

# Альтернативные конструктивные решения электрических машин для генератора со свободным поршнем.

Перевод Духанин В.И.  
сайт [centaurproject.com](http://centaurproject.com)

## Часть 3.

### 4.3 Машины переменного тока с подвижными катушками.

Особенности этих конструкций - высокая производительность (отсутствуют потери в магнитопроводе), необходимость в гибком проводном/скользящем контакте и высокие требования термостойкости конструкции. Из-за установленных ограничений движущихся масс, исследована только обмотка воздушного зазора (без ярма). Анализ таблицы 2 здесь не имеет силы, поскольку упоминаемый фактор нагрузки не применим. Полагая, что заданная масса подвижного элемента состоит только из меди и пренебрегая краевыми эффектами, требуемая масса транслятора для заданной плотности магнитного потока в воздушном зазоре находится из уравнения (3). Рациональное значение плотности тока (rms) для обмоточной катушки воздушного зазора полагается равным  $4 \text{ А/мм}^2$  [10]. Известные подвижные катушки, трехфазной машины переменного тока показаны на рис.7.

$$W_{rotor} = \pi F \rho_{cu} / (2 \hat{B}_g \sin(\alpha) J_{rms} k_w k_f \sqrt{2}) \quad (3)$$

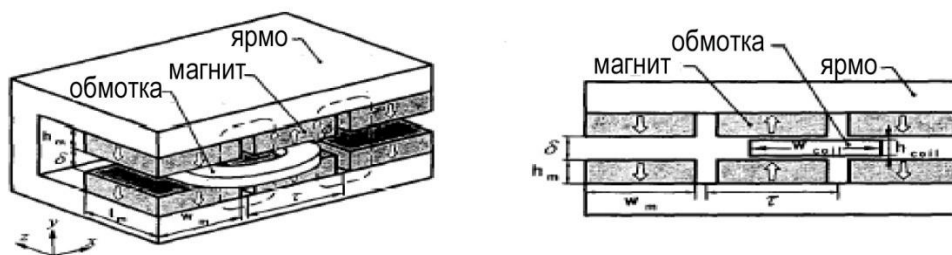


Рис.7. Различные виды машины переменного тока с подвижными катушками

Для поверхностно устанавливаемых конструкций максимальная плотность магнитного потока в воздушном зазоре равна  $0,9 \text{ Т}$  и  $\alpha$  может быть максимально  $90^\circ$ . Хотя для конструкций с утопленными магнитами максимальная плотность магнитного потока может быть равна  $1,6 \text{ Т}$ , однако  $\alpha$  не может быть  $90^\circ$ . Результаты представлены в таблице 3. Можно увидеть, что для вариантов с подвижной катушкой существует

требование высокой массы ротора, а их производительность слабее, чем у машин с подвижными магнитами раздела 4.1.

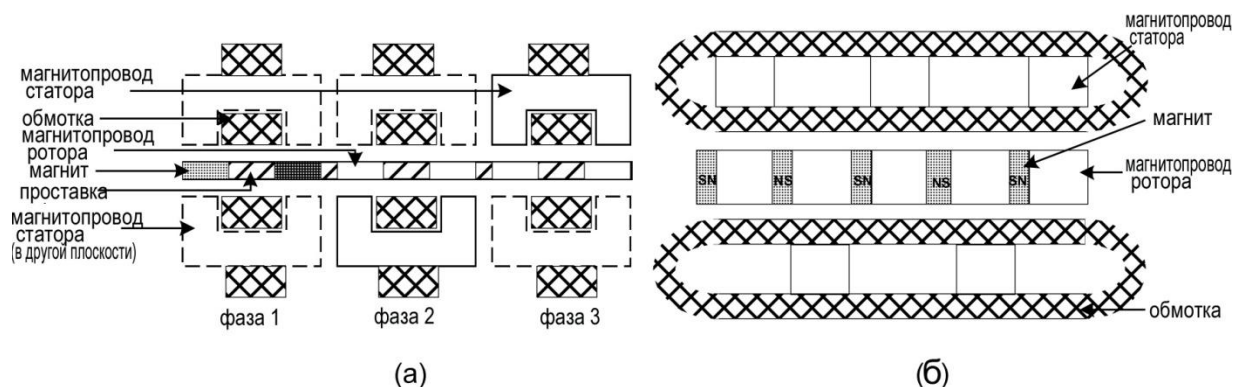


Рис.8. Трехфазная ТФМс утопленными магнитами

а) поперечный разрез; б) продольный разрез.

