

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2827925

**СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ГИБРИДНОГО
МАГНИТНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ РОТОРА
ЭЛЕКТРОМАШИНЫ, УСТОЙЧИВОГО К
НЕОБРАТИМОМУ РАЗМАГНИЧИВАНИЮ В
УСЛОВИЯХ ПЕРЕГРЕВА**

Патентообладатель: **ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "АМТ" (RU)**

Автор(ы): **Тишин Александр Метталинович (RU)**

Заявка № 2023130316

Приоритет изобретения **22 ноября 2023 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **03 октября 2024 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **22 ноября 2043 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат 0692e761a6300bf54f240f670bca2026
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

H02K 1/27 (2024.08); H01F 7/02 (2024.08); H01F 1/00 (2024.08); H02K 21/02 (2024.08)

(21)(22) Заявка: 2023130316, 22.11.2023

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
22.11.2023

Дата регистрации:
03.10.2024

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 22.11.2023

(45) Опубликовано: 03.10.2024 Бюл. № 28

Адрес для переписки:
108840, Москва, г. Троицк, ул. Промышленная,
4, стр. 1, этаж 1, ООО "АМТ"

(72) Автор(ы):

Тишин Александр Метталинович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "АМТ" (RU)

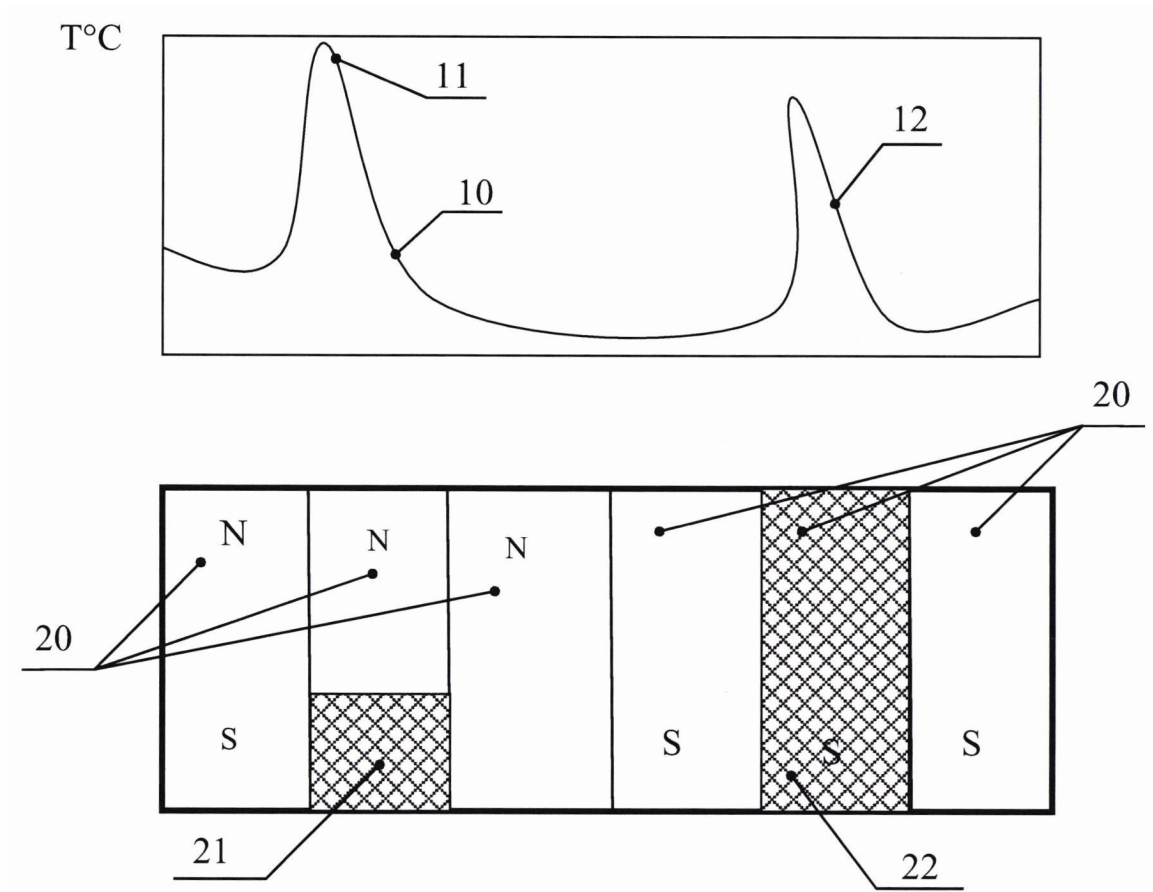
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: CN 105449967 A, 30.03.2016. RU
2783857 C1, 21.11.2022. CN 103475123 A,
25.12.2013. US 2021257884 A1, 19.08.2021. JP
2014007852 A, 16.01.2014. US 10714988 B2,
14.07.2020. CN 103219814 A, 24.07.2013.

(54) СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ГИБРИДНОГО МАГНИТНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ РОТОРА
ЭЛЕКТРОМАШИНЫ, УСТОЙЧИВОГО К НЕОБРАТИМОМУ РАЗМАГНИЧИВАНИЮ В УСЛОВИЯХ
ПЕРЕГРЕВА

(57) Реферат:

Изобретение относится к электротехнике. Технический результат заключается в повышении эффективности функционирования синхронных электроприводов на основе постоянных магнитов (СЭПМ) путем минимизации влияния температурного нагрева на магнитные характеристики постоянных магнитов (ПМ). Уменьшение размагничивания в процессе нагрева обеспечивает уменьшение общих (суммарных) температурных коэффициентов по коэрцитивной силе H_{cj} и остаточной индукции B_r гибридного магнита в процессе эксплуатации. Способ формирования гибридного магнитного элемента для СЭПМ включает выполнение комбинированных полюсов из магнитных материалов, устойчивых к необратимому размагничиванию. Предварительно выявляют зоны возможного перегрева магнитного элемента ротора, вызывающие необратимое

размагничивание при температурах функционирования ротора электромашины. Магнитный элемент ротора выполнен в форме пакета из склеенных между собой деталей из ферромагнитных материалов, число и последовательность расположения которых в направлении, перпендикулярном полярной оси магнитного элемента, химический состав материала деталей, показатель коэрцитивной силы и параметры клея выбраны из условия обеспечения функционирования ротора электромашины в зонах возможного перегрева. Причем в выявленных зонах возможного перегрева располагают детали, выполненные из материалов, имеющих температуру размагничивания, превышающую температуру перегрева магнитного элемента ротора в условиях эксплуатации электромашины. 6 з.п. ф-лы, 8 ил., 1 табл.



