

УДК 621.313.6

В.Е. Высоцкий, С.А. Тарашев, А.П. Синицин, Е.К. Злобина, С.И. Миненко**РАЗРАБОТКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ
С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

Рассмотрены вопросы разработки конструкции и проектирования линейных генераторов малой и средней мощности с высокоэнергетическими постоянными магнитами. Применение в ЛГПМ высокоэнергетических постоянных магнитов на базе редкоземельных металлов создает возможность значительного уменьшения массы системы возбуждения, и позволяет получить генератор бесконтактного типа. Наиболее приемлемыми можно считать энергетические характеристики магнитов типа Sm-CO и Nd-Fe-B. При проектировании целесообразно использовать магниты Nd-Fe-B, учитывая температурные зависимости, поскольку их механические свойства существенно лучше, в частности ниже хрупкость и выше пределы прочности.

Показаны возможности применения таких генераторов в качестве источников питания для автономных электроэнергетических комплексов.

Приводятся варианты конструкции линейных генераторов, а также результаты расчета их характеристик и параметров.

Линейный генератор; конструкция; проектирование высокоэнергетические постоянные магниты; характеристики.

V.E. Vysotsky, A.P. Sinitcin, S.A. Tarashev, E.K. Zlobina, S.I. Minenko**DESIGN OF LINEAR GENERATORS WITH HIGH-ENERGY PERMANENT
MAGNETS THE ELECTRICAL POWER AUTONOMOUS SYSTEM**

Questions pertinent to design of small- and medium-capacity linear generators with high-energy permanent magnets are considered. Applying in linear generators with high-energy permanent magnets on base few-earthen metals gives possible big under mass of inductor system and can design brushless generator. Best characteristics have permanent magnets Sm-CO and Nd-Fe-B. For design must to use magnets Nd-Fe-B rationally. Their mechanical characterizations are better than many others. Possibilities of using such generators for system of the power supply are showed. The design of linear generator and results calculations of its characterizations and parameters are given.

Linear generator; high-energy permanent magnets; design; characterizations.

В настоящее время в России и за рубежом большое внимание уделяется совершенствованию систем электропитания (СЭП) автономных электроэнергетических комплексов. Системы электропитания, являясь одной из основных частей автономных объектов, определяют их энергетическое обеспечение, существенно влияют на эффективность и срок активного функционирования. В связи с развитием в последнее время новых прогрессивных технологий появилась необходимость создания и применения в качестве источника питания СЭП линейных генераторов (ЛГ) малой и средней мощности с возвратно-поступательным движением. Отсутствие промежуточного механического звена в виде преобразователя движения обеспечивает более высокие технико-экономические показатели колебательных и вибрационных устройств и облегчает их интеграцию с рабочим органом. Такие устройства реализуют широкий диапазон механических частот колебаний и могут с успехом применяться во всех случаях, когда имеются вынуждающие механические колебательные движения или перемещения.

Следует отметить, что применяемые в настоящее время источники электрической энергии автономных СЭП – солнечные (СБ) и аккумуляторные батареи (АБ) – не всегда отвечают требованиям надежности, энергоэффективности, а также продолжительности активного функционирования.

Наиболее полно требованиям надежности отвечает линейный генератор с постоянными магнитами (ЛГПМ). Применение в ЛГПМ высокоэнергетических постоянных магнитов на базе редкоземельных металлов создает возможность резкого уменьшения массы системы возбуждения, и позволяет получить генератор бесконтактного типа. Последнее обстоятельство является решающим в случае выбора ЛГПМ в качестве источника энергии для автономных электроэнергетических комплексов [1–4].

Наиболее приемлемыми можно считать энергетические характеристики магнитов типа *SmCo* и *Nd-Fe-B*. Причем первый имеет значительно больший температурный диапазон (до 300 °С). Однако механические свойства магнитов *Nd-Fe-B* существенно лучше, в частности ниже хрупкость и выше пределы прочности, поэтому при проектировании целесообразно использовать именно этот материал, используя температурные зависимости магнитов.

Интеграция в структуру СЭП определяет условия эксплуатации генератора и накладывает ряд ограничений как на конструктивное исполнение ЛГ, так и на методику его проектирования. Для повышения технико-экономических показателей современных СЭП необходима разработка специальных генераторов возвратно-поступательного действия. Они должны надежно функционировать в широком температурном и частотном диапазоне.

Конструкция ЛГПМ должна обеспечивать:

- ◆ функционирование в составе СЭП, в которой дополнительным первичным источником энергии является специфический, например, термоакустический двигатель;
- ◆ работу при температуре окружающей среды в диапазоне от 20 до 100 °С;
- ◆ возможность функционирования в особых условиях;
- ◆ непрерывную работу в течение всего срока службы;
- ◆ высокую надежность и ресурс;
- ◆ массогабаритные показатели на уровне 30 Вт/кг;
- ◆ электромагнитную совместимость с СЭП;
- ◆ виброзащищенность конструкции,
- ◆ виброактивность, допустимую для автономных систем;
- ◆ допустимые предельные отклонения подвижного элемента в радиальном направлении.

В настоящее время по тематике линейных электрических машин предложено значительное число конструктивных решений. Разработаны математические модели и рассмотрены вопросы проектирования электрических машин возвратно-поступательного движения, но они относятся, в основном, к двигательному режиму работы [1, 4].

С точки зрения массообъемных показателей, конструкция с магнитами в виде прямого цилиндра с коаксиальным сквозным отверстием и радиальным направлением намагничивания имеет ряд преимуществ, в частности, наибольшую длину зазора по окружности магнита и характеризуется наилучшим использованием материала, но она относительно сложна и в технологическом отношении может оказаться более дорогостоящей.

В качестве одного из конструктивных вариантов может быть предложена магнитная система, изображенная на рис. 1.

Для данной конструкции магнитопровод ЛГПМ состоит из двух частей: внешней – выполненной в виде пакета круглых штампованных пластин с четырьмя полюсами, и внутренней – представляющей собой также пакет шихтованных пластин, размещенных с внутренней стороны индуктора.

Подвижная часть состоит из полого каркаса из немагнитного материала и восьми призматических магнитов, размещенных на нем. Немагнитный промежуток обеспечивается специальной вставкой [5].

Преимуществом данной конструкции является ее технологичность и достаточно высокое использование материалов. Обмотка, выполненная в виде сосредоточенных катушек, размещена на полюсах магнитопровода. Магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами, суммируется и проходит через полюса магнитопровода, меняя свое направление в зависимости от положения индуктора.

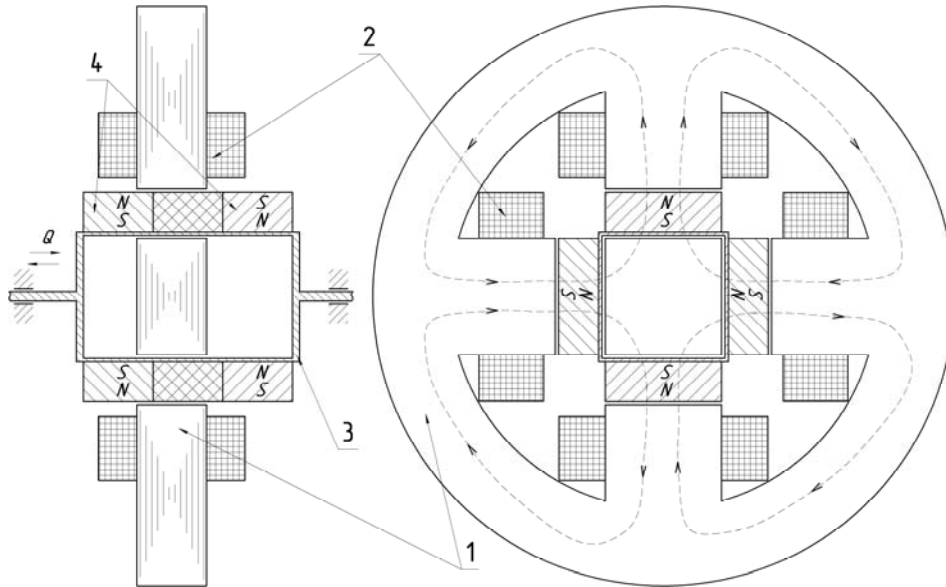


Рис. 1. Конструкция ЛГПМ: 1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – подвижная часть (индуктор); 4 – постоянный магнит

Эксплуатационные требования, предъявляемые к ЛГПМ, накладывают ряд ограничений на выбор материала некоторых механических узлов. К таким узлам в первую очередь следует отнести опоры. Согласно требованиям, сформулированным к ЛГПМ предназначенного для функционирования в составе автономной СЭП, конструкции опор должны обеспечивать минимальные допустимые отклонения подвижного элемента в радиальном направлении. Кроме того, следует учитывать требования надежности и продолжительности активного функционирования.

