена экспериментальная силовая установка вместе с линейным двухтактным двигателем внутреннего сгорания. Шток соединяет поршни, двигающиеся в цилиндрах оппозитного двигателя внутреннего сгорания. На блоках цилиндров установлены головки цилиндров с клапанными механизмами, свечами зажигания и инжекторами топлива. На штоке жестко закреплен подвижный элемент электрической машины,двигающийся возвратно-поступательно в кольцевой проточке статора электрической машины.

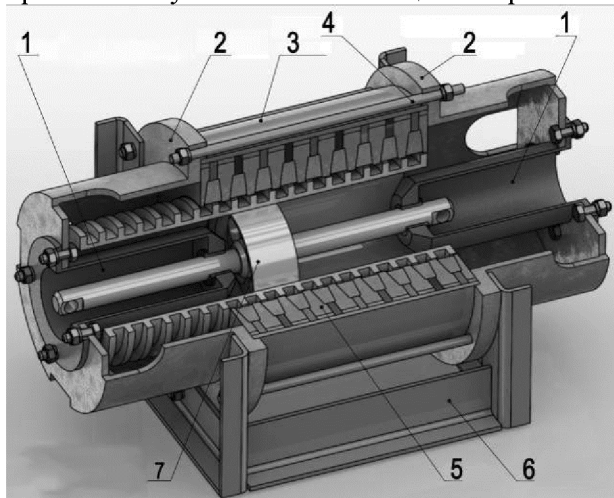


Рисунок 1 – Общий вид экспериментальной линейной электрической машины: 1- стакан направляющий; 2 – фланец; 3- кожух; 4 – шпилька; 5 – статор; 6 – опорный каркас; 7 – подвижный элемент

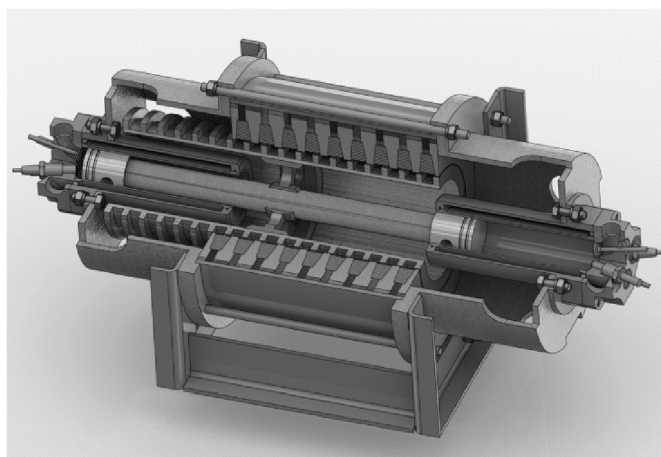


Рисунок 2 – Общий вид ГСП

Выбор конструкции

В литературе по линейным электрическим генераторам рассматриваются в основном конструкции электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов, закрепленных на подвижном элементе, что объясняется необходимостью создания достаточного большого магнитного потока в воздушном зазоре [1]. При этом встречаются магнитные системы с постоянными магнитами кольцевой формы радиальной или осевой чередующейся намагниченностью, а также магнитные системы с неосесимметричным типом магнитных полей. Последние магнитные системы, используемые в машинах с поперечным магнитным полем, требуют исследования трехмерных магнитных полей и потоков, что требует разработки новых аналитических методов и больших затрат вычислительного времени при расчете численными методами.

При размещении постоянных магнитов на подвижном элементе требуется учитывать воздействие как тепловых потоков от двигателя внутреннего сгорания, снижающих магнитную индукцию магнитов, так и вибрационное воздействие на хрупкий материал магнитов. Кроме того, как правило, за пределами рассмотрения оказываются механические или другие способы закрепления системы постоянных магнитов на подвижном элементе.