ФИГ.2

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.

H02K 1/27 (2006.01)*H01F 7/02* (2006.01)*H01F 1/00* (2006.01)*H02K 21/02* (2006.01)(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC

H02K 1/27 (2024.08); *H01F 7/02* (2024.08); *H01F 1/00* (2024.08); *H02K 21/02* (2024.08)(21)(22) Application: **2023130316, 22.11.2023**(24) Effective date for property rights:
22.11.2023Registration date:
03.10.2024

Priority:

(22) Date of filing: **22.11.2023**(45) Date of publication: **03.10.2024** Bull. № 28

Mail address:

**108840, Moskva, g. Troitsk, ul. Promyshlennaya,
4, str. 1, etazh 1, OOO "AMT"**

(72) Inventor(s):

Tishin Aleksandr Mettalinovich (RU)

(73) Proprietor(s):

**OBSHCHESTVO S OGRANICHENNOJ
OTVETSTVENNOSTYU "AMT" (RU)**(54) **METHOD OF FORMING HYBRID MAGNETIC ELEMENT FOR ELECTRIC MACHINE ROTOR, WHICH IS RESISTANT TO IRREVERSIBLE DEMAGNETIZATION UNDER CONDITIONS OF OVERHEATING**

(57) Abstract:

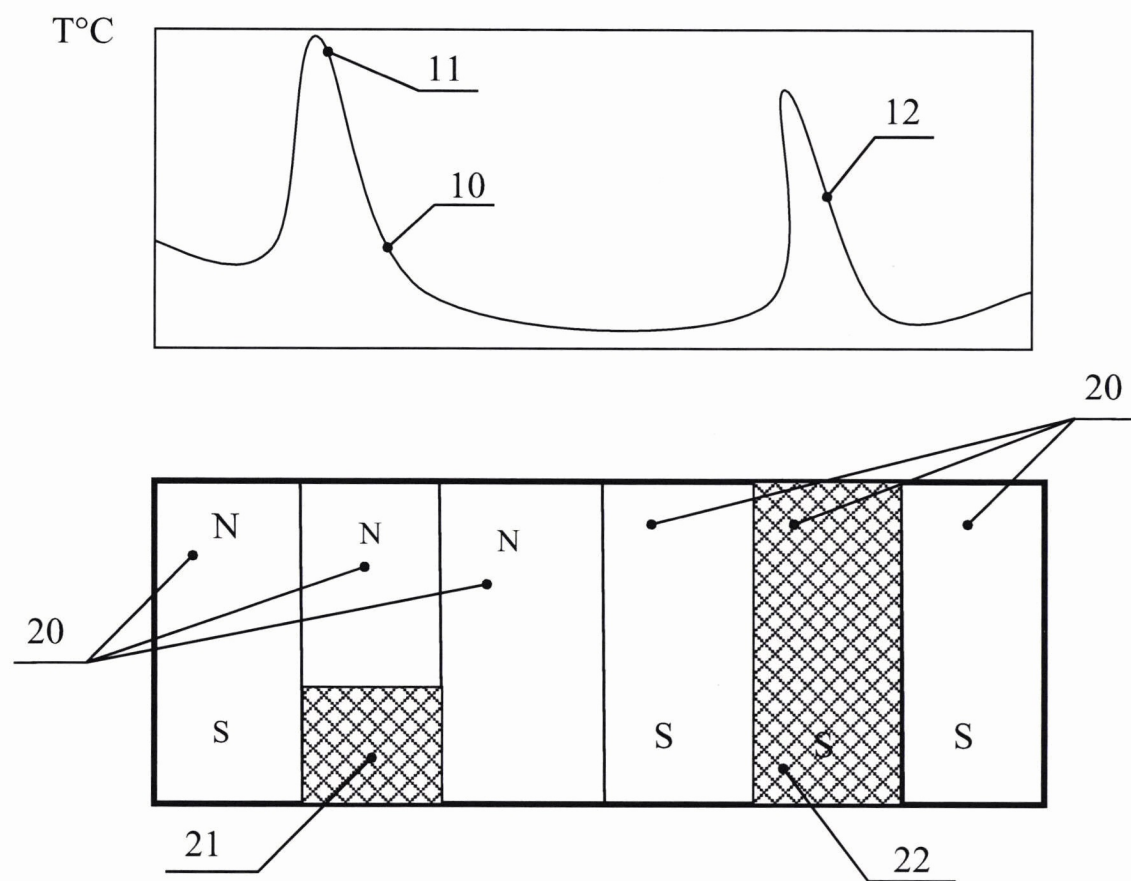
FIELD: electrical engineering.

SUBSTANCE: reduced demagnetization during heating provides reduction of total (summarized) temperature coefficients by coercive force H_{cj} and residual induction B_r of hybrid magnet during operation. Method of forming hybrid magnetic element for PMBED includes making combined poles from magnetic materials resistant to irreversible demagnetization. Zones of possible overheating of the rotor magnetic element, which cause irreversible demagnetization at operating temperatures of the electric machine rotor, are first detected. Rotor magnetic element is made in the form of a package of glued together parts from ferromagnetic materials, number and sequence of location of which in direction perpendicular to polar axis of magnetic element,

chemical composition of material of parts, coercive force index and glue parameters are selected based on the condition of electric machine rotor functioning in areas of possible overheating. In the identified zones of possible overheating, there are parts made from materials having a demagnetization temperature, exceeding temperature of rotor magnetic element overheating under conditions of electric machine operation.

EFFECT: improving operating efficiency of synchronous permanent magnets based electric drives (PMBED) by minimizing the effect of temperature heating on magnetic characteristics of permanent magnets (PM).

7 cl, 8 dwg, 1 tbl



ФИГ.2

Изобретение относится к электротехнике и может быть использовано для изготовления магнитных элементов для синхронных электроприводов на основе постоянных магнитов (ПМ).

Известно, что синхронные электроприводы на основе постоянных магнитов (СЭПМ) обладают рядом технических преимуществ, а именно существенно меньшими массогабаритными характеристиками и более высоким КПД. Однако при повышении температуры при воздействии магнитного поля, создаваемого обмотками статора, возможно размагничивание постоянных магнитов. В зависимости от положения нагрузочной линии (пунктирная линия на фиг. 1) и размагничивающего фактора постоянного магнита (отношения L/D), температурный интервал возрастания вероятности размагничивания может изменяться (см. С.Н.Сhen. Engineering magnetic materials and their applications, Course MAT-512, University of Dayton. 2006-2010). Критическим фактором является степень близости к так называемому «колену» (расположено в области 6-9 кЭ), в области которого может произойти самопроизвольное полное или частичное размагничивание постоянного магнита. Так представленные на фиг. 1 данные для постоянного магнита марки Nd 33, позволяют заключить, что данный постоянный магнит может работать до температуры 100°C при размагничивающем факторе 0,2 и до температуры 175°C - при размагничивающем факторе 2,0. Как правило, увеличение рабочей температуры достигается за счет добавления диспрозия (Dy) или тербия (Tb) - редкоземельных элементов с высокими константами магнитной анизотропии, что, однако, резко увеличивает затраты на изготовление электроприводов.

