



## ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ МАГНИТНЫХ КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ ДВУХСТАТОРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

**Бердиев У.Т.**, к.т.н., профессор,

**Сулайманов У.Б.** -ассистент

**Султанов М.У.** – студент

*Ташкентский Государственный транспортный университет*

**Аннотация.** В данной статье рассмотрен вопрос одним из приоритетных направлений научных исследований и технических разработок, связанных с энергосбережением и рациональным потреблением энергии, а также широкое внедрение с высоким удельным расходом магнитных материалов при производстве безотходной технологии изготовления элементов электродвигателя методами порошковой металлургии. Изучены полученные магнитные компоненты для двухстаторного электродвигателя выполнены комплексные исследования магнитных компонентов для изготовления элементов статора и ротора двухстаторного комбинированного электродвигателя.

**Ключевые слова.** Порошковая металлургия, магнитные компоненты, гистерезисные потери, оксидных покрытий, двухстаторного электродвигателя, сердечники, индукция, намагничивания.

**Введение:** Развитие высокоэффективных технологий производства электродвигателей, трансформаторов и других изделий электротехнической промышленности базируется на использовании новых магнитно-мягких материалов, в частности материалов со структурой металл-диэлектрик-металл (МДМ-структурой).

Результаты, указывают на возможность разработки новых магнитных композиционных материалов и перспективность их практического применения для создания различных электротехнических устройств нового типа [1, 4]. Предварительные расчеты показали, что на основе таких материалов можно создавать высокочастотные преобразователи, высокоэффективные осевые электродвигатели и генераторы, магнитные компоненты широкого применения.

Как показано в литературном обзоре [1-9], в настоящее время при производстве электрических машин в основном используют известные магнитомягкие сплавы. 90% из них составляют электротехнические стали различных типов. Такие материалы практически достигли предела своих физико-механических и эксплуатационных свойств, и для создания нового поколения изделий необходимо использовать совершенно новый класс магнитомягких материалов с улучшенными характеристиками, в качестве которых можно использовать полученные композиты в производстве [2, 3, 6]. Известны двухстаторные асинхронные электродвигатели, управляемые поворотом одного статора относительно другого. Недостатком известных электродвигателей, является их невысокая надежность в режиме



регулирования скорости, так как при этом возможен обрыв выводов обмоток. Повысить надежность электродвигателя достигается тем, что один статор выполнен с числом полюсов вдвое больше, чем другой, и сердечником с большим числом пар полюсов выполнен поворотным, явнополюсным с числом полюсов, равным числу полюсов другого статора [5, 6].

Методика нанесения изолирующих покрытий на основе оксида фосфора разработана применительно к задачам настоящей работы на основе способа изготовления композиционного магнитомягкого материала [5, 8, 12], в котором собственно предложена методика добавления в исходный металлический порошок во вращающемся вакуумируемом барабане при давлении 0,15 – 1,5 Па, нагреваемом до температуры расплавления смазки 150-200°C и обработку проводят до получения равномерного распределения смазки в материале в течение 15 – 30 минут, при этом содержание смазки в композиционном материале составляет от 0,01 до 0,1%.

Из расчетных, и экспериментальных данных установлено, что в зависимости от толщины изоляционного покрытия и размера частиц исходного порошка металлического железа получаемые композиционные материалы можно разделить на два класса: низкочастотные ( $f < 1\text{кГц}$ ) и высокочастотные ( $f > 1\text{кГц}$ ). Для последующих высокочастотных применений с помощью сепаратора отсеяны порошки с размером меньше 100 мкм, для низкочастотных – с размером больше 100 мкм. После сепарации на поверхность частиц железа наносился изоляционный слой.

Сущность методики поясняется рисунке 1, на котором приведена установка по приготовлению композиционного материала, включающая электропривод вакуумного насоса (1), соединительную муфту (2), вакуумный насос (3), подвижный вакуумный разъем (4), барабан с размещенным в нем композиционным магнитомягким материалом (5), датчик температуры (6), нагреватель (7) и электропривод реактора (8 и 9).

На первом этапе смазка вводится путем смешения ее с изолированным металлическим порошком в шаровых мельницах или других смесителях. Приготовленный со смазкой композиционный материал помещается внутрь барабана. После этого включается вакуумный насос, понижающий давление воздуха внутри барабана с материалом до 0,15 – 1,5 Па. По достижению требуемого вакуума включается нагрев барабана до температуры 150 – 200°C. Процесс обработки порошка продолжается в течение 15 – 30 минут. Охлаждение магнитомягкого материала происходит после выключения нагрева при сохранении вакуума.

Преимуществом данного способа по сравнению с известными является снижение содержания смазки до 0,01 - 0,1%, позволяющее получить в дальнейшем качественное прессованное изделие из магнитомягкого композиционного материала с плотностью 7,5 – 7,65 г/см<sup>3</sup> и, как следствие, обладающее высокими магнитными характеристиками [7, 9, 12].