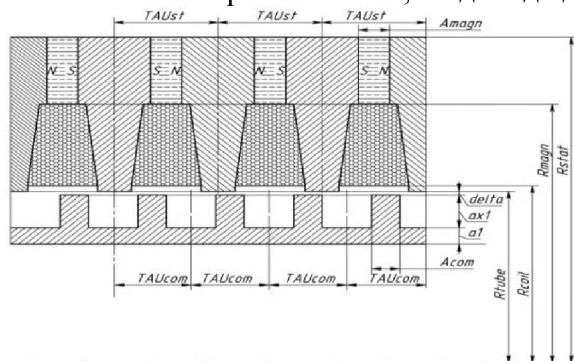
В связи с этим в настоящей статье рассматривается линейная индукторная электрическая машина с возбуждением от системы кольцевых постоянных магнитов, размещенных на наружной поверхности статора, и подвижным элементом, выполненным в виде трубы с коль-

цевыми выступами из магнитомягкого материала. Поскольку в индукторных машинах магнитная индукция в каждой точке воздушного рабочего зазора меняется только по величине, а ее направление остается постоянным, то индукция в зазоре имеет пульсирующий характер и содержит переменную (рабочую) и постоянную (нерабочую) составляющие [2].

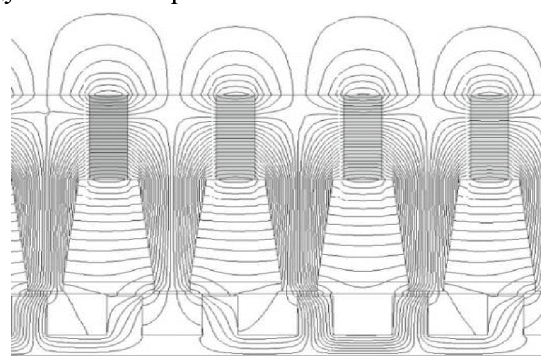
Достоинствами индукторных машин являются простота конструкции подвижного элемента, высокая надежность, работоспособность в сложных окружающих условиях, удаленность постоянных магнитов от источников тепловых потоков двигателя внутреннего сгорания, возможность организации естественного или принудительного охлаждения постоянных магнитов [3, 4].

При выборе системы магнитов возбуждения сначала была выбрана конструкция, состоящая из последовательности кольцевых магнитов чередующейся осевой намагниченности и кольцевых магнитопроводов, располагаемых между ними, показанная на рисунке 3а.

В результате расчетов методом конечных элементов была получена диаграмма распределения магнитных потоков (рисунок 3, б), откуда видно, что до 25% магнитных потоков постоянных магнитов рассеивается, не доходя до воздушного зазора.