Представляется актуальным поиск путей повышения рабочей температуры постоянных магнитов, поскольку постоянное снижение размеров современных СЭПМ, а также повышение плотности тока (крутящий момент прямо пропорционален плотности тока) приводит к повышению плотности мощности и большим джоулевым потерям на единицу объема. Указанное приводит к необходимости отведения большего количества тепла в единицу времени, что является затруднительным при наименьшем объеме СЭПМ (меньшей площади поверхности теплоотвода), что в конце концов и вызывает повышение температуры ротора и постоянных магнитов, расположенных на нем.

Известны усовершенствования конструкции ротора с использованием ПМ из NdFeB, не содержащих Dy. В статье Irreversible Demagnetization Improvement Process of Hybrid Traction Motors with Dy-Free Magnets» / Machines 2023, 11 (1), 4; <https://doi.org/10.3390/machines11010Q04>, описан процесс улучшения необратимого размагничивания за счет усовершенствования конструкции - изменения расстояния между воздушными отверстиями в магнитопроводе ротора, которое сдвигает регион, где необратимое размагничивание происходит в области с низким вкладом обратной ЭДС. Хотя магнит, лишенный редкоземельных элементов, имеет высокую скорость необратимого размагничивания при высоких температурах из-за его низкой коэрцитивной силы, в данной статье предложен процесс улучшения необратимого размагничивания, чтобы компенсировать этот недостаток. Этот процесс анализирует вклад обратной ЭДС магнита (электродвижущей силы) с использованием уравнения потокосцепления, которое не меняется со временем. Далее место необратимого размагничивания перемещается в положение с низким вкладом в обратную электродвижущую силу. То есть степень необратимого размагничивания может быть снижена, если она происходит там, где вклад обратной ЭДС магнита мал. Конструктивно подобрано такое расстояние между воздушными отверстиями в магнитопроводе ротора, чтобы ПМ без диспрозия меньше размагничивался.

Описан способ оценки температуры постоянных магнитов в синхронных машинах

с постоянными магнитами с использованием поисковых катушек (Yuan Cheng et al. «Magnet temperature estimation of permanent magnet synchronous motor using search coils» - 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2022; DOI: 10.1109/ICEMS56177.2022.9983044). Это дает возможность заменить непосредственные измерения температуры на косвенные, основанные на линейной зависимости потокосцепления двигателя и температуры ПМ, но с высокой точностью. Описаны варианты, использующие такие измерения (CN 114928290 A, опубл. 19.08.2022; CN 114928289 A, опубл. 19.08.2022; JP 2022116488 A, опубл. 10.08.2022).

Описаны различные практические реализации самих ПМ роторов, позволяющие снизить размагничивающий фактор и, соответственно, повысить эффективность генераторов.

Известна конструкция гибридных ПМ, где каждый магнит состоит из нескольких магнитных материалов с различными значениями магнитного потока (US 10714988 B2, опубл. 14.07.2020). ПМ содержит первый магнитный материал; и второй магнитный материал, отличный от первого магнитного материала. При этом полярная ось первого магнитного материала параллельна полярной оси второго магнитного материала. Намагниченность насыщения (MS), магнитная анизотропия (Ku), температурный коэффициент (СТ) намагниченности, СТ коэрцитивной силы или температура Кюри (ТС) выше для второго магнитного материала, чем для первого материала. Объем второго магнитного материала меньше или равен объему первого магнитного материала. Первый магнитный материал представляет собой по меньшей мере один из: альнико, феррита, магнитного материала на основе редкоземельного металла, магнитного материала на основе марганца, магнитного материала на основе переходного металла и платины или нитрида железа (Fe-N). Второй магнитный материал представляет собой по меньшей мере один из следующих материалов: альнико, феррит, материал на основе редкоземельного металла, материал на основе марганца, магнитный материал на основе переходного металла и платины или Fe-N. ПМ имеет более высокую плотность магнитного потока, чем плотность магнитного потока первого магнитного материала.

В статье (Dapeng Wang et al. «Exchange-coupled nanoscale SmCo/NdFeB hybrid magnets» - Journal of Magnetism and Magnetic Materials Volume 324, Issue 18, September 2012, Pages 2836-2839; DOI: 10.1016/j.jmmm.2012.04.018) описаны преимущества гибридных NdFeB/SmCo магнитов перед однофазными. Описан способ изготовления гибридных магнитов, заключающийся в отжиге мелкодисперсной порошковой смеси из NdFeB и Sm-Co в вакууме и под давлением. Размер частичек порошка не превышал 20 нм. В результате были получены крайне низкие значения коэрцитивной силы и BH_{max} на уровне 12-14 МГсЭ, не позволяющие применения композитов в реальных высоконагруженных электроприводах с высокой плотностью момента. Выявлено, что подобный подход не позволяет локально увеличить величину H_{cj} в заданном месте постоянного магнита подверженного большим размагничивающим полям.

Наиболее близким к патентуемому способу является изобретение по заявке CN 105449967 A - Combined magnetic pole built-in radial direction V type permanent magnet synchronous motor, опубл. 30.03.2016 - прототип), в котором описано выполнение ПМ типа V с комбинированным магнитным полюсом в радиальном направлении для СЭПМ. Магнитное поле воздушного зазора СЭПМ, управляемого синусоидальной волной, имеет гармонические волны и может вызвать необратимое размагничивание, поэтому магнитный полюс ротора имеет однослойную или многослойную вложенную V-образную структуру ПМ; магнитный полюс ротора содержит два полюса ПМ из

редкоземельных металлов и два полюса из феррита. Направления намагничивания совпадают. Такая комбинация может приблизить форму волны плотности потока в воздушном зазоре к синусоидальной волне и уменьшить содержание гармоник в магнитном поле воздушного зазора.

5 Недостаток такого решения состоит в том, что оно не касается средств, препятствующих необратимому размагничиванию ПМ вследствие нагрева и перегрева в процессе работы электромашины.

Настоящее изобретение направлено на решение проблемы повышения эффективности функционирования СЭПМ путем устранения/уменьшения влияния температурного
10 нагрева на магнитные характеристики ПМ в процессе эксплуатации.

Патентуемый способ формирования гибридного магнитного элемента для СЭПМ включает выполнение комбинированных полюсов из магнитных материалов, устойчивых к необратимому размагничиванию.

Отличие состоит в следующем.

15 Предварительно выявляют зоны возможного перегрева магнитного элемента ротора, вызывающие необратимое размагничивание при температурах функционирования ротора электромашины.

Магнитный элемент ротора выполнен в форме пакета из склеенных между собой деталей из ферромагнитных материалов, число и последовательность расположения
20 которых в направлении перпендикулярном полярной оси магнитного элемента, химический состав материала деталей, показатель коэрцитивной силы и параметры клея выбраны из условия обеспечения функционирования ротора электромашины в зонах возможного перегрева, причем в выявленных зонах возможного перегрева располагают детали, выполненные из материалов, имеющих температуру
25 размагничивания превышающую температуру перегрева магнитного элемента ротора в условиях эксплуатации электромашины.

Способ может характеризоваться тем, что определение зон возможного перегрева в теле магнитного элемента ротора проводят путем моделирования или экспериментально.

30 Способ может характеризоваться и тем, что число деталей составляет 2-10 при их толщине от 0,1 до 10 мм в направлении склеивания.

Способ может характеризоваться также тем, что склейку пластин осуществляют с использованием компаундов, содержащих микрочастицы из магнитомягких материалов.

Способ может характеризоваться и тем, что детали из ферромагнитных материалов
35 включают спеченные редкоземельные постоянные магниты, ферриты, магнитотвердые магнитопласты или композиты на их основе.

Способ может характеризоваться, кроме того, тем, что пакет образован из деталей и имеет слоистую структуру SmCo35-N50H-SmCo35, или слоистую структуру SmCo35-N50H-SmCo35-N50H-SmCo35, или слоистую структуру N50H-SmCo35-N50H-SmCo35-
40 N50H, или слоистую структуру NdFeB-SmCo, или слоистую структуру FeN-SmCo.

Способ может характеризоваться и тем, что внешние детали пакета выполнены из спеченных редкоземельных постоянных магнитов марки SmCo.

Технический результат - повышение эффективности функционирования СЭПМ путем минимизации влияния температурного нагрева на магнитные характеристики ПМ в
45 процессе эксплуатации. Уменьшение размагничивания в процессе нагрева обеспечивает уменьшение общих (суммарных) температурных коэффициентов по коэрцитивной силе H_{cj} и остаточной индукции B_r гибридного магнита в процессе эксплуатации.

Сущность изобретения поясняется на фигурах.

Фиг.1 - характеристики размагничивания СЭПМ;

Фиг. 2-4 - схема гибридного магнитного элемента с вариантами размещения деталей в зонах перегрева;

Фиг. 5 - СЭПМ с различными вариантами магнитов на роторе:

- а) с цельными магнитами,
- б) с гибридными магнитами $\text{SmCo35-N50H-SmCo35}$,
- в) с гибридными магнитами $\text{SmCo35-N50H-SmCo35-N50H-SmCo35}$,
- г) с гибридными магнитами $\text{N50H-SmCo35-N50H-SmCo35-N50H}$.

Фиг. 6 - графики зависимости электромагнитного момента от температуры магнитов;

- Фиг. 7, 8 - графики зависимости потокоцеплений магнитов от температуры и длительности нагрева.

Схема гибридного магнитного элемента с вариантами размещения деталей в зонах перегрева показана на фиг. 2-4, где: 10 - температурная зависимость зон перегрева по длине магнитного элемента; 11, 12 - зоны перегрева; 20 - детали; 21, 22 - детали, имеющие более высокую температуру размагничивания.

Так, детали 20 могут быть выполнены из спеченных NdFeB , Sm-Co редкоземельных элементов, ферритов, магнитотвердых магнитопластов или композитов на их основе. Детали 21, 22, имеющие более высокую температуру размагничивания, выполняются из более высокотемпературных магнитных материалов, а именно NdFeB , SmCo редкоземельных элементов.

Количественная оценка термостабильности предлагаемых гибридных магнитов отражена на фиг. 7, 8. Для сравнения были выбраны три магнита: 1 - неодимовый магнит марки N42AH; 2 - неодимовый магнит марки N42H; 3 - гибридный магнит, собранный из магнитов марок N42H и S28G. Габаритные размеры испытуемых магнитов одинаковые и составляли $21 \times 21 \times 3.7$ мм. Методика испытаний состоит из 6 пунктов:

1. Магниты намагничивались до насыщения в импульсном магнитном поле с амплитудой 5 Тл.

2. Измерялось магнитное потокоцепление с катушкой Гельмгольца Ψ_0 магнитов после п. 1.

3. Магниты помещались в печь в составе замкнутого магнитопровода.

4. Магниты выдерживались в печи при температуре t_n в течение 5 мин, после чего и извлекались из печи и выдерживались при нормальной температуре для охлаждения до температуры среды.

5. Измерялось потокоцепление после нагрева Ψ_{n-5} .

6. Магниты повторно намагничивались до насыщения и пп. 2-5 повторялись после выдержки в течение 10 мин, измерялось Ψ_{n-10} .

В результате испытаний определено:

1. При быстром нагреве магниты марки 42H и гибридный магнит ведут себя практически одинаково;

2. У гибридного магнита падение потока менее резкое в частности при нагреве до 240°C ;

3. Магнитный поток гибридного магнита после нагрева на 30% больше, чем у магнита марки N42H.

Из представленного следует, что в высоконагруженных СЭПМ, длительное время работающих при высоких температурах, применение гибридных магнитов наиболее актуально.

Склеивку пластин осуществляют с использованием компаундов с относительной

магнитной проницаемостью в 2-3 раза превышающей магнитную проницаемость вакуума, содержащих микрочастицы из магнитомягких материалов. Детали могут быть выполнены из композита, включающего магнитотвердые материалы, а также изотропные и анизотропные электротехнические стали или магнитомягкие магнитопласты. Химический состав подбирается расчетным путем с последующим экспериментальным подтверждением таким образом, чтобы обеспечить оптимальное требуемое значение температурных коэффициентов по остаточной магнитной индукции B_r и коэрцитивной силе H_{cj} (см. фиг. 7, 8). Традиционный способ предполагает достижение минимальных значений температурных коэффициентов.

Патентуемый способ предполагает возможность управляемого и предсказуемого изменения температурных коэффициентов, благодаря контролю химического состава компонентов (см. таблицу 1).

Таблица 1

Марка магнита	Коэффициент уменьшения остаточной намагниченности	Содержание редкоземельных материалов		
		PrNd	Nd	Dy
N42	$\leq -0,125\%/C$	32%	-	-
N42	$\leq -0,117\%/C$	13%	18%	-
N42	$\leq -0,113\%/C$	<29%	-	<1%
N42	$\leq -0,110\%/C$	29%	-	1%

ГОСТ 52956-2008 дает четкие ограничения на такие температурные зависимости магнитных параметров материалов как остаточная магнитная индукция B_r и коэрцитивная сила по намагниченности H_{cj} . Относительные изменения параметров в диапазоне температур 293 К - 373 К зафиксированы как $\Delta B_r \times 100 / (B_r \times \Delta T)$ от -0.12 до -0.08%/К и $\Delta H_{cj} \times 100 / (H_{cj} \times \Delta T)$ от -0.59 до -0.45%/К соответственно. Традиционно это делается для того, чтобы избежать большого размагничивания магнитов и обеспечить стабильность рабочих характеристик электромашины с постоянными магнитами на роторе. Однако для обеспечения данного уровня значений температурных коэффициентов невозможно использовать феррит, а необходимо добавление более дорогостоящего металлического Nd и еще более дорогого металлического диспрозия. Поскольку магниты являются одним из наиболее затратных компонентов электромашины, то это существенно ограничивает область применения СЭПМ. Вместе с этим, с развитием высокооборотных машин появились дополнительные технические трудности. Отсутствие возможности управления величиной данных температурных коэффициентов приводит к трудностям при размагничивании роторов на высоких оборотах, увеличивает значение противо-эдс и затрудняет управление электромашиной. Таким образом, необходима возможность прецизионного регулирования величины данных температурных коэффициентов, что и достигается предлагаемым техническим решением.

В качестве примера реализации рассмотрена модель СЭПМ, магниты в котором расположены на внешнем роторе.

В модели учтены температурно-зависимые свойства постоянных магнитов марок N50H и SmCo35.

На фиг. 5 показаны модели СЭПМ с цельными магнитами (а) и с гибридными магнитами в трех вариантах (б, в, г). Приведены позиции: 1 - статор, 2 - якорная обмотка, 3 - ярмо ротора, 4 - цельный магнит.

Гибридные магниты обозначены: поз. 5 - гибридный магнит SmCo35-N50H-SmCo35, поз. 6 - гибридный магнит SmCo35-N50H-SmCo35-N50H-SmCo35, поз. 7 - N50H-SmCo35-N50H-SmCo35-N50H.

Внешний диаметр СЭПМ 280 мм, осевая длина 65 мм, число зубцов 54, полюсов 48.
5 Обмотка дробно-зубцовая, число пазов на полюс и фазу 3/8, число витков на зубце 10, соединена звездой.

Поперечные размеры цельных магнитов 4×12 мм (фиг. 5,а). Гибридных магнитов фиг. 5: б) 4×4 мм, в) и г) 4×2,4 мм.

Ток нагрузки 550 А, угол опережения 10 электрических градусов, частота 373,2 Гц.
10 Поскольку СЭПМ обладает симметрией, на фиг. 5 показана только 1/6 часть всей окружности моделей. Электромагнитные расчеты проведены с использованием метода конечных элементов, на боковых границах заданы граничные условия симметрии, на внешних границах - условия Дирихле, соответствующие нулевому значению векторного магнитного потенциала.

15 Для каждой модели был проведен расчет электромагнитного момента, при этом режим нагрузки для всех случаев задан одинаковым. Расчеты проводились при температурах магнитов 20°C, 120°C и 200°C. В результате получены зависимости момента от температуры магнитов для каждого из вариантов ротора (фиг. 6).

Из графиков следует, что в области температур 120°C выше рабочей температуры
20 магнитов N50H, роторы с гибридными магнитами обеспечивают большее значение момента. Например, момент СЭПМ с гибридными магнитами Sm-Nd-Sm обеспечивает значение момента на 24% больше, чем СЭПМ с магнитами марки N50H. В области невысоких температур 20-120°C СЭПМ с гибридными магнитами обеспечивает значение момента на 5-8% выше, чем СЭПМ с магнитами марки SmCo35.

25 Описанный положительный эффект достигается благодаря тому, что магниты марки SmCo35 намного более устойчивы к размагничиванию при высоких температурах, по сравнению с магнитами N50H.

Фиг. 7, 8 - графики зависимости потокоцеплений магнитов от температуры и
30 длительности нагрева. Видно, что гибридный магнит N42H/S28G обеспечивает необходимый уровень температурной зависимости потокоцепления в течение 5 и 10 мин при нагреве до 240°C.

Ниже приведены примеры гибридных магнитов для СЭПМ, выполненные в соответствии с данным изобретением.

ПРИМЕР 1

- 35 1. Размеры деталей: длина, ширина, высота 2×21×6 (мм).
2. Количество деталей в пакете - 3.
3. Состав материалов в пакете: SmCo35-N50H-SmCo35.
4. Материал клея: DELO® MONOPOX HT2999, толщина склейки -15 мкм. Наполнитель склейки - микрочастицы из магнитомягких материалов состава $MnO, 8ZnO, 2Fe_2O_4$, 20%
40 об.
5. Полученные характеристики гибридного магнита $B_r=1.25$ Тл, $H_{св}=955$ кА/м, $H_{сж}=2100$ кА/м, $(BH)_{max}=299$ кДж/м³.

ПРИМЕР 2

- 45 1. Размеры деталей: длина, ширина, высота 5×21×6 (мм).
2. Количество деталей в пакете - 5.
3. Состав материалов в пакете: SmCo35-N50H-SmCo35-N50H-SmCo35.
4. Материал клея: марка ВТ-25-200 JCN В 6-06-5100-96, толщина склейки 5-10 мкм,

наполнитель склейки - микрочастицы из магнитомягкого материала Fe_3O_4 , 25% об.

5. Полученные характеристики гибридных магнитов при $T=20^\circ\text{C}$ $B_r=1,21$ Тл, $H_{св}=950$ кА/м, $H_{сj}=2050$ кА/м, $(BH)_{таx}=295$ кДж/м³.

ПРИМЕР 3

1. Размеры деталей: длина, ширина, высота $5 \times 21 \times 3,7$ (мм).

2. Количество деталей в пакете - 5.

3. Состав материалов в пакете: N50H-SmCo35-N50H-SmCo35-N50H.

4. Материал клея: марка DELO® MONOPOX HT2999, толщина склейки 10 мкм, наполнитель склейки - отсутствует.

5. Полученные характеристики гибридных магнитов $B_r=1,17$ Тл, $H_{св}=890$ кА/м, $H_{сj}=1995$ кА/м, $(BH)_{таx}=280$ кДж/м³.

ПРИМЕР 4

1. Размеры деталей: длина, ширина, высота $1 \times 10 \times 5$ (мм).

2. Количество деталей в пакете - 2.

3. Состав материалов в пакете: SmCo32-N42H.

4. Материал клея: DELO® MONOPOX HT2999, толщина склейки 10 мкм, наполнитель склейки - микрочастицы из магнитомягких материалов: $\text{MnO}, 8\text{ZnO}, 2\text{Fe}_2\text{O}_4$, 20% об.

5. Полученные характеристики гибридных магнитов $B_r=1,19$ Тл, $H_{св}=920$ кА/м, $H_{сj}=1800$ кА/м, $(BH)_{шаx}=270$ кДж/м³.

ПРИМЕР 5

1. Размеры деталей: длина, ширина, высота $5 \times 10 \times 5$ (мм).

2. Количество деталей в пакете - 10.

3. Состав материалов в пакете:

SmCo35-N42SH-SmCo35-N42SH-SmCo35-N42SH-SmCo35-N42SH-SmCo35-N42SH.

4. Материал клея: DELO® MONOPOX HT2999, толщина склейки 12 мкм, наполнитель склейки - микрочастицы из магнитомягких материалов, $\text{MnO}, 8,5\text{ZnO}, 15\text{Fe}_2\text{O}_4$, 20% об.

5. Полученные характеристики гибридных магнитов $B_r=1,20$ Тл, $H_{св}=950$ кА/м, $H_{сj}=2010$ кА/м, $(BH)_{таx}=275$ кДж/м³.

Таким образом, по результатам приведенных примеров реализации изобретения следует, что гибридные магниты позволяют объединить положительные качества магнитов N50H и SmCo35 и получить прирост момента СЭПМ в широком диапазоне температур, без использования тербия и диспрозия.

(57) Формула изобретения

1. Способ формирования гибридного магнитного элемента для ротора электромашин, включающий выполнение комбинированных полюсов из магнитных материалов, устойчивых к необратимому размагничиванию,

отличающийся тем, что:

предварительно выявляют зоны возможного перегрева магнитного элемента ротора, вызывающие необратимое размагничивание при температурах функционирования ротора электромашин;

магнитный элемент ротора выполнен в форме пакета из склеенных между собой деталей из ферромагнитных материалов, число и последовательность расположения которых в направлении, перпендикулярном полярной оси магнитного элемента, химический состав материала деталей, показатель коэрцитивной силы и параметры клея выбраны из условия обеспечения функционирования ротора электромашин в

зонах возможного перегрева, причем в выявленных зонах возможного перегрева располагают детали, выполненные из материалов, имеющих температуру размагничивания, превышающую температуру перегрева магнитного элемента ротора в условиях эксплуатации электромашины.

5 2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что определение зон возможного перегрева в теле магнитного элемента ротора проводят путем моделирования или экспериментально.

3. Способ по п. 1, отличающийся тем, что число деталей составляет 2-10 при их толщине от 0,1 до 10 мм в направлении склеивания.

10 4. Способ по п. 1, отличающийся тем, что склейку пластин осуществляют с использованием компаундов, содержащих микрочастицы из магнитомягких материалов.

5. Способ по п. 1, отличающийся тем, что детали из ферромагнитных материалов включают спеченные редкоземельные постоянные магниты, ферриты, магнитотвердые магнитопласты или композиты на их основе.

15 6. Способ по п. 1, отличающийся тем, что пакет образован из деталей, имеющих слоистую структуру SmCo₃₅-N_{50H}-SmCo₃₅, или слоистую структуру SmCo₃₅-N_{50H}-SmCo₃₅-N_{50H}-SmCo₃₅, или слоистую структуру N_{50H}-SmCo₃₅-N_{50H}-SmCo₃₅-N_{50H}, или слоистую структуру NdFeB-SmCo, или слоистую структуру Fe₁₆N₂-Sm₂Co₁₇.

20 7. Способ по п. 5, отличающийся тем, что внешние детали пакета выполнены из спеченных редкоземельных постоянных магнитов марки SmCo.

25

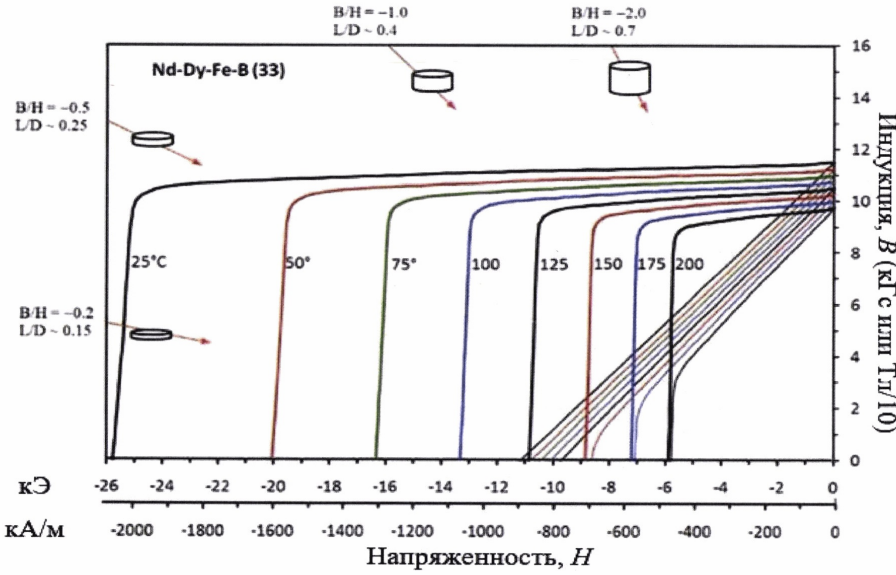
30

35

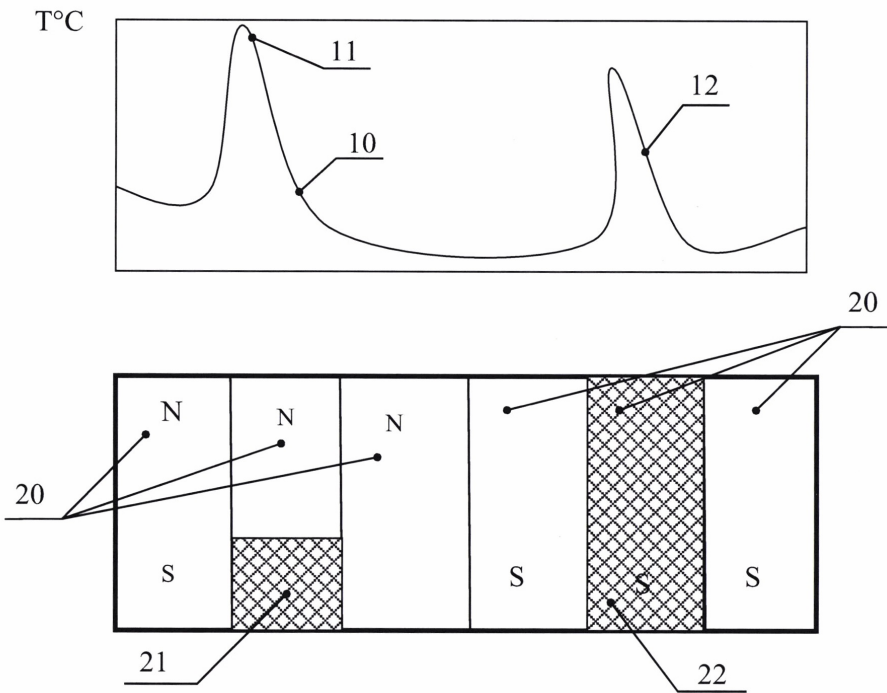
40

45

1

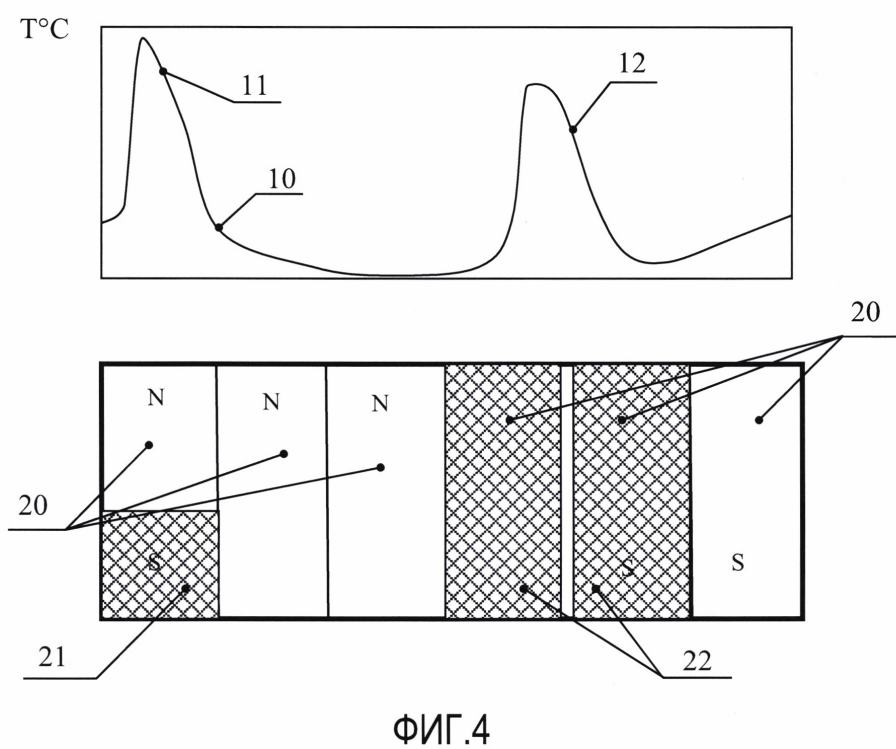
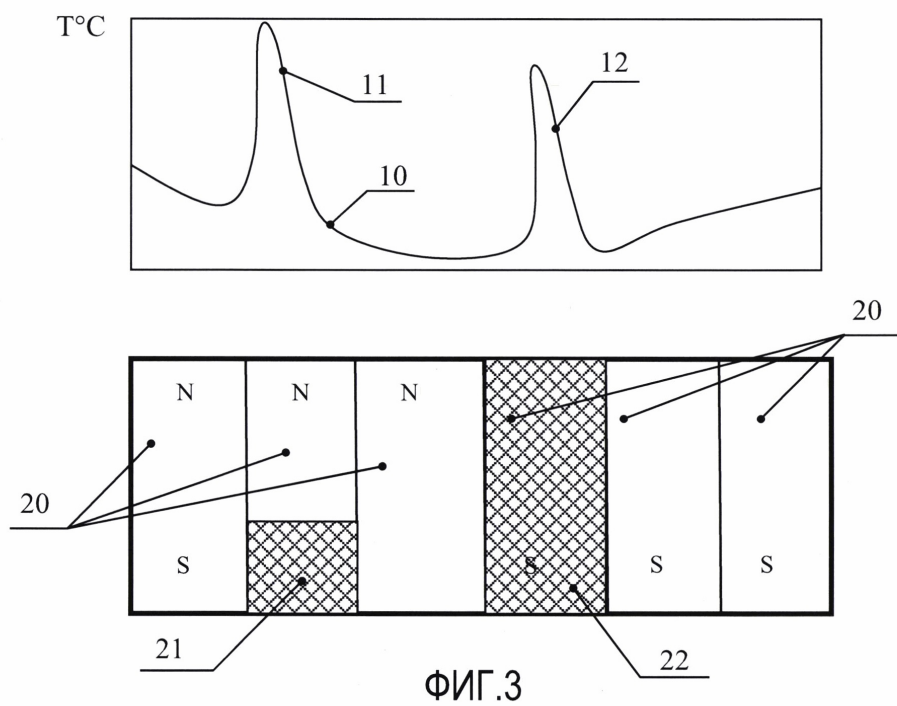


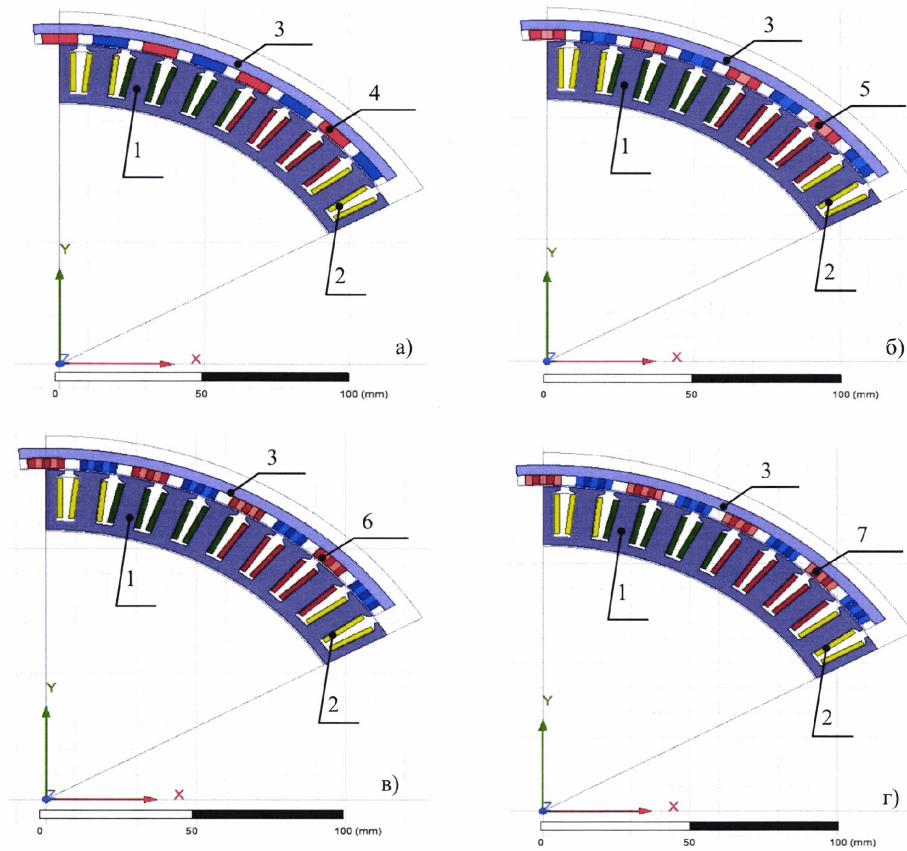
ФИГ.1



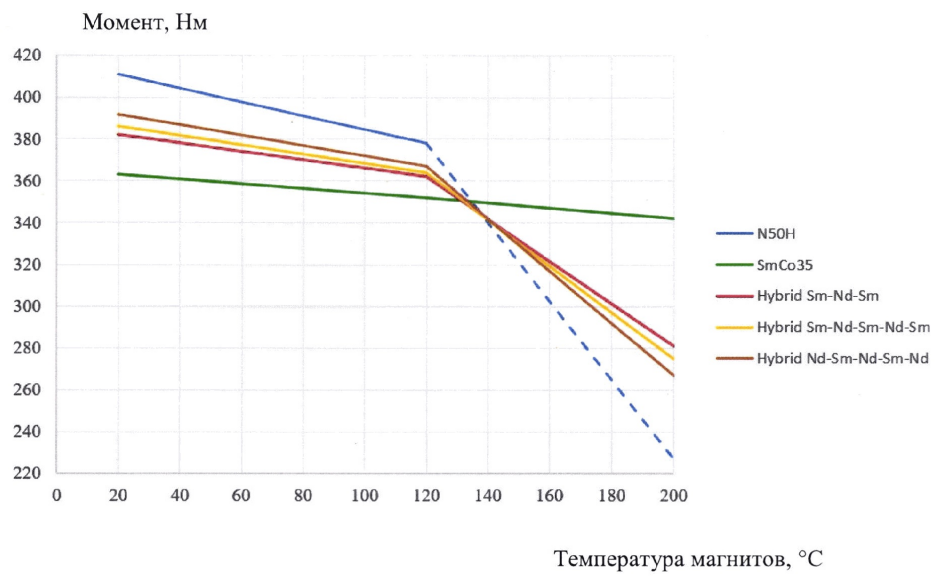
ФИГ.2

2

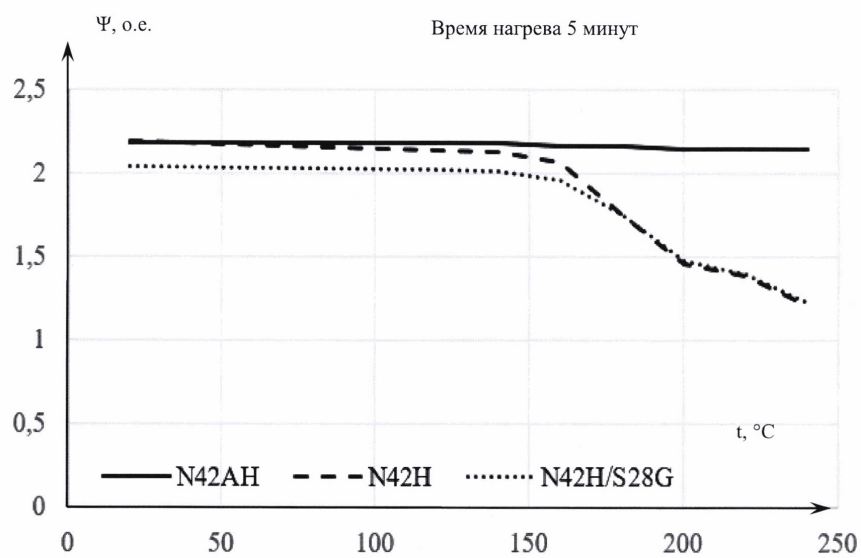




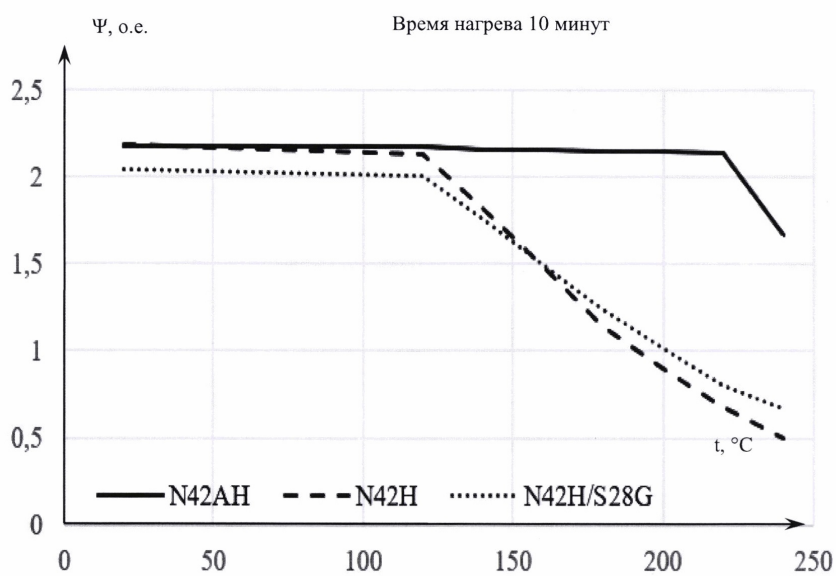
ФИГ.5



ФИГ.6



ФИГ.7



ФИГ.8