При работе на частоте $f > 50 \text{ Гц}$ нагрузка на опоры существенно возрастает, и положение центра вала будет стремиться в смещенное положение относительно центра опоры.

В качестве опор подвижной части могут быть использованы аксиальные подшипники скольжения. Однако их применение сопряжено с достаточно высоким уровнем потерь на трение и ограничено частотой колебания $f \leq 50 \text{ Гц}$.

Для обеспечения надежной работы линейного генератора на высоких частотах предлагается в качестве направляющих опор подвижной части использовать упругие мембраны [6].

В соответствие рассматриваемой конструкции ЛГПМ может быть поставлена эквивалентная электромагнитная схема, приведенная на рис. 2.

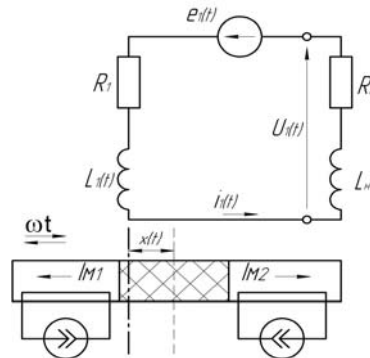


Рис. 2. Эквивалентная электромагнитная схема ЛГПМ

Здесь $L_1(t), R_1$ – индуктивность и активное сопротивление рабочей обмотки; $L_н, R_н$ – сопротивление нагрузки; $e_1(t)$ – ЭДС, наводимая в рабочей обмотке при перемещении магнитов.

Согласно эквивалентной электромагнитной схеме, уравнение электрического равновесия можно записать в виде

$$e_1(t) = i_1(t)(R_1 + R_н) + i_1 \frac{dL_1(t)}{dt} + (L_1 + L_н) \frac{di_1(t)}{dt}. \quad (1)$$

Постоянные магниты моделируются эквивалентной фиктивной обмоткой возбуждения, включенной на источник тока:

$$I_i = \frac{F_i}{w},$$

причем

$$I_M = I_{M1} = I_{M2}, w_1 = w_2 = 1. \quad (2)$$

Выражение для напряжения нагрузки запишется в виде

$$U_1(t) = i_1(t)R_н + L_н \frac{di_1(t)}{dt}. \quad (3)$$

Полученная система уравнений (1–3) полностью описывает электромагнитные процессы в ЛГ, учитывает изменение параметров в зависимости от координаты индуктора. Система имеет периодические коэффициенты, вследствие чего точное аналитическое решение ее представляется сложной математической задачей. Решение уравнений выполнено численным методом с использованием программы *Mathcad*. На рис. 3 приведены временные диаграммы напряжения и тока для различных режимов работы ЛГПМ. На графиках пунктирной линией показано напряжение, сплошной – ток.

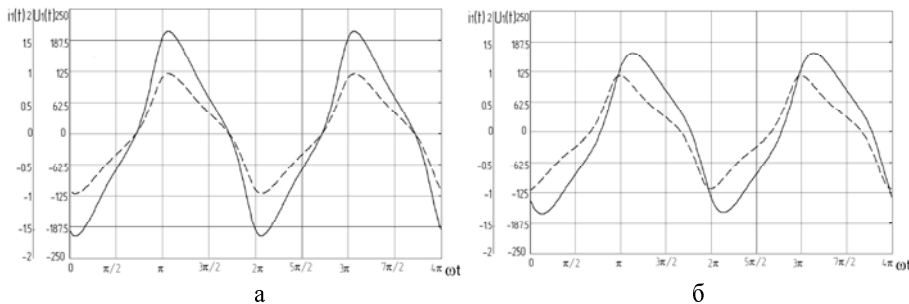


Рис. 3. Напряжение и ток рабочей обмотки при работе: а – активная нагрузка ($R=73 \text{ Ом}$); б – активно-индуктивная нагрузка ($R=73 \text{ Ом}, L=0,1 \text{ Гн}$)

Для анализа качества выходного напряжения расчетные кривые были представлены тригонометрическим рядом Фурье.

На рис. 4 приведены временные диаграммы гармонических составляющих напряжения $U_1(t)$, и спектр действующих значений этого напряжения.

