

Новые проводниковые материалы и их влияние на параметры высокоскоростных электромеханических преобразователей энергии

АНТИПОВ В.Н., ГРОЗОВ А.Д., ИВАНОВА А.В.

Представлены результаты анализа последних достижений по созданию новых материалов с повышенной электропроводностью. Установлена возможность в ближайшем будущем применения в электромеханических преобразователях энергии обмоток из углеродного нановолокна, обладающего в диапазоне некриогенных температур электропроводностью в 1,5 раза выше, чем у меди марки ММ. Исследования влияния электропроводности проводниковых материалов на параметры мини-турбогенераторов выполнены на основе численного эксперимента для различных магнитных, ферромагнитных и конструкционных материалов. Установлено, что для высокоскоростных мини-турбогенераторов значение удельной электропроводности проводникового материала не определяет выбор основных размеров мини-турбогенератора и оказывает незначительное влияние на КПД машины и превышения температуры обмотки. Применение материала с повышенной электропроводностью более эффективно для электромеханических преобразователей энергии при частоте 50 Гц, для которых появляется возможность существенного уменьшения расхода хладагента. Предложена методика оценки параметров мини-турбогенераторов по характеристикам проводниковых материалов, основанная на решении задачи линейного программирования.

Ключевые слова: высокоскоростной мини-турбогенератор, аморфный сплав, линейное программирование, постоянный магнит, тангенциальное напряжение, углеродный наноматериал, электротехническая сталь

Для нового высокоэффективного оборудования децентрализованной энергетики – малоразмерных газотурбинных установок мощностью до 200 кВт и частотой вращения до 100000 мин⁻¹ – наилучшими качествами электромеханического преобразователя энергии обладает синхронная машина с возбуждением от постоянных высококоэрцитивных магнитов – высокоскоростной мини-турбогенератор. Выбор новых конструкционных, магнитных и ферромагнитных материалов определяет возможность не только повышения предельных мощностей мини-турбогенератора, но и его рационального конструктивного исполнения. Установлено [1–3], что основные размеры высокоскоростного мини-турбогенератора зависят от типа и характеристик постоянных магнитов и материала бандажного цилиндра, а выбор ферромагнитного материала сердечника статора определяет КПД машины с обмоткой якоря из медного провода.

Повышение КПД высокоскоростных мини-турбогенераторов может быть также достигнуто применением проводниковых материалов повышенной электропроводности за счет снижения джоулевых потерь.

Наиболее применяемым материалом высокой проводимости для обмоточных проводов электромеханических преобразователей энергии является

электролитическая медь, которая помимо малого удельного сопротивления обладает многими другими преимуществами. Стандартная медь при температуре 20 °С имеет плотность 8890 кг/м³, удельное сопротивление 0,0172 мкОм·мм и температуру плавления 1083 °С. Для изготовления обмоточных проводов применяется мягкая медь марки ММ, которая получается отжигом твердой меди при температуре 330–350 °С.

Вторым по значению после меди проводниковым материалом является алюминий. По сравнению с медью алюминий обладает пониженными электрическими и механическими свойствами. Электрическое сопротивление алюминиевого провода в 1,63 раза больше, чем медного, однако алюминий менее дефицитен, чем медь. Стандартный алюминий при температуре 20 °С имеет плотность 2700 кг/м³, удельное сопротивление 0,028 мкОм·мм и температуру плавления 660 °С. Для электротехнических целей используют алюминий марки А1, содержащий не более 0,5% примесей.

Наилучшей электропроводностью обладает серебро (плотность 10500 кг/м³, удельное сопротивление 0,016 мкОм·мм, температура плавления 961 °С), но широкое применение этого металла слишком дорого.

Широкое применение находят медные сплавы (латуни и бронзы) благодаря приемлемым механическим свойствам [4]. Максимальная прочность достигает значений 800 МПа, однако при образовании твердого раствора электропроводность металла снижается. Это связано с тем, что электропроводность определяют электроны проводимости, которые под влиянием приложенного напряжения двигаются вдоль кристаллической решетки. Однако в сплавах они преодолевают препятствия в виде дефектов кристаллического строения, таких как атомы легирующих элементов, примеси, дислокации, тем самым рассеивают электроны проводимости увеличивается. Таким образом, электропроводность медных сплавов всегда ниже, чем чистой меди. По международному стандарту IACS (International Annealed Copper Standard) отожженной чистой меди (электропроводность 58 МСм/м) соответствует обозначение 100% IACS [4]. Электропроводность других материалов обычно представляют в процентах от электропроводности чистой меди (% IACS). Электрическая проводимость разных сплавов меди падает до (10÷35)% IACS. Для обеспечения высокой электропроводности степень легирования медных сплавов должна быть очень малой – сотые доли процента.

Известная проблема дальнейшего повышения прочности медных сплавов при сохранении высокой электропроводности решается в последние годы путем получения ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры различными методами интенсивной пластической деформации (ИПД), которые базируются на применении больших деформаций сдвига в условиях высоких давлений и низких температур [5]. Исследования низколегированных дисперсионно-упрочняемых медных сплавов системы Cu-Cr [6] показали, что формирование УМЗ структуры при дополнительной термообработке позволяет получить сочетание высокой прочности (790÷845 МПа) и повышенной электропроводности (81÷85% IACS), в то время как при стандартной обработке закалкой и старением в крупнозернистых образцах медного сплава предел прочности 430 МПа, а электропроводность 68% IACS.

В диссертации Н.Д. Степанова [7] рассмотрены УМЗ структуры в меди и микрокомпозиционных медных сплавах методами больших пластических деформаций и исследованы свойства прочности и электропроводности. Полученные методом равноканального углового прессования (РКУП) достаточно массивные медные заготовки с однородной УМЗ имели предел прочности около 400 МПа, относительное удлинение около 12%, электропроводность около 95% IACS. Последующая прокатка повышает предел прочности на (80÷100) МПа, относительное удлинение до 14%, электропроводность

снижается до (93÷94)% IACS. Предложены режимы обработки прокаткой микрокомпозиционных сплавов Cu-14%Fe и Cu-18%Nb для получения фольги, достигнуты следующие сочетания предела прочности и электропроводности для сплава Cu-14%Fe: 1000 МПа и 40% IACS, для сплава Cu-18%Nb: 1130 МПа и 55% IACS. Таким образом, электропроводность обоих сплавов достаточно сильно снижается.

В развитие метода равноканального углового прессования для обработки длинномерных ($l/d \geq 10$) заготовок в Донецком физико-техническом институте был предложен и разработан метод угловой гидроэкструзии (УГЭ) [8]. Получена медная проволока диаметром 0,5 мм из горячепрессованных прутков диаметром 60 мм из меди марок М1 (99,95%) и М06 (99,98%) методами прямой гидроэкструзии, УГЭ и волочения с уникальным комплексом физико-механических свойств меди: предел прочности $\sigma = 686$ МПа при электрической проводимости примерно 86,4% IACS – для меди М1; предел прочности $\sigma = 576$ МПа при электрической проводимости на уровне 96,7% IACS – для меди М06.

В рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» были разработаны новые дисперсно-упрочняемые высокопрочные износостойкие медные сплавы систем Cu-Cr и Cu-Cr-Zr для электроконтактных проводов высокоскоростных железнодорожных магистралей с повышенными эксплуатационными характеристиками. Сплав Cu-Cr-Zr имеет повышенную твердость 220–225 Нv, электропроводность 80% IACS и термическую стабильность (температуру разупрочнения) более 450 °С [9].

В рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по теме «Разработка технологии получения наноструктурированных алюминиевых сплавов с повышенной конструкционной прочностью для применения в электротехнике» получены экспериментальные образцы алюминиевых сплавов Al-Fe с сочетанием прочности (327÷335) МПа и электропроводности (52,3÷49,3)% IACS. Сплав может эксплуатироваться при повышенной температуре до 150 °С [10]. Замена проводов со стальным сердечником на провода из алюмоматричных композитов позволяет повысить значения допустимых плотностей тока в несколько раз и, как следствие, обеспечить передачу большей мощности.

Таким образом, современные технологии позволяют создавать медные и алюминиевые сплавы повышенной прочности, практически сохраняя 90% электропроводности исходного металла, однако эти

технологии не позволяют получить материал с индексом IACS выше 100%, т.е. удельную электропроводность, превышающую удельную электропроводность меди.

Возможности современных технологий позволяют получать наноматериалы, т.е. материалы со структурой элементов, имеющих размеры, равные примерно нескольким нанометрам. Теоретически обосновано использование наноматериалов в металлматричных композиционных материалах, так как они, обладая высокими энергетическим потенциалом и удельной поверхностью, способны изменять уровень взаимодействия на межфазной границе «металл–наполнитель», что позволяет регулировать комплекс свойств металлматричных композиционных материалов.

Углеродный наноматериал (УНМ) при его диспергировании в металлической матрице весьма перспективен для применения в составе композиционных материалов. Углеродные нанотрубки (УНТ) представляют собой протяженные цилиндры из свернутых гексагональных графитовых плоскостей, при этом диаметр трубки находится в нанометровом диапазоне, а длина составляет несколько сантиметров. Трубка оканчивается обычно полусферической головкой в виде половины молекулы фуллерена. Угол ориентации графитовой плоскости относительно оси трубки

$$\alpha = \arctg \frac{n\sqrt{3}}{2m-n} \quad (1)$$

определяет хиральность УНТ, от которой зависят ее электрические характеристики. Индексы обозначения хиральности (m, n) указывают координаты шестиугольника, который в результате сворачивания плоскости должен совпасть с шестиугольником в начале координат. Диаметр однослойной трубки также определяется индексами хиральности:

$$D = \frac{d_0\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{m^2 + n^2 - mn}, \quad (2)$$

где $d_0 = 0,142$ нм – расстояние между соседними атомами углерода в графитовой плоскости.

По измеренному диаметру D чаще всего определяют хиральность трубки. Индексы хиральности определяют и проводимость УНТ: металлическую, $(n-m)/3$ – целое, либо полупроводниковую, $(n-m)/3$ – дробное.

Например, металлическими являются трубки при $\alpha = 0$, ($m, 0$) типа «кресло» (armchair-конфигурация). Углеродные нанотрубки металлического типа проводят электрический ток при абсолютном нуле, а полупроводникового типа при абсолютном нуле обладают нулевой проводимостью, которая возрастает с повышением температуры.

Электрические свойства однослойных УНТ разными группами исследователей оцениваются неоднозначно. Исследования показали, что нанотрубки устойчивы к протеканию тока большой плотности, и проводимость нанотрубок квантуется. Сопротивление цилиндрического наноразмерного резистора определяется двумя фундаментальными физическими константами – зарядом электрона $e = 1,6 \cdot 10^{19}$ Кл и постоянной Планка $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж/с – и названо квантом электрического сопротивления $R_0 = h/(2e^2) = 12,9$ кОм.

Минимальное измеренное значение $0,051$ мкОм·м на порядок ниже измеренного для кристаллического графита в поперечном направлении $0,38$ мкОм·м, но втрое выше сопротивления чистой меди $0,0172$ мкОм·м [11]. В последних публикациях [12] электропроводность УНТ оценивается значением 10^6 – 10^7 См/м, а электропроводность углеродного волокна $(2-8,5) \cdot 10^6$ См/м, т.е. на порядок меньше электропроводности меди.

Многие отечественные и зарубежные исследователи занимаются проблемой получения композиционных материалов, армированных углеродными нанотрубками. Важнейшие методы внедрения в производство и модифицирования углеродных нанотрубок представлены в [13]. Возможность существенного повышения прочностных характеристик термореактивных композитов при введении малых добавок углеродных нанотрубок показана в [14]. Исследованы частотные зависимости проводимости эпоксидных композитов, наполненных нанотрубками в диапазоне концентраций от 0,1 до 10% масс, и предложены различные механизмы проводимости в зависимости от содержания наноуглеродного наполнителя. Установлено, что введение нанотрубок позволяет получить из диэлектрика электропроводный материал с электрической проводимостью однослойных УНТ, равной $8,79$ См/м.

На примере пропиленовых волокон в [15] измерена электропроводность композиционных волокнистых структур с различными концентрациями углеродных наполнителей: технического углерода, графитизированных углеродных нановолокон, одностенных и многостенных нанотрубок. Показано, что изменение электропроводности в зависимости от концентрации углеродного наполнителя носит пороговый характер. Порог протекания электрического тока для нановолокон составляет 1–3%, для нанотрубок 0,6–1,0%, а для технического углерода 10–20%. Для достижения максимально возможных значений проводимости композиционного волокна необходимо учитывать не только значения осевых отношений проводящих частиц, но и характер их диспергирования в полимерной матрице.

Углеродоксидные композиты являются перспективными носителями катализаторов электрод-

ных процессов в электрохимических устройствах. В [16] определены зависимости удельной электропроводности композитов от содержания углеродных наноматериалов (1÷5 мас. %). Композиты сформированы обработкой смесей оксида титана и углеродных наноматериалов в шаровой мельнице. Установлено, что добавление 3 мас. % УНТ к оксиду приводит к резкому увеличению удельной электропроводности от $5,0 \cdot 10^{-4}$ до $0,022$ См/м.

Замена проводов со стальным сердечником на провода из алюмоматричных композитов позволяет повысить значение допустимых плотностей тока в несколько раз и, как следствие, обеспечить передачу большей мощности [17].

Патентом РФ [16] предложен способ получения углеродных нанотрубчатых волокон, имеющих высокий модуль упругости и низкое удельное сопротивление (менее 120 мкОм·см). Удельная электропроводность рассчитывалась как электропроводность, деленная на плотность УНТ-волокна, значение которой лежит в интервале $0,3 \div 2,2$ г/см³. Удельная электропроводность УНТ-волокна по данному изобретению составляет $4,18$ кСм/м²/кг, в то время как у меди она равна $6,59$ кСм/м²/кг, а у алюминиевого сплава $12,3$ кСм/м²/кг.

Нанотрубки применять на практике сложно не только из-за их малых размеров, но и из-за трудностей при сплетении в единое волокно. В результате многолетних экспериментов по связыванию отдельных нанотрубок в подобие нити в университете Райса (Rice University) (Хьюстон, США) получен материал для использования в промышленных целях – более гибкий, чем металлические проводники и обладающий высокой теплопроводностью.

Таким образом, в ближайшее время появится возможность применения в электромеханических преобразователях энергии обмоток из УНТ-волокна, обладающего электропроводностью с индексом IACS 150% в диапазоне некриогенных температур. При применении проводникового материала с удельной электропроводностью выше, чем у меди, джоулевы потери машины уменьшатся обратно пропорционально удельной электропроводности, уменьшится превышение температуры обмотки, однако уровень повышения общего КПД может быть определен только расчетом.

Для оценки эффективности применения новых проводниковых материалов выполнен численный эксперимент для значений удельной электропроводности 100% IACS, 120% IACS и 150% IACS на базовой модели мини-турбогенератора [1]. Базовой моделью является проект ранее разработанного генератора СГПМ-100-70000 ($P=100$ кВт, $U=500$ В, $I=128,3$ А, $n=70000$ мин⁻¹, $m=3$, $\cos\varphi=0,9$), в котором сердечник статора выполнен из электротехнической стали 2421 толщиной $0,18$ мм, поле возбуж-

дения создается высококоэрцитивными постоянными магнитами из сплава неодим-железо-бор марки N38H, а напряжения в бандажном цилиндре $\sigma=900$ МПа. Проект выполнен для двухполюсного и четырехполюсного исполнения, основные технические данные представлены в [1].

Результаты численного эксперимента для различных марок и типов постоянных магнитов [19, 20] представлены в табл. 1. На рис. 1 показана зависимость КПД двухполюсного СГПМ-100-7000 от удельной электропроводности материала обмотки.

Анализ результатов расчета показывает, что значение удельной электропроводности проводникового материала не определяет выбор основных размеров мини-турбогенератора (внешняя характеристика генератора сохраняется) и незначительно влияет на КПД машины (не более 0,1% при изменении IACS в 1,5 раза), но уменьшает потери в обмотке на $80-90$ Вт.

В табл. 2 представлены результаты расчета для различных постоянных магнитов при изменении материала бандажного цилиндра ($\sigma=600$ МПа). Сравнение изменения КПД мини-турбогенератора при различных бандажных цилиндрах выполнено на рис. 2 для постоянных магнитов NdFeB [19].

Замена материала бандажного цилиндра изменяет основные размеры мини-турбогенератора, но не характер зависимости КПД машины от электропроводности проводникового материала (не более 0,1% при изменении IACS в 1,5 раза), при этом потери в обмотке снижаются на $85-100$ Вт.

По методике [21] сделана оценка снижения превышения температуры обмотки при применении материала повышенной электропроводности с индексом IACS 150%. Снижение превышения температуры не более 5 °С, поскольку для магнитопровода из электротехнической стали 2421 потери в стали превышают потери в меди практически на порядок.

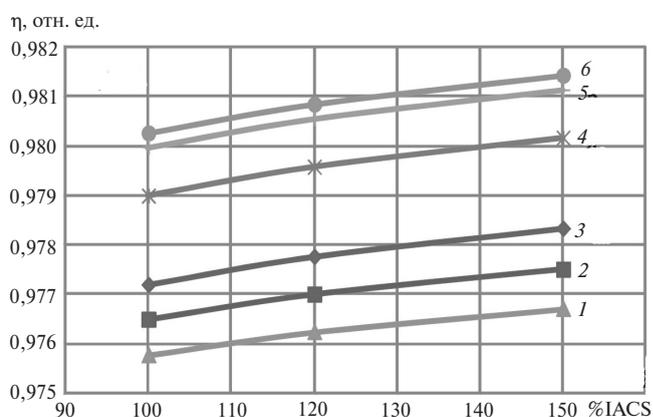


Рис. 1. Зависимость КПД двухполюсного СГПМ-100-7000 от удельной электропроводности материала обмотки: бандажный цилиндр $\sigma=900$ МПа; электротехническая сталь 2421 ($\Delta=0,18$ мм): 1 – N27H; 2 – N38H; 3 – N45H; 4 – XGS28M; 5 – XGS28; 6 – XGSnew

Таблица 1

Изменение характеристик двухполюсного СГПМ-100-7000 от значения удельной электропроводности материала обмотки: бандажный цилиндр $\sigma=900$ МПа; электротехническая сталь 2421 ($\Delta=0,18$ мм)

Параметр	Тип магнита, активная длина L , мм					
	N27H $B_r=1,08$ Т $H_{cb}=836$ кА	N38H $B_r=1,25$ Т $H_{cb}=899$ кА	N45H $B_r=1,38$ Т $H_{cb}=955$ кА	XGS28M $B_r=1,1$ Т $H_{cb}=796$ кА	XGS28 $B_r=1,1$ Т $H_{cb}=820$ кА	XGS28new $B_r=1,1$ Т $H_{cb}=870$ кА
	237	200	179	236,5	234	229,5
IACS=1						
Потери в меди P_{Cu} , Вт	274,1	248,1	233,3	271,8	270,0	266,9
Номинальное напряжение ΔU , отн. ед.	0,951	0,949	0,950	0,951	0,951	0,951
КПД η , отн. ед.	0,9772	0,9765	0,9758	0,9790	0,9803	0,9800
IACS=1,2						
Потери в меди P_{Cu} , Вт	228	207	194	227	225	222
Номинальное напряжение ΔU , отн. ед.	0,951	0,949	0,950	0,951	0,951	0,951
КПД η , отн. ед.	0,9778	0,9770	0,9762	0,9796	0,9808	0,9805
IACS=1,5						
Потери в меди P_{Cu} , Вт	182,7	165,4	155,5	181,2	180,0	177,9
Номинальное напряжение ΔU , отн. ед.	0,951	0,949	0,950	0,951	0,951	0,951
КПД η , отн. ед.	0,9783	0,9775	0,9767	0,9802	0,9814	0,9811

Таблица 2

Изменение характеристик двухполюсного СГПМ-100-7000 от значения удельной электропроводности материала обмотки: бандажный цилиндр $\sigma=600$ МПа; электротехническая сталь 2421 ($\Delta=0,18$ мм)

Параметр	Тип магнита, активная длина L , мм					
	N27H $B_r=1,08$ Т $H_{cb}=836$ кА	N38H $B_r=1,25$ Т $H_{cb}=899$ кА	N45H $B_r=1,38$ Т $H_{cb}=955$ кА	XGS28M $B_r=1,1$ Т $H_{cb}=796$ кА	XGS28 $B_r=1,1$ Т $H_{cb}=820$ кА	XGS28new $B_r=1,1$ Т $H_{cb}=870$ кА
	272	235	213	273,5	270	264
IACS=1						
Потери в меди P_{Cu} , Вт	298,7	272,7	257,2	297,8	295,4	291,1
Номинальное напряжение ΔU , отн. ед.	0,949	0,949	0,950	0,950	0,949	0,950
КПД η , отн. ед.	0,9811	0,9806	0,9801	0,9824	0,9824	0,9823
IACS=1,2						
Потери в меди P_{Cu} , Вт	248,9	227,2	214,3	248,2	246,1	242,6
Номинальное напряжение ΔU , отн. ед.	0,949	0,949	0,950	0,950	0,949	0,950
КПД η , отн. ед.	0,9817	0,9812	0,9806	0,9831	0,9831	0,9829
IACS=1,5						
Потери в меди P_{Cu} , Вт	199,1	181,8	171,5	198,5	196,9	194,1
Номинальное напряжение ΔU , отн. ед.	0,949	0,949	0,950	0,950	0,949	0,950
КПД η , отн. ед.	0,9823	0,9817	0,9811	0,9837	0,9837	0,9835

В табл. 3 представлены результаты расчета 4-полюсного мини-турбогенератора для различных постоянных магнитов и бандажного цилиндра ($\sigma=900$ МПа) при сердечнике статора из аморфного сплава ГМ-440. Зависимость КПД 4-полюсного СГПМ-100-7000 от удельной электропроводности материала обмотки показана на рис. 3 для постоянных магнитов NdFeB.

Замена материала сердечника статора на аморфный сплав увеличивает КПД мини-турбогенератора

и немного увеличивает зависимость КПД машины от электропроводности проводникового материала (не более 0,15% при изменении IACS в 1,5 раза). Уровень абсолютного уменьшения джоулевых потерь остается на прежнем уровне 75÷90 Вт. Поскольку уровень потерь в магнитопроводе из аморфного сплава определяет низкое значение превышения температуры обмотки, то дальнейшее его снижение за счет повышения электропроводности

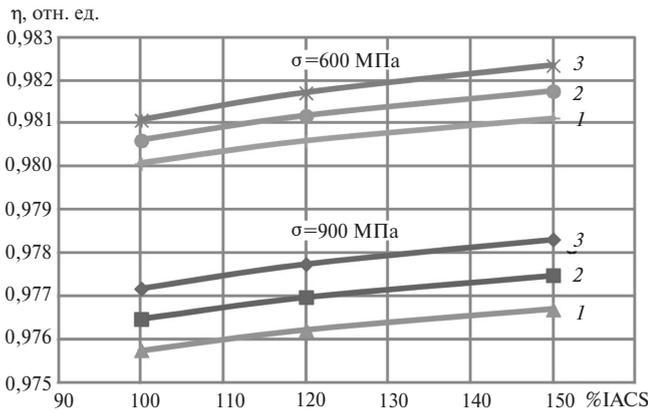


Рис. 2. Зависимость КПД двухполюсного СГПМ-100-7000 от удельной электропроводности материала обмотки: постоянные магниты NdFeB: 1 – N27H; 2 – N38H; 3 – N45H; электротехническая сталь 2421 ($\Delta=0,18$ мм)

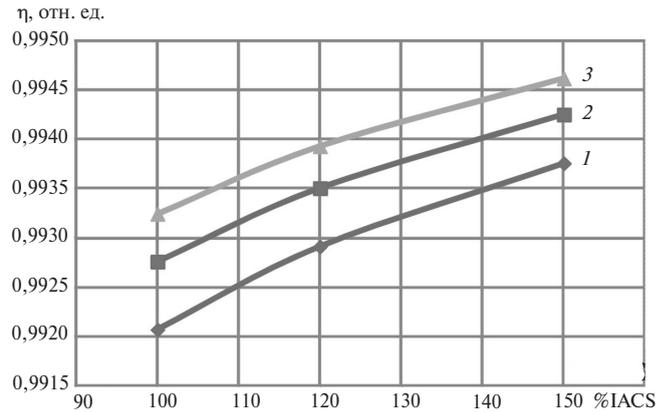


Рис. 3. Зависимость КПД четырехполюсного СГПМ-100-7000 от значений удельной электропроводности материала обмотки: бандажный цилиндр $\sigma=900$ МПа; аморфный сплав ГМ-440: 1 – N27H; 2 – N38H; 3 – N45H

сти материала обмотки составляет 27%, хотя в абсолютных единицах это 3,4 °С.

Таким образом, основной эффект от применения проводниковых материалов с повышенной электропроводностью заключается в уменьшении на 70–100 Вт джоулевых потерь в обмотке генератора мощностью 100 кВт, что позволяет повысить эффективность жидкостного охлаждения статора или перейти на газовое охлаждение машины.

Применение материала с повышенной по сравнению с медью электропроводностью более эффективно для электромеханических преобразователей энергии при частоте 50 Гц. Так, для турбогенератора ТФЭ-10-2ГУЗ (10 МВт, 6,3 кВ, 3000 мин⁻¹) газотурбинной ТЭЦ малой энергетики изменение электропроводности материала обмотки в 1,5 раза

уменьшает потери на 19,1 кВт (33%) и повышает КПД на 0,2%.

Полученная в результате численного эксперимента расчетная база выходных параметров мини-турбогенератора, характеризующих влияние электропроводности проводникового материала обмотки, позволяет предложить методику оценки такого влияния путем решения задачи линейного программирования, которая формулируется как определение КПД генератора для заданного типа магнита, бандажного цилиндра и материала сердечника статора при изменении удельной электропроводности материала обмотки статора. Вариация удельной электропроводности обеспечивает выполнение требований, предъявляемых к мини-турбогенератору (заданные номинальные данные, поперечная геометрия, внешняя характеристика генера-

Таблица 3

Изменение характеристик генератора от значений удельной электропроводности материала обмотки: бандажный цилиндр $\sigma=900$ МПа; аморфный сплав ГМ-440

Параметр	Тип магнита					
	N27H $B_r=1,08$ Т $H_{cb}=836$ кА	N38H $B_r=1,25$ Т $H_{cb}=899$ кА	N45H $B_r=1,38$ Т $H_{cb}=955$ кА	XGS28M $B_r=1,1$ Т $H_{cb}=796$ кА	XGS28 $B_r=1,1$ Т $H_{cb}=820$ кА	XGS28new $B_r=1,1$ Т $H_{cb}=870$ кА
IACS=1						
Потери в меди P_{Cu} , Вт	262,8	237,1	221,4	269,5	260,9	231,3
Номинальное напряжение ΔU , отн. ед.	0,950	0,950	0,949	0,982	0,950	0,819
КПД η , отн. ед.	0,9921	0,9928	0,9932	0,9934	0,9936	0,9944
IACS=1,2						
Потери в меди P_{Cu} , Вт	219,0	197,5	184,5	224,6	217,4	192,8
Номинальное напряжение ΔU , отн. ед.	0,950	0,950	0,949	0,982	0,950	0,819
КПД η , отн. ед.	0,9929	0,9935	0,9939	0,9942	0,9944	0,9951
IACS=1,5						
Потери в меди P_{Cu} , Вт	175,2	158,0	147,6	179,7	173,9	154,2
Номинальное напряжение ΔU , отн. ед.	0,950	0,950	0,949	0,982	0,950	0,819
КПД η , отн. ед.	0,9938	0,9942	0,9946	0,9951	0,9953	0,9958

тора), и в то же время изменяет потери в меди и КПД генератора.

Задача линейного программирования в стандартной форме записывается так. Требуется обеспечить максимум функции

$$z = \max \sum_{i=1}^9 C_i x_i. \quad (3)$$

В качестве целевой функции z принимается общий КПД η . Соответствующие значения η для коэффициентов C_i целевой функции могут быть взяты из табл. 1–3.

Ограничения заданы в виде равенств с неотрицательными переменными:

$$x_{10} + \sum_{i=1}^9 a_{1i} x_i = b_1; \quad x_{11} + \sum_{i=1}^9 a_{2i} x_i = b_2; \\ x_{12} + \sum_{i=1}^9 a_{3i} x_i = b_3; \quad \sum_{i=1}^9 x_i = 1; \quad x_i \geq 0; \quad i=1..12. \quad (4)$$

Для определения КПД генератора при изменении параметров как магнита, так и бандажного цилиндра коэффициенты в уравнениях ограничений равны: a_{1i} – значениям активной длины машины L_i ; a_{2i} – значениям потерь в обмотке P_{Cu} ; a_{3i} – значениям электропроводности материала % IACS $_i$. Погрешность поиска КПД генератора при различных IACS для параметров магнита NdFeB и бандажного цилиндра путем решения задачи линейного программирования при использовании шести переменных представлена в табл. 4.

Таблица 4

Погрешность решения задачи линейного программирования при поиске КПД генератора при различных IACS за счет одновременного изменения параметров магнита NdFeB и бандажного цилиндра при использовании шести переменных

Значение IACS	σ , МПа	Целевая функция z	Электромагнитный расчет $z_{рас}$	$\frac{ z_{рас} - z }{z_{рас}}$, %
IACS=100%	1233	0,9722	0,9724	0,02
	900	0,9766	0,9765	-0,01
	611	0,9805	0,9806	0,01
IACS=150%	1233	0,9732	0,9733	0,01
	900	0,9777	0,9775	-0,02
	611	0,9817	0,9817	0,00

Выводы. 1. В ближайшее время можно ожидать использования в электромеханических преобразователях энергии обмоток из УНТ-волокна, обладающего электропроводностью с индексом IACS 150% в диапазоне некриогенных температур.

2. Для двухполюсного исполнения высокоскоростного мини-турбогенератора СГПМ-100-70000 ($P=100$ кВт, $U=500$ В, $I=128,3$ А, $n=70000$ мин $^{-1}$) применение материала со значением электропроводности, в 1,5 раза большей чем у меди, приведет к снижению потерь в обмотке на 84 Вт, уменьшению превышения температуры обмотки на 3,5 °С и увеличению КПД на 0,1%, поскольку основные потери машины будут в электротехнической стали (1880 Вт).

3. Для четырехполюсного исполнения СГПМ-100-7000 с магнитопроводом из аморфного сплава ГМ-440 применение материала обмотки с индексом электропроводности IACS 150% приведет к снижению потерь в обмотке на 82 Вт, а также к уменьшению превышения температуры обмотки на 3,4 °С и увеличению КПД на 0,15%, поскольку снижение потерь в магнитопроводе уже определяет низкий уровень превышения температуры обмотки.

4. Применение материала с повышенной по сравнению с медью электропроводностью более эффективно для электромеханических преобразователей энергии при частоте 50 Гц, для которых КПД повышается на 0,2%, появляется возможность существенного уменьшения расхода хладагента.

5. Погрешность поиска значения КПД генератора при различных IACS для разных параметров магнита NdFeB и бандажного цилиндра путем решения задачи линейного программирования при использовании шести переменных не превосходит 0,02%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Выбор магнитных и ферромагнитных материалов для высокоскоростных мини-турбогенераторов. – Электричество, 2017, № 7, с. 38–46.
2. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Применение линейного программирования для эффективного проектирования высокоскоростных мини-турбогенераторов. – Энергетик, 2018, № 4, с. 43–46.
3. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Перспективные металлические стекла для высокоскоростных электромеханических преобразователей энергии. – Физика и химия стекла, 2018, т. 44, № 2, с. 206–213.
4. Осинцев О.Е., Федоров В.Н. Медь и медные сплавы. М.: Машиностроение, 2004, 336 с.
5. Валиев Р.З., Гундеров Д.В., Мурашкин М.Ю., Семенова И.П. Объемные наноструктурные металлы и сплавы с уникальными механическими свойствами для перспективных применений. – Вестник УГАТУ, 2006, т. 7, № 3(16), с. 23–34.
6. Нестеров К.М., Исламгалиев Р.К., Валиев Р.З. Прочность и электропроводность ультрамелкозернистого медного сплава системы Cu-Cr. УГАТУ. Машиностроение, 2012, т. 16, № 8 (53), с. 110–117.
7. Степанов Н.Д. Получение УМЗ структуры в меди и микрокомпозиционных медных сплавах методами больших пластических деформаций и ее влияние на свойства прочности и электропроводности: Автореф. дисс.... канд. техн. наук: 05.16.01. Екатеринбург, 2013, 23 с.
8. Давиденко А.А. Получение высокопрочной наноструктурной медной проволоки с использованием метода угловой гидротрунции. – Сб. трудов VII Российской ежегодной конф. молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и

технология неорганических материалов». М: Интерконтакт, Наука, 2010, с. 24–25.

9. Чувиладель В.И., Копылов В.И., Нохрин А.В., Лопатин Ю.Г., Мелехин Н.В., Сахаров Н.В., Пискунов А.В. Термическая стабильность структуры и физико-механических свойств нано- и микрокристаллических металлов и сплавов, полученных методом равноканального углового прессования. — Сб. тезисов 7-й Международной конф. «Фазовые превращения и прочность кристаллов 2012». Черногоровка, 2012, с. 166.

10. Медведев А.Е., Мурашкин М.Ю., Еникеев Н.А., Овидько И.А., Валиев Р.З. Прочность и электропроводность ультрамелкозернистого алюминиевого сплава Al-2Fe, подвергнутого отжигу и деформации. — Физика и механика материалов, 2015, т. 24, № 3, с. 297–307.

11. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки. — Успехи физических наук, 1997, т. 9, с. 945–972.

12. Хуссейн С.М.Р.Х., Ханфар А. Углеродные нанотрубки: проблемы и перспективы их использования. — Успехи современной науки, 2017, т. 4, № 4, с. 166–169.

13. Дьячкова Т.П., Ткачев А.Г. Методы функционализации и модифицирования углеродных нанотрубок. М.: Изд. дом «Спектр», 2013, 152 с.

14. Яковлев Е.А., Яковлев Н.А., Ильиных И.А., Бурмистров И.Н., Горшков Н.В. Исследование влияния функционализированных многостенных углеродных нанотрубок на электропроводность и механические характеристики эпоксидных композитов. — Вестник Томского гос. ун-та, 2016, № 3(5), с. 15–23.

15. Москалюк А.Б., Алешин А.Н., Цобкалло Е.С., Крестинин А.В., Юдин В.Е. Электропроводность полипропиленовых волокон с дисперсными углеродными наполнителями. — Физика твердого тела, 2012, т. 54, вып. 10, с. 1993–1998.

16. Пат. на изобретение РФ №2621102. Углеродное нанотрубчатое волокно, имеющее низкое удельное сопротивление/М.Я. Отто, де Й. Йонг и др. — БИ, 2017, № 16.

17. Володин А.А., Бельмесов А.А., Мурзин В.Б., Фурсиков П.В., Золотаренко А.Д., Тарасов Б.П. Электропроводящие композиты на основе оксида титана и углеродных нанотрубок. — Неорганические материалы, 2013, т. 49, № 7, с. 702–708.

18. Евдокимов И.А., Прусов Е.С., Киреев А.В. Модифицированные углеродными наноструктурами функциональные металломатричные композиционные материалы на основе алюминия и его сплавов с повышенными механическими и эксплуатационными свойствами. — Ползуновский альманах, 2010, № 2, с. 264–268.

19. Сайт компании ЗАО НПП «Редмаг» [Официальный сайт] <http://redmagnit.com/61.html>. (Дата обращения 17.10. 2018).

20. Сайт компании Bossgoo.com [Официальный сайт] <http://china-magnets.ru.bossgoo.com/> (Дата обращения 14.09.2018).

21. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Оценка систем охлаждения высокоскоростных мини-турбогенераторов. — Электричество, 2017, № 6, с. 36–42.

[22.11.2018]

А в т о р ы: Антипов Виктор Николаевич окончил Ленинградский политехнический институт (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет) в 1963 г. Защитил докторскую диссертацию «Обеспечение заданных коммутационных качеств при проектировании машин постоянного тока промышленного назначения» в 1989 г. Ведущий научный сотрудник Института химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН).

Грозов Андрей Дмитриевич окончил Ленинградский политехнический институт в 1979 г. Научный сотрудник ИХС РАН.

Иванова Анна Владимировна окончила Ленинградский государственный университет в 1979 г. Защитила кандидатскую диссертацию «Колебания модели упругого летательного аппарата в виде системы тонкостенных стержней в турбулентной атмосфере» в 1989 г. Старший научный сотрудник ИХС РАН.

Elektrichestvo, 2019, No 5. pp. 24–32

DOI:10.24160/0013-5380-2019-5-24-32

New Conducting Materials and Their Influence on the Parameters of High-Speed Electromechanical Power Converters

ANTIPOV Viktor N. (*Russian Academy of Sciences (RAS), Institute of Silicate Chemistry (ISCh), St. Petersburg, Russia*) — *Leading scientist, Dr. Sci. (Eng.)*

GROZOV Andrey D. (*RAS, ISCh, St. Petersburg, Russia*) — *Scientist*

IVANOVA Anna V. (*RAS, ISCh, St. Petersburg, Russia*) — *Senior scientist, Cand. Sci. (Eng.)*

The article presents the results from an analysis of the latest achievements in development of materials having increased electrical conductivity. It is shown that there is a possibility to construct in the nearest future electromechanical power converters with windings made of carbon nanofiber the electrical conductivity of which in the range of non-cryogenic temperatures is a factor of 1.5 higher than that of Grade MM copper. The effect the electrical conductivity of conducting materials has on the parameters of mini turbine generators is investigated using the numerical experiment method for different magnetic, ferromagnetic, and structural materials. It is found that for high-speed miniturbine generators, the conducting material electrical conductivity value does not determine the choice of the mini turbine generator main dimensions and has an insignificant effect on the machine efficiency and on the extent to which the winding temperature is exceeded. The use of material having increased electrical conductivity is more efficient for electromechanical power converters operating at the 50 Hz frequency, for which it becomes possible to operate with an essentially lower cooling agent flow rate. A procedure for estimating the parameters of mini

turbine generators from the characteristics of conducting materials based on solving the linear programming problem is proposed.

Key words: high-speed miniturbine generator, amorphous alloy, linear programming, permanent magnet, tangential stress, carbon nanomaterial, electrical steel

REFERENCES

1. Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 7, pp. 38–46.
2. Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. *Energetik – in Russ. (Power Engineering Specialist)*, 2018, No. 4, pp. 43–46.
3. Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. *Fizika i khimiya stekla – in Russ. (Physics and Chemistry of Glass)*, 2018, vol. 44, No. 2, pp. 206–213.
4. Osintsev O.Ye., Fedorov V.N. *Med' i mednye splavy* (Copper and copper alloys). Moscow, Mashinostroeniye, 2004, 336 p.
5. Valiyev R.Z., Gunderov D.V., Muraskin M.Yu., Semenova I.P. *Vestnik of UGATU – in Russ. (Bulletin of Ufa State Aviation Technological University)*, 2006, vol. 7, No. 3 (16), pp. 23–34.
6. Nesterov K.M., Islamgaliyev R.K., Valiyev R.Z. *Prochnost' i elektroprovodnost' ul'tramelkozernistogo mednogo splava sistemy Cu-Cr* (The strength and electrical conductivity of an ultrafine-grained copper alloy of the Cu-Cr system). Ufa State Aviation Technological University. Mashinostroeniye, 2012, vol. 16, No. 8 (53), pp. 110–117.
7. Stepanov N.D. *Polucheniye YM3 struktury v medi i mikrokompozitsionnykh mednykh splavakh metodami bol'shikh plasticheskikh deformatsiy i eye vliyaniye na svoystva prochnosti i elektroprovodnosti: Avtoref. diss.... kand. tekhn. nauk* (Obtaining an ultrafine-grained structure in copper and microcomposition copper alloys using the methods of large plastic deformations and its influence on the strength and electrical conductivity properties): Author's abstract. diss. ... Cand. Sci. (Eng.). 05.16.01. Ekaterinburg, 2013, 23 p.
8. Davidenko A.A. *Polucheniye vysokoprochnoi nanostrukturalnoy mednoi provoloki s ispol'zovaniyem metoda uglovoi gidroekstruzii. – Sb. trudov VII Rossiyskoi ezhegodnoi konf. molodykh nauchnykh sotrudnikov i aspirantov «Fiziko-khimiya i tekhnologiya neorganicheskikh materialov* (Obtaining a high-strength nanostructured copper wire using the angular hydraulic extrusion method, in Proceedings of the Seventh Annual Russian Conference of Young Researchers and Post-Graduate Students «Physicochemistry and Technology of Inorganic Materials»). Moscow, Interkontakt, Nauka, 2010, pp. 24–25.
9. Chuvil'deyev V.N., Kopylov V.I., Nokhrin A.V., Lopatin Yu.G., Melekkhin N.V., Sakharov N.V., Piskunov A.V. *Termicheskaya stabil'nost' struktury i fiziko-mekhanicheskikh svoystv nano- i mikrokristallicheskih metallov i splavov, poluchennykh metodom ravnokanal'nogo uglovogo pressovaniya. – Sb. tezisov 7-y Mezhdunarod. konf. «Fazovye prevrashcheniya i prochnost' kristallov 2012»* (Thermal stability of the structure and physicochemical properties of nano- and microcrystalline metals and alloys obtained using the equal-channel angular pressing method, in Abstracts of the Seventh International Conference «Phase Transformations and Strength of Crystals 2012»). Chernogolovka, 2012, 166 p.
10. Medvedev A.Ye., Murashkin M.Yu., Yenikeev N.A., Ovid'ko I.A., Valiyev R.Z. *Fizika i mekhanika materialov – in Russ. (Physics and Mechanics)*, 2015, vol. 24, No. 3, pp. 297–307.
11. Yeletskiy A.V. *Uspekhi fizicheskikh nauk – in Russ. (Advances in the physical sciences)*, 1997, vol. 9, pp. 945–972.
12. Khusseyin S.M.R.Kh., Khanfar A. *Uspekhi sovremennoy nauki – in Russ. (Successes of modern science)*, 2017, vol. 4, No. 4, pp. 166–169.
13. D'yachkova T.P., Tkachev A.G. *Metody funktsionalizatsii i modifitsirovaniya uglerodnykh nanotrubok* (Carbon nanotubes functionalization and modification methods). Moscow, Publ. House «Spektr», 2013, 152 p.
14. Yakovlev Ye.A., Yakovlev N.A., P'inykh I.A., Burmistrov I.N., Gorshkov N.V. *Vestnik Tomskogo gos. universiteta. – in Russ. (Bulletin of Tomsk State University)*, 2016, No. 3 (5), pp. 15–23.
15. Moskalyuk A.B., Aleshin A.N., Tsobkallo Ye.S., Krestinin A.V., Yudin V.Ye. *Fizika tverdogo tela – in Russ. (Solid state physics)*, 2012, vol. 54, iss. 10, pp. 1993–1998.
16. Pat. na izobreteniya RF No. 2621102. *Uglerodnoe nanotrubchatoye volokno, imeyushcheye nizkoe udel'noe soprotivleniye* (Carbon nanotubular fiber having low resistivity, RF Invention Patent No. 2621102)/M.Ya Otto, de Y. Yong and et al. Bulletin of inventions, 2017, No. 16.
17. Volodin A.A., Bel'mesov A.A., Murzin V.B., Fursikov P.V., Zolotareno A.D., Tarasov B.P. *Neorganicheskiye materialy – in Russ. (Inorganic materials)*, 2013, vol. 49, No. 7, pp. 702–708.
18. Yevdokimov I.A., Prusov Ye.S., Kireyev A.V. *Polzunovskiy al'manakh – in Russ. (Polzunovsky almanac)*, 2010, No. 2, pp. 264–268.
19. Sayt JSC NPP «Redmag» [Ofits. Sayt] <http://redmagnit.com/61.html> (Data obrashchniya 17.10. 2018).
20. Сайт компании Bossgoo.com. [Ofits. Sayt] <http://china-magnets.ru.bossgoo.com/> (Data obrashchniya 14.09.2018).
21. Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 6, pp. 36–42.

[22.11.2018]