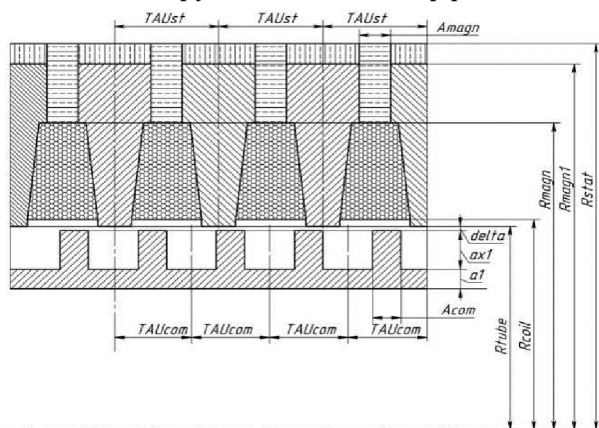
а) схема машины с кольцевыми магнитами



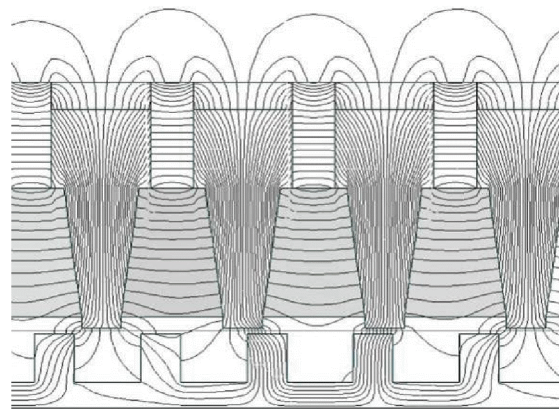
б) линии магнитных потоков

Рисунок 3

Для более полного использования магнитного потока постоянных магнитов рассматривалась комбинированная магнитная система из кольцевых магнитов с радиальной и осевой намагниченностью в виде так называемого Холбах-массива (Halbach-array) [5]. Холбах-массив представляет собой последовательность постоянных магнитов с циклически изменяемой угловой ориентацией вектора намагниченности. При этом, во-первых, в идеальном случае вектор намагниченности синусоидально изменяется в пространстве, что приводит к минимизации пульсации межзубцового сцепления без применения специальных мер в виде скоса пазов, а во-вторых, магнитные потоки замыкаются внутри электрической машины, не рассеиваясь снаружи и создавая эффект самоэкранирования (рисунок 4).



а) схема машины с кольцевыми магнитами



б) линии магнитных потоков

Рисунок 4

Основные параметры электрической машины

Для анализа были выбраны основные параметры электрической машины, приведенные в таблице 1 (см. также эскиз на рисунке 4а).

Для исключения взаимного влияния токов и ЭДС каждая из катушек статора присоединялась к выпрямительному диодному мосту. Общие точки всех диодных мостов соединялись общим проводом, подключенным к сопротивлению нагрузки.

Схема электрического соединения фазных катушек и нагрузки приведена на рисунке 5. Диоды принимались идеальными, то есть без учета переходных процессов.

Таблица 1

Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Величина
Радиус внутренней проточки статора	R_{tube}	мм	60
Наружный радиус статора	R_{stat}	мм	102
Внутренний радиус трубы коммутатора	R_1	мм	46,3
Внутренний радиус катушек	R_{coil}	мм	62
Внутренний радиус постоянных магнитов	R_{magn}	мм	84
Внутренний радиус доп. пост. магнитов	R_{magn1}	мм	97,4
Воздушный зазор	δ	мм	1
Толщина стенки трубы коммутатора	a_1	мм	4,4
Шаг полюсов статора	TAU_{st}	мм	22
Шаг кольцевых выступов коммутатора	$TAU_{com} = \frac{3}{4} TAU_{st}$	мм	16,5
Толщина кольцевых постоянных магнитов	A_{magn}	мм	6,6
Половина толщины магнитопровода	b	мм	3,08
Толщина кольцевого выступа коммутатора	A_{com}	мм	6,16
Относительный размер уступа магнитопровода	$bm_{rel} = \frac{bm}{b}$	—	0,6
Число витков катушки	NC	—	50
Толщина провода катушки	$D1_{wire}$	мм	2,6
Активное сопротивление катушки	Res_{coil}	Ом	0.0385
Сопротивление нагрузки	R_{LOAD}	Ом	2

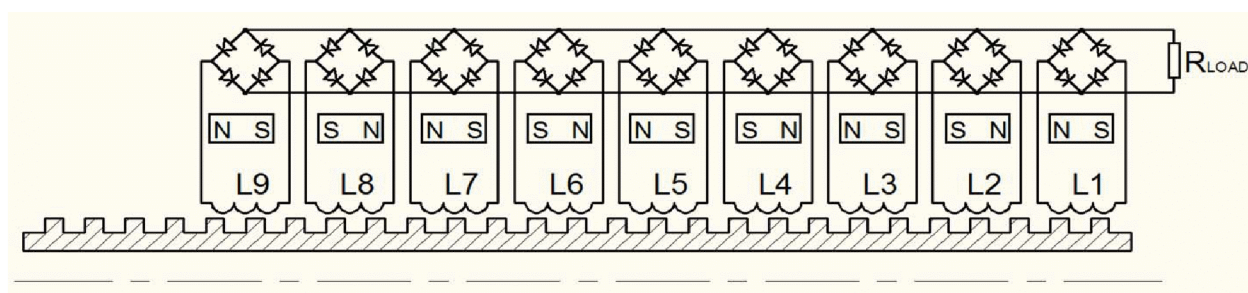


Рисунок 5 – Электрическая схема соединения катушек

При динамическом расчете параметры движения подвижного элемента перемещение S и скорость V задавались следующими зависимостями:

$$S = L_{stroke} \cdot \sin(2\pi t / f), \quad (1)$$

где: L_{stroke} – рабочий ход подвижного элемента;

f – частота, Гц;

$$V = \frac{dS}{dt} = \frac{L_{stroke} \cdot 2\pi}{f} \cdot \cos(2\pi t / f). \quad (2)$$

Графики движения подвижного элемента приведены на рисунке 6.

