

* * *

Сверхскоростные и сверхскоростные синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов (обзор зарубежных публикаций)

ШУМОВ Ю.Н., САФОНОВ А.С.

Рассмотрены тенденции развития, достижения и проблемы в области сверхскоростных и сверхскоростных синхронных электрических машин с постоянными магнитами мощностью от 1 кВт до нескольких мегаватт с частотой вращения от 10×10^3 до 500×10^3 мин⁻¹. Представлены некоторые данные синхронных машин с постоянными магнитами на основе обзора зарубежных публикаций.

Ключевые слова: обзор, синхронные машины, постоянные магниты, высокая и ультравысокая скорости, потери в роторе, углеволоконный бандаж, расчет нагрева, намагничивание по Халбаху, беспазовый статор, газовый турбогенератор, микротурбина, турбокомпрессор, электрохимический накопитель энергии

Согласно [1] синхронные машины с постоянными магнитами (СМПМ) подразделяются на сверхскоростные при частоте вращения $(100, 200) \times 10^3$ мин⁻¹ и сверхскоростные при частоте вращения более 200×10^3 мин⁻¹. Для удобства изложения указанные СМПМ будем называть сверхскоростными. Следует отметить, что среди российских публикаций практически отсутствуют сведения о разработках в данной области. Поэтому с целью выявления особенностей конструкции, технологического уровня и актуальности таких разработок в РФ произведен обзор зарубежных публикаций, доступных для бесплатного пользования в Интернете.

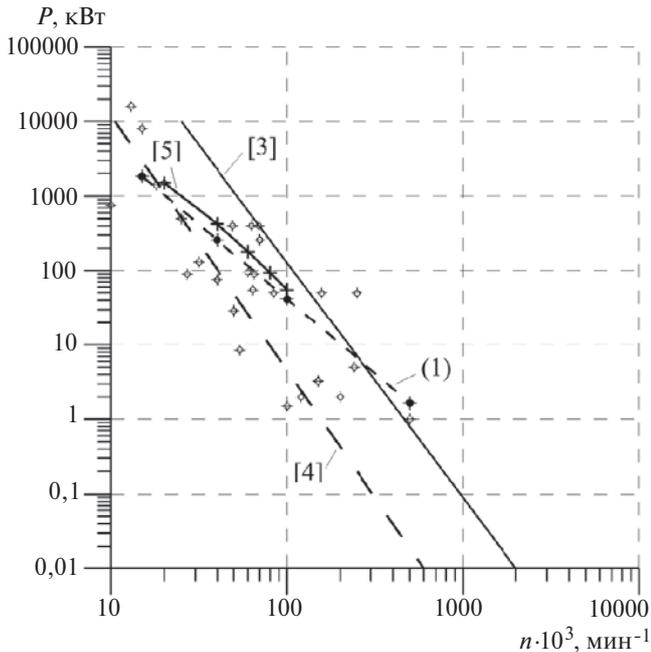
Как показано в [2], предельная мощность электрической машины (ЭМ) при прочих равных условиях обратно пропорциональна квадрату частоты вращения, что объясняется ограничением допустимого размера диаметра ротора по соображениям его прочности. Поэтому если при частоте вращения порядка 10×10^3 мин⁻¹ можно выполнить ЭМ мощностью в несколько мегаватт, то при частоте вращения порядка 10^6 мин⁻¹ – в несколько ватт.

В соответствии с [2] формула для предельной мощности СМПМ без учета $\cos \varphi$ и КПД и ряде упрощений имеет вид

$$P = \frac{81,05 \times 10^3 V^3 l A B_d}{n^2}, \quad (1)$$

где V – линейная окружная скорость, м/с; B_d – магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл; A – линейная нагрузка, А/см; n – частота вращения, мин⁻¹; $l = l_d / D_i$ – относительная длина пакета железа статора; l_d – длина пакета железа статора, мм; D_i – внутренний диаметр статора, мм. Значения этих параметров для разных СМПМ имеют пределы: A – от 100 (микромашин) до (800–1000) А/см; индукция B_d – от 0,4 до 0,8 Тл; $V = 200, 250$ м/с; $l = 1, 3$. В [3] принимается, что предельная $P \sim 1/n^3$, а в [4] считается $P \sim 1/n^{3,6}$.

На рисунке в логарифмическом масштабе показаны зависимость $P = f(n)$, построенная по (1) для средних значений $B_d = 0,6$ Тл, $V = 220$ м/с, $A = 400$ А/см, $l = 2$, а также аналогичные зависимости по [3], [5] и [4], точками отмечены реальные СМПМ, на которые есть данные в открытом доступе Интернета.



Зависимости предельной мощности СМПМ от частоты вращения, рассчитанные по (1), а также полученные по [3–5]

Области применения сверхскоростных СМПМ непрерывно расширяются. Самая значительная из них — в качестве двигатель-генераторов (Г/Д) газовых турбин мощностью от 20 МВт при $n = 10 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$ до 1 кВт при $n = 500 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$. Машины мощностью менее 1 кВт при ультравысоких частотах вращения используются в силовых микроэлектромеханических системах [1].

Для турбогенераторов мощностью менее десяти мегаватт характерно отсутствие единообразия в терминологии. Так, микротурбогенераторами (МТГ) принято называть машины мощностью от 25 до 250 кВт [6, 7], в то же время ведутся интенсивные разработки и исследования МТГ в диапазоне от нескольких киловатт до нескольких ватт. Их также называют микротурбогенераторами, и только в публикациях некоторых авторов они названы ультрамикротурбогенераторами [3]. Для МТГ мощностью менее 1 кВт применяются также термины: «meso scale» (крупногабаритный ультрамикро) [8], «palm-size gas turbogenerator» (размером с ладонь МТГ) [3], «finger top size» (размером с полпальца) [3]. Естественно, и ЭМ, входящие в состав таких МТГ, являются микромашинами.

