

УДК 621.313.1

## Проектирование электрических машин с поперечным магнитным потоком

В. Г. Еременко\*, О. А. Кузьмичева, О. Г. Клочков, С. Ю. Лебедев

Для новых областей использования электрических машин: автомобиля с гибридной энергоустановкой, прямого электропривода судового винта, ветрогенератора с безредукторным приводом электрогенератора, — разработана новая конструкция многополюсной электрической машины с постоянными магнитами, отличающаяся большим моментом при низких скоростях вращения и получившая в литературе два названия: машины с поперечным магнитным потоком или машины с коммутируемым магнитным потоком. Она может использоваться в двигательном и генераторном режимах, регулирующихся силовыми полупроводниковыми коммутаторами.

Приведены две типовые схемы магнитной цепи, отличающиеся числом постоянных магнитов на полюсе. В большинстве случаев используются кольцевые статорные обмотки. В качестве базового размера, определяющего размеры машины и ее обмотки, была принята длина части полюса статора, взаимодействующая через воздушный зазор с постоянными магнитами, определяющая осевую длину машины и поперечные сечения магнитопровода.

Основная расчетная формула для базового размера получена в виде корня четвертой степени из выражения, содержащего момент машины. Все остальные размеры магнитопровода и обмоток через постоянные коэффициенты связаны с базовым размером.

Представлена модель машины в программе Matlab, работающая в качестве ветрогенератора с переменной электрической нагрузкой. При коммутации нагрузки в сторону увеличения и уменьшения фиксировали изменение скорости вращения, момента и мощности. Для мощности 75 кВт указаны характеристики данной машины и ранее известных типов машин и показано, что настоящая машина имеет минимальные массу, объем и максимальный КПД при близких скоростях вращения 570 — 610 об/мин.

Даны рекомендации по ее использованию в качестве мотор-колеса для гибридной транспортной энергоустановки.

Ключевые слова: двигатель-генератор с поперечным магнитным потоком (ДГПМП), базовый размер машины, постоянные магниты.

Помимо классических двигателей с постоянными магнитами в гибридных автомобилях возможно применение нового типа электрических машин — ДГПМП [1 — 16]. В работе впервые изложена методика расчета двигателя-генератора с поперечным магнитным потоком. Рассмотрено два варианта конструкции, от-

личающихся количеством постоянных магнитов (ПМ) при одинаковых числе полюсов и значениях мощности и частоты вращения. Выяснено, что базовый размер ДГПМП, определяющий через коэффициенты геометрии размеры машины, пропорционален корню четвертой степени из значения момента машины, в то время как в классических двигателях с радиальным потоком базовый размер пропорционален корню третьей степени

\* YeremenkoVG@mpei.ru

из значения момента машины. Описана замкнутая система уравнений для расчета габаритных параметров и обмоточных данных машины.

Публикации, содержащие конструкцию и принцип работы двигателя с поперечным потоком, появились с 70-х гг. прошлого века. Множество патентов, статей и учебников опубликовано в разных странах. Например [3] защищает конструкцию машины с двойным зазором. В [1] приведено описание и сравнение с другими машинами автобусного двигателя с поперечным магнитным потоком. Все источники дают общую информацию о возможных вариантах исполнения активной части двигателя и о принципах работы двигателя, но нигде не упоминается о методике проектирования, расчетах главных размеров, потерь и КПД.

В [1] описана таблица с характеристиками различных бесщеточных двигателей мощностью 75 кВт, применяемых в электрических транспортных средствах.

Из табл. 1 следует, что двигатель с поперечным потоком имеет при минимальных размерах и массе максимальный КПД.

При составлении методики проектирования двигателя в качестве аналога была принята конструкция, предложенная в [3]. Активная часть двигателя представлена на рис. 1. Для предварительного расчета была упрощена конструкция активной части двигателя, приведенная на рис. 2.