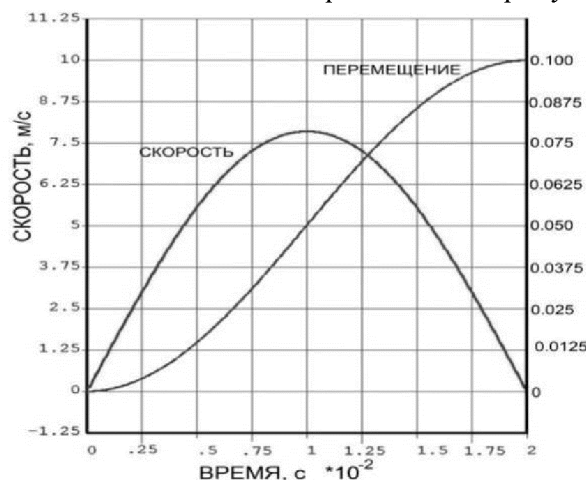


Рисунок 6 – Кинематические параметры движения подвижного элемента

Для постоянных магнитов был выбран спеченный материал на основе сплавов неодима с железом и бором марки МАЕР43ML (ТУ 1984-001-18785310-2003).

Расчет характеристик электрической машины в режиме генерации проводился методом конечных элементов в программе ANSYS-Emag. Для учета насыщения стали в магнитопроводах и нелинейных магнитных характеристик постоянных магнитов были введены зависимости $B=B(H)$ для указанных материалов.

Результаты расчетов

Задача решалась в осесимметричной постановке, для чего была разработана осесимметричная конечно-элементная модель электрической машины, в которой методом перемещения сетки моделировалась нестационарная задача перемещения подвижного элемента относительно магнитной системы статора. Вихревые токи в магнитопроводах и постоянных магнитах не учитывались. Поскольку нагрузка машины полагалась чисто активной, то электрическая мощность машины P вычислялась по формуле:

$$P = 2 \cdot f \cdot R_{LOAD} \cdot \int_0^{T/2} I_{sum}^2 dt, \quad (3)$$

где: I_{sum} – суммарный мгновенный ток, А;

T – период колебаний, $T = 1/f$, с;

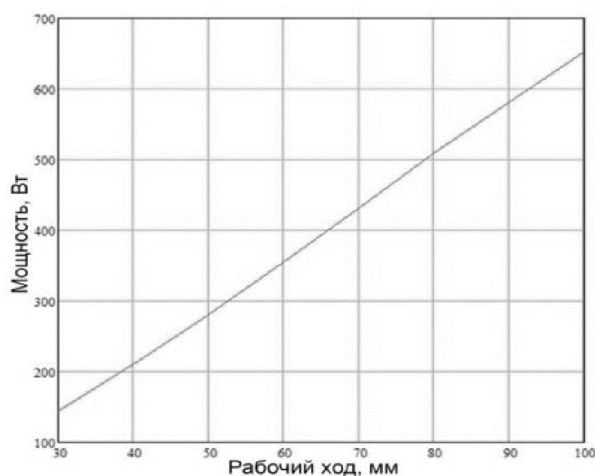


Рисунок 7 – Зависимость мощности линейного генератора от величины рабочего хода (при частоте 50 Гц)

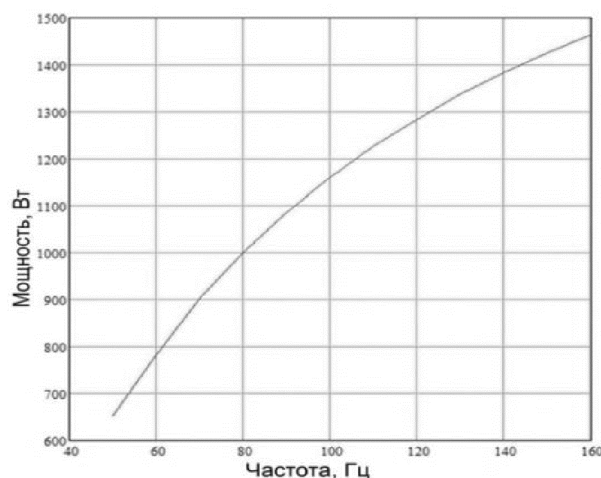


Рисунок 8 – Зависимость мощности линейного генератора от частоты колебаний (при рабочем ходе 100 мм)

Для анализа производительности электрической машины при работе вместе с двигателем внутреннего сгорания были проведены расчеты мощности машины при различных вели-

чинах рабочего хода (амплитуды линейных колебаний) при фиксированной частоте 50 Гц (рисунок 7), а также мощности машины при различных частотах при фиксированной величине рабочего хода $L_{stroke} = 100$ мм (рисунок 8).

На рисунке 9 показана зависимость магнитной индукции в воздушном зазоре от времени. Отметим достаточно высокую амплитуду изменения магнитной индукции 1,25 тл.

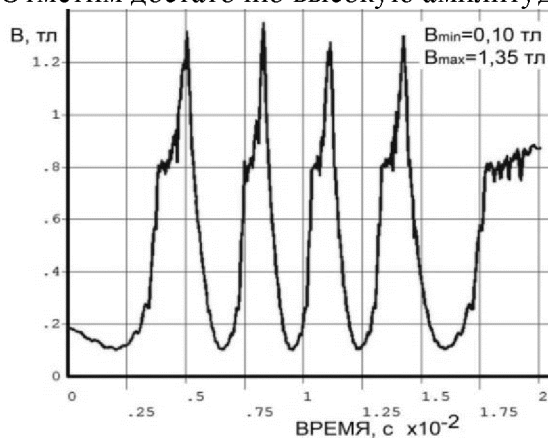


Рисунок 9 – Зависимость величины магнитной индукции в воздушном зазоре

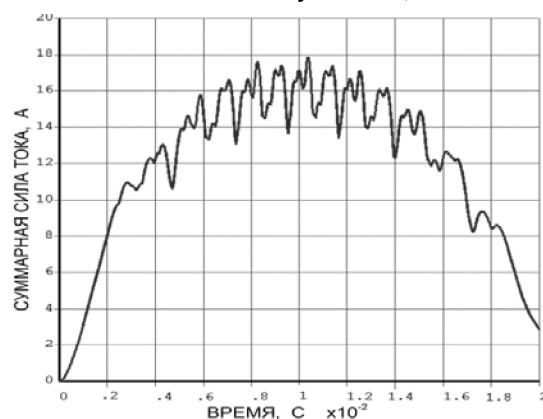


Рисунок 10 – Зависимость суммарного тока через сопротивление нагрузки

На рисунке 10 показана зависимость суммарного тока от катушек, проходящего через активное сопротивление нагрузки, от времени.

На рисунке 11 приведен график осевой силы, действующей на подвижный элемент. Необходимо отметить высокий уровень пульсации осевой силы, что приводит к вибрации и шуму во время работы.

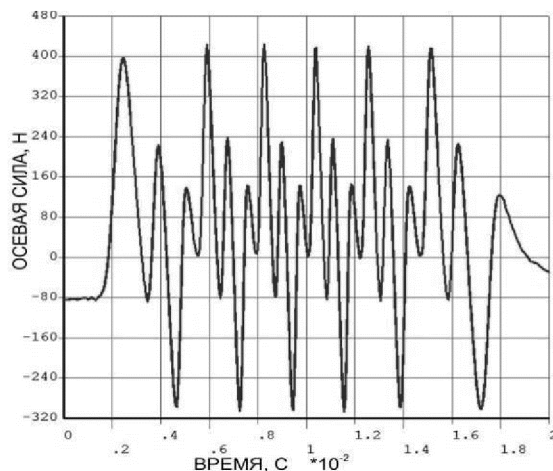


Рисунок 11 – Осевая сила, действующая на подвижный элемент

Коэффициент полезного действия электрической машины в приведенном диапазоне частот изменялся незначительно и составлял 0,93-0,95.