На одном валу МТГ располагаются ротор ЭМ, компрессор и турбина. При запуске турбины ЭМ работает в режиме двигателя. В качестве генератора, как правило, используются СМПМ. Опытные образцы МТГ с асинхронными машинами (АМ), за исключением ультрамикротурбогенераторов и вентильно-индукторных реактивных машин (ВИРМ), не были внедрены в производство [2, 9, 10].

Преимущества использования СМПМ в составе МТГ: отсутствие обмоток на роторе, отсутствие в роторе основных потерь (кроме добавочных), надежность, простота обслуживания, более высокие значения КПД (η) и $\cos \varphi$ по сравнению с другими типами бесконтактных ЭМ. Недостатки: возможность размагничивания постоянных магнитов (ПМ) при работе в условиях высокой температуры (более 150, 350 °С в зависимости от марки ПМ), невозможность гашения поля в аварийных режимах.

Рассмотрим опыт зарубежных фирм-разработчиков и производителей СМПМ и их конструктивные особенности.

МТГ с СМПМ производят Capstone Turbine corp., Elliott Energy (Calnetix), Honeywell, Bowman Power Systems, Northern Research and Eng. corp., Allison Engine corp., Willams international (США), Turbec (Швеция), Siemens (Германия), Toyota, Nissan, Hitachi, Kawasaki (Япония) и др. Разработками новых типов МТГ и СМПМ (сверхскоростных на P^3 1 кВт) для них занимаются — ETH Zurich, Celeroton (Швейцария), ONERA (Франция), KUL, Royal Military Academy IMEC (Бельгия), Tohoku Univ., Univ. of Tokyo, Tokyo Institute of Technology, Mitsubishi Heavy Industries, Nagasaki Univ. (Япония). УльтрамикромТГ разрабатывают MIT (США), KUL (Бельгия), NEDO (Япония), ETH Zurich (Швейцария) и др. [1, 3, 11]. Отсюда видна перспективность разработок сверхскоростных СМПМ малой мощности.

В качестве ПМ в СМПМ применяются, как правило, интерметаллические соединения на основе редкоземельных металлов — NdFeB и SmCo. Преимущества NdFeB — более высокая энергия, чем у SmCo, достаточно низкая цена; недостатки — низкая температура размагничивания (температура Кюри), склонность к коррозии.

Наиболее распространена конструкция СМПМ с радиальным потоком ПМ, в некоторых конструкциях МТГ — намагничивание ПМ по Халбаху (радиально-тангенциальное) [12, 13], с аксиальным магнитным потоком у ультрамалых МТГ [1]. Как правило, ПМ располагаются на периферии ротора. В качестве бандажа используются или наматываемый на ПМ углеволоконный материал, пропитываемый эпоксидной смолой, или труба (гильза) из немагнитного металла [чаще Inconel 718 (сплав Ni, Co, Cr), титановый сплав или нержавеющая сталь — реже]. Достоинство углеволоконного композита — более высокая прочность, чем у самых прочных (авиационных) сплавов; недостатки — высокая стоимость, плохая теплопроводность, что способствует дополнительному нагреву ПМ добавочными потерями от высших гармонических. Новые техно-

логии по намотке и компаундированию такого бандажа разрабатывает, в частности, gosseta Technik GmbH (Германия).

СМПМ в моделях Capstone C30, C65 имеют, соответственно, $P=30, 65$ кВт и $n=96 \times 10^3$ мин⁻¹, а модель C200 – $P=200$ кВт и $n=60 \times 10^3$ мин⁻¹. Эти модели, имеющие наибольшую популярность на рынке, в частности потому, что в них установлены динамические воздушные подшипники, не требующие смазки, поставляются и в РФ.

МТГ фирмы Calnetix Power Solution (Elliott Energy Systems Inc.) имеет $P=100$ кВт, $n=68 \times 10^3$ мин⁻¹, на свободном конце вала установлен подшипник качения с плавающими кольцами и керамическими шариками (между цилиндром ротора СМПМ и компрессором) – гидродинамический подшипник. Подшипники смазываются высококачественным синтетическим маслом.

Turbec (Швеция) выпускает МТГ типа HISEM 110/70, причем в этой конструкции используется СМПМ фирмы АВВ [14, 15], подшипники шариковые с масляной смазкой. Магниты марки NdFeB, бандаж для них – углеволоконный композит. Число полюсов $2p=4$, внешний диаметр статора $D_a=135$ мм, $l_d=160$ мм, $V=242$ м/с, $l=2,3$, $h=97\%$, число пазов статора $Z_1=24$, пазы открытые. Над магнитами установлен медный экран для уменьшения в них добавочных потерь.

Фирмой Ohio State Univ. (США) выполнено шесть проектов СМПМ для МТГ [16]. Некоторые данные одного из проектов: $P=400$ кВт, $n=69 \times 10^3$ мин⁻¹, $Z_1=36$, $2p=6$, $V=200$ м/с, $D_a=133$ мм, диаметр ротора $D_2=55,4$ мм, $l_d=166$ мм, $l=2,8$, глубина паза $h_{z1}=10$ мм, высота магнита $h_m=20$ мм.

Electrotechnology Research (Корея) разработала СМПМ для МТГ мощностью 65 кВт, $n=69 \times 10^3$ мин⁻¹. Пакет статора выполнен из кремнистой стали толщиной $D=0,35$ мм, ПМ марки NdFeB, подшипники гидродинамические.

Фирма Florida Inst. of Technology (США) спроектировала СМПМ для МТГ со следующими данными: $P=1,5$ кВт, $n_H=100 \times 10^3$ мин⁻¹ (63×10^3 – 136×10^3 мин⁻¹), $D_a=33$ мм, $l_d=31,75$ мм, $Z_1=24$, $2p=4$, $D_i=21,6$ мм, $D_2=19,6$ мм, механический воздушный зазор $d_{\text{мех}}=1$ мм, толщина бандажа $d_{\text{банд}}=1$ мм, $h_m=1,5$ мм, ПМ – SmCo, $h=(92,4–94,8)\%$, масса 0,22 кг; проведено сравнение вариантов: ПМ – NdFeB или SmCo.

Одна из фирм в США для армии выпускает МТГ типа LTS22 мощностью $P=15$ кВт, $n=127 \times 10^3$ мин⁻¹, причем масса машины в 34 раза меньше, чем аналогичного дизельного генератора на $n=3600$ мин⁻¹. Некоторые технические данные СМПМ, встроенного в турбоагрегат: $Z_1=6$, число

пазов на полюс и фазу $q=0,5$, обмотка статора концентрическая зубцовая, $2p=4$, бандажная гильза из прочного сплава, ПМ из Sm₂Co₇ с температурой Кюри 350 °С, две катушки на фазу, сдвинутые на 180°. Обмотка залита эпоксидной смолой. Сталь статора Нурегсо 50, $h=97,1\%$, $D_a=61,25$ мм, $D_2=25,2$ мм, $l_d=58,8$ мм, $l=2,17$, $V=160$ м/с. Число эффективных проводников в катушке $S_n=7$; $A=350$ А/см, форсированное воздушное охлаждение [17].

KUL (Бельгия) и ETH Zurich, Celeroton (Швейцария) ведут исследования по созданию СМПМ $P=1$ кВт, $n=500 \times 10^3$ мин⁻¹ для МТГ. В KUL разработана турбина с такими параметрами, но, очевидно, не удалось разработать надежный генератор, в качестве которого решено использовать ВИРМ. При этом утверждалось, что ВИРМ имеет массивный ротор, поэтому весьма подходит для такой высокой частоты вращения. Однако не учтено, что в отличие от СМПМ сердечник ротора ВИРМ переманчивается, а это приводит к значительным потерям при нешихтованном сердечнике. Шихтовка же значительно уменьшает прочность ротора. Кроме того, ротор имеет зубцы, что значительно увеличивает потери на вязкое трение (трение о воздух). Поэтому ВИРМ не нашли промышленного применения в МТГ. Использовать же СМПМ при весьма малых габаритах такого МТГ (110×100 мм) невозможно, так как обеспечить приемлемую температуру в зоне ПМ затруднительно, поскольку источник высокой температуры расположен близко к ПМ; АМ с массивным ротором также не подходит для данной конструкции из-за больших потерь и низкого $\cos \phi$. Вместе с тем в ETH Zurich разработана и испытана СМПМ на $P=1$ кВт, $n=500 \times 10^3$ мин⁻¹. Некоторые параметры этой СМПМ: $D_a=25$ мм, $D_i=18$ мм, $l_d=30$ мм, $D_2=10$ мм, статор беспазовый, обмотка многожильная, проводники обмотки $38 \times \text{Æ}0,071$ мм, $A=156$ А/см, $V=260$ м/с, $l=1,7$, $h=96,5\%$, сталь сердечника аморфная 2605SA1, подшипники магнитные активные [1, 18, 19].

В Univ. of Technology (Darmstadt, Германия) совместно с АВВ (Швеция) разработана СМПМ для микротурбогенератора со следующими данными: $P=40$ кВт, $n=40 \times 10^3$ мин⁻¹, $D_i=90$ мм, $l_d=90$ мм, $l=1$; $Z_1=36$, $2p=4$, $d=3,2$ мм, ПМ – SmCo, $D_{\text{банд}}=4,8$ мм, $h=91,8\%$, $V=176$ м/с, бандаж для ПМ – углеволоконный композит [20].

В The Ohio State Univ. (США) создан проект СМПМ для газового микротурбогенератора на $P=400$ кВт, $n=62,9 \times 10^3$ мин⁻¹. Некоторые данные: $Z_1=36$, $2p=6$, $D_a=140$ мм, $l_d=152$ мм, $D_2=60,8$ мм, $l=2,3$; высота яра статора $h_j=7,09$ мм,

$h = 98,8\%$, $h_m = 20$ мм, $d = 2$ мм [16]. Здесь же разработан другой проект СМПП для МТГ со следующими данными: $P = 400$ кВт, $n = 49,2 \times 10^3$ мин⁻¹, $D_a = 160$ мм, $l_d = 119$ мм, $D_2 = 78$ мм, $h_j = 9$ мм, $h = 98,9\%$, $Z_1 = 36$, $2p = 6$, $l = 1,45$.

Созданная в Tokai Univ. (Япония) СМПП для МТГ имеет данные: $P = 90$ кВт, $n = 65 \times 10^3$ мин⁻¹, $Z_1 = 21$, $D_a = 180$ мм, $l_d = 240$ мм, $2p = 4$, $q = 1^3/4$, бандажная гильза для ПМ – из сплава Inconel, $D_{\text{банд}} = 3$ мм, охлаждение жидкостное [21].

Calnetix разработала СМПП для МТГ на $P = 120$ кВт, $n = 70 \times 10^3$ мин⁻¹ с параметрами: $Z_1 = 24$, $2p = 4$, $D_a = 101,6$ мм, $D_i = 63,8$ мм, $V = 220$ м/с, индукция в яре статора $B_j = 1,45$ Тл, индукция в зубце статора $B_{z1} = 1,17$ Тл, $A = 1110$ А/см [22].

Наряду со встроенными в МТГ генераторами на $P < 500$ кВт выпускается или разрабатывается ряд моделей сверхскоростных СМПП в мегаваттном диапазоне до 20, 30 МВт для газовых турбин и турбин, работающих на перегретом паре.

Мировыми лидерами по производству мощных СМПП для нефтегазовой промышленности являются FMC Technologies и Calnetix (США). Разработкой таких СМПП до 2009 г. занималась Direct Drive Systems (отделение Calnetix), которая объединилась с FMC Technologies [23, 24]. Разработаны и производятся три типоразмера: Frame2 – $P = 2$ МВт, $n = 22,5 \times 10^3$ мин⁻¹, $h = 97,5\%$, масса $G = 1315$ кг, $l' b' h = 1,1 \times 0,7 \times 0,6$ м; Frame8 – $P = 8$ МВт, $n = 15 \times 10^3$ мин⁻¹, $h = 97,5\%$, $G = 4070$ кг, $l' b' h = 2,2 \times 0,9 \times 1$ м; Frame12 – $P = 12$ МВт, $n = 11 \times 10^3$ мин⁻¹, $h = 97,5\%$, $G = 10433$ кг, $l' b' h = 3,0 \times 0,5 \times 0,7$ м. Все СМПП имеют шариковые подшипники с масляной смазкой или активные магнитные подшипники (АМП). Типоразмер Frame2 разработан Calnetix, затем исследовался и дорабатывался в Direct Drive Systems. Некоторые его технические данные: $Z_1 = 48$, пазы открытые, $2p = 4$, $V = 250$ м/с. Бандаж для ПМ – углеволоконный композит на основе полиэфиркетонной смолы. Сталь сердечника статора – кремнистая. Масса ротора 900 кг, охлаждение алюминиевого кожуха – водно-спиртовая смесь. Два радиальных АМП – упорный, а также страховочный с керамическими шариками. По желанию заказчика выпускается модификация с двумя сдвоенными шариковыми подшипниками с угловым контактом и масляной смазкой [23, 24].

Calnetix по заказу British Royal Navy разработала СМПП для военно-морского флота ($P = 2$ МВт, $n = (19, 22, 5) \times 10^3$ мин⁻¹). При проектировании руководствовались желанием иметь малое значение l , при котором однако необходимо увеличить D_2 , что приведет к увеличению V и, следовательно, толщи-

ны углеволоконного композита (бандажа ПМ), возрастут потери трения о воздух, уменьшится h ; ПМ – SmCo, $2p = 4$, подшипники шариковые, с диаметром шарика 65 мм. Охлаждение: внутри ЭМ – принудительная радиально-аксиальная вентиляция, в кожухе – каналы для жидкостного охлаждения. Масса СМПП 748 кг, удельный объем 3500 кВт/м³, удельная мощность 2,67 кВт/кг, что выше, чем у низкоскоростных СМПП [25].

Фирма Direct Drive Systems (США) производит СГПП, разработанный Calnetix на $P = 8 \times 10^3$ кВт, $n = 15 \times 10^3$ мин⁻¹. Некоторые параметры: $Z_1 = 48$, пазы открытые, $2p = 4$, $V = 250$ м/с, шаг обмотки $u = 12$, четыре трехфазные обмотки подключены к четырем двухполупериодным мостам. Назначение – в составе турбогенератора для питания корабельной бортовой сети. Бандаж ПМ – углеволоконный композит на основе полиэфиркетонной смолы. Алюминиевый кожух охлаждается водой. Масса ротора 900 кг, длина 2020 мм, два радиальных АМП, один упорный, страховочный подшипник с керамическими шариками [26–28].

Novem (Дания) и Eindhoven Univ. (Нидерланды) разработали СМПП на $P = 1,4 \times 10^3$ кВт, $n = 18 \times 10^3$ мин⁻¹. Некоторые параметры: $Z_1 = 48$, $2p = 4$, $m = 9$ (три трехфазные обмотки). Бандаж ПМ – углеволоконный композит, медный экран над ПМ. Охлаждение статора жидкостное [29].

Фирмой MIT (США) исследован опытный образец СГПП мощностью 16 МВт, $n = 13 \times 10^3$ мин⁻¹ для турбоагрегата судна. Использование СГПП вместо традиционного СГ с обмоткой на роторе позволяет резко сократить площадь и объем занимаемого пространства. При проектировании сравнивались варианты конструкции: с внутренним ротором, с внешним ротором, с аксиальным магнитным потоком. Выбран вариант с внутренним ротором. Сравнивались также конструкции с разным числом фаз обмотки (3, 5, 7, 9 и 11), а также материал бандажа ПМ (нержавеющая сталь, титан, сплав Inconel, углеволоконный композит), пазовая и беспазовая конструкции статора и т.д. Выбрана пазовая конструкция: $Z_1 = 36$, $D_a = 472$ мм, $d = 4$ мм, $l_d = 838$ мм, $h_{z1} = 10$ мм, $B_d = 0,8$ Тл, $V = 200$ м/с, $h_m = 25$ мм, $f_1 = 650$ Гц, $h = 92\%$, $2p = 6$, $m = 3$, $j = 30$ А/мм² (жидкостное охлаждение статора), $l = 2,85$, для сердечника статора – кремнистая сталь, ПМ – сплав NdFeB [30].

В Univ. of Sheffield (Великобритания) выполнен опытный образец СМПП со следующими данными: $P = 1,5 \times 10^3$ кВт, $n = 20 \times 10^3$ мин⁻¹, $Z_1 = 12$, $2p = 8$, $q = 0,5$, ПМ – NdFeB, $D_a = 440$ мм, $D_i = 304$ мм, $l_d = 225$ мм, $D_2 = 300$ мм, $d = 2$ мм, сталь статора – кремнистая с Si=6,5% и D=0,1 мм, $h_m = 23$ мм, бандаж ПМ – углеволоконный композит с

$D_{\text{банд}} = 14,4$ мм. Проект имеет ряд отличительных особенностей – обмотка зубцовая с $q = 0,5$ (обычно не используется для СМПП в мегаваттном диапазоне), $l = 0,74$ (меньше общепринятых $l > 1$), $B_d = 0,4$ Тл (достаточно малое значение), $A = 905$ А/см (выше общепринятого значения, поэтому требуется интенсивное охлаждение), $V = 314$ м/с (выше обычного максимума $V = 250$ м/с) [31].

Ansaldo Sistemi Industriali (Италия) разработала в 2010 г. СМПП общего назначения на $P = 1700$ кВт, $n = 22,5 \times 10^3$ мин⁻¹. Некоторые данные: статор беспазовый, $2p = 4$, ПМ намагничены по Халбаху, обмотка статора многожильная, бандаж ПМ – углеволоконный, сталь статора с малыми потерями, $h = 92\%$, масса $G = 2000$ кг, подшипники – АМП. Следует отметить, что беспазовая конструкция статора и намагничивание ПМ по Халбаху не использовалась до сих пор для СМПП в мегаваттном диапазоне [32].

Сверхскоростные СДПП широко используются для привода турбокомпрессоров, детандеров (турбоэксандеров), воздуходувок, турбонагнетателей. Однако в этой области применения с ними успешно конкурируют АМ как с массивным, так и шихтованным ротором [9].

General Electric (GE) (США) производит СДПП ($P = 6 \times 10^3$ кВт, $n = 17 \times 10^3$ мин⁻¹), предназначенный для привода компрессора. Бандажная гильза для ПМ – из сверхпрочного сплава. Класс изоляции обмотки – F, охлаждение газом, перекачиваемым компрессором. Утверждается, что эта СМПП – крупнейшая в мире [33].

Kingsbury inc. (США) производит СДПП ($P = 6$ МВт, $n = 12,2 \times 10^3$ мин⁻¹) для турбоэксандера ($P = 3,5$ МВт, $n = 22 \times 10^3$ мин⁻¹) [34], причем в СДПП устанавливают АМП, разработанные совместно Kingsbury inc. и S2M (Франция). Для турбокомпрессоров используются также упомянутые выше СДПП производства FMC Technologies мощностью $P = 2, 8$ и 12 МВт.

Большую исследовательскую работу по разработке СМПП на ультравысокие частоты вращения и мощность $1,5$ – 5 кВт, частоту вращения более 100×10^3 провели в Mitsubishi Heavy Industries, Nagaoka Univ. of Technology, Nagasaki Univ. (Япония). Назначение этих СМПП – турбонагнетатели для автомобильных двигателей. При этом исследовалось преимущество зубцовых обмоток – минимальная длина лобовых частей. С этой целью моделировались и испытывались опытные образцы с $Z_1 = 3$ и $Z_1 = 6$ [35].

Так, в Nagasaki Univ. разработан опытный образец СМПП для автомобильного турбонагнетателя ($P = 5$ кВт, $n = 240 \times 10^3$ мин⁻¹). Некоторые дан-

ные: $Z_1 = 6$, $2p = 2$, $q = 1$, обмотка концентрическая зубцовая, $D_a = 92$ мм, $D_i = 28$ мм, $l_d = 30$ мм, $l = 1,07$, $V = 204$ м/с, $h = 84,7\%$, сталь сердечника статора кремнистая с $Si = 6,5\%$, $D = 0,1$ мм, ПМ марки NdFeB сегментированы, подшипники керамические шариковые, причем 77% всех потерь – в подшипниках. Решается вопрос выбора подшипников: с масляной смазкой или же газовые, охлаждение воздушное или жидкостное [36].

В Univ. of Central Florida (США) по программе NASA для космических аппаратов выполнен опытный образец СМПП с такими данными: $P = 2$ кВт, $n = 200 \times 10^3$ мин⁻¹, статор беспазовый, $2p = 2$, $D_a = 35$ мм, $D_2 = 22$ мм, $l_d = 21$ мм, $l = 0,84$, $d = 0,8$ мм, $V = 230$ м/с [37].

Moving Magnet Technologies S.A. (Франция) совместно с LAI, EPFI (Швейцария) разработана СМПП ($P = 2$ кВт, $n = 200 \times 10^3$ мин⁻¹). Статор беспазовый; ПМ марки NdFeB намагничены по Халбаху [38], бандажная гильза из титанового сплава Ti6Al4V, сталь пакета статора – сплав никель-железо, $D_2 = 16,5$ мм, $d = 1,36$ мм, $l_d = 30$ мм, $B_d = 1,11$ Тл, $l = 1,54$, $V = 172$ м/с.

Фирмой Univ. of Newcastle (Великобритания) по заданию Goodrich corporation спроектирован и изготовлен опытный образец СМПП для привода авиационного топливного насоса на $P = 100$ кВт, $n = 30 \times 10^3$ мин⁻¹. На статоре шесть основных обмотанных зубцов, между которыми расположены необмотанные зубцы, которые изолируют фазы электрически и магнитно. Провод обмотки многожильный, один провод содержит 256 проводников; $2p = 6$, $f_1 = 1,5$ кГц, число фаз $m = 4$; ПМ марки SmCo намагничены по Халбаху, сталь статора с $D = 0,35$ мм марки Rotelloy; $D_2 = 73$ мм, $l_d = 81$ мм, $l = 1,1$, бандажная гильза из сплава Inconel, $V = 250$ м/с, $h = 84,5\%$ [39].

В Aalto Univ. (Espoo, Финляндия) спроектирован проект СМПП: $P = 130$ кВт, $n = 31,5 \times 10^3$ мин⁻¹, $D_a = 250$ мм, $D_2 = 107$ мм, $l_d = 135$ мм, $V = 200,7$ м/с, $l = 1,2$, над ПМ – алюминиевый экран и углеволоконный бандаж, подшипники АМП [5].

В Hamelton Standstrand Aerospace Rockford (США) разработан опытный образец СМПП ($P = 90$ кВт, $n = 27 \times 10^3$ мин⁻¹). Некоторые данные: $D_a = 146$ мм, $D_i = 95$ мм, $l_d = 120$ мм, $l = 1,26$, $d = 1,1$ мм, $2p = 4$, ПМ – SmCo, $B_d = 0,7$ Тл, $h = 96,1\%$, подшипники АМП, жидкостное охлаждение; отличительная особенность – достаточно малое значение $V = 123$ м/с [40].

Значительную область применения для СМПП представляют собой сверхскоростные электромеханические накопители энергии (ЭМН) [41], которые в последние два десятилетия быстро развиваются

как по областям применения, так и по мощности и частоте вращения. Ротор электрической машины (ЭМ), как правило, встроенный в общий корпус ЭМН с маховиком, работает в тяжелом тепловом режиме, так как его охлаждение происходит только путем радиации (внутреннее пространство ЭМН, как правило, вакуумируется, а подшипники обычно магнитные, и механический контакт ротора со статором отсутствует). В роторе СМПМ имеют место потери только от высших гармонических, что благоприятно для теплового режима.

В Calnetix и Vycon (США), которые специализируются на разработке и изготовлении сверхскоростных СМПМ, спроектирован ЭМН мощностью $P = 160$ кВт (200 кВА), $n = 36 \times 10^3$ мин⁻¹. Сравнивались три типа ЭМ: СМПМ, АМ и ВИРМ. Предпочтение отдано СМПМ по причине более высокого КПД и меньших габаритов. Магниты установлены на поверхности ротора и удерживаются гильзой из немагнитного сплава. Применение гильзы вместо углепластикового композита способствует уменьшению нагрева ПМ. При проектировании ЭМ добивались уменьшения высших гармонических, в частности зубцовых. Для этого уменьшено раскрытие паза и увеличен воздушный зазор. Следует отметить, что для уменьшения пространственных гармоник увеличено число пазов и использована двухслойная обмотка [42].

В Calnetix и SEM-UT (США) изготовлен опытный образец СМПМ для ЭМН со следующими данными: $P = 110$ кВт, $n = 40 \times 10^3$ мин⁻¹, статор беспазовый, обмотка кольцевая, $2p = 2$. Бандажная гильза из сплава Inconel. Над ПМ экран из бериллевой меди, подшипники АМП, статор с жидкостным охлаждением [42, 43].

В Rosseta Technik GmbH (Германия) спроектирован и производится СМПМ в составе ЭМН со следующими данными: $P = 500$ кВт, $n = 25 \times 10^3$ мин⁻¹, $D_f = 155$ мм, $l_d = 300$ мм, $l = 1,93$, ПМ марки NeFeB, $V = 203$ м/с, бандаж для ПМ – углеволоконный, керамические шариковые подшипники [44].

В Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) (США), которая специализируется на разработках ЭМН, спроектирован СМПМ со структурой ПМ по Халбаху; ЭМ встроена в ЭМН, причем статор находится внутри ротора. Центробежные усилия, действующие на ПМ, воспринимаются композитным маховиком. Статор безжелезный, его обмотка отделена от маховика специальной перегородкой (гильзой). Некоторые параметры этой СМПМ: $P_{\max} = 50$ кВт, $n = 84 \times 10^3$ мин⁻¹, $\eta = 99,3\%$ [45].

В [13] проведено сравнение двух типов СМПМ, предназначенных для ЭМН: на $2p = 4$, с радиально-намагниченными ПМ и структурой ПМ по Халбаху. Расчеты показали, что последняя по сравнению с классической СМПМ имеет меньшие потери. Преимущества СМПМ по Халбаху объясняются большей магнитной индукцией в немагнитном зазоре и меньшими магнитными потерями ввиду отсутствия стальных участков магнитопровода.

Сверхскоростные СМПМ наряду с АМ достаточно широко используются в приводах станков, моторшпинделях, сервоприводах и т.д. Так, Elektromaschine und Antriebe (Швейцария) выпускает около 50 типоразмеров СДПМ для сервоприводов и моторшпинделей с $2p = 2, 4, 6, 8$ на значения вращающего момента $M = 1,2, 210$ Нж и $n_{\max} = 25 \times 10^3$ мин⁻¹, M до 80 Нж [46].

Siemens (Германия) выпускает СДПМ для сервопривода станков, моторшпинделей серий 1FE, 1FK, 1FL, 1ET, 1EV мощностью до 30 кВт и n до 40×10^3 мин⁻¹; Bosch Rexroth AG (Германия) производит встраиваемые СДПМ серии IndraDyn H для моторшпинделей и сервоприводов на значения M до 4500 Нж и n_{\max} до 30×10^3 мин⁻¹ [47]. Parker (США) выпускает СДПМ серии HW для моторшпинделей и сервоприводов (P до 110 кВт, M до 1250 Нж, n до 50×10^3 мин⁻¹) [48].

Выводы. 1. Преимущественная область применения СМПМ – газовые турбогенераторы, электромеханические накопители энергии. Для привода компрессоров, детандеров, турбоагрегатов наряду с СМПМ используются асинхронные машины.

2. Основные проблемы при проектировании СМПМ: выбор марки магнитов (SmCo или NdFeB), борьба с потерями от высших гармонических, выбор способа бандажа магнитов. Предпочтительно использование обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q^3 \geq 2$. Вместе с тем некоторые машины выполняются даже с $q = 0,5$, при этом спектр высших пространственных гармонических значителен. В некоторых проектах, даже для машин в мегаваттном диапазоне, используется магнитная структура ПМ, намагниченная по Халбаху.

3. Обеспечены следующие предельные показатели: $P = 16 \times 10^3$ кВт, $n = 13 \times 10^3$ мин⁻¹ в нижнем диапазоне частоты вращения и $P = 1$ кВт, $n = 500 \times 10^3$ мин⁻¹ – в верхнем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шумов Ю.Н. Ультраскоростные электрические машины для силовых микроэлектромеханических систем. – Приводная техника, 2011, № 6 (94), с. 51–57.
2. Шумов Ю.Н. Состояние и тенденции развития сверхскоростных электрических машин средней и большой мощности. – Приводная техника, 2009, № 1, с. 32–43.

2. **Matsuo E., Yoshiki H., Nagashima T., Kato C.** To wards the development of finger-top gas turbine. — Proc. of the intern. gas turbine congress, Tokyo, November 2003, (IGTC 2003) 05 — 103.
4. **Borisavejevic A.** Limits, modeling and design of high-speed permanent magnet machines. — Ph. D. Thesis Technische Universitet Delft, 2011.
5. **Kolondzovski Z.** Thermal and mechanical analysis of high-speed permanent magnet electric machines. — Doct. Diss. TKK Dissertations 233, 2010. Aalto univ. School of Science and Technology (Espoo, Finland).
6. **Malguist A., Aglen O., Keller et al.** Microturbines speeding the shift to distributed heat and power. — ABB Review, 2003, № 3, p. 22–25.
7. **Kim J., Kirk D., Guttuerres H.** Permanent magnet high-speed generator for FTT microturbine. www.slidsence.com/permanent-magnet-nigh-speed
8. **Kim D.** Virtual design of LIGA fabricated meso scale gas bearings for microturbomachinery. — The sixth int. workshop on micro and nanotechnology for power generation and energy conversion applications. Nov. — Dec., Berkley (USA).
9. **Шумов Ю.Н.** Сверхскоростные и ультраскоростные асинхронные машины за рубежом: обзор публикаций. — Электричество, 2011, № 5, с. 36–41.
10. **Humiston T., Pillay P., Faiz J.** The switched reluctance motor drive for distributed generation. — IEEE Paper 0 — 7803-55-46-6/99, 1999.
11. **Poirs J., Waumans T., Vleugels P. et al.** Micropower generation with microgasturbines: a challenge. — Proc. J. Mech. E. V.221, ptc: J. Mechanical engineering science, 2007.
12. **Pfister P.-D., Perrard Y.** Slotless permanent-magnet machines: general analytical magnetic field calculation. — IEEE Tr. on magn., 2011, vol. 47, № 6, p. 1739–1745.
13. **Jang S.M., Jeong S.-S., Ryn D.-W. et al.** Design analysis of high speed slotless PM machine with Halbach array. — IEEE Tr. on magn., 2001, vol. 37, № 4, p. 2827–2830.
14. **Aglen O.** Loss calculation and thermal analysis of high-speed generator. — IEEE int. conf. on electric machines and drives. (IEMDC'03), Medison (USA), June 2003, vol. 2, p. 1117–1123.
15. **Aglen O.** A high-speed generator for microturbines. — Proc. of the int. conf. (ICEE'01), Dares Salaam, 2001.
16. **Sharat A. El., Keynani A., Shewy H. El.** 400 kW six analytical high speed generator designs for smart grid systems. — Int. Journal of electrical and electronics engineering, 2010, p. 520–537.
17. **Mikkelson D.C.** 15 kW small turboelectric power generation system // DTIC Document 2006: www.dtic.mil/tr/fulltext/U2/a515623.pdf
18. **Imoberdorf P., Zwissing C., Round S.D., Kolar J.W.** Combined radial-axial magnetic bearing for 1 kW, 500000 rpm permanent magnet machine. — Twenty second annual IEEE applied power electronics conf. (APEC 2007) Anaheim (USA), 2007.
19. **Zwissing C., Dörr M., Round S.D.** An ultra-high-speed 500000 rpm, 1 kW electrical drive system. — 4th power conversion conf. 2007, Nagoya (Japan), April 2007, p. 1577–1583.
20. **Binder A., Schneider T.** Permanent magnet synchronous generators for regenerative energy conversion — a survey. — European conf. on power electronics and applications, Dresden, 2005.
21. **Morimoto M., Aiba K., Sakurai et al.** Position sensorless starting of super high-speed pm generator for micro gas turbine. — IEEE Tr. on industrial electronics, 2006, vol.53, № 2, p. 415–420.
22. **Huynh Co, Zheng Liping, Acharya Dipjyoti.** Losses in high-speed permanent magnet machines used in microturbine application. — J. of engineering for gas turbines and power. March 2009, vol.131/022301-1.
23. **Direct Drive Systems.** — FMC Technologies: www.finctechnologies.com/en/DirectDriveSystems.aspx
24. **Direct Drive Systems.** — High-speed, high-power motors and generators: www.finctechnologies.com/en/DirectDriveSystems.aspx
25. **Huynh Co, Hawkins I., Farahani A., Mc Mullen P.** Design and development of a two megawatt, high speed permanent magnet alternator for shipboard application: www.calnetix.com/document.23.pdf
26. **Baily C., Saban D.M., Gonzalez-Lopez D.** Design and experimental evaluation of a high-speed, directly-compled, multi-megawatt permanent-magnet machine. — Proc. of the thirty-eight turbomachinery symposium, 2009, p. 137–148.
27. **Bailay C., Sabai I., Guelas-Pinto P.** Design of high-speed direct connected permanent-magnet motors and generators for the petrochemical industry. — IEEE Tr. on industry appl., 2009, vol. 45, № 3, p. 1159–1162.
28. **Saban D.M., Baily C., Gonzalez-Lopez D., Luca L.** Experimental evaluation of a high-speed permanent-magnet machine. — Paper № PCIC-0 Copyright material IEEE.
29. **Veen J.L.F., Vander, Offringa L.J.J. Vanderput A.J.A.** Minimizing rotor losses in high-speed high-power permanent magnet synchronous generators with rectifier load. — IEE Proc. — Electr. Power Appl., 1997, vol. 144, № 5, p.332–337.
30. **Rucker J.E.** Design and analysis of a permanent magnet generator for naval application. — Electric ship technologies symposium, 2005, p. 451–458.
31. **Paulides J.J.H., Jewell G.W., Howe D.** An evaluation of alternative stator lamination materials for high-speed, 1,5 MW permanent magnet generator. — IEEE transactions on magnetics, vol. 40, № 4, July 2004, p. 2041.
32. **Ansaldo sistemi industriali.** 20 years of high-speed adjustable-speed electric drive motor systems: case studies reliability energy saving opportunities. — 2011 Gas/electric partnership conference. XIX, Huston, Febr. 2011.
33. **Weeber K.** Advanced electric machines technology. CE global research. — Workshop on future large CO2 compressor systems, March 2009.
34. **Active magnetic bearings and high speed motor/generators:** www.kivgsbury.com/pdf/mag_bearings_brochure.pdf
35. **Noguchi T., Yamashita Y., Tokata Y. et al.** 160000 r/min, 2,7 kW electric drive of supercharger for automobiles. — Int. conf. on power electronics and drives systems. (PEDS2005), vol. 2, p. 1380–1385.
36. **Oyama J., Higuchi T., Abe T. et al.** A trial production of small size ultra-high speed drive system. — Electric Machines and Drives Conf. (IEMDC'03) IEEE Intern. vol. 1, p. 31–36.
37. **Zhao L., Ham C., Zheng L. et al.** A highly efficient 200000 rpm permanent magnet motor system. — Tr. on magn., 2007, vol. 43, № 6, p. 2528–2530.
38. **Zhu Z.Q., Home D.** Halbach permanent magnet machines and applications: a rewiv. — IEE Proc. Electric Power Appl., Jul. 2001, vol. 148, № 4, p. 229–308.
29. **Atkinson G.J., Mecrow B.C.** High power fault tolerant motors for aerospace applications. — UKMAG one-day seminar electrical drives systems for the more electric aircraft. University of Bristol, 19 April 2007.
40. **Gieras J.F., Jansson U.** Design of a high-speed permanent magnet brushless generator for microturbines. — Electromotion, 2005, vol. 12, № 2–3, p. 86–91.
41. **Шумов Ю.Н., Ермилов Ф.М., Иванов О.А.** Электромеханические накопители энергии — состояние в мировой практике и перспективы развития. — Новые технологии, 2012, № 3, с. 29–38.
42. **Hawkins L.A., Murphi B.T.** Application of permanent magnet bearing for an energy storage flywheel. — Fifth symposium on magnetic technology, 1–3 December 1999.
43. **Hawkins L., McMullen P.** An AMB energy storage flywheel for industrial applications: www.calnetix.com/wpcontent/themes/calnetix/pdf/B
44. **Schwungrad-Energie-Speicher.** Rosseta Technik GmbH. Vortrag: 19 Kleinmaschinen Kolloquium (17/18.03.2011): www.rosseta.de/srsy.htm