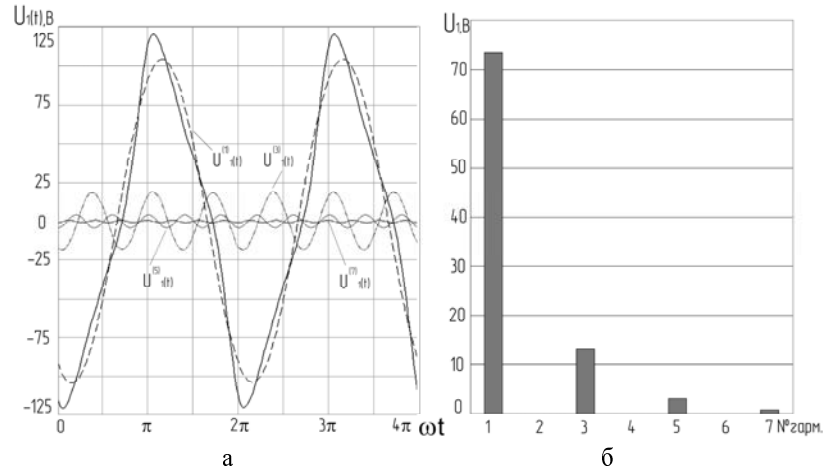


Рис. 4. Напряжение рабочей обмотки: а – гармонические составляющие; б – спектр действующих значений

Как видно из представленной диаграммы существенное влияние на качество напряжения рабочей обмотки ЛГПМ оказывают третья и пятая гармоники, величина седьмой гармоники менее 0,2 %. Следует отметить, что уровень искажений кривой напряжения зависит от рода нагрузки. На рис. 5 приведены графики коэффициента гармонических искажений напряжения в зависимости от нагрузки.

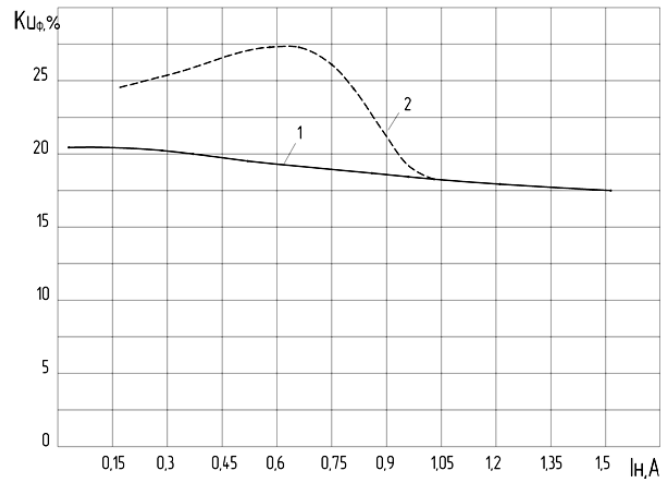


Рис. 5. Коэффициент гармонических искажений напряжения: 1 – активная; 2 – индуктивная нагрузка

Анализируя полученные зависимости можно сделать вывод, что увеличение индуктивной составляющей сопротивления нагрузки приводит к существенному увеличению коэффициента искажения кривой напряжения.

Исходные данные и допущения при проектировании ЛГПМ обусловлены функционированием в составе системы электропитания автономного объекта и должны формироваться с учетом эксплуатационных требований, накладываемых на него.

При разработке методики проектирования ЛГПМ были приняты следующие основные допущения: мощность первичного двигателя много больше мощности генератора и, следовательно, амплитуда колебаний не зависит от нагрузки; координата положения индуктора изменяется по гармоническому закону; при расчете параметров магнитной цепи магнитное сопротивление стальных участков принимается, равным нулю.

На первом этапе определяются основные геометрические параметры генератора с учетом выработанных рекомендаций по расчету объема ПМ и выбору рациональных соотношений b_{Δ}/b_m и h_m/l_m . Предварительно рассчитывается магнитная система ЛГПМ и обмоточные данные.

На втором этапе производится проверка устойчивости ПМ к размагничиванию в режиме короткого замыкания, рассчитываются режим допустимой перегрузки и характеристики номинального режима работы. При неудовлетворительных результатах производится корректировка данных в первом блоке и расчет повторяется. В заключение производится расчет массогабаритных и удельных показателей ЛГПМ. Расчет серии образцов 50–1000 Вт дал результаты, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Расчетная мощность, Вт	50	100	250	500	1000
Напряжение, В	63	63	63	63	63
Номинальный ток, А	0,810	1,600	3,980	7,950	15,890
КПД (без учета мех потерь), о.е.	0,786	0,820	0,849	0,864	0,873
Диаметр магнита, м	0,014	0,026	0,066	0,132	0,260
Высота магнита, м	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Ширина магнита, м	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Немагнитный зазор, м	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Удельная мощность, Вт/кг	29,7	32,7	34	33,2	30,4

Выводы. Определена перспективная конструкция линейного генератора с постоянными магнитами для автономных электроэнергетических комплексов.

