

УДК 621.313

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МИНИ-ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

И. Ю. Кручинина,

канд. техн. наук, заместитель директора по научной работе

В. Н. Антипов,

доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник

Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН, г. Санкт-Петербург

Выполнены исследования по созданию мини-турбогенераторов предельных мощностей, основанные на применении новых материалов. Определены максимально допустимые электромагнитные и механические нагрузки мини-турбогенераторов мощностью 100 и 200 кВт в зависимости от допустимых размеров сердечника статора. Разработаны модели для комплексной оптимизации выбранных параметров генератора и для решения трехмерной контактной задачи теории упругости методом конечных элементов на математической модели фрагмента конструкции ротора. Для решения принципиальных проблем создания мини-турбогенератора мощностью 200 кВт с частотой вращения $100\ 000\ \text{мин}^{-1}$ и выше необходимо получить более прочные материалы и антифрикционные покрытия для ротора, аморфные сплавы для сердечника статора и улучшить высококоэрцитивные магниты. В статье приведена расчетная оценка влияния свойств материалов на технико-экономические показатели мини-турбогенераторов.

Ключевые слова — высокоскоростной генератор, новые материалы, покрытия, постоянные магниты, аморфные сплавы.

Введение

Газотурбинные станции с одновременной выработкой электрической и тепловой энергии для малой энергетики по ряду технико-экономических показателей имеют преимущество перед большой энергетикой, прежде всего, за счет скорости возведения станций и уменьшенных инвестиций. Типичными являются ТЭЦ с двумя и четырьмя газотурбинными агрегатами с электрической мощностью каждой турбины 9 МВт. Перспективным турбогенератором для децентрализованной энергетики является быстроходный турбогенератор с возбуждением от постоянных магнитов и частотами вращения $6000\ \text{мин}^{-1}$ и выше.

В настоящее время самой низкой себестоимостью выработанной электроэнергии и самой высокой эффективностью полезного использования топлива (до 90 %) характеризуются когенерационные установки, использующие технологию прямого газотурбинного цикла.

Высокоскоростные турбогенераторы для малой энергетики

В ИХС РАН разработан проект высокоскоростного турбогенератора для децентрализованной энергетики мощностью 6,0 МВт на частоту вращения $12\ 000\ \text{мин}^{-1}$, имеющий повышенные технико-экономические показатели [1], что потребовало комплексного подхода в расчетно-проектных и материаловедческих исследованиях и принятия новых проектных и технологических решений. Мощность 6,0 МВт реализована в расточке статора 310 мм. Сравнение удельных характеристик разработанного турбогенератора СГПМ-6-12000 с традиционным турбогенератором ТК-6-2РУХЛЗ приведено в табл. 1. Основные номинальные данные и размеры статора представлены в табл. 2.

Одна из технологий малой энергетики базируется на применении мини-турбин. Наиболее распространенными на нашем рынке являются мини-турбины американской фирмы Сар-

■ **Таблица 1.** Сравнение высокоскоростного турбогенератора с традиционным

Параметр	ТК-6-2РУХЛЗ	СГПМ-6-12000
Мощность, кВт	6000	6000
Напряжение, В	6300	6300
Частота вращения, мин ⁻¹	3000	12 000
КПД, %	97,4	98,0
Масса, кг	20 040	4780
Удельная масса, кг/кВт	3,34	0,8

■ **Таблица 2.** Основные номинальные данные и размеры турбогенератора

Основные номинальные данные	
Мощность номинальная	6000 кВт
Напряжение номинальное	3150 В
Ток номинальный	1221 А
Частота	200 Гц
Число фаз	3
Число полюсов	2
Коэффициент мощности	0,9
Основные размеры сердечника якоря, мм	
Внешний диаметр	610
Внутренний диаметр	310
Активная длина	2100
Зазор	8,0
Высота ярма	84,5
Размеры паза	12,5 × 65,0

stone мощностью 30, 65 и 200 кВт номинальной частотой вращения вала 96 000 мин⁻¹ [2]. Мини-турбины могут объединяться в кластеры до 1 МВт. Другая фирма Elliott (Calnetix) на российском рынке предлагает известную турбину TA-100 и имеет разработанный ряд мини-турбин с различной номинальной скоростью вращения [3]. В табл. 3 представлены данные по мини-турбогенераторам фирмы Calnetix.

Для мини-турбинных установок нами предлагаются высокоскоростные турбогенераторы с возбуждением от постоянных магнитов:

■ **Таблица 3.** Основные геометрические размеры мини-турбогенераторов фирмы Calnetix

Типоразмер	Мощность, кВт	Частота вращения, мин ⁻¹	Диаметр ротора статора, мм	Активная длина статора, мм
RSS-12-115-1	12	115 000	37,6	56,9
RSS-26-84-1	26	84 000	44,5	92,9
RSS-100-60-1	100	60 000	72,9	171,5

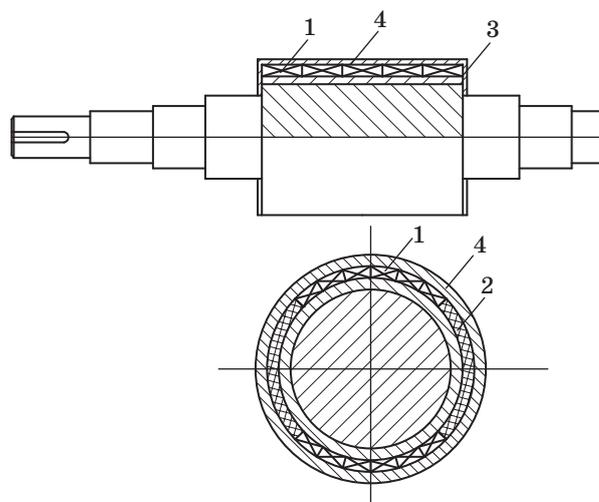
— для проекта малоразмерных газотурбинных установок ФГУП «УАП «Гидравлика» разработаны турбогенераторы СГПМ-0,25-48000 (250 кВт, 400 В, 48 000 мин⁻¹) и СГПМ-0,10-67000 (100 кВт, 400 В, 67 000 мин⁻¹);

— для проекта газотурбинной установки ГТУ-1С ФГУП ММПП «Салют» — турбогенератор СГПМ-1,0-24000 (1000 кВт, 400 В, 24 000 мин⁻¹).

Отличительной особенностью конструкции разработанных высокооборотных турбогенераторов с возбуждением от постоянных магнитов является патентно-защищенное исполнение ротора [4] (рис. 1). Магнитная система ротора турбогенератора состоит из набора элементарных магнитов (размер которых определяется технологическими соображениями), занимающих в окружном направлении две зоны по 120–140°, между которыми располагаются немагнитные вставки для образования полюсов ротора. Магниты и вставки крепятся на подложке посредством бандажного цилиндра и с торцевых сторон фиксируются запорными кольцами, которые выполнены из материала с низким электрическим сопротивлением, например из меди.

Предлагаемая конструкция обеспечивает пусковые характеристики синхронной машины, и генератор может работать в режиме двигателя, создавая необходимый пусковой момент. Конструкция отличается простотой и надежностью, так как содержит минимально необходимое число элементов.

Для повышения технико-экономических показателей высокооборотных турбогенераторов децентрализованной энергетики должны быть использованы новые, полученные с помощью нанотехнологий, материалы, в том числе: немагнит-



■ **Рис. 1.** Конструкция ротора по патенту РФ № 2320064: 1 — элементарные магниты; 2 — немагнитные вставки; 3 — запорные кольца; 4 — бандажный цилиндр

ные стали повышенной прочности, антифрикционные покрытия поверхности ротора, аморфные и наноструктурированные металлические сплавы для сердечника статора, наноструктурные высокоэнергетические постоянные магниты из сплава Nd-Fe-B с улучшенными параметрами.

На основе численного моделирования базовых электрических машин разработаны требования к характеристикам новых материалов, применение которых позволит существенно улучшить как энергетические, так и массогабаритные показатели высокоскоростных турбогенераторов.

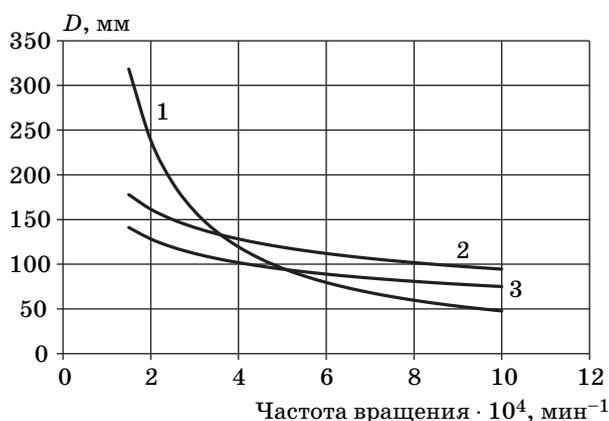
Материалы и сплавы повышенной прочности для ротора

Быстроходный мини-турбогенератор для передвижных электростанций мощностью 100–200 кВт на основе высокоскоростных (до 100 000 мин⁻¹) газовых турбин, безусловно, обладает малыми размерами и массой и привлекателен для широкого круга автономных потребителей, однако для его создания потребуются решить ряд принципиальных проблем, требующих разработки новых материалов. Первостепенной является задача обеспечения прочности ротора. Можно полагать, что для обычно применяемых материалов предельно допустимая окружная скорость на поверхности ротора лежит в пределах 250–300 м/с. Характер ограничения на величину допустимого диаметра ротора с этих позиций показан на рис. 2 для окружной скорости ротора 250 м/с (кривая 1).

С другой стороны, для реализации заданной номинальной кажущейся мощности $S_n = P_n \cos\varphi_n$ необходим диаметр ротора

$$D_1 = \sqrt[3]{\frac{C_A S_n}{\lambda n}},$$

где C_A — машинная постоянная Арнольда, мм³ × мин⁻¹/В·А; P_n — номинальная мощность, кВт;



■ **Рис. 2.** Зависимость допустимого диаметра ротора от частоты вращения

$\cos\varphi_n$ — коэффициент мощности в номинальном режиме; λ — отношение расчетной длины сердечника статора к диаметру; n — частота вращения вала, мин⁻¹.

Машинная постоянная Арнольда определяется электромагнитными нагрузками — максимальным значением индукции в воздушном зазоре B_δ и линейной нагрузкой обмотки статора:

$$A_1: C_A = 6,1 \cdot 10^7 / A_1 B_\delta \alpha' K_\phi K_{об1},$$

где α' — расчетное отношение среднего значения индукции в воздушном зазоре к ее максимальному значению; K_ϕ — коэффициент формы кривой поля, представляющий отношение действующего значения ЭДС к среднему; $K_{об1}$ — коэффициент обмотки статора основной гармонической ЭДС.

Зависимость линейной нагрузки обмотки статора от диаметра определяется опытом современного электромашиностроения, значения магнитной индукции в зазоре для высокоскоростных машин должны быть приняты меньше обычно используемых в целях ограничения потерь в стали при высокой частоте перемагничивания. Полагая $K_\phi = 1,11$, $\alpha' = 2/\pi$, $\lambda = 2$, $A_1 = 300$ А/см, $B_\delta = 0,5$ Тл, получим представленные на рис. 2 зависимости требуемого диаметра ротора для мощности генератора 100 (кривая 2) и 200 кВт (кривая 3) от номинальной частоты вращения. Зависимости рис. 2 свидетельствуют о том, что при мощности генератора 100–200 кВт для частот вращения свыше 50 000 мин⁻¹ возникнут проблемы, связанные с механической прочностью ротора.

Рассмотрим эти проблемы более детально на примере проектирования мини-турбогенераторов с возбуждением от постоянных магнитов мощностью 100 и 200 кВт при частотах вращения 30 000–100 000 мин⁻¹. При расчетах для принятых значений $\lambda = 2$ и $\alpha' = 0,67$ определены и представлены в табл. 4 необходимые для реализации заданной мощности высота магнита H и толщина бандажного кольца h . Используя решение задачи Лямэ теории упругости, применяя принцип Даламбера и ориентируясь на средние тангенциаль-

■ **Таблица 4.** Механическая напряженность бандажного цилиндра при изменении мощности и частоты вращения генератора

P , кВт	n , мин ⁻¹	D_2 , мм	δ , мм	h , мм	H , мм	σ , МПа
100	30 000	98	6,0	5,0	10,0	407
100	50 000	83	6,0	5,0	8,0	694
100	100 000	62	6,0	5,0	8,5	1403
200	30 000	139	8,0	7,0	9,5	687
200	50 000	98	8,0	7,0	8,0	795
200	100 000	83	8,0	7,0	6,5	1991

ные напряжения в бандажном цилиндре (как допустимые), можно получить следующее неравенство в качестве критерия прочности:

$$[\sigma] = \sigma_t \leq \frac{1}{3} \rho \omega^2 \left\{ (R-h)^2 \left[1 - \left(1 - \frac{H}{(R-h)} \right)^3 \right] + R^2 \left[1 - \left(1 - \frac{h}{R} \right)^3 \right] \right\} \frac{R-h}{h^2},$$

где $[\sigma]$ — допустимое напряжение; σ_t — тангенциальное напряжение в бандажном цилиндре; ρ — плотность материала магнита и бандажного цилиндра; ω — угловая частота вращения ротора; R — внешний радиус ротора; h — радиальная толщина бандажного цилиндра; H — радиальная высота магнитов.

Для расчетных вариантов были определены тангенциальные напряжения в бандажном цилиндре.

Как видно из табл. 4, при мощности 100 кВт генератор может быть выполнен на основе стального или титанового бандажа на частоту вращения 30 000 мин⁻¹, поскольку допустимые значения тангенциальных напряжений для стали — 560 МПа, для титана — 490 МПа; для частот вращения 50 000 и 100 000 мин⁻¹ требуется выполнять бандажный цилиндр из композитных материалов с допустимой величиной тангенциальных напряжений 1500 МПа, например, из органика марки ОПЖА/ЭДТ-Н из органожгута Армос 600-А-НК, имеющего прочность при растяжении 2500 МПа.

При мощности 200 кВт при наличии этого материала возможно изготовление мини-турбогенератора на частоты вращения до 50 000 мин⁻¹, для частоты вращения 100 000 мин⁻¹ требуется разработка нового материала.

Более точное решение может быть получено методом конечных элементов при численном моделировании трехмерной контактной задачи теории упругости. При работе машины элементарные магниты и вставки нагружают бандажный цилиндр собственными центробежными силами. При этом возможно отсоединение подошвы системы элементов от подложки в том случае, если величины натягов недостаточны. Поэтому при окончательных расчетах необходимо решать контактную задачу теории упругости с целью определить прочность, контактные давления или возможные отрывы элементов магнитной системы друг от друга. Трехмерная контактная задача теории упругости с многочисленными контактными областями реализована методом конечных элементов на математической модели фрагмента

конструкции ротора. Внешним воздействием является инерционная нагрузка, вызванная вращением ротора. В качестве граничных условий ставится условие симметрии по всем областям, полученным в результате выделения рассматриваемого элемента симметрии. Был выполнен подробный анализ механического состояния магнитной системы роторов рассматриваемых вариантов. Все расчеты проводились для случая сопряжения магнитной системы с валом посредством горячей посадки с определенным натягом, обеспечивающим контакт элементов магнитной системы по ее радиальным поверхностям при номинальной частоте вращения генератора. Основные результаты расчета приведены в табл. 4.

Для высокоскоростного турбогенератора с постоянными магнитами основное требование к бандажному стакану ротора — это его прочность.

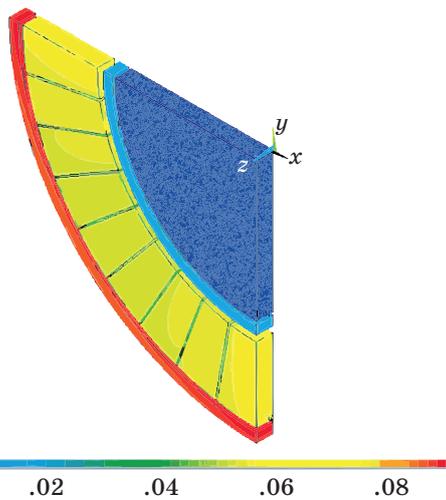
Анализ результатов моделирования методом конечных элементов контактной задачи теории упругости [5] показал принципиальную выполнимость конструкции магнитной системы ротора в случае использования в качестве материала для бандажа немагнитных сплавов с пределом прочности порядка 1600–1700 МПа. Максимально возможные натяги посадки определялись из условия захлаживания подложки с магнитами (при посадке бандажа) либо тела ротора (при посадке всей магнитной системы) до температуры жидкого азота. Для турбогенератора СПИМ-6,0-12000 результаты численного моделирования представлены на рис. 3–6.

В данном случае натяг посадки бандажного цилиндра принят 0,029 см; натяг посадки магнитной системы на тело ротора — 0,018 см.

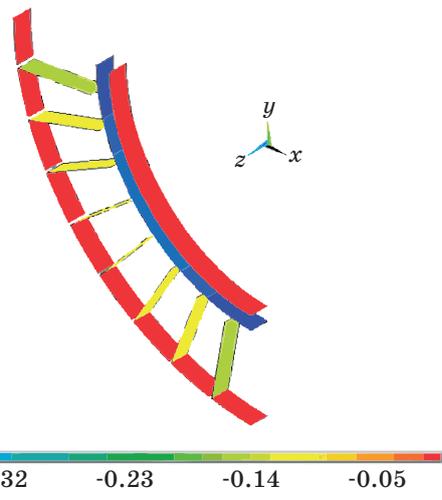
Результаты расчетов различных вариантов материала бандажного цилиндра сведены в табл. 5.

В качестве титанового сплава можно рекомендовать сплав типа ВТ8-ВТ14 или других марок с требованием после соответствующей термообработки получить состояние с пределом прочности порядка 1600–1700 МПа.

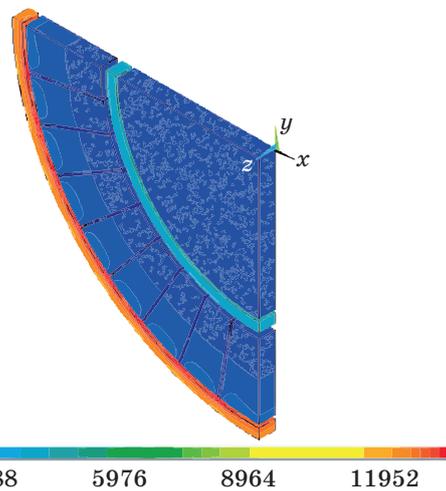
Существуют жаропрочные сплавы на никелевой основе типа ХН68ВКТЮ и ХН63МБ, а также прецизионные сплавы на кобальтовой основе типа 40КХНМ и 40КХНМВТЮ, достигавшие на образцах заданных характеристик. Однако промышленно освоенных технологий изготовления труб с упомянутыми свойствами не выявлено. По оценке ЦНИИТмаш, освоение потребует инвестиций порядка 10 млн руб. и времени 9–10 месяцев. Остается путь использования двухслойного бандажа: внутренний слой — немагнитная сталь, а внешний наматывается органопластиковым жгутом с предварительным натяжением для обеспечения контакта элементарных магнитов с магнитной подложкой. Возможности получения высокопроч-



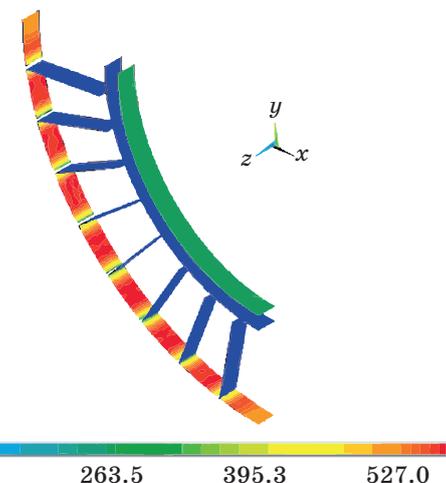
■ **Рис. 3.** Картина суммарных перемещений (см) под воздействием натяга и центробежных сил



■ **Рис. 6.** Величины расчетных зазоров по поверхностям сопряжения элементов ротора (см) под воздействием натяга и центробежных сил



■ **Рис. 4.** Картина напряженно-деформированного состояния ($\text{кг}/\text{см}^2$) под воздействием натяга и центробежных сил



■ **Рис. 5.** Распределение контактного давления по поверхностям сопряжения элементов ротора ($\text{кг}/\text{см}^2$) под воздействием натяга и центробежных сил

■ **Таблица 5.** Расчетные данные для различного материала бандажа

Материал бандажа	Максимальная величина		
	напряжения от натяга, σ_0 , $\text{кг}/\text{см}^2$	напряжения от натяга и действия центробежных сил, σ , $\text{кг}/\text{см}^2$	контактного давления от натяга и действия центробежных сил, Q , $\text{кг}/\text{см}^2$
Сталь	6930	13 400	590
Титан	3900	11 200	600
Органопластик	4000	9500	580

ных материалов с высоким пределом текучести связаны с осуществлением ультратонкого измельчения кристаллического зерна. Одним из самых проблемных вопросов является создание объемных наноструктурированных материалов, получение микроструктур в объеме крупного образца. Для этого методом высокоскоростной интенсивной пластической деформации создается максимально возможное число зародышей зерен и затормаживается их рост. В дополнение к различным режимам нагрева, охлаждения и деформирования стремятся измельчить зерно комбинацией различных методов. За рубежом одним из таких методов является регулирование структуры путем наложения сильного магнитного поля. По экспериментальным данным, в стали при наложении сильного магнитного поля (8–12 Тл) во время фазового превращения образуется структура с упорядоченным в направлении поля расположением кристаллических зерен. В результате применения комбинированного метода — интенсивного деформирования и сильного магнитного поля — ожидается уменьшение размера зерна до 0,8–0,5 мкм.

В Уральском институте металлов разработаны сверхпрочные стали и сплавы с прочностью до 2000–2500 МПа [6]. Разработанные способы упрочнения комбинированием процессов интенсивной пластической деформации с формированием наноструктур в прокате путем измельчения структуры зерна и упрочнения за счет плотно расположенной наноразмерной фазы при микролегировании азотом и ванадием не приводят к снижению пластичности и сопротивления хрупким, усталостным и другим разрушениям. В настоящее время по технологическим причинам невозможно изготовление цилиндра диаметром более 25 мм.

В Институте качественных сталей ЦНИИчермет им. И. П. Бардина проанализированы вопросы нанофазного легирования металлов и сплавов атомарным азотом в сочетании с нитридообразующими элементами. Нанотехнология микролегирования стали нитридными фазами может работать как самостоятельно, так и в сочетании с нанотехнологиями пластической деформации. Появилась возможность увеличить прочность стали в 3–4 раза, а также хладостойкость и коррозионную стойкость. Главное достоинство нанотехнологии микролегирования стали нитридными и карбонитридными фазами заключается в ее универсальности — она применима для выплавки любой стали и всего сортамента металлопродукции.

Антифрикционные покрытия ротора

Механические потери от трения бочки ротора о воздух в высокооборотных электромеханических преобразователях энергии стремительно возрастают с увеличением окружной скорости ротора и по величине составляют от 0,6 до 1 % полезной мощности. Для рассмотренных вариантов турбогенератора 6 МВт при частоте вращения ротора 12 000 мин⁻¹ потери трения о воздух составляют от 42 до 63 кВт. Снижение механических потерь в высокооборотных машинах может быть достигнуто применением антифрикционных высокотемпературных стеклоподобных составов. По данным материаловедческих исследований физико-химических характеристик синтезированных покрытий, перспективными являются аморфные металлические покрытия на основе железа-АМАГ-200 (FeSiB₂NbCu). Покрытие является прочным, долговечным, характеризуется низкими величинами остаточных напряжений, надежно работает при температурах до 1000 К. КПД турбогенератора с антифрикционным покрытием ротора может быть увеличен на 0,5 %. Существенное ограничение при применении этого покрытия — высокие технологические температу-

ры, не позволяющие наносить покрытие на ротор в сборе из-за температурных ограничений по размачиванию постоянных магнитов (150 °С).

Для повышения показателей эффективности высокоскоростных электрических машин предложено использовать антифрикционные нанокomпозитные покрытия на ротор, снижающие как механические потери, так и нагрев ротора, технология синтеза которых не требует температуры выше 100 °С.

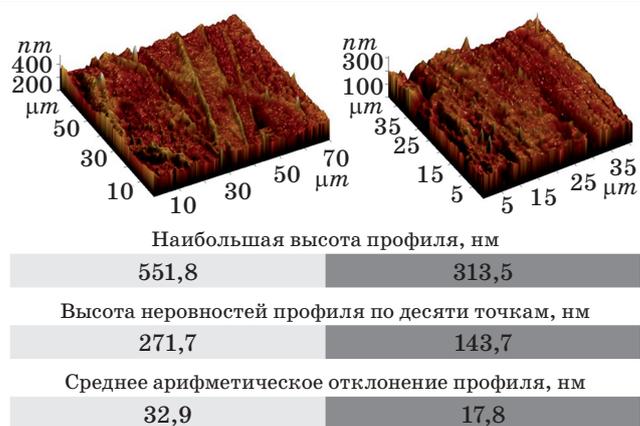
В ИХС РАН синтезированы и исследованы:

- органосиликатные покрытия на основе кремнийорганических полимеров — полидиметилфенилфиллоксана, модифицированного органическим полиэфиром. В качестве наполнителей применены хризотилловый асбест, слюда мусковит, алюмоборосиликатное стекло, диоксид циркония. Использовались различные технологии изготовления покрытий, режимы термической обработки и сушки, методы их нанесения, варьировалось количество слоев покрытий;

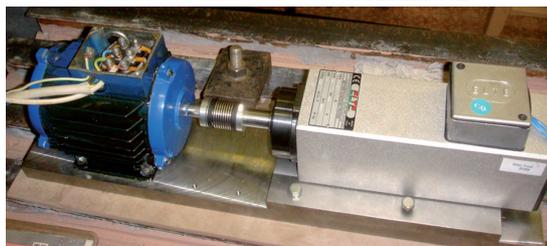
- специальные покрытия на ротор на основе органо-неорганических эпоксисилоксановых и эпоксититанатных золь-гель композиций на базе аналога — атмосферостойкого защитного покрытия.

Исследовано также покрытие поверхности ротора фторсодержащими поверхностно-активными веществами (фтортензидами или фтор-ПАВ) путем нанесения состава «Валкон» [7].

Изучены физико-химические свойства синтезированных покрытий: морфология поверхности и гидрофобность. По результатам исследований методом атомно-силовой микроскопии выявлено, что при использовании покрытий шероховатость необработанной поверхности образца улучшается на 1–2 класса (рис. 7). Исследования свойств гидрофобности методом «сидячей капли» показали, что покрытия на основе эпоксититанатного золя (ЭТ1) имеют значение краевого угла смачивания ~88–91°. Введение в золь фторсодержащего полимера позволяет повысить гидрофобность по-



■ Рис. 7. Характеристики поверхностей трения



■ **Рис. 8.** Ротор модельного мини-турбогенератора с органосиликатным покрытием и мини-турбогенератор на испытательном стенде

крытия и увеличить значение краевого угла смачивания до $\sim 150^\circ$ (ЭТ2).

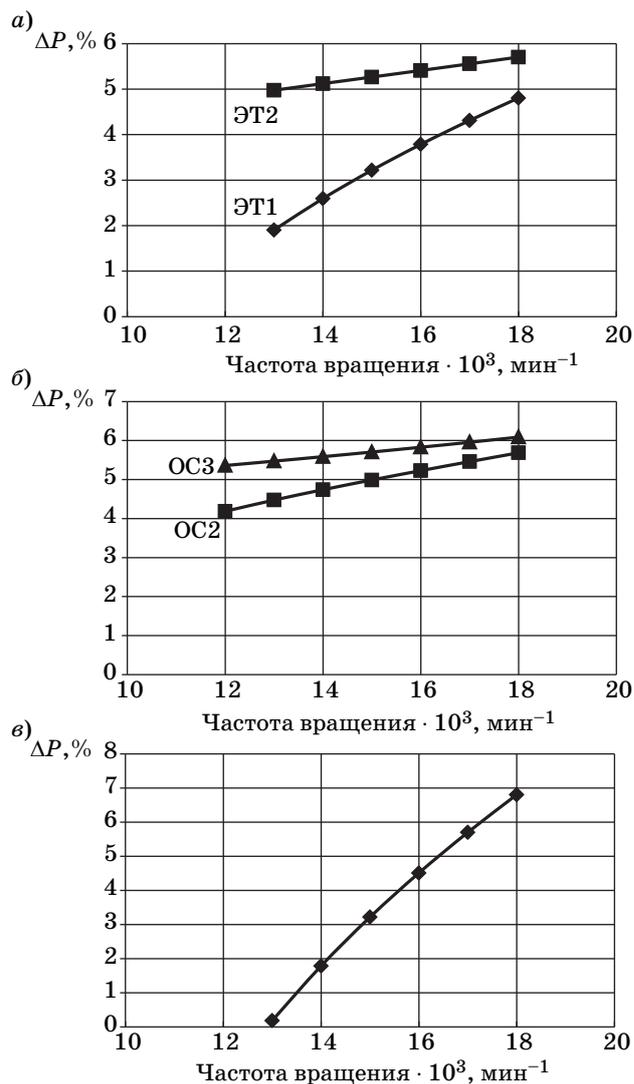
В результате физического моделирования на модельной машине (рис. 8) высокооборотного мини-турбогенератора СГПМ-1,2-18000 [8, 9] определены потери холостого хода в зависимости от частоты вращения, в том числе аэродинамические потери трения ротора о воздух, и проведены исследования влияния антифрикционных покрытий, нанесенных на поверхность ротора, на снижение уровня механических потерь синхронных машин повышенных частот вращения. Исследуемый диапазон частот вращения $9000\text{--}18\,000\text{ мин}^{-1}$.

Результаты определения среднего снижения потерь трения ротора с органосиликатными и эпоксититанатными покрытиями и после обработки для ротора с «Валконом» показаны на рис. 9, а–в.

Высокое значение общего уровня потерь и незначительная величина их снижения увеличивают вероятную погрешность результатов измерений.

Эффект уменьшения потерь трения в диапазоне окружных скоростей ротора $17\text{--}42\text{ м/с}$ в случае применения органосиликатных и эпоксититанатных покрытий составил $5\text{--}6\%$. Исследование обработанной поверхности непокрытого ротора «Валконом» показало резкое изменение снижения потерь в исследуемом диапазоне окружных скоростей ротора: ниже 30 м/с проявляется эффект увеличения потерь. Обработка эпоксититанатного покрытия фтортензидами эффекта уменьшения потерь не дала.

Большие перспективы открывает полученный в американской лаборатории Эймса (*Department of Energy Ames Laboratory*) материал ВАМ, более



■ **Рис. 9.** Экспериментальные результаты снижения уровня потерь трения: а — органосиликатные покрытия; б — эпоксититанатные покрытия; в — «Валкон»

скользкий, чем тефлон, и при этом почти такой же твердый, как алмаз. ВАМ представляет собой комбинацию металлических сплавов бора, алюминия и магния (AlMgB_{14}) с боридом титана (TiB_2) [10]. ВАМ уступает по твердости лишь алмазу и нитриду бора с кубической решеткой, при этом демонстрируя удивительно низкий коэффициент трения — $0,02$ (у тефлона он равен $0,05\text{--}0,1$, а у хорошо смазанной стали — $0,16$). Дальнейшие планы исследований влияния антифрикционных покрытий на величину механических потерь будут направлены на разработку отечественного аналога американского материала ВАМ — неорганического покрытия на основе высокодисперсного алюминия, содержащего легирующие добавки (магний, бор) и нанодисперсный диборид титана.

Материалы магнитопровода статора

В проекте высокооборотного турбогенератора мощностью 6,0 МВт на частоту вращения 12 000 мин⁻¹ для децентрализованной энергетики в связи с высокой частотой перемагничивания (200 Гц) для сердечника статора в расчетах для снижения потерь принята сталь электротехническая горячекатаная тонколистовая марки 1521 толщиной 0,2 мм. Дальнейшее снижение потерь сердечника статора возможно при переходе на аморфные металлические сплавы. Лента из аморфных и нанокристаллических сплавов изготавливается на уникальном высокоточном оборудовании из расплава методом формирования и литья плоской струи металлического расплава на кобальтовой или железной основе заданного химического состава на поверхность охлаждаемого диска, движущуюся с линейной скоростью от 20 до 30 м/с, и быстрого затвердевания (со скоростью ~106 °С/с) плоской струи расплава (*planar*

flow casting). При таком процессе затвердевания расплава не успевает происходить кристаллизация металлической ленты, которая в результате имеет структуру металлического стекла.

Высокожелезистый сплав 94ЖСР-А имеет индукцию насыщения $B = 1,6$ Тл и удельные потери $P_{1,3/50} = 0,46 - 0,26$ Вт/кг, т. е. в 2–3 раза меньше, чем лучшие холоднокатаные стали.

Расчеты показывают, что применение аморфных сплавов даже для частоты перемагничивания 50 Гц может значительно повысить эффективность синхронного генератора. В табл. 6 сведены расчетные данные потерь в стали низкооборотного генератора с постоянными магнитами мощностью 500 кВт для изотропных и анизотропных, холоднокатаных и горячекатаных электротехнических сталей, а также для аморфного сплава. Улучшение КПД генератора оценивается величиной 1,0 % [11].

Появление наноструктурированных аморфных сплавов типа Finemet открывает новые возможности для повышения эффективности высоко-

■ **Таблица 6.** Сравнение потерь в стали синхронного генератора 500 кВт для различных материалов

Параметр	Марка стали							30КСП*
	2411		1511		3413			
Толщина листов стали, мм	0,5	0,35	0,5	0,35	0,5	0,35	0,27	0,04
Удельные потери, Вт/кг	1,6	1,35	1,55	1,35	0,8	0,6	0,5	0,1
Потери в спинке статора, кВт	1,67	1,41	1,2	1,08	0,64	0,48	0,4	0,1
Потери в зубцах статора, кВт	3,69	3,11	3,2	2,74	1,63	1,22	1,02	0,23
Потери в стали статора, кВт	5,47	4,63	4,5	3,93	2,38	1,81	1,53	0,45
Суммарные потери, кВт	22,9	22,1	22,0	21,4	19,9	19,3	19,0	17,92
КПД, %	95,6	95,8	95,8	95,9	96,2	96,3	96,3	96,5

*Аморфный сплав.

■ **Таблица 7.** Магнитные свойства Finemet в сравнении с обычными материалами

Материал	Толщина, мкм	B_s , Тл	B_r/B_s , %	H_c , А/м	M_r (1 кГц)·10 ³	P_{cv} , кВт·м ³	T_c , °С
Finemet:							
FT-1H	18	1,35	90	0,8	5,0	950	570
FT-1M	18	1,35	60	1,3	70,0	350	570
Высокожелезистый аморфный	25	1,56	83	2,4	5,0	2200	415
Электротехническая сталь 3% Si	50	1,90	85	6,0	2,7	8400	750
Электротехническая сталь 6,5% Si	50	1,30	63	45	1,2	5800	700

■ **Таблица 8.** Сравнение потерь в стали сердечника статора из различных материалов для синхронного генератора 100 кВт, 67 000 мин⁻¹

Параметр	Горячекатаная сталь 1521	Аморфная сталь ГГ440В
Толщина листов стали, мм	0,2	0,025
Удельные потери, Вт/кг	$12,5 \cdot 1,7 \cdot B^2 \cdot (f/400)^2$	$1,2 \cdot 10^{-3} \cdot B^{1,6} \cdot f^{1,1}$
Потери в спинке статора, Вт	385,7	50,6
Потери в зубцах статора, кВт	43,7	11,5
Потери в стали статора, кВт	429,4	62,1
Суммарные потери, кВт	1281,7	587,7
КПД, %	0,987	0,994

коскоростных электромеханических преобразователей энергии. Сравнение характеристик наноструктурированного сплава Finemet с электротехнической сталью дано в табл. 7.

Применение отечественного аморфного сплава производства «Гаммамед» [12] для сердечника статора высокоскоростного мини-турбогенератора 100 кВт, 67 000 мин⁻¹ уменьшает потери в стали почти в 7 раз и увеличивает КПД на 1,3 %. Расчеты представлены в табл. 8.

Повышение параметров постоянных магнитов

Отечественной промышленностью выпускаются спеченные постоянные магниты из сплавов Nd-Fe-B с максимальным энергетическим произведением $(BH)_{\max} = 280 - 320$ кДж/м³, в то время как ведущие фирмы Японии, Китая и Германии уже более 15 лет поставляют на рынок такие магниты с $(BH)_{\max} \geq 400$ кДж/м³. При проектировании опытных образцов турбогенераторов с постоянными магнитами нами использованы редкоземельные постоянные магниты Nd-Fe-B, обладающие остаточной магнитной индукцией на уровне 1,14 Тл, коэрцитивной силой по индукции порядка 900 кА/м, коэрцитивной силой по намагниченности в диапазоне 900÷1750 кА/м, максимальным энергетическим произведением 250 кДж/м³.

Проблема недостаточно высокого уровня свойств спеченных магнитов Nd-Fe-B, изготавливаемых российскими предприятиями, заключается в несовершенной технологии их производства. Основным недостатком используемых технологий является загрязнение химически активных порошков кислородом, влагой и углеродом на стадии их измельчения с последующим образованием оксидов, гидроокислов и карбидов неодима при спекании. С использованием специализированного оборудования на ФГУП «Уральский электромеханический завод» реализован проект по разработке прогрессивного низкокислородного технологического процесса [13]. Оптимизация технологических параметров на каждом этапе процесса позволила реализовать высокоэнергоемкие магниты со следующими свойствами: $B_r \geq 1,41$ Тл; $H_c \geq 715$ кА/м; $(BH)_{\max} \geq 400$ кДж/м³ и рабочей температурой $T \geq 80$ °С, а также высококоэрцитивные магниты с $B_r \geq 1,25$ Тл; $H_c \geq 1990$ кА/м; $(BH)_{\max} \geq 300$ кДж/м³ и $T \geq 160$ °С. Содержание кислорода в этих магнитах не превышает 0,2 вес. %, а степень текстуры составляет не менее 95 %. Свойства полученных магнитов соответствуют мировому уровню, а их значения максимального энергетического произведения на 25 % превышают характеристики лучших отечественных промышленных аналогов.

Нами рассматривалась возможность повышения энергетических характеристик постоянных магнитов за счет нанесения клеевого слоя с наночастицами железа. Синтез наночастиц железа происходит в среде инертного газа, и для защиты от агрегации и роста частиц необходима связующая матрица. Характеристики намагниченности клеевого состава указывают на улучшение магнитных свойств, однако применение клеевого слоя на поверхности постоянного магнита типа Nd-Fe-B практически не повлияло на кривую намагниченности постоянного магнита и не может быть признано эффективным способом повышения энергетических характеристик магнитов.

В настоящее время проблемы повышения коэрцитивной силы Nd-Fe-B связаны с легированием сплавов Nd-Fe-B алюминием, гадолинием, ванадием. Намагниченность насыщения магнитотвердой фазы Nd-Fe-B ухудшается при любом из типов легирования, поэтому допустима минимальная модификация сплава. Установлено благоприятное влияние добавки Nd-Co на величину коэрцитивной силы (рост 8 %) для магнитов, легированных 0,2 масс. % Nd-Co.

Интерес представляют исследования совершенствования магнитных свойств материалов за счет замещения части неодима (Nd) на диспрозий (Dy), увеличивающего абсолютное значение коэрцитивной силы спеченных магнитов благодаря повышению поля анизотропии магнитотвердой фазы [1].

Исследованиями ФГУП ВНИИНМ наноструктурных высокоэнергетических постоянных магнитов Nd-Fe-B установлено, что максимальная энергия магнитов достигается при размере нанокристаллитов 20–30 нм. Причем максимум имеет островообразный характер: при размере кристаллитов в диапазоне от 15 до 40 нм максимальная энергия снижается в 4 раза.

Расчеты, выполненные при проектировании высокооборотного мини-турбогенератора 100 кВт, 67 000 мин⁻¹, показывают значительное влияние характеристик постоянных магнитов на параметры мини-турбогенератора. Изменение параметров магнита с $B_r = 1,05$ Тл, $H_c = 750$ кА на $B_r = 1,20$ Тл, $H_c = 900$ кА позволяет уменьшить высоту магнита на 20 %, активную длину на 5 %, объем магнитов на 26 %, снизить напряженность бандажного цилиндра.

Заключение

1. Для систем децентрализованной энергетики перспективным высокооборотным турбогенератором является синхронная машина с возбуждением от постоянных высококоэрцитивных магнитов нового поколения Nd-Fe-B.

2. Для повышения технико-экономических показателей высокооборотных турбогенераторов децентрализованной энергетики должны быть использованы новые, полученные с помощью нанотехнологий, материалы, в том числе немагнитные стали повышенной прочности, антифрикционные покрытия поверхности ротора, аморфные и наноструктурированные металлические сплавы для сердечника статора, наноструктурные высокоэнергетические постоянные магниты из сплава Nd-Fe-B с улучшенными параметрами.

3. Применение высокопрочных материалов для бандажного стакана ротора, таких как жаропрочные сплавы на никелевой основе типа ХН68ВКТЮ и ХН63МБ, прецизионные сплавы на кобальтовой основе типа 40КХНМ и 40КХНМВТЮ, увеличение прочности стали в 3–4 раза за счет нанотехнологии микролегирования стали нитридными фазами в сочетании с нанотехнологиями пластической деформации позволит достичь предела текучести 1600–1700 МПа и обеспечить оптимальные соотношения геометрических размеров ротора турбогенератора.

4. При переходе с электротехнической горячекатаной тонколистовой стали марки 1521 толщиной 0,2 мм на аморфные и нанокристаллические сплавы (94ЖСР-А, 5БСДР, Finemet, Nanoglass, Vitroperm) возможно снижение потерь в сердечнике статора в 2–3 раза.

5. По результатам наших исследований потери на трение бочки ротора о воздух составляют 0,6–1,0 % полезной мощности турбогенератора, так как они пропорциональны частоте вращения в третьей степени. Снижение механических потерь в высокооборотных машинах может быть достигнуто благодаря применению антифрикционных покрытий.

6. Наноструктурирование высокоэнергетических постоянных магнитов Nd-Fe-B позволяет при размере нанокристаллитов 20–30 нм достичь в 4 раза большей максимальной энергии.

7. Нанотехнологии способны обеспечить создание высокооборотных турбогенераторов для децентрализованной энергетики, обладающих высокими технико-экономическими параметрами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 11-08-00287_а.

Литература

1. **Перспективный турбогенератор для децентрализованной (локальной) энергетики** / Я. Б. Данилевич, В. А. Жабров, В. Н. Антипов, И. Ю. Кручинина, Ю. Ф. Хозиков, А. В. Иванова // Изв. РАН. Энергетика. 2009. № 4. С. 89–97.
2. <http://www.r-gaz.ru/capstone.html> (дата обращения: 17.02.2012).
3. <http://www.r-gaz.ru/elliott.html> (дата обращения: 20.02.2012).
4. **Патент на изобретение № 2320064. Ротор синхронной электрической машины** / Данилевич Я. Б., Антипов В. Н., Грозов А. Д.; Заявл. 05.10.2006; Опубл. 20.03.2008, Бюл. № 8. 1 с.
5. **Данилевич Я. Б., Антипов В. Н., Кручинина И. Ю., Хозиков Ю. Ф.** Турбогенераторы малой мощности для децентрализованных систем энергообеспечения: учеб. пособие. — СПб.: Наука, 2009. — 102 с.
6. **Панфилова Л. М., Смирнов Л. А.** Конструкционные в наноструктурном состоянии микролигированные стали будущего // Материалы второго Всерос. совещания ученых, инженеров и производителей в области нанотехнологий. Москва, 15 мая 2008 г. СПб.: Лемма, 2008. С. 58–59.
7. **Агошков О. Г.** Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии. Общая характеристика фтортезидов: препринт / БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова; ООО «Консалтинг новые технологии». — СПб., 2008. — 4 с.
8. **Данилевич Я. Б., Антипов В. Н., Кручинина И. Ю.** и др. Перспективные электромеханические преобразователи энергии на основе новых материалов и покрытий // Электротехника. 2010. № 9. С. 2–9.
9. **Данилевич Я. Б., Антипов В. Н., Кручинина И. Ю., Московская В. В.** Органосиликатные покрытия быстроходного ротора турбогенератора // Тр. XXI Всерос. совещания по температуроустойчивым функциональным покрытиям. СПб., 26–28 апреля 2010 г. С. 22–23.
10. **Камчатский Т.** Сверхскользящий материал // Энергетика и промышленность России. 2009. № 01–02 (117–118): новые технологии.
11. **Данилевич Я. Б., Антипов В. Н., Штайнле Л. Ю.** Гидрогенератор с возбуждением от постоянных магнитов // Энергетика. 2010. № 2. С. 5–7.
12. <http://www.gammamet.ru/ru/gm440b.htm> (дата обращения: 20.02.2012).
13. **Попов А. Г.** и др. Низкоскоростная технология получения высокоэнергоемких постоянных магнитов на основе сплавов Nd-Fe-B // Научное наследие академика С. В. Вонсовского: тез. докл. междунар. конф., Россия, Екатеринбург, 15 октября 2010 г. С. 53.