

**ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ВЫСОКОБОРОТНЫЙ ГЕНЕРАТОР
ДЛЯ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ**

© 2016 Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, В.И. Бекузин, В.В. Айгузина

Уфимский государственный авиационный технический университет

Статья поступила в редакцию 23.08.2016

В статье показана возможность создания высоковольтного высокооборотного генератора мощностью 230 кВт и массой 30 кг с максимальным КПД и минимальными массогабаритными показателями, определен его проектный облик при частоте вращения 50 000–70 000 об/мин и выходным линейным напряжением 4 кВ, проведены электромагнитные расчеты и экспериментальные исследования.

Ключевые слова: автономные системы, высоковольтный высокооборотный генератор, аморфное железо.

Работа выполнена в рамках гранта государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-6858.2016.8 Фундаментальные исследования электромагнитных и тепловых полей высокооборотных электромеханических преобразователей энергии с учетом требований прочности, с целью их многомерной оптимизации).

Для обеспечения эффективной работы автономных информационных и управляющих комплексов необходима разработка надежного источника электроэнергии. Наиболее перспективным в системах электроснабжения автономных объектов (СЭС АО) является использование высокооборотных электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ) с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ВПМ), которые характеризуются минимальными массогабаритными показателями при максимальной мощности и КПД. При этом мощность высокооборотных ЭМПЭ, используемых в СЭС АО, как правило, не превышает 200 кВт, а линейное напряжение составляет не более 400–600 В [1–5].

Проведенный обзор публикаций [1–5] показал, что вопросы проектирования высоковольтных высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ не освещены в литературе достаточно полно и большая часть исследований посвящена высоковольтным генераторам с электромагнитным возбуждением. При этом согласно [1–5] высоковольтный высокооборотный генератор для АО должен соответствовать следующим критериям: максимальный КПД (более 95 %); минимальные массогабаритные показатели; технологичность конструктивной схемы; возможность использования одного ЭМПЭ, работающего и в генераторном, и в дви-

гательном режиме; возможность работы в импульсном режиме с мощностью, в несколько раз превышающей номинальную; высокая прочность при механических, тепловых и электромагнитных нагрузках и перегрузках; значительный ресурс и долговечность; самовозбуждение при отсутствии на АО дополнительного источника энергии; возможность работы на частотах вращения, соответствующих получению оптимальных характеристик приводного двигателя без применения редуктора. Причем частота вращения ротора исследуемого ЭМПЭ должна составлять 50 000–70 000 об/мин.

Поэтому целью данной работы является определение проектного облика высоковольтного (выходное линейное напряжение 4 кВ) высокооборотного (частота вращения 50 000–70 000 об/мин) генератора мощностью 230 кВт с максимальным КПД и минимальными массогабаритными показателями.

**АКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ,
ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ
ВЫСОКОБОРОТНЫХ ЭМПЭ**

Основные конструктивные и активные материалы, применяемые в высокооборотных ЭМПЭ, рассмотрены в работах [6, 7]. В то же время одна из важных составляющих высоковольтного ЭМПЭ, которая обеспечивает его работоспособность, – обмоточный провод обмотки статора, однако его исследования не приводятся в работах [6, 7]. Изоляция обмоточного провода должна обеспечивать длительный режим работы ЭМПЭ при температуре до 200–250 °С и напряжении более 8 кВ. Известны обмоточные провода DAMID 240 [8], имеющие номинальный диаметр от 0,63 до 2 мм,

Исмагилов Флюр Рашитович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханики.

*Вавилов Вячеслав Евгеньевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электромеханики.
E-mail: s2_88@mail.ru.*

Бекузин Владимир Игоревич, аспирант кафедры электромеханики. E-mail: tiobaldo1@rambler.ru

Айгузина Валентина Владимировна, инженер кафедры электромеханики. E-mail: vtipu@mail.ru

срок эксплуатации 10 лет и напряжение пробоя 10 кВ. Важно отметить, что при проектировании обмоток высокооборотных высоковольтных ЭМПЭ следует учитывать возможность проявления в обмотках эффекта электрической короны, который особенно проявляется при напряжении обмоток более 6 кВ. Суть данного явления заключается в том, что вблизи изоляции обмоток из-за высокой напряженности электрического поля ионизируется воздух и образуется озон, при этом возможно образование азотной кислоты и разрушение изоляции. Для противодействия данному явлению применяются полупроводящие лаки, которые наносятся на поверхность изоляции.

Помимо температурных характеристик, обмоточный провод должен иметь такой номинальный диаметр, при котором обеспечивается максимальная прочность обмотки и технологичность ее выполнения, а также минимальные потери на вихревые токи в проводниках, которые можно определить в следующем виде [9, 10]:

$$P_{\text{вих}} = \frac{\pi B_{\text{max}}^2 (2\pi f)^2 d^4 \sigma l a}{128}, \quad (1)$$

где B_{max} – максимальное значение магнитной индукции; f – частота тока в обмотке; σ – удельная электрическая проводимость материала обмотки; d – диаметр провода; l – полная длина провода; a – число параллельных проводников в обмотке.

Как видно из (1), потери на вихревые токи определяются геометрическими размерами проводников обмотки, магнитной индукцией и частотой. Максимальное значение магнитной индукции варьируется в зависимости от конструкции пазовой зоны ЭМПЭ.

Так, в высоковольтном генераторе мощностью 230 кВт с внешним диаметром статора 180 мм, немагнитным зазором 5–7 мм и полузакрытым пазом максимальное значение магнитной индукции составляет 0,07–0,09 Тл, потери на вихревые токи в проводниках при диаметре провода 0,63 мм и частоте 2000 Гц составляют 156 Вт [11].

При открытом пазе для высоковольтного генератора с такими же размерами и параметрами максимальное значение магнитной индукции составляет 0,11–0,13 Тл, соответственно, потери на вихревые токи при диаметре провода 0,63 мм и частоте 2000 Гц составляют 326 Вт [11].

Максимальное значение индукции и, соответственно, максимальные потери имеют место в беспазовом ЭМПЭ. Для рассмотренных параметров максимальная индукция в беспазовом ЭМПЭ составляет 0,3–0,4 Тл, соответственно, потери на вихревые токи в проводниках при диаметре провода 0,63 мм и частоте 2000 Гц составляют 2184 Вт. Поэтому в беспазовых высокооборотных высоковольтных генераторах необходимо выбирать

такой диаметр провода, при котором потери на вихревые токи будут минимальными, однако необходимо учитывать усложнение технологии изготовления обмотки при уменьшении диаметра обмоточного провода. В частности, здесь можно рекомендовать провод Mediotherm 200 с температурным индексом 200, напряжением пробоя 10 кВ и номинальным диаметром 0,07–6 мм [12].

Поэтому в дальнейшем в статье при расчетах для беспазового генератора используется провод Mediotherm 200 диаметром 0,1 мм, для высоковольтного генератора с открытым пазом – Mediotherm 200 диаметром 0,5 мм, для высоковольтного генератора с полузакрытым пазом – DAMID 240 диаметром 0,63 мм.

В качестве материала для изготовления ВПМ высокооборотного высоковольтного ЭМПЭ, согласно рекомендациям, представленным в [9, 10], выбираются ВПМ марки Sm_2Co_{17} , в качестве материала для изготовления бандажной оболочки ротора выбирается углепластик, для изготовления вала – сталь 30ХГСА.

Особое внимание при проектировании высокооборотных высоковольтных ЭМПЭ необходимо уделять материалу, из которого изготавливается магнитопровод статора. Основное требование к активным материалам для изготовления магнитопровода высоковольтных высокооборотных ЭМПЭ – минимальные удельные потери на вихревые токи и гистерезис, которые, согласно [6], в зависимости от частоты вращения ротора при синусоидальном магнитном потоке, определяются в виде:

$$P_{\text{уд}} = k_{\text{гист}} B^2 \frac{pn}{60} + k_{\text{вих}} \left(B \frac{pn}{60} \right)^2 + k_{\text{доб.вих}} \left(B \frac{pn}{60} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (2)$$

где $k_{\text{гист}}$, $k_{\text{вих}}$, $k_{\text{доб.вих}}$ – коэффициенты потерь на гистерезис, вихревые токи и добавочные вихревые токи соответственно, B – максимальная плотность потока, n – частота вращения ротора; p – число пар полюсов.

Для рассматриваемого высоковольтного генератора при массе магнитопровода статора 10 кг, индукции в магнитопроводе 1,3 Тл и частоте напряжения 1 000–2 000 Гц при применении стали Vascoflux 48 с толщиной листа 0,1 мм потери в железе варьируются от 400 до 1 100 Вт [13].

При применении стали 10JNEX900 с толщиной листа 0,1 мм на частоте 1 000–2 000 Гц и индукции 1,3 Тл удельные потери составляют от 450 до 1 200 Вт [7].

При использовании аморфного железа *Metglas* 2605 SA1 [14] при частоте напряжения 1 000–2 000 Гц и индукции 1,3 Тл потери составляют от 60 до 90 Вт, что меньше других рассмотренных вариантов в 7–8 раз. Поэтому одной из перспектив для высокооборотных ЭМПЭ является применение в магнитопроводах аморфного железа, например *Metglas* 2605 SA1.

Недостатками, ограничивающими применение аморфного железа, является его низкая индукция насыщения (1,4–1,5 Тл), за исключением сплава *Metglas 2605CO*, который имеет индукцию насыщения 1,8 Тл, а также сложность изготовления из них магнитопроводов.

В высокооборотном высоковольтном генераторе для обеспечения механической прочности ротора используется бандажная оболочка, что приводит к увеличению воздушного зазора и снижению основной гармоники магнитной индукции в воздушном зазоре до 0,6–0,5 Тл. С учетом температурного размагничивания ВПМ и размагничивания под действием магнитного поля реакции якоря основная гармоника магнитной индукции в воздушном зазоре может снижаться до 0,4–0,45 Тл (при беспазовой конструкции основная гармоника магнитной индукции в воздушном зазоре может снижаться до 0,25–0,3 Тл), при этом не будет происходить насыщения магнитопровода.

Для решения проблем технологичности применения аморфного железа разработаны различные способы производства магнитопроводов [15, 16], наиболее простым из которых является беспазовая конструкция. Поэтому представляется целесообразным при выборе конструктивной схемы высоковольтного высокооборотного ЭМПЭ произвести сравнение конструктивных исполнений магнитопровода, выполненного штамповкой из электротехнической стали, и различных конструкций магнитопроводов, выполненных из аморфного железа *Metglas 2605 SA1*.

ВЫБОР КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭМПЭ

При выборе конструктивной схемы высоковольтного высокооборотного генератора рассматривались следующие варианты конструктивного исполнения:

- высоковольтный генератор с распределенной обмоткой и шихтованным магнитопроводом из электротехнической стали (3 % Si, толщина листа 0,18 мм; вариант 1);

- высоковольтный генератор с зубцовой обмоткой и магнитопроводом из аморфного железа конструкции, предложенной в [15], или с магнитопроводом из аморфного железа модульной конструкции, где каждый модуль является отдельной фазой генератора (вариант 2); электромагнитные характеристики данных конструкций являются аналогичными; их отличие состоит в том, что модульная конструкция имеет более высокий уровень критических частот вращения благодаря возможности введения дополнительных подшипниковых опор;

- высоковольтный беспазовый генератор с кольцевой обмоткой и магнитопроводом из

аморфного железа конструкции, предложенной в [7] (вариант 3);

- низковольтный генератор, сочлененный с повышающим трансформатором (вариант 4).

Расчеты производились с использованием аналитических методик, представленных в работах [7, 17], а также с помощью программного комплекса *Ansoft Maxwell*. Результаты расчетов представленных конструктивных схем и их сравнение приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что наиболее эффективными конструктивными исполнениями высоковольтного высокооборотного генератора мощностью 230 кВт являются два варианта: высоковольтный высокооборотный генератор с распределенной трехфазной обмоткой (вариант 1) и высоковольтный беспазовый генератор с кольцевой обмоткой и магнитопроводом из аморфного железа (вариант 3), так как они обладают минимальной массой (39 кг и 30 кг соответственно) по сравнению с прочими конструктивными аналогами при электрическом КПД 98 %. Также с использованием программного комплекса *Ansoft Maxwell* авторами были произведены электромагнитные расчеты данных конструктивных исполнений.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В результате получены основные характеристики (табл. 1) высоковольтного высокооборотного генератора с трехфазной распределенной обмоткой (вариант 1) и беспазового высоковольтного высокооборотного генератора с кольцевой обмоткой и магнитопроводом из аморфного железа (вариант 3) мощностью 230 кВт, с частотой вращения ротора 60 000 об/мин, частотой напряжения 2000 Гц, материал ВМП – Sm_2Co_{17} .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проверки полученных результатов в ФГБОУ ВО «УГАТУ» был разработан макет мало-мощного беспазового ЭМПЭ (330 Вт). Радиальные и диаметральные размеры мало-мощного макета соответствуют расчетным геометрическим размерам (таблица 2), при этом активная длина макета в 10 раз меньше и составила 20 мм. Для сохранения постоянства немагнитного зазора на статоре был установлен немагнитный неэлектропроводящий экран.

Макет выполнен мало-мощным, так как ввиду отсутствия насыщения в магнитопроводе ЭМПЭ возможно линейное масштабирование его напряжения и мощности от длины и частоты вращения.

Ротор экспериментального макета был выполнен четырехполюсным из ВМП Sm_2Co_{17} . Частота вращения ротора экспериментального макета составляла 800 об/мин. Число витков в

Таблица 1. Критериальное сравнение вариантов конструктивного исполнения высоковольтного высокооборотного генератора

	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Номинальная мощность, кВт	230	230	230	230
Фазное напряжение, В	2000	2000	2000	Генератора 235 В, на выходе из трансформатора 2000 В
Число пар полюсов	2	2	2	2
Потери в меди, Вт	1052	2475	2100	–
Потери в магнитопроводе статора, Вт	1830	125	65	–
Потери на вихревые токи, Вт	156	147	110	–
Механические потери, Вт	830	830	830	830
Суммарные потери	3868	3577	3105	
Технологическая сложность изготовления	Технология изготовления отработана	Техно-логия изготовления новая и обладает значительной сложностью	Технология изготовления простая и отработанная	Технология изготовления отработана, сложность заключается в необходимости изготовления трансформатора
КПД системы	0,988	0,988	0,989	генератора $\eta_g = 0,988$ трансформатора $\eta_t = 0,97$. Полный КПД: $\eta_{\Sigma} = \eta_g \eta_t = 0,958$
Масса активных элементов, кг	39	52–55	30	85 (масса системы)

Таблица 2. Расчетные характеристики высоковольтных высокооборотных ЭМПЭ под нагрузкой пазового и беспазового исполнения

	Вариант 1	Вариант 3
Номинальный действующий ток, А	48,27	40
Действующее фазное напряжение, В	2012	2007
Число пазов	24	–
Число витков в фазе	72	200
Число проводников в пазу	18	3400
Число параллельных жил в проводнике	21	340
Диаметр голой жилы, мм	0,63	0,1
Высота ВПМ, мм	15	12
Масса, кг	39	30

фазе – 100. Для удобства намотки использовался провод диаметром 1,2 мм. В результате вращения при частоте 800 об/мин действующее выходное напряжение исследуемого макета составило 3,5 В (рис. 1).

Выходное напряжение, масса и мощность полномасштабного экспериментального образца

определялись с использованием метода линейного масштабирования на основе экспериментальных данных, полученных для маломощного макета.

Так как длина полноразмерного беспазового генератора, рассчитываемого в статье, в 10 раз больше, а скорость вращения больше в 75 раз,

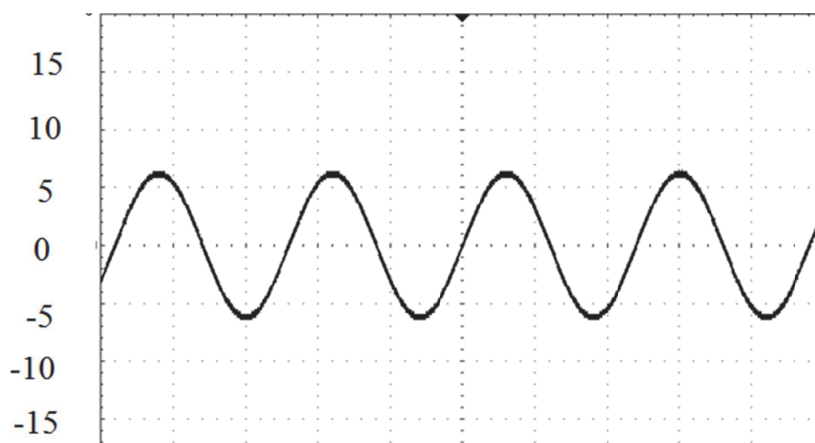


Рис. 1. Результаты экспериментальных исследований беспазового высоковольтного генератора

чем в макете, то, с учетом линейной зависимости выходного напряжения генератора от скорости и длины, величина выходного напряжения полно-размерного генератора составит 2 625 В. Это подтверждает результаты компьютерного моделирования и аналитических расчетов. Аналогичный результат получается с массой и мощностью генератора. То есть полученные расчетные результаты подтверждаются экспериментальными исследованиями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье показана возможность создания высоковольтного высокооборотного генератора мощностью 230 кВт и массой 30 кг. Определен проектный облик высокооборотного (частота вращения 50 000–70 000 об/мин) высоковольтного генератора (выходное линейное напряжение 4 кВ) мощностью 230 кВт с максимальным КПД и минимальными массогабаритными показателями, а также проведены его электромагнитные расчеты и экспериментальные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kolondzovski Z., Arkkio A., Larjola J. Power Limits of High-Speed Permanent Magnet Electrical Machines for Compressor Applications // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2011. Vol. 26. № 1. P. 73–82.
2. Saban M., Gonzalez-Lopez D., Bailey C. Test Procedures for High-Speed Multimegawatt Permanent Magnet Synchronous Machines // IEEE Transactions on Industry Applications. 2010. Vol. 46. № 5. P. 1769–1777.
3. Borisavljevic A., Polinder H., Ferreira J. On the Speed Limits of Permanent-Magnet Machines // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. Vol. 57. № 1. P. 220–227.
4. Chuchalin A.I., Safyannikov I.A., Rossomakhin I.N. High Voltage Electrical Machine Disk Generator // International Conference on Electrical Machines, ICEM 98 Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, September 2-4, 1998. Pp.530-534.
5. Intini Marques R., Gabriel S.B. Dual Stage Four Grid (DS4G) Ion Engine for Very High Velocity Change Missions // 31st International Electric Propulsion Conference, Ann Arbor, Michigan, USA September 20-24, 2009.
6. Co Huynh, Liping Zheng, Dipjyoti Acharya. Losses in High Speed Permanent Magnet Machines Used in Microturbine Applications // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – March 2009. – Vol. 131.
7. Borisavljevic A. Limits, Modeling and Design of High-Speed Permanent Magnet Machines // Printed by Wormann Print Service. Zutphen, the Netherlands, 2011. P. 209.
8. Damid 240. URL: <http://www.smithbv.nl/cms/userfiles/files/DAMID-240.pdf>
9. Электрический самолет: концепция и технологии / А.В. Левин, С.М. Мусин, С.А. Харитонов, К.Л. Ковалёв, А.А. Герасин, С.П. Халютин/ Уфа: УГАТУ, 2014. 388 с.
10. Elliott Energy Systems, Inc. 2901 S.E. Monroe Street Stuart, FL 34997 772-219-9449. [Электронный ресурс] URL: <http://www.tapower.com> (дата обращения 21.07.2017).
11. Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. Коэффициент полезного действия высокоскоростных электромеханических преобразователей энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. № 2 (538). С. 12-19.
12. Enamelled Copper Wires. URL: <http://www.etem.bg/products/bg/229/brochures/copper-wires.pdf> (дата обращения 21.07.2017).
13. Hans-Christian Lahne, Dieter Gerling. Investigation of High-performance Materials in Design of a 50000 rpm Highspeed Induction Generator for Use in Aircraft Applications // AST 2015, February 24–25, Hamburg, Germany, pp. 1–10.
14. Magnetic Alloy 2605SA1 (iron-based). URL: <http://www.elnamagnetics.com/wp-content/uploads/library/Metglas/2605SA1.pdf> (дата обращения 21.07.2017).
15. Nicholas J. De Cristofaro, Dung A. Ngo, Richard L. Bye, Jr., Peter J. Stamatias, Gordon E. Fish Amorphous metal stator for a radial-flux electric motor // patent US6960860 B1, H02K1/14, H02K1/12, H02K15/02, 01.10.2005.
16. Man Mohan. A synchronous machine with amorphous

core // International Journal of Engineering Science and Technology. Vol. 4, No.06. June 2012. P. 2596–2560.
17. Nikita Uzhegov, Janne Nerg and Juha Pyrhonen. Design

of 6-slot 2-pole High-Speed Permanent Magnet Synchronous Machines with Tooth-Coil Windings // ICEM 2014, At Berlin, Germany, Pp. 2525-2530.

HIGH-VOLTAGE HIGH-SPEED GENERATOR FOR AUTONOMOUS SYSTEMS

© 2016 F.R. Ismagilov, V.E.Vavilov, V.I. Bekuzin, V.V. Ayguzina

Ufa State Aviation Technical University

The article shows the possibility of creating high-speed high-voltage generator with a capacity of 230 kW and a weight of 30 kg with maximum efficiency and minimum size-weight parameters, its design at speed of 50 000-70 000 rpm and output linear voltage of 4 kV is determined, electromagnetic calculations and experimental studies are represented.

Keywords: autonomous systems, high-speed high-voltage generator, amorphous alloys.

Flur Ismagilov, Doctor of Technics, Professor, Head at the Electromechanics Department.

Vyacheslav Vavilov, Candidate of Technics, Senior Lecturer at the of Electromechanics Department. E-mail: s2_88@mail.ru

Vladimir Bekuzin, Graduate Student at the Electromechanics Department. E-mail: tiobaldo1@rambler.ru

Valentina Ayguzina, Student at the Department of Electromechanics. E-mail: vtipy@mail.ru