Предложенная математическая модель и разработанная универсальная программа в среде *Mathcad* позволила провести исследования установившихся электромагнитных процессов и выработать рекомендации по проектированию ЛГПМ.

Методика инженерного проектирования использована для расчета ЛГПМ различной мощности с заданными массообъемными и энергетическими показателями СЭП в составе автономного объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хитерер М.Я., Овчинников И.Е. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. – СПб.: КОРОНА Принт, 2004. – 368 с.
2. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
3. Осин И.Л., Колесников В. П., Юферов Ф. М. Синхронные микродвигатели с постоянными магнитами. – М.: Энергия, 1976. – 232 с.
4. Матоян Г.С., Афонин М.В., Соколова Е.М., Мью Тем Ту. Перспективы применения синхронных генераторов с постоянными магнитами и возвратно-поступательным движением индуктора // Электричество. – 2007. – № 11. – С. 54-56.

5. *Высоцкий В.Е., Синицин А.П., Тарашев С.А.* Линейный генератор с постоянными магнитами для систем электропитания автономных объектов // ИВУЗ Электромеханика. – 2010. – № 1. – С. 80-82.
6. *Cool and Straight: Linear Compressors for Refrigeration / Paul Bailey, Mike Dadd, Richard Stone* // Department of Engineering Science, University of Oxford, 2010.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Л.И. Калакутский.

Высоцкий Виталий Евгеньевич – ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»; e-mail: vitalyvysotsky@mail.ru; 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244; тел. (факс): 88462784460; кафедра теоретической и общей электротехники; заведующий кафедрой; д.т.н.; профессор.

Тарашев Сергей Александрович – e-mail: tarashev@mail.ru, тел. (факс): 88462423129; кафедра теоретической и общей электротехники, инженер.

Синицин Алексей Петрович – e-mail: alexxandket@mail.ru; кафедра теоретической и общей электротехники; инженер.

Злобина Елена Кузьминична – e-mail: toe_fp@samgtu.ru; кафедра теоретической и общей электротехники; аспирантка.

Миненко Сергей Иванович – ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ – Прогресс», e-mail: csdb@mail.samtel.ru; 443009, г. Самара, ул. Земеца, 18; тел. (факс): 88462784460; начальник отдела.

Vysotsky Vitaly Evgenievich – Federal State-Owned Budgetary Educational Establishment of Higher Vocational Education “Samara State Technical University”; e-mail: vitalyvysotsky@mail.ru; 244, Molodogvardeiskaya street, Samara, 443100, Russia; phone (fax): +78462784460; the department of theoretical fundamentals of electrotechnical; chief of department; dr. of eng. sc.; professor.

Tarashev Sergei Alexandrovich – e-mail: tarashev @mail.ru, phone (fax): +78462423129; the department of theoretical fundamentals of electrotechnical; engineer.

Sinitcin Alexei Petrovich – e-mail: alexxandket@mail.ru; the department of theoretical fundamentals of electrotechnical; engineer.

Zlobina Elena Kuzminichna – e-mail: toe_fp@samgtu.ru; the department of theoretical fundamentals of electrotechnical; postgraduate student.

Minenko Sergei Ivanovich – FSUI "CCDB-Progress"; e-mail: csdb@mail.samtel.ru; 18, Zemets street, Samara, 443009, Russia; chief of department.

УДК 007.52

И.Б. Шеремет, Н.А. Рудянов, А.В. Рябов, В.С. Хрушев, В.И. Комченков

ОБОСНОВАНИЕ СЕМЕЙСТВА БОЕВЫХ И ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ РОБОТОВ ДЛЯ БОЯ В ГОРОДЕ

Рассматривается подход к комплексной роботизации боевых и обеспечивающих роботов при ведении боевых действий на урбанизированной территории. Для решения задач повышения ситуационной осведомленности, разведки и наблюдения за противником, разведки минно-взрывных заграждений, обнаружения опасных предметов, доставки специальных технических средств, а также огневой поддержки, предлагается роботизированная система поддержки боевых действий на урбанизированной территории в составе базовой машины и трех типов унифицированных РТК. Определены основные задачи для РТК различных типов и основные требования к ним. Рассмотрены организационные принципы и структура робототехнической системы для боя в городе в составе батальона.

Боевые и обеспечивающие роботы; урбанизированная территория.