В двигателе к намагниченным токами катушек элементам полюса притягиваются постоянные магниты ротора. Токи в катушках переключаются по сигналу датчика положения ротора.

Электромагнитная сила на один полюс равна  $F$ , Н для рис. 2:

$$F = B_{\delta} I_{\max} w 2l, \quad (1)$$

Таблица 1

**Характеристики бесщеточных двигателей мощностью 75 кВт, применяемых в электрических транспортных средствах**

Характеристики	Асинхронный двигатель	Вентильный реактивный двигатель	Гибридный синхронный двигатель	Синхронный двигатель с ПМ	Многофазный модульный синхронный двигатель с ПМ	Двигатель с поперечным потоком
Ротор	внутренний (белочья клетка)	внутренний	внешний	внутренний	внутренний	внутренний
Число валов	1	2	1	1	1	1
Передаточное отношение	6,22 (3,11)	12,44 (1)	6,22 (1)	622 (1)	6,22 (1)	622 (1)
Количество полюсов	2	6	20	24	40	44
Номинальная частота вращения, об/мин	940	1232	616	616	616	570
Номинальная частота сети, Гц	49	82	103	123	205	209
Воздушный зазор, мм	1	1	2	2	3	от 1,2 до 2,0
Диаметр, мм						
внутренний	111	56	282	313	328	90
Зазор	266	278	351	341	354	354
Внешний	413	400	410	410	410	366
Длина сердечника, мм	276	200	243	229	255	124
Сердечник + лобовые обмотки, мм	397	350	285	265	295	212
Материал сердечника статора	шихтовидный					магнитомягкий порошок
Объем, $\times 10^{-3}$ , м <sup>3</sup>	53,2	44,0	37,6	35,0	38,9	22,3
Масса активной части, кг	272	147	106	79	71	73
Масса ПМ, кг	—	—	2,7	4,7	7,0	11,5
КПД	0,900	0,930	0,932	0,941	0,949	0,976

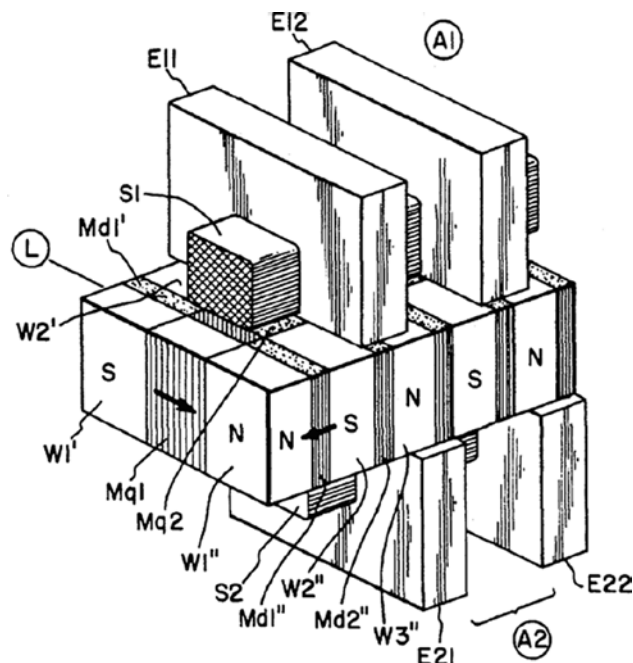


Рис. 1. Двигатель с двойным зазором:

A1, A2 — внешний и внутренний статоры; L — ротор; E11, E12, E21, E22 — элементы полюса; S1, S2 — кольцевые катушки внешнего и внутреннего статоров; W1', W2', W1'', W2'', W3'' — элементы из магнетического материала; Mq1, Mq2 — постоянные магниты, расположенные в средней части ротора L; Md1', Md1'', Md2'' — постоянные магниты

