

# Конструкция и экспериментальная проверка линейного генератора с постоянными магнитами для преобразователя энергии со свободным поршнем.

Перевод Духанин В.И.

Сайт [centaurproject.com](http://centaurproject.com)

## Часть 3.

### 4. Прототип и экспериментальные результаты.

Прототип трубчатой машины на постоянных магнитах с оптимальными конструктивными параметрами для максимальной производительности системы и общей массой подвижной магнитной арматуры, не превышающей 6 кг, был спроектирован, как изображено на эскизе в разделе 3 (см. рис.15). Сердечник статора трубчатой ПМ-машины изготовлен из слоистых модулей, которые собраны из I-образных слоев, используя специально спроектированное приспособление, как показано на рис.16. Катушки трубчатой машины сформованы для достижения высокого фактора упаковки, и в целом статор подвергнут вакуумной пропитке лаком. Магниты изготовлены из спеченного NdFeB с остаточной намагниченностью 1,2 Т и относительной обратной магнитной проницаемостью 1,05, обратимый температурный коэффициент намагничивания был 0.11 %/°С. Магниты по окружности поделены на 16 сегментов и закреплены на несущей титановой трубе, используя высокотемпературный клей. Полностью собранная подвижная магнитная арматура помещена внутрь бандажа из углеродной ткани толщиной 0,4 мм, как показано на рис.17.

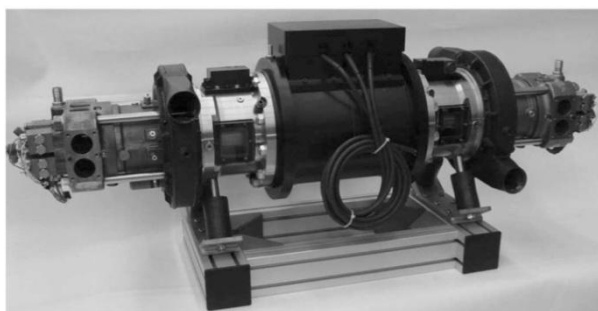


Рис.15. Прототип трубчатой генератора на постоянных магнитах в сборке с КЭСП.

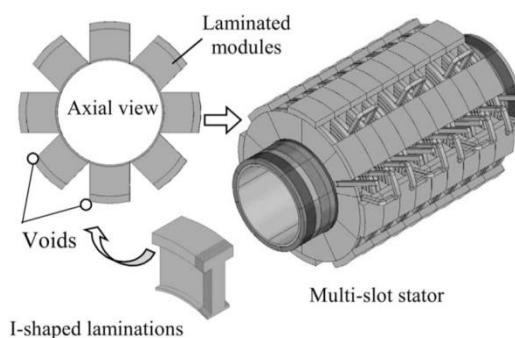


Рис.16. Магнитопровод статора, изготовленный из модулей, шихтованных I-образными листовыми заготовками.

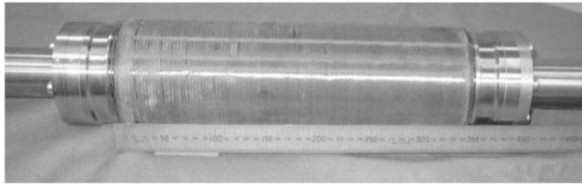


Рис.17. Прототип сборки подвижной магнитной арматуры.

Таблица 2. Сравнение измеренных и рассчитанных параметров машины.			
	Фаза	Расчет	Измер.
Пиковое значение ЭДС при 1 м/с, В	A	100,4	100,1
	B	100,4	99,4
	C	99,8	98,72
Индуктивность фазы, мГн	A	0,304	0,300
	B	0,294	0,308
	C	0,304	0,308
Сопротивление фазы, мОм при 22°C	A	14,46	17,6
	B		17,5
	C		18,9

В таблице 2 сравниваются измеренные и предсказанные фазовые сопротивления и индуктивности и пиковые значения фазовых ЭДС. Как можно увидеть, измеренные ЭДС и индуктивности хорошо согласуются с предсказанными значениями. Измеренные фазовые сопротивления, однако, примерно на 15% выше, чем предсказанные, так как сопротивление между фазами/соединительными проводами катушек не было включено в расчет. Был измерен поток сцепления каждой фазы, как функция перемещения арматуры, используя измеритель магнитного потока и линейный позиционный энкодер.

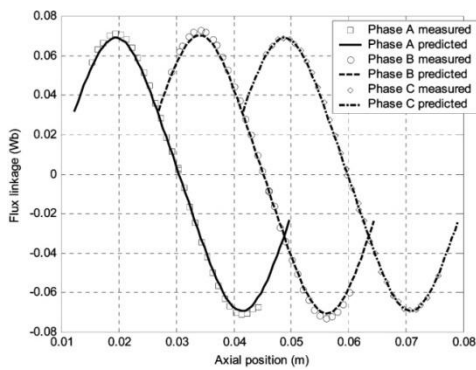


Рис.18. Сравнение измеренных и рассчитанных фазовых магнитных потоков сцепления.

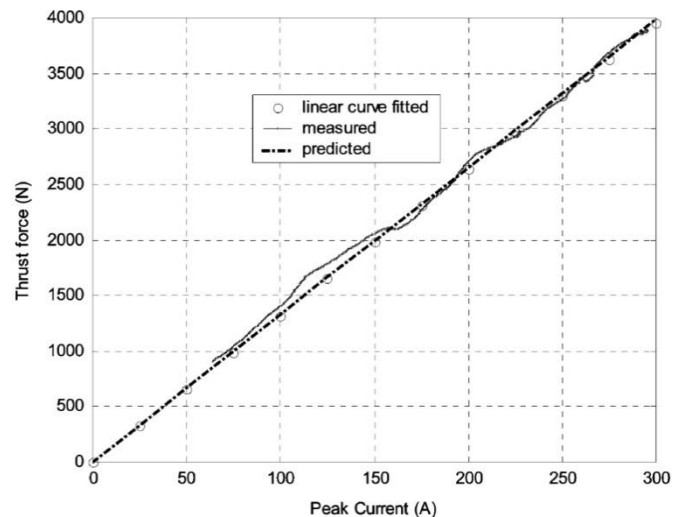


Рис.19. Сравнение измеренной и рассчитанной осевой силы.

На рис.18 сравниваются измеренные и рассчитанные фазовые потоки сцепления. Как можно видеть, измеренные волновые формы фазового потока сцепления хорошо согласуются с расчетными волновыми формами, и демонстрируют  $120^\circ$  симметрию электрических векторов между фазами. Фаза В имела большее пиковое значение потока на 72,75 mWb, который на 2% и 5% больше, чем фазы А и С соответственно. Осевая сила генератора была измерена с использованием нагрузочной ячейки и зафиксированной арматуры в определенной позиции и возбуждением фазовых обмоток соответствующими токами.

На рис. 19 сравнивается отклонение, измеренное и рассчитанное осевой силы, как функции пикового тока машины. Из рис.19 константы измеренной и рассчитанной осевой силы составляют соответственно 13,28 N/A и 13,20 N/A. Таким образом, между измерениями и расчетами было достигнуто хорошее согласование.

## **5. Заключение.**

Была рассмотрена подходящая для применения в конвертере энергии со свободным поршнем цилиндрическая бесщеточная машина на постоянных магнитах с магнитами с квази-Халбах магнитной структурой. Было показано, что эта структура машины обладает привлекательными свойствами в смысле ее высокой плотности мощности, высокого КПД, низкой силой сцепления и низкой величиной подвижной массы, что необходимо для достижения высокой выходной мощности от преобразователя энергии со свободным поршнем. Характеристики цилиндрической машины были проанализированы, как аналитически, так и методом КЭ, и было показано, что конструкция машины может быть оптимизирована с учетом трех главных размерных отношений, с соответствующим расчетом для вольтамперной характеристики и потерь, связанных с силовой электроникой конвертера. Измерения, проведенные на 10-полюсном, 9-пазовом прототипе трубчатого генератора с постоянными магнитами подтвердили конструктивные принципы, анализ и предсказанные характеристики.