45. Meritt B.T., Post R.F., Dreifuert et al. Halbach array motor/generators – a novel generalized electric machine. – Halbach Festschrift Symposium, Berkley (USA), 3 February 1995.

46. High speed drive Каталог фирмы e+a: www.e-und-a.ch

47. High speed synchron motors Intra Dyn H – for high speed with integrated cooling. – Каталог Bosch Rexroth AG: www.aketon.ru/files/datasheets/servo/intradym_n_ds.pdf

48. Серия HW 2–110 кВт фирмы Parker: www.freetrec.ru/catalog/showguud?cat_id=507382id=494

[11.09.13]

Авторы: Шумов Юрий Николаевич окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1960 г. В 1980 г.

защитил в МЭИ кандидатскую диссертацию «Теоретические и экспериментальные исследования асинхронных генераторов». Доцент кафедры «Электрические системы» Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ).

Сафонов Александр Сергеевич окончил энергетический факультет Московского государственного открытого университета ГОУ ВПО МГОУ по специальности «Электромеханика» в 1999 г. В 2003 г. защитил в ФГОУ ВПО РГАЗУ кандидатскую диссертацию «Встроенные электромеханические системы, совмещенные с сельскохозяйственным механизмом». Доцент кафедры «Электрические системы» МАМИ.

Superhigh- and Ultrahigh-Speed Synchronous Machines Excited from Permanent Magnets: State, Design Features, and Development Prospects (from foreign publications)

Yu.N. SHUMOV and A.S. SAFONOV

The development trends, achievements, and problems in the field of superhigh- and ultrahigh-speed permanent-magnet synchronous electrical machines with capacities from 1 kW to a few MW and rotation frequencies from 10×10^3 to $500 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ are considered. Some data of permanent-magnet synchronous machines are presented based on a review of foreign publications.

Key words: review, synchronous machines, permanent magnets, high and ultrahigh speeds, rotor losses, carbon-fiber band, calculation of heating, Halbach magnetization, slotless stator, gas turbine generator, microturbine, turbine compressor, electromechanical energy storage

Authors: Yurii Nikolaevich Shumov graduated from the Electromechanical Department of the Moscow Power Engineering Institute (MPEI) in 1960. In 1980 he received the degree of Cand. Techn. Sci. from the MPEI. His thesis dealt with theoretical and experimental investigations of asynchronous generators. He is a lecturer in the Chair of Electric Systems at the Moscow State Machinery Construction Institute (MMCI).

Aleksandr Sergeevich Safonov graduated from the Power Engineering Department of the Moscow State Open University (GOU VPO MSOU) in 1999 specializing in electromechanics. In 2003 he received the degree of Cand. Techn. Sci. from FGOU VPO RGAZU. His thesis dealt with built-in electromechanical systems combined with an agricultural mechanism. He is a lecturer at the MMCI Chair of Electrical Systems.

* * *

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ и ЧИТАТЕЛЕЙ!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.

Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы можно приобрести в редакции журнала:

111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

(МЭИ, каф. ТОЭ, первый этаж, ком. 3-111, тел./факс (495)362-7485).