Для нанесения покрытий оксида фосфора на поверхность частиц металлических порошков предложенная методика была модифицирована.



Методика нанесения включала в себя этап предварительного смешивания исходных металлических порошков с заданным количеством реактива, в состав которого входил спиртовой раствор ортофосфорной кислоты в соотношении – 40%  $H_3PO_4$  + 60% этиловый спирт.

На следующем этапе приготовленный порошок помещали в реактор для нанесения изоляционных покрытий (рисунок 1). Обработку порошков с реакционной добавкой проводили в реакционном барабане при давлении от  $10^5$  до  $10^6$  Па, нагреваемом до температуры 150 – 200°C в течение 15 – 30 минут. В результате на поверхности частиц железа образовалось сложное по составу покрытие из ферритных соединений и фосфатов. В дальнейшем для получения различных по толщине покрытий на металлических порошках процесс нанесения повторялся 2, 3 и 4 раза.

Предложенный метод капсулированные порошка железа оксидным слоем является высокоэкономичным методом, практически не изменяющим стоимость последнего, и, с позиций получения заданного состава с заданными магнитными параметрами и удельным электросопротивлением, может быть широко использован в практике для получения МДМ-сплавов с особыми магнитными и электрическими свойствами.

Технология изготовления экспериментальных образцов магнитопроводов на основе изолированных порошков магнитных материалов представляет собой многостадийный процесс, включающий следующие основные операции.

1. Операция по предварительной подготовке, пассивации и реакционному нанесению изоляционных покрытий из газовой фазы в вакууме при температуре 150 – 200°C исходных порошков.
2. Операция по смазке изолированного порошка добавлением раствора торфяного воска (Peatwax) в количестве 0,15% от исходного веса порошка.
3. Операция по изготовлению образцов магнитопроводов путем гидростатического прессования изолированных порошков проводится в изготовленных пресс-формах под давлением 8 – 10 т/см<sup>2</sup> при нормальных условиях. Спрессованные изделия подвергаются термообработке и нормализации физических параметров. Отжиг образцов производится при температуре 400 – 450°C в специальных автоклавах в зависимости от требований.

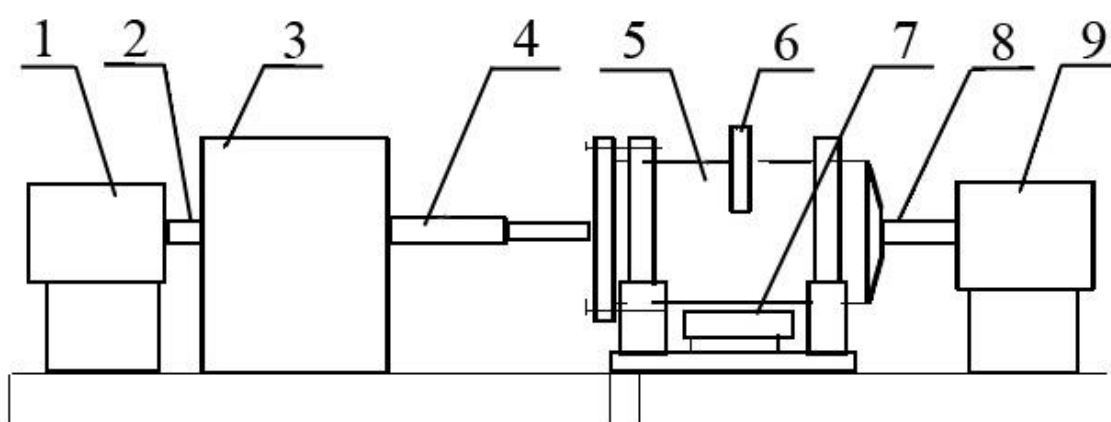


Рисунок 1. – Реактор для нанесения изоляционных покрытий на поверхность порошков

Для исследований изготовлены образцы с использованием железного порошка ASC100.29 с размером частиц  $d > 0,1$  мм и  $d < 0,1$  мм и со средней толщиной изоляции на основе оксида фосфора - 1 нм, а также образцы на основе ASC100.29 ( $d < 0,05$  мм) со значениями толщины изоляционного слоя 10, 20, 30 нм.

Измерения магнитных свойств образцов экспериментальных компонентов для статора и ротора выполнялись на экспресс-магнетометре (рисунок 2), где по кривым перемагничивания образцов определялись потери и остальные магнитные параметры.

Измерение магнитных характеристик магнитопроводов в широком диапазоне изменения магнитных полей, частот перемагничивания и температур производились на экспресс-магнетометре. Предварительно для нормировки магнетометра проведены измерения магнитных характеристик на сертифицированном флаксометре. Для нормировки магнетометра использовался также микроверметр Ф5050. На рисунке 15 приведