

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

ВЫБОР ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКОЛ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

В.Н. Антипов, вед. научн. сотр. Института химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН), г. Санкт-Петербург, д-р техн. наук, bht@mail.ru

А.Д. Грозов, научн. сотр. Института химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН), г. Санкт-Петербург, bht@mail.ru

А.В. Иванова, ст. научн. сотр. Института химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН), г. Санкт-Петербург, канд. физ.-мат. наук, iann57@mail.ru

На рубеже XX–XXI веков в децентрализованной энергетике появилось новое высокоэффективное оборудование – малоразмерные газотурбинные установки мощностью до 200 кВт и частотой вращения до 100 000 мин⁻¹. Преимущество нового оборудования заключается не только в малых размерах, но и в его высокой надежности, экологичности и энергоэффективности. Малоразмерные газотурбинные установки легко объединяются в кластер, что обеспечивает потребителя необходимой величиной установленной мощности [1]. В малоразмерных газотурбинных установках осуществлена интегральная компоновка мини-турбогенератора с турбиной и компрессором при высоких уровнях тепловых, механических и электромагнитных нагрузок. При проектировании высокоскоростных мини-турбогенераторов одной из важных задач является уменьшение потерь в ферромагнитном материале сердечника статора, которые по сравнению с общепромышленными машинами имеют повышенное значение из-за высокой частоты перемагничивания электромагнитного поля. Задача решается как вынужденным ограничением допустимых значений электромагнитных нагрузок, так и выбором материалов и передовых технологий [2–5]. Низкий уровень потерь и достаточно высокие значения индукции насыщения делают металлические стекла привлекательным материалом для применения в электромеханических преобразователях энергии, в частности в высокоскоростных мини-турбогенераторах мощностью 100–200 кВт на основе высокоскоростных (до 100 000 мин⁻¹) газовых турбин.

Ключевые слова: металлические стекла, мини-турбогенераторы, аморфные сплавы, нанокристаллические сплавы, потери энергии.

SELECTION OF PROSPECTIVE METALLIC GLASSES FOR HIGH-SPEED ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERTERS

V.N. Antipov, Leading Researcher, Institute of Silicate Chemistry, RAS, St. Petersburg, Ph. D., bht@mail.ru

A.D. Grozov, Researcher, Institute of Silicate Chemistry, St. Petersburg, RAS, St. Petersburg, bht@mail.ru

A.V. Ivanova, Senior Researcher, Institute of Silicate Chemistry, RAS, Doctor of Physics and Mathematics, St. Petersburg, iann57@mail.ru

The possibilities of using metal glasses for magnetic cores of high-speed mini-turbogenerators with a rotation frequency of up to 100 000 rpm are studied. The existing amorphous and nanocrystalline alloys satisfying the requirements for designing mini-turbogenerators are analyzed. A numerical

experiment has shown that in the manufacture of the stator core from electrical steel, the transition to the preferred 4-pole design is practically impossible due to the increase in losses and the inevitable overheating of the stator winding, but the use of the domestic amorphous alloy GM-440V provides the possibility to halve the weight of the generator and an increase in its efficiency by 2%. Domestic nanocrystalline alloys are not inferior to foreign alloys in terms of their characteristics; however, they do not have sufficiently high values of the saturation magnetic flux density for use in magnetic cores. The prospect of increasing the induction of nanocrystalline alloys is highly likely in the near future.

Keywords: metallic glasses, mini-turbogenerators, amorphous alloys, nanocrystalline alloys, energy losses.

Выбор материала для применения

Металлические стекла – это аморфные металлические сплавы, в которых отсутствует дальний порядок в расположении атомов, что существенно отличает их от обычных кристаллических металлов. Аморфное состояние представляет собой некристаллическое состояние твердого вещества, которое характеризуется изотропией свойств и отсутствием точки плавления. Твердое тело в аморфном состоянии принято рассматривать как переохлажденную жидкость с очень высоким коэффициентом вязкости [6].

Лента из аморфных и нанокристаллических сплавов изготавливается на уникальном высокоточном оборудовании из расплава методом литья плоской струи металлического расплава заданного химического состава на кобальтовой или железной основе на поверхность охлаждаемого диска, движущуюся с линейной скоростью от 20 до 30 м/с, и быстрого (со скоростью ~ 106 °С/сек) затвердевания плоской струи расплава [7]. При таком процессе затвердевания расплава не успевает происходить кристаллизация металлической ленты, и она имеет структуру металлического стекла.

Благодаря технологии изготовления аморфной ленты в настоящее время получены сотни различных составов, изучены структура и свойства металлических стекол и найдены широкие области их применения, основные из которых показаны в табл. 1 [8–9].

Таблица 1

Свойства и области применения аморфных металлических материалов

Свойство	Область применения	Состав сплава
Высокая прочность, высокая вязкость	Проволока, армирующие материалы, пружины, режущий инструмент	$Fe_{75}Si_{15}B_{10}$
Высокая коррозионная стойкость	Электродные материалы, фильтры для работы в растворах кислот, морской воде, сточных водах	$Fe_{45}Cr_{25}Mo_{10}P_{13}C_7$
Высокая магнитная индукция насыщения, низкие потери	Сердечники трансформаторов, преобразователи, дроссели	$Fe_{81}B_{15}C_2$
Высокая магнитная проницаемость, низкая коэрцитивная сила	Магнитные головки и экраны, магнетометры, сигнальные устройства	$Fe_5Co_{70}Si_{10}B_{15}$
Постоянство модулей упругости и температурного коэффициента линейного расширения	Инварные и элинварные материалы	$Fe_{83}B_{17}$

Металлические стекла характеризуются высоким уровнем индукции насыщения, высокой магнитной проницаемостью и низким уровнем потерь в широком частотном диапазоне, низкой магнитострикцией, устойчивостью к изменению температуры и малым эффектом

старения. В настоящий момент ассортимент аморфных и наноструктурированных сплавов достаточно широк [6, 10], и, решая задачу выбора ферромагнитного (аморфного или нанокристаллического) материала для сердечника статора мини-турбогенератора, необходимо стремиться в диапазоне частот перемагничивания до 3000 Гц в первую очередь к допустимым значениям индукции насыщения на уровне электротехнической стали (1,8 Тл) и снижению на порядок электромагнитных потерь.

Аморфный сплав на основе железа марок 7421, 7411, 2НСР и 2ХСР разрабатывался для серийного выпуска трансформаторов средней мощности промышленной и повышенной частоты. Ориентировочный диапазон частот применения – 0,4–10 кГц. По сравнению с кристаллической электротехнической сталью имеет более низкие удельные потери $P_{уд}$ при относительно высоких значениях индукции насыщения B_s . Эти сплавы не содержат остродефицитных кобальта и никеля [6].

Аморфные железоникелевые сплавы марок 10НСР, АМАГ 212, АМГ 225 обладают довольно высокими значениями индукции насыщения B_s , магнитной проницаемости μ и коэффициента прямоугольности K_p , а также относительно малой величиной коэрцитивной силы H_c [11]. Основное применение такие сплавы находят в силовых трансформаторах преобразователей, в высокочастотных магнитных усилителях, в фазовращателях и магнитных модуляторах. Диапазон частот применения – 5–50 кГц.

Аморфные железокобальтовые сплавы могут быть разделены на сплавы с большим содержанием железа (24КСР, 30КСР, 9КСР, АМАГ 325), близкие по свойствам к железоникелевым сплавам и имеющие общую область применения, и сплавы с большим содержанием кобальта (71КНСР, 84КСР, 84КХСР, 86КГСР, 82К2ХСР, 823ХСР, АМАГ 176, АМАГ 183Б, ГМ-501, ГМ-503А, ГМ-503ВБ ГМ-515А), обладающие небольшой величиной H_c , высокой магнитной проницаемостью, имеющие близкую к нулевой магнитострикцию и высокие значения коэффициента прямоугольности. Последние предназначены для работы на высоких (до 200 кГц) частотах, в высокочастотных силовых трансформаторах, магнитных ключах, экранах, магнетометрах и т.д. [12, 13].

Структура нанокристаллических сплавов представляет собой двухфазную систему, одной из фаз которой являются нанокристаллы, а другой – остаточная аморфная матрица. Размер кристаллов (наночастиц) в этих сплавах составляет от 1 до 10 нм. Наиболее распространенный метод получения наноструктуры – регулируемая кристаллизация из исходного аморфного состояния [9]. Одним из первых и хорошо известных нанокристаллических сплавов является японский материал FINEMET [13–15].

Таблица 2

Магнитные свойства FINEMET в сравнении с обычными материалами

Материал	Толщина, мкм	B_s , Т	B_r/B_s , %	H_c , А/м	$\mu \cdot 10^3$, Гн/м	$P_{уд}$, кВт/м ³	T_c , °С
Finemet							
FT-1Н	18	1,35	90	0.8	5.0	950	570
FT-1М	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

Создатели сплава характеризуют его как материал, сочетающий в себе высокие значения индукции насыщения ($B_s \sim 1,2$ Т) и магнитной проницаемости ($\mu \sim 10^5$ на частоте 1 кГц) с низкими величинами коэрцитивной силы ($H_c \sim 1,0$ А/м), магнитострикции (~ 0) и потерь.

Точное управление параметрами отжига позволяет в широких пределах регулировать требуемые свойства материала (форму петли гистерезиса, уровень магнитной проницаемости, коэффициент прямоугольности, удельные потери). Фирма выпускает ленту трех типов с различными формами петли гистерезиса, а именно с высоким (FT-1H), средним (FT-1M) и низким (FT-1L) коэффициентом остаточной намагниченности. Вид кривой $B = f(H)$ определяется направлением приложения магнитного поля в процессе отжига. Магнитные свойства FINEMET в сравнении с обычными материалами представлены в табл. 2.

Таблица 3

Типичные физические свойства металлических стекол

Металлический сплав	ГМ-503В	ГМ-440В	ГМ-412В	FT-3L
Магнитная индукция, Тл	0,58	1,5	1,17	1,23
Максимальная относительная магнитная проницаемость	50 000	20 000	45 000	50 000
Коэрцитивная сила, А/м	0,25	4,0	1,2	0,6
Магнитострикция насыщения	$< 0,2 \cdot 10^{-6}$	$25 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	≈ 0
Температура Кюри, °С	260	420	610	570
Удельные магнитные потери (Вт/кг) для частоты 3000 Гц, индукции 1,0 Тл	2,03	8,02	2,69	2,37

Одно из ведущих отечественных предприятий по производству аморфных и нанокристаллических магнитомягких сплавов и изделий из них – ООО НПП «Гаммамет» [12]. Предприятие выпускает аморфные сплавы на основе кобальта (ГМ-501, ГМ-503А, ГМ-503В, ГМ-515А) и аморфные (ГМ-440А, ГМ-440В) и нанокристаллические (ГМ-414, ГМ-414М, ГМ-412А, ГМ-412В) сплавы на основе железа.

Для выбора перспективных металлических стекол для высокоскоростных мини-турбогенераторов в табл. 3 собраны для анализа характеристики аморфных и наноструктурированных металлических сплавов отечественного производителя ООО НПП «Гаммамет» [12] и наноструктурированного сплава FINEMET японской фирмы «Hitachi Metal, Ltd» [13].

Следует отметить, что частотный диапазон применения этих сплавов (200 кГц) значительно выше, чем диапазон работы мини-турбогенераторов, поэтому анализ следует проводить для частоты 3 кГц, при которой магнитная проницаемость близка к начальной магнитной проницаемости материала (снижение не более 3%). Удельные магнитные потери (табл. 3) рассчитаны для частоты 3000 Гц и индукции 1,0 Тл.

Аморфные металлические сплавы на кобальтовой основе (ГМ-503В) имеют наименьшие удельные потери, но уступают аморфным и нанокристаллическим сплавам на основе железа по индукции насыщения, значения которой не позволяют применить аморфные кобальтовые сплавы для высокоскоростных мини-турбогенераторов. Аморфный сплав ГМ-440В уступает наноструктурированному сплаву ГМ-412В по величине удельных потерь, но превосходит по величине индукции насыщения. Достигнутые значения характеристик металлического стекла ГМ-440В вполне достаточны для применения в мини-турбогенераторах.

Методика численного эксперимента

В качестве базовой модели мини-турбогенератора для выполнения численного эксперимента выбран проект ранее разработанного генератора СГПМ-100-70000 ($P = 100$ кВт, $U = 500$ В, $I = 128,3$ А, $n = 70000$ мин⁻¹, $m = 3$, $\cos\phi = 0,9$), в котором сердечник статора

выполнен из электротехнической стали 2411 толщиной 0,18 мм, а поле возбуждения создается высококоэрцитивными постоянными магнитами из сплава неодим-железо-бор марки N38H [16]. Проект выполнен для двухполюсного и четырехполюсного исполнения, конструкция мини-турбогенератора представлена на рис. 1, а основные технические данные – в табл. 4.

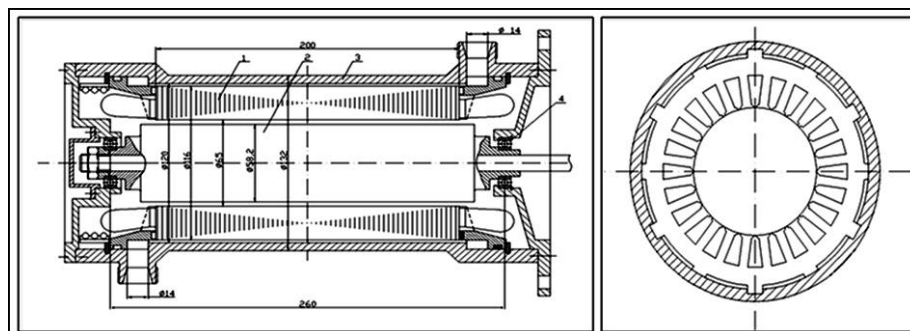


Рис. 1. Конструкция мини-турбогенератора

1 – сердечник статора, 2 – ротор, 3 – корпус, 4 – подшипник

Таблица 4

Основные данные мини-турбогенератора СГПМ-100-70000

Параметр	Значение	
Число полюсов	2	4
Внешний диаметр, мм	140	116
Внутренний диаметр, мм	65	65
Активная длина, мм	200	197
Зазор, мм	4,0	4,0
Размеры паза, мм	4,5/8,1×16	4,2/7,9×16
Высота спинки, мм	21,5	8.5
Число пазов статора	24	24
Число эффект. проводников в пазу	2	2
Число витков	8	8
Число параллельных ветвей	2	2
Размер проводника, мм	ПЭТ-155 0,93/0,99	ПЭТ-155 0,86/0,89

Численный эксперимент на базе современных расчетных методов и пакетов программ позволяет задавать размеры и геометрию машины, учитывать нелинейность характеристик, реальное распределение токов и другие факторы, а также выполнять многовариантные расчеты, обеспечивая повышение надежности и точности расчетов, а также оптимизацию конструкции машины на этапе проектирования и изготовления.

Для базовой модели мини-турбогенератора выполнены электромагнитные расчеты, в которых предусмотрена возможность варьировать применение в конструкции различных магнитных, ферромагнитных и конструкционных материалов.

Проведенные расчеты показали, что материал бандажного цилиндра и характеристики выбранного постоянного магнита определяют габариты генератора, его активную длину и

массу. При замене ферромагнитного материала сохраняются массогабаритные показатели мини-турбогенератора, а потери в стали и КПД, соответствующие выбранному варианту, значительно зависят от характеристик ферромагнитных материалов.

Эффективность металлических стекол исследована по результатам сравнительных расчетов потерь мини-турбогенератора при изготовлении сердечника статора из электротехнической стали 2421 толщиной 0,18 мм и из аморфного сплава ГМ-440В как в 2-полюсной, так и в 4-полюсной конструкциях. В табл. 5 представлены характеристики сплава, которые использовались при расчетах.

Таблица 5

Типичные физические свойства магнитопровода ГМ-40В

Параметр	Значение
Магнитная индукция B_s , Тл	1,5
Коэффициент прямоугольности $K_p = B_r / B_s$	0,06
Начальная относительная магнитная проницаемость μ	8000
Максимальная относительная магнитная проницаемость μ_{\max}	20000
Коэрцитивная сила H_c , А/м	4
Температура Кюри T_c , °С	420
Плотность ρ , кг/м ³	7300
Удельное электросопротивление σ , Ом·м	$1,3 \cdot 10^{-6}$
Удельные магнитные потери $P_{уд}$ для частоты f (менее 3 кГц) и индукции B_m , Вт/кг	$P_{уд} = 3 \cdot 10^{-5} f^{1.6} (B_m)^{2.1}$

Вариантные расчеты проведены как для самарий-кобальтовых магнитов марки XGS, так и для неодим-железо-борных магнитов N45H при одинаковых тангенциальных напряжениях в бандажном цилиндре ротора. Условием завершения вариантного расчета является получение заданной внешней характеристики генератора (отклонение расчетного напряжения при номинальной нагрузке от номинального – не более 5%).

Результаты численного эксперимента

Сравнение расчетных вариантов базовых моделей 2-полюсного и 4-полюсного мини-турбогенераторов по величине электромагнитных потерь и КПД при применении для магнитопровода электротехнической стали и металлического стекла ГМ-440В представлено в табл. 6.

Таблица 6

Влияние материала сердечника статора на характеристики машины*

Тип магнита	Материал сердечника	Число полюсов	l_m , мм	η , %	p_{Fe} , Вт	M_{gen} , кг
N45H	2421-0,18	$2p=2$	179	97,57	2014	52,9
		$2p=4$	178	96,69	2838	28,3
	ГМ-440	$2p=4$	179	99,45	84	28,3
XGSnew	2421-0,18	$2p=2$	229,5	98,00	1629	64,8
		$2p=4$	190	97,47	2096	29,8
	ГМ-440	$2p=4$	190	99,44	72	29,8

* l_m – активная длина статора, η – КПД, p_{Fe} – потери в стали, M_{gen} – масса генератора

Известно, что 4-полюсное исполнение более предпочтительно по массогабаритным показателям, чем 2-полюсное [17], однако частота перемагничивания 2-полюсного мини-турбогенератора при предельной частоте вращения не превышает 1667 Гц, а 4-полюсного – 3333 Гц. Несмотря на снижение объема магнитопровода, увеличенная частота перемагничивания 4-полюсного мини-турбогенератора увеличивает электромагнитные потери на 35–50 % и снижает КПД примерно на 1 %. При изготовлении сердечника статора из электротехнической стали такой переход практически невозможен из-за неизбежного перегрева обмотки статора. Преимущество 4-полюсной конструкции мини-турбогенератора достигается только при применении для сердечника статора аморфного сплава, что позволяет вдвое снизить вес машины и увеличить КПД на 2 %.

Заключение. Выполнен поиск перспективных металлических стекол для изготовления магнитопроводов высокоскоростных мини-турбогенераторов. Преимущество отдано аморфным сплавам на основе железа типа ГМ-440. Нанокристаллические сплавы на основе железа типа ГМ-412 имеют удельные потери ниже, чем аморфные, но по величине индукции насыщения не всегда удовлетворяют требованиям, предъявляемым мини-турбогенераторами.

Численными исследованиями выходных параметров высокоскоростных мини-турбогенераторов установлено, что при изготовлении сердечника статора из электротехнической стали переход на предпочтительную 4-полюсную конструкцию практически невозможен из-за роста потерь и неизбежного перегрева обмотки статора.

На основе проведенных исследований разработчикам высокоскоростных мини-турбогенераторов можно рекомендовать 4-полюсную конструкцию машины с сердечником статора из аморфного сплава как наиболее эффективную. В настоящее время это позволит вдвое снизить массу машины и увеличить ее КПД на 2 %.

В ближайшем будущем весьма вероятно перспектива повышения индукции нанокристаллических сплавов, применение которых для сердечников статоров сделает конструкции мини-турбогенераторов еще более эффективными.

Список литературы

1. Рассохин В.А., Забелин Н.А., Матвеев Ю.В. Основные направления развития микротурбинных технологий в России и за рубежом // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 4. С. 41–51.
2. Турбогенераторы малой мощности для децентрализованных систем энергообеспечения / Данилевич Я.Б., Антипов В.Н., Кручинина И.Ю., Хозиков Ю.Ф. Санкт-Петербург: Наука, 2009. 102 с.
3. Тишин А.М. Оценка предельной плотности мощности и сравнительный анализ массогабаритных характеристик электромашин // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2017. № 2(20). С. 148–170.
4. Бахтурин Г.И., Логунов А.Б., Миронов Н.А. Новые производственные технологии: взгляд экспертов научно-технической сферы // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2016. № 3(18). С. 101–117.
5. Gieras J.F., Jonsson U. Design of a High-Speed Magnet Brushless Generator for Microturbines // Electromotion. 2005. Vol. 12. No. 2–3. Pp. 86–91.
6. Молотилев Б.В., Галкин М.П., Корниенков Б.А. Аморфные электротехнические стали на современном уровне развития // Сталь. 2014. № 12. С. 90–92.
7. Молотилев Б.В., Бродов А.А. Магнитные материалы – разработка, производство, экономика // Сталь. 2009. № 7. С. 84–87.
8. Металлы и сплавы. Справочник / под ред. Ю.П. Солнцева. СПб: НПО «Профессионал», 2003. 1096 с.
9. Молотилев Б.В., Галкин М.П., Корниенков Б.А. Принципы конструирования новых прецизионных сплавов, композитных материалов и изделий на их основе // Сталь. № 9. 2016. С. 67–70.

10. Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2002. 384 с.
11. Ратушняк С.Л., Гончукова Н.О. Связь между началом кристаллизации и внутренними напряжениями в аморфных сплавах на основе железа // *Физика и химия стекла*. 2012. Т. 38. № 56. С. 926–930.
12. Каталог продукции «Гаммамет». URL: <http://gammamet.ru/images/2013.pdf>.
13. Nanocrystalline soft magnetic material FINEMET. URL: <http://www.hitachi-metals.co.jp/products/elec/tel/pdf/hl-fm9-h.pdf>.
14. Мушников Н.В., Потапов А.П., Шишкин Д.А., Протасов А.В., Головня О.А., Щеголева Н.Н., Гавико В.С., Шуняев К.Ю., Быков В.А., Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. Магнитные свойства и структура нанокристаллических сплавов типа файнмет с различным содержанием железа // *Физика металлов и металловедение*. 2015. Т. 116. № 7. С. 701–708.
15. Филиппов Б.Н., Шулика В.В., Потапов А.П., Вильданова Н.Ф. Магнитные свойства и температурная стабильность сплава типа Файнмет, легированного молибденом // *Журнал технической физики*. 2014. Т. 84. Вып. 3. С. 63–68.
16. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Оценка систем охлаждения высокоскоростных мини-турбогенераторов // *Электричество*. 2017. № 6. С. 36–42.
17. Ледовский А.Н. Электрические машины с высокоэффективными постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1985. 168 с.

References

1. Rassohin V.A., Zabelin N.A., Matveev Yu.V. (2011) *Osnovnye napravleniya razvitiya mikroturbinnykh tekhnologiy v Rossii i za rubezhom* [The main directions of development of the microturbine technology in Russia and abroad] *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU* [State Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology]. St. Petersburg, No. 4. Pp. 41–51.
2. Danilevich Ya.B., Antipov V.N., Kruchinina I.Yu., Hozikov Yu.F. (2009) *Turbogeneratory maloy moshchnosti dlya detsentralizovannykh sistem energoobespecheniya* [Turbo-generators of low power for decentralized power supply systems] *Nauka* [Nauka]. St Petersburg. P. 102.
3. Tishin A.M. (2017) *Otsenka predel'noy plotnosti moshchnosti i sravnitel'nyy analiz massogabaritnykh kharakteristik elektromashin* [Evaluation of the maximum power density and comparative analysis of the weight and size characteristics of electric machines] *Innovatika i ekspertiza* [Innovatics and expert examination]. No. 2(20). Pp. 148–170.
4. Bahturin G.I., Logunov A.B., Mironov N.A. (2016) *Novye proizvodstvennye tekhnologii: vzglyad ekspertov nauchno-tekhnicheskoy sfery* [New production technologies: the view of experts in the scientific and technological sphere] *Innovatika i ekspertiza* [Innovatics and expert examination]. No. 3(18). Pp. 101–117.
5. Gieras J.F., Jonsson U. (2005) Design of a High-Speed Magnet Brushless Generator for Microturbines. *Electromotion*. Vol. 12. No. 2–3. Pp. 86–91.
6. Molotilov B.V., Galkin M.P., Kornienkov B.A. (2014) *Amorfnye elektrotekhnicheskie stali na sovremennom urovne razvitiya* [Amorphous electrotechnical steels at the present level of development] *Stal'* [Steel]. No. 12. Pp. 90–92.
7. Molotilov B.V., Brodov A.A. (2009) *Magnitnye materialy – razrabotka, proizvodstvo, ekonomika* [Magnetic materials – development, production, economy] *Stal'* [Steel]. No. 7. Pp. 84–87.
8. *Metally i splavy. Spravochnik. Pod red. Yu.P. Solntseva* [Metals and alloys (2003) Handbook. Ed. Yu.P. Solntsev] *NPO «Professional»* [NPO «Professional»]. St. Petersburg. 1096 p.
9. Molotilov B.V., Galkin M.P., Kornienkov B.A. (2016) *Printsipy konstruirovaniya novykh pretsizionnykh spлавov, kompozitnykh materialov i izdeliy na ikh osnove* [Design principles of new precision alloys, composite materials and products based on them] *Stal'* [Steel]. No. 9. Pp. 67–70.
10. Starodubcev Yu.N., Belozеров V.Ya. (2002) *Magnitnye svoystva amorfnykh i nanokristallicheskiykh spлавov* [Magnetic properties of amorphous and nanocrystalline alloys] *Izd-vo Ural. un-ta* [Urals University Publishers]. Ekaterinburg. P. 384.

11. Ratushnyak S.L., Gonchukova N.O. (2012) *Svyaz' mezhdru nachalom kristallizatsii i vnutrennimi napryazheniyami v amorfnykh splavakh na osnove zheleza* [The connection between the beginning of crystallization and internal stresses in amorphous alloys based on iron] *Fizika i khimiya stekla* [Glass Physics and Chemistry]. Vol. 38. No. 56. Pp. 926–930.
12. *Katalog produktitsii «Gammamet»* [Product catalog «Gammamet»]. Available at: <http://gammamet.ru/images/2013.pdf>.
13. *Nanocrystallicheskie legkie magneticheskie materialy FINEMET* [Nanocrystalline soft magnetic material FINEMET]. Available at: <http://www.hitachi-metals.co.jp/products/elec/tel/pdf/hl-fm9-h.pdf>.
14. Mushnikov N.V., Potapov A.P., Shishkin D.A., Protasov A.V., Golovnya O.A., Shchegoleva N.N., Gaviko V.S., Shunyaev K.Yu., Bykov V.A., Starodubcev Yu.N., Belozerov V.Ya. (2015) Magnetic properties and structure of nanocrystalline alloys of the Finmet type with different iron content. *The Physics of Metals and Metallography*. Vol. 116. No. 7. Pp. 701–708.
15. Filippov B.N., Shulika V.V., Potapov A.P., Vil'danova N.F. (2014) *Magnitnye svoystva i temperaturnaya stabil'nost' splava tipa Faynmet, legirovannogo molibdenom* [Magnetic properties and thermal stability of alloy-type Finmet alloyed with molybdenum] *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [The Russian journal of applied physics]. Vol. 84. Issue 3. Pp. 63–68.
16. Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. (2017) *Otsenka sistem okhlazhdeniya vysokoskorostnykh mini-turbogeneratorov* [Assessment of Systems for Cooling High-Speed Mini Turbine Generators] *Elektrichestvo* [Electricity]. No. 6. Pp. 36–42.
17. Ledovskiy A.N. (1985) *Elektricheskie mashiny s vysokoeffektivnymi postoyannymi magnitami* [Electric machines with high-performance permanent magnets] *Energoatomizdat* [Energoatomizdat Publishers]. Moscow. P. 168.