#### 4.4 Машины с поперечным магнитным потоком.

Машины, обсуждаемые в разделах выше, попадают в главную категорию машин с продольным магнитным полем. Машины с поперечным магнитным полем (TFM) обладают магнитным потоком в плоскости, перпендикулярной движению подвижного элемента, и имеют растущую популярность в настоящее время. Они характеризуются высокой удельной плотностью момента/силы, высокими утечками магнитного потока, низким значением фактора мощности и сложным процессом производства [5, 9]. Этот тип машин рассматривается здесь из-за их многообещающей удельной силовой плотности, несмотря на их многие недостатки. Необходимо отметить, что доверять аналитическим результатам для конструкции TFM можно только, если они были проверены методом 3D-МКЭ. Ранее обсуждались конструкции с поверхностно-монтажными магнитами. TFM с утопленными магнитами показана на рис. 8. Эти конструкции (подобно поверхностно-монтажным конструкциям [1]) позволяют использовать все магнитные полюса одновременно, и, следовательно, позволяют получить более высокую силовую плотность. Дополнительное преимущество в том, что достигается высокое значение магнитной индукции, например,  $\sim 1,6$  Т, так как отсутствует требование взаимосвязи между шириной зубца и шириной паза, которое имеется в случае обычных машин (см. раздел 4.1). Магнитопровод в TFM приносит многократно большие магнитные потоки в воздушных

зазорах (высокие утечки), и настоящее определение размеров сердечника по-настоящему может быть основано на величине предполагаемых магнитных потоков утечек.

Таблица 3. Параметры линейных машин.

Машина	Магниты	КПД, %	Статор	Масса подвижного элемента, кг	Удельная мощность, кВт/кг	Фактор мощности
Продольный магнитный поток, подвижные магниты	Поверхностные	~ 93	Короткий	~ 15	~ 0,60	0,98
			Длинный	~ 12	~ 0,50	0,98
	Утопленные	~ 92	Короткий	~ 40	~ 0,40	0,94
			Длинный	~ 31	~ 0,35	0,94
Вентильные индукторные	нет	-----	-----	>55	<0,30	-----
Гибридные индукторные	поверхностные	~ 85	-----	>40	~ 0,10	-----
Подвижная катушка, переменного тока	утопленные	~ 97	короткий	~ 40	~ 0,45	-----
			длинный	~ 32	~ 0,40	-----
	поверхностные	~ 98	короткий	~ 30	~ 0,20	-----
			длинный	~ 20	~ 0,15	-----
Поперечный магнитный поток	утопленные	~ 95	короткий	~ 7	~ 0,81	0,35
		~ 94	длинный	~ 5	~ 0,67	0,35
	поверхностные	~ 95	короткий	~ 14	~ 1,1	0,35
		~ 94	длинный	~ 10	~ 0,67	0,35

Результаты представлены в таблице 3.

Можно заметить, что ТФМ с утопленными магнитами, по сравнению с поверхностно монтируемыми ТФМ, имеют превосходящие зависимости удельных характеристик, однако требуют большей массы ротора. Тем не менее, конструкции ТФМ лучше, чем все другие машины, представленные в таблице 3. Главный недостаток заключается в их низком факторе мощности. Как установлено ранее, аналитические расчеты ТФМ требуют проверки методом 3D-МКЭ. Это объясняется существенным трехмерным характером магнитных потоков, аналитическое моделирование которых весьма затруднительно. Для этой цели секция ТФМ была смоделирована в программе 3D-FEM и проанализирована (см. рис.9). Результаты представлены в таблице 4. Линейная сила была рассчитана статическим моделированием подвижного элемента вдоль оси  $q$  питаемый только током оси  $d$ . Фактор мощности был оценен посредством наблюдаемого потока в магнитопроводе статора в  $d$ -оси ( магнитного потока магнита) и в  $q$ -оси ( магнитный поток реакции якоря), согласно выражению (4)[5].