## Список литературы.

- [1] C. C. Chan, "The state-of-the-art of electric and hybrid vehicles," *Proc.IEEE*, vol. 90, no. 2, pp. 247–275, Feb. 2002.
- [2] S. Barsali, C. Miulli, and A. Possenti, "A control strategy to minimize fuel consumption of series hybrid electric vehicles," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 1, pp. 187–195, Mar. 2004.
- [3] P. Van Blarigan, N. Paradiso, and S. S. Goldsborough, "Homogeneous charge compression ignition with a free piston: A new approach to ideal Otto cycle performance," *SAE Paper 982484*, 1998, pp. 89–106.
- [4] W. R. Cawthorne, P. Famouri, J. Chen, N. N. Clarke, T. I. McDaniel, R. J. Atkinson, S. Nandkumar, C. M. Atkinson, and S. Petreanu, "Development of a linear alternator-engine for hybrid electric vehicle applications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 48, no. 6, pp. 1797–1802, Nov.1999.
- [5] D.Carter and E.Wechner, "The free-piston power pack: Sustainable power for hybrid electric vehicles," *SAE Paper 2003-01-3277*, Oct. 2003.
- [6] C. M. Atkinson, S. Petranu, N.N. Clark, R. J. Atkinson, T. I. McDaniel, S. Nandkumar, and P. Famouri, "Numerical simulation of a two-stroke linear engine-alternator combination," *SAE Paper 1999-01-0921*, 1999.
- [7] A. P. Kleemann, J.-C. Dabadie, and S. Henriot, "Computational design studies for a high-efficiency and low-emissions free-piston engine prototype," *SAE Paper 2004-01-2928*, 2004.
- [8] J. Fredriksson and I. Denbratt, "Simulation of a two-stroke free piston engine," *SAE Paper 2004-01-1871*, 2004.
- [9] E.Max, "FPEC, free-piston energy converter," presented at the 21st Elect.Veh. Symp. Exhib., EVS21 Monte Carlo, Monaco, Apr. 2005.
- [10] J. F. Eastham, "Novel synchronous machines: Linear and disc," *IEE Proc.B*, vol. 137, no. 1, pp. 49–58, Jan. 1990.
- [11] J.Wang, G.W. Jewell, andD.Howe, "A general framework for the analysis and design of tubular linear permanent magnet machines," *IEEE Trans.Magn*, vol. 35, no. 3, pt. 2, pp. 1986–2000, May 1999.
- [12] M. Inoue, J. Wang, and D. Howe, "Influence of slot openings in tubular modular permanent magnet machines," in *Proc. 4th Int. Symp. Linear Drives Ind. Appl*, Birmingham, U.K., Sep. 8–10, 2003, pp. 383–386.
- [13] Y. Amara, J. Wang, and D. Howe, "Eddy current loss in tubular modular permanent magnet machines," in *Proc. Int. Conf. Elect. Mach.*, Cracow, Poland, 2004, Paper ID 193, Paper ID 193

Таблица 2. Сравнение измеренных и рассчитанных параметров машины.			
	Фаза	Расчет	Измер.
Пиковое значение ЭДС при 1 м/с, В	А	100,4	100,1
	В	100,4	99,4
	С	99,8	98,72
Индуктивность фазы, мГн	А	0,304	0,300
	В	0,294	0,308
	С	0,304	0,308
Сопротивление фазы, мОм при 22°C	А	14,46	17,6
	В		17,5
	С		18,9

[14] J. Wang and D. Howe, "Magnetic field distribution of quasi-Halbach magnetized cylinder for tubular permanent magnet machines," in Proc. 4th Int. Symp. Linear Drives Ind. Appl., Birmingham, U.K., Sep. 8–10, 2003, pp. 481–484.

[15] , "Design optimization of radially magnetized, iron-cored, tubular permanent magnet machines and drive systems," IEEE Trans. Magn., vol. 40, no. 5, pp. 3262–3277, Sep. 2004.

[16] J.Wang, Y. Amara, and D. Howe, "Armature reaction field and inductances of tubular modular permanent magnet machines," J. Appl. Phys., vol. 97, no. 10, pp. 504–506, 2005.