В результате расчетов получены следующие удельные характеристики электрической машины при частоте 50 Гц и рабочем ходе 100 мм (таблица 2):

Таблица 2

Наименование	Ед. изм.	Величина
Удельные параметры		
Удельная мощность на единицу поверхности воздушного зазора	Вт/м ²	8734
Удельная мощность на единицу объема статора	Вт/м ³	100 747
Удельная мощность на единицу массы электрической машины	Вт/кг	16,8
Массовые параметры		
Масса подвижного элемента (без элементов крепления)	кг	5,9
Масса магнитного материала	кг	8,00

Заключение

Необходимо отметить следующее:

1. Невысокие удельные мощностные характеристики рассмотренной линейной электрической машины требуют оптимизации как геометрических, так и кинематических параметров ее работы.
2. Достаточно большая масса постоянных магнитов приводит к удорожанию электрической машины.

Вместе с этим устройство пригодно для лабораторного моделирования в дальнейшем.

В результате расчета линейной электрической машины методом конечных элементов можно детально исследовать распределение магнитного поля с учетом нелинейных характеристик магнитных материалов. При возросших вычислительных мощностях современных компьютеров появляется возможность проводить оптимизацию параметров электрических машин при моделировании движения частей электрической машины относительно друг друга.

Литература

1. Boldea, I. Variable speed generators. The Electric Generators Handbook. Taylor & Francis Group, 2006
2. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины, Москва, Высшая школа, 1985 г.
3. Cawthorne William R., Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use With a Linear Internal Combustion Engine. Dissertation, the College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University, Morgantown, West Virginia, 1999
4. Хитереп М.Я., Овчинников И.Е. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. СПб, КОРОНА принт, 2008
5. Jang S.-M. and all. Thrust Analysis and Measurements of Tubular Linear Actuator With Cylindrical Halbach Array, IEEE Transactions on magnetics, VOL. 41, NO. 5, MAY 2005

Выбор рациональной компоновочной схемы в дизайне малогабаритного городского транспортного средства

к.т.н. доц. Ившин К.С., Полозов А.В.

ИжГТУ им. М.Т. Калашникова

ivshic@mail.ru, polo-anton@yandex.ru

Аннотация. В статье определены критерии выбора компоновочных схем и рациональные компоновочные схемы колес, пассажиров и силовых агрегатов для малогабаритного городского транспортного средства.

Ключевые слова: компоновочная схема, эксплуатационные свойства, малогабаритный городской автомобиль, дизайн

Выбор рациональной компоновочной схемы ТС требует детального анализа возможных вариантов, учитывая влияние на эксплуатационные свойства автомобиля. Компоновочное решение автомобиля подразумевает пространственное расположение узлов, пассажиров и зависит от применяемого типа силового агрегата. Разрабатывая перспективный городской автомобиль, следует рассматривать разные перспективные силовые установки, альтернативные двигателю внутреннего сгорания (ДВС). В результате появляется широкий выбор комбинаций расположения агрегатов и пассажиров в пространстве кузова, которые могут отличаться от общепринятых конструкций ТС. Выявляется актуальность в проведении детального анализа и выбора рациональной компоновочной схемы малогабаритного ТС (МТС) на начальной стадии проектирования.

ТС разного назначения имеют разный приоритет в определенной совокупности эксплуатационных свойств. Проблемы экологии и трафика движения транспортных потоков в крупных городах [1] определяют критерии выбора компоновочных схем для МТС городского назначения: габаритные параметры, количество пассажиров, экологичность, устойчивость, управляемость, маневренность. Выбор компоновочных схем определяется по расположению