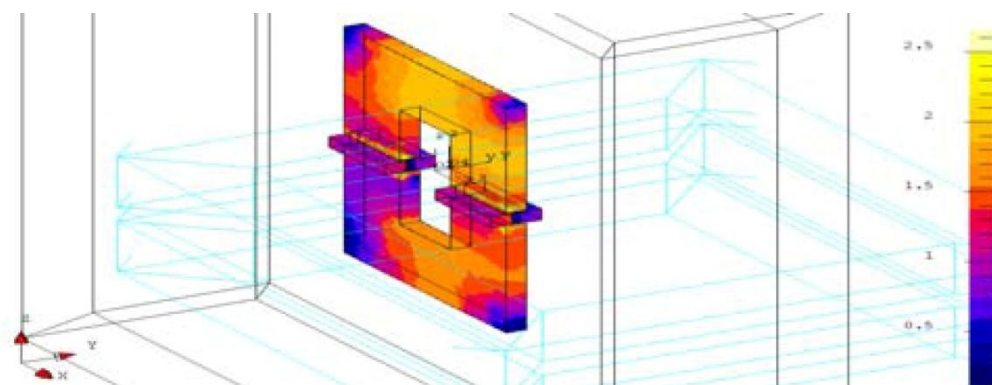


Рис. 9. Секция TFM, смоделированная в 3D-FEM.

## 5. Заключение

Определено, что машины с поперечным магнитным потоком близко подходят к удовлетворению конструктивных требований, приведенных в таблице 1. Конструкции с утопленными магнитами имеют хорошие удельные характеристики, однако, требуется высокая масса транслятора. Поверхностно монтируемые конструкции требуют меньшей массы транслятора, однако, они имеют слегка заниженные удельные производительные характеристики. Проверки аналитических результатов методом программы 3D-FEM подтвердило жизнеспособность применения TFM в генераторах со свободным поршнем. Однако оба TFM варианта страдают недостатком в виде низкого фактора мощности. Это требует попыток нахождения технических решений TFM с низкими магнитными потерями. Это будет продолжением настоящей работы.

$$Pf = \cos(\tan^{-1}(\Phi_q / \Phi_d)) \quad (4)$$

Таблица 4. Сравнение результатов аналитической и 3D-FEM моделей для машины с поперечным магнитным потоком.

	Аналитическая модель	3D-FEM модель
Сила на 1 полюс	170 Н	155 Н
Фактор мощности	0,35	0,302

Список литературы:

- [1] W. M. Arshad, C. Sadarangani, T. Bäckström and P. Thelin, Evaluation of Different Electrical Machines for a Free Piston Generator, EVS-19 Symposium, Busan, Korea, October, 2002.
- [2] J. F. Gieras, and Z. J. Piech, Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems, RC Press LLC, Florida, 2000, ISBN 0-8493-1859-7.
- [3] E. R. Laithwaite, Induction machines for special purposes, George Newens Limited, London, 1966.
- [4] I. Boldea and S. A. Nasar, Linear electric actuators and generators, Cambridge University Press, New York, 1997, ISBN 0-521-48017-5.
- [5] P. Anpalaham, Design of transverse flux machines using analytical calculations and finite element analysis, Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Department of Electrical Engineering, Stockholm, 1999.
- [6] P.V. Blarigan, Advanced internal combustion engine research, Proceedings of the 2000 DOE Hydrogen Program Review: NREL/CP-570-28890 (2000), 1–19.
- [7] W. Cawthorne, Optimisation of a brushless permanent magnet linear alternator for use with a linear internal combustion engine, Ph.D. thesis, West Virginia University, Morgantown, Department of Computer Science and Electrical Engineering, 1999.
- [8] J.F. Gieras, M. Wing, Permanent Magnet Motor Technology, 2nd Edition, ISBN: 0-8247-0739-7, Marcel Dekker Inc. 2002.
- [9] M. Goertz and L. Peng, Free piston engine and its application and optimisation, 2000-01-0996, SAE World Congress, Detroit, Michigan, 2000, pp. 1–10.
- [10] J. Engström, On design of slotless permanent magnet machines, Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Department of Electrical Engineering, Stockholm, 1999.
- [11] J. P. Hong, D. H. Kang, S. W. Joo, and S. C. Hahn, Variation of force density in BLDC linear motor on the width of PM and coil, IEEE ISIE 2001 Proceedings, Vol. 2, pp. 979-982.