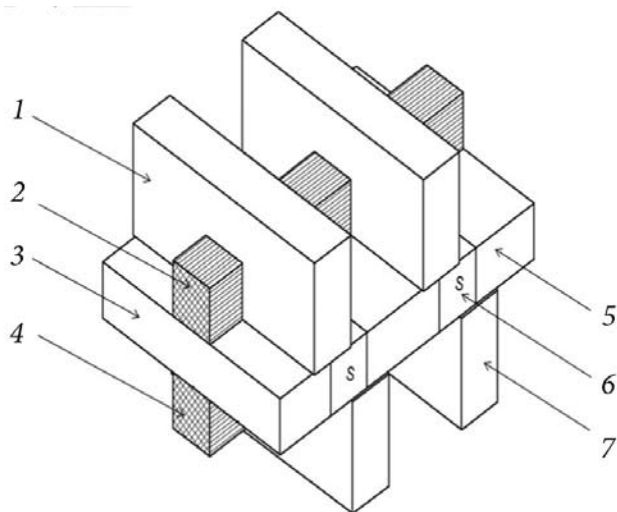


Рис. 2. Упрощенная конструкция двигателя:

1, 2 — сердечник и катушка внешнего статора; 3 — ротор; 4 — катушка внутреннего статора; 5 — диэлектрик; 6 — постоянный магнит; 7 — сердечник внутреннего статора

где  $B_\delta$  — индукция в воздушном зазоре, Тл;  $I_{\max}$  — максимальный ток одной фазы, А;  $w$  — число витков катушки статора;  $l$  — длина части полюса статора, взаимодействующей с ПМ, м.

Средний крутящий момент  $M_{cp}$ , Н·м:

$$M_{cp} = F_{об} D_{cp} / 2,$$

где  $D_{cp} = lk_2$  — средний диаметр по воздушному зазору, м;  $k_2 = D_{cp} / l$  — относительный размер диаметра расточки.

Номинальная мощность двигателя  $P_{ном}$ , Вт:

$$P_{ном} = \frac{\pi B_\delta k_1^2 l^4 k_3 j p k_2 n_{ном}}{45}, \quad (2)$$

где  $a = k_1 l$  — поперечный размер катушки, принятой квадратной формы, м;  $k_3$  — коэффициент заполнения паза медью;  $j$  — плотность тока в катушке, А/м<sup>2</sup>;  $n_{ном}$  — номинальная частота вращения, об/мин.

Выразим основной размер  $l$  из (3):

$$l = \sqrt[4]{\frac{45 P_{ном}}{\pi B_\delta k_1^2 k_3 j p k_2 n_{ном}}}.$$

Особенность этого расчета в корне четвертой степени из значения момента машины.

Для рис. 1 сила взаимодействия на один полюс  $F$ , Н:

$$F_{\max} = 4 B_\delta I_{S1} w_{S1} l. \quad (3)$$

Формула (2) показывает, что электромагнитная сила двигателя с конструкцией, аналогичной рис. 1, в два раза больше конструкции на рис. 2 и (1).

Модель ДГПМП в среде Matlab в режиме ветрогенератора приведена на рис. 3 [17].

Параметры ДГПМП, которые использовались при моделировании, сведены в табл. 2 — 4.

При моделировании ротор имеет номинальный вращающий момент, зависящий в действительности от скорости ветра. Моделирование начинается с нулевой скорости ротора, выражаемой номинальным сопротивлением нагрузки  $R = 3,5$  Ом. После того, как установившаяся операция по скорости достигнута, меняется сопротивление  $R$ : увеличивается с 3,5 до 5,25 Ом.

Результаты моделирования показаны на рис. 4. Если происходит увеличение сопротивления, то уменьшаются ток (см. рис. 4, а), выходная мощность и электромагнитный тормозной момент генератора. Так как ведущий вращающий момент остается постоянным, скорость машины увеличивается (см. рис. 4, б). Это увеличивает

Таблица 2

#### Электрические параметры схемы замещения ДГПМП

Параметр	Значение
Число полюсов ротора, $p$	16
Потокоцепление при номинальной скорости	0,135 Вб·об
Индуктивность катушки	0,0037 Гн
Сопротивление катушки	0,101 Ом
Частота ротора	80 Гц
Сопротивление нагрузки	3,5 Ом

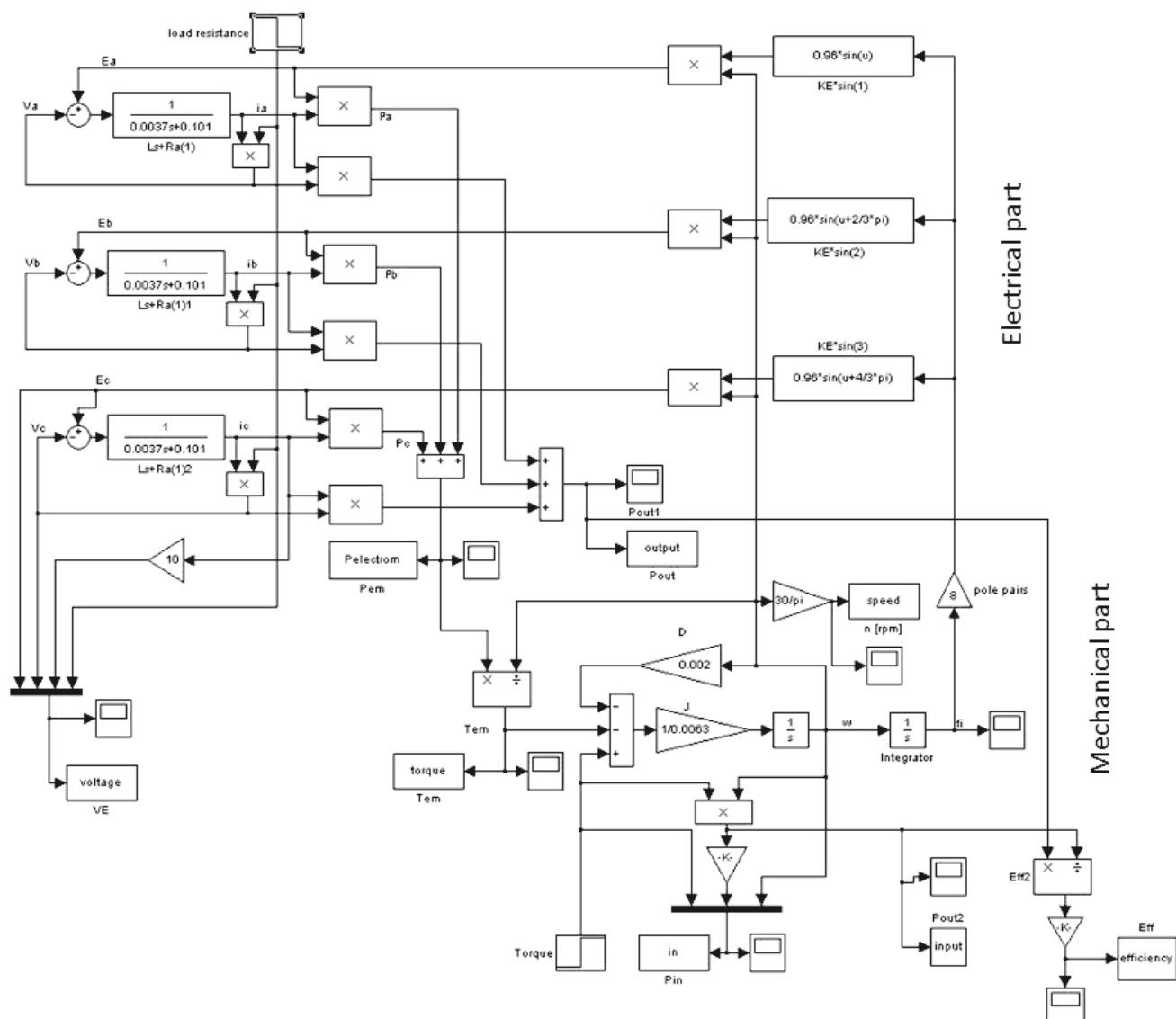


Рис. 3. Модель ДГПМП в Matlab:

VE — напряжение источника питания; load resistance — сопротивление нагрузки;  $T_{em}$  — момент электрической машины;  $T_{torque}$  — момент ветрогенератора;  $P_{in}$  — входная мощность;  $E_{if}$  — КПД;  $P_{out2}$ ,  $P_{out1}$  — выходная мощность механическая и электрическая выходные мощности; speed — скорость вращения

ЭДС (см. рис. 4, а). Более высокая ЭДС поднимает текущий ток близко к начальному уровню (см. рис. 4, а). Электромагнитный момент приблизительно равен вращающему моменту. Выходная мощность машины увеличивается из-за увеличения скорости (рис. 4, б).

На рис 4, а виден процесс скачкообразного изменения тока, значение которого затем стремится к прежнему значению; характерно также увеличение частоты и скорости вращения ДГПМП. На рис 4, б скорость после изменения сопротивления увеличивается, а мощность после скачкообразного провала увеличивается до большего значения, чем до него.

Когда сопротивление нагрузки внезапно уменьшается с 3,5 до 2,33 Ом, ротор вращается с той же самой скоростью из-за инерции, поэтому электродвижущая

сила постоянная. Ток фазы найден из эквивалентной схемы машины, зависит от сопротивления  $R$ , сначала увеличивается, а потом начинает спадать до первоначального значения.

На рис. 5 а, б показаны вращающий и электромеханические параметры генератора, когда сопротивление  $R$  уменьшается с 3,5 до 2,33 Ом. В этом случае поведение электромеханических характеристик противоположно тому, что было обсуждено выше.

Противоположно предыдущему случаю после скачка сопротивления с 3,5 до 2,33 Ом (см. рис 5, а) скорость (частота) вращения и ЭДС уменьшаются, ток увеличивается на несколько периодов. Из рис 5, б следует, что скорость после скачка сопротивления уменьшается, а мощность после первоначального скачка вверх падает до значения ниже первоначального.

Таблица 3

## Номинальные параметры ДГПМП

Параметр	Значение
Номинальный ток	11,55 А
Номинальная скорость	600 об/мин
Номинальное напряжение фазы (ампл.)	60 В
Номинальная сила	1,380 кВт
Число полюсов ротора	16

Результаты моделирования полностью согласованы с физико-техническими процессами, происходящими в ветроэнергетической установке, для которой и предполагается использовать ДГПМП.

Таким образом, двигатель с поперечным магнитным потоком обладает меньшими размерами и лучшими массогабаритными показателями по сравнению с известными машинами. Он имеет более высокий на 2,5% КПД.

Его конструкция имеет большое свободное пространство внутри ротора, что хорошо вписывается в

Таблица 4

## Номинальные параметры ДГПМП

Параметр	Значение
Индуктивность катушки	$L = 0,0037$ Гн
Сопротивление катушки	$R = 0,101$ Ом
Момент инерции ротора	$J = 0,0063$ кг·м <sup>2</sup>
Коэффициент деления	$D = 0,002$
Число пар полюса ротора	$p = 8$
Постоянная ЭДС	$k_E = 0,96$
Сопротивление нагрузки	$R_L = 3,5$ Ом
Момент вращения турбины	$T_T = 18,5$ Н·м

конструкцию мотор-колеса гибридных транспортных средств.

Предложенная методика расчета показывает, что базовый размер пропорционален корню четвертой степени из момента машины;

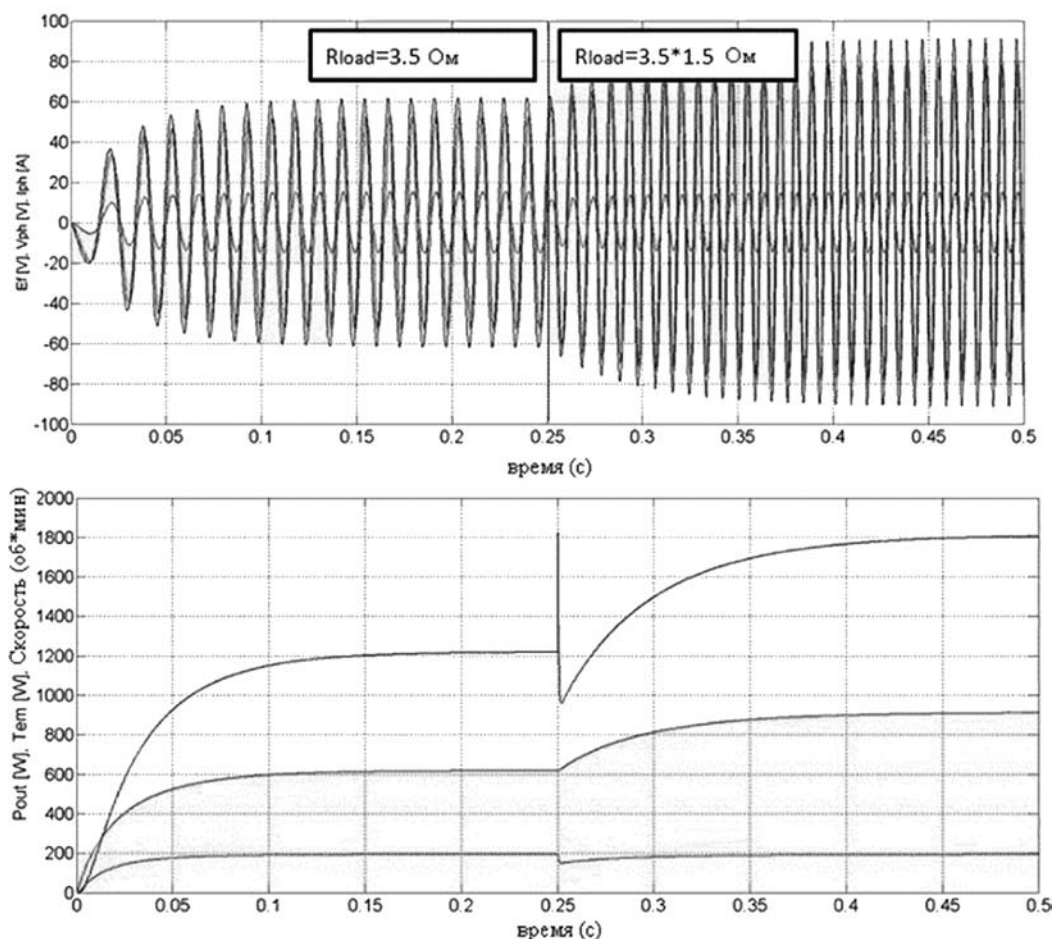


Рис. 4. Электромеханические параметры генератора в динамическом режиме, изменяющемся сопротивлении нагрузки от 3,5 до 5,25 Ом:

а — наведенное и фазовое напряжения с током фазы; б — выходная мощность, скорость и электромагнитный вращающий момент

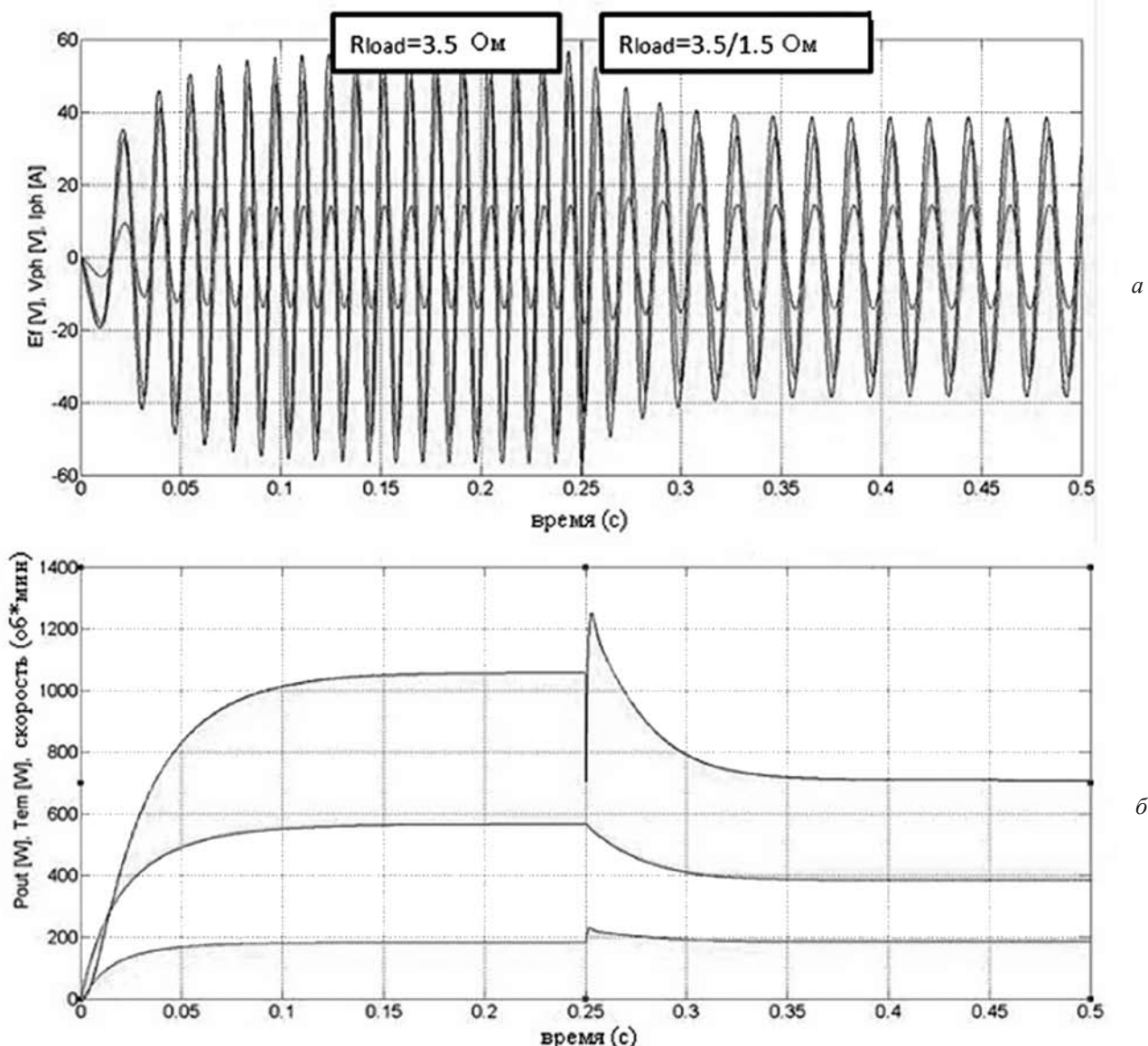


Рис. 5. Электромеханические параметры генератора в динамическом условии, изменяющемся сопротивлении груза от 3,5 до 2,33 Ом:

а — Наведенное и фазовое напряжение с током фазы; б — выходная мощность, скорость и электромагнитный вращающий момент

Данная многополюсная машина имеет низкие пульсации момента.

Высококоэрцитивные постоянные магниты, используемые для возбуждения, должны иметь монолитную конструкцию с ротором ДГПМП.

## Литература

1. Gieras J.F., Wing M. Permanent magnet motor technology. NY.: Marcel Dekker. Inc, 2002.
2. Cosic A. Analysis of a novel transverse flux machine with a tubular cross-section for free piston energy converter application // Doctoral thesis. Stockholm (Sweden): KTH School of Electrical Eng., 2010.

3. Pat. № 5051641 USA. Transversal flow machine in accumulator arrangement, 1991.

4. Pat. № 6952068 USA. Fabricated components of transverse flux electric motors, 2005.

5. Persson M., Jansson P., Jack A.G., Mecrow B.C. Soft magnetic composite materials — use for electrical machines // Proc. IEEE Conf. Electr. Machines Drives. Durham (UK), 1995. P. 242 — 246.

6. Löwenstein L. Kurbelwellen-Starter-Generatoren auf der Basis von Reluktanzmaschinen // Thesis RWTH Aachen. Aachen, 2003.

7. Henneberger G., Bork M. Development of a transverse flux traction motor in a direct drive system

// Proc. Intern. Conf. Electrical Machines. Helsinki (Finland), 2000. P. 1457 — 1460.

8. **Wan Z., Ahmed A., Husain I., Muljadi E.** A novel transverse flux machine for vehicle // *Traction Appl.*, 2015. [Электрон. ресурс]. <http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63661.pdf> (дата обращения 11.08.16).

9. **Popan A.D., Viorel I.A., Blissenbach R.** A passive rotor transverse flux motor, 2002. [Электрон. ресурс]. [http://szabol10.tripod.com/WorkshopVRM/Workshop\\_VRM\\_6.pdf](http://szabol10.tripod.com/WorkshopVRM/Workshop_VRM_6.pdf) (дата обращения 20.08.16).

10. **Ustkoyuncu N., Ramu K.** A performance comparison of conventional and transverse flux linear switched reluctance motors, 2015. [Электрон. ресурс]. <http://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/issues/elk-15-23-4/elk-23-4-4-1305-214.pdf> (дата обращения 22.08.16).

11. **Babazadeh A., Karimi H.R.** Adaptive output tracking of transverse flux machines using neuro-fuzzy approach, 2006. [Электрон. ресурс]. <http://www2.tku.edu.tw/~tkjse/9-2/9-2-5.pdf> (дата обращения 15.08.16).

12. **Ping Zheng e. a.** Analysis and design of a transverse-flux dual rotor machine for power-split hybrid electric vehicle applications, 2013. [Электрон. ресурс]. <http://www.mdpi.com/> (дата обращения 11.08.16).

13. **Huang S., Luo J., Lipo T.A.** Analysis and evaluation of the transverse flux circumferential current

machine, 1997. [Электрон. ресурс]. <http://lipo.ece.wisc.edu/1997pub/97-30.pdf> (дата обращения 01.08.16).

14. **Ji-Young Lee e. a.** Characteristic analysis of a permanent magnet transverse flux linear motor with spiral core, 2013. [Электрон. ресурс]. <http://www.koreascience.or.kr/> (дата обращения 11.08.16).

15. **Jiyoung Lee e. a.** Comparison of transverse flux rotary machines with different stator core topologies, 2014. [Электрон. ресурс]. [http://www.academia.edu/3795193/A\\_Comparison\\_of\\_Radial\\_and\\_Axial\\_Flux\\_Structures\\_in\\_Electrical\\_Machines](http://www.academia.edu/3795193/A_Comparison_of_Radial_and_Axial_Flux_Structures_in_Electrical_Machines) (дата обращения 07.08.16).

16. **Velicu S. e. a.** Computer aided design (cad) of linear transverse flux motors used in drive of the machine tools, 2010. [Электрон. ресурс]. [http://www.eng.upt.ro/aiif/Lucrari\\_PDF2\\_2010/Velicu.pdf](http://www.eng.upt.ro/aiif/Lucrari_PDF2_2010/Velicu.pdf) (дата обращения 03.08.16).

17. **Dobzhanskyi O.** Study on permanent magnet transverse flux machine [Электрон. ресурс]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7219443/> (дата обращения 05.08.16).

*Статья поступила в редакцию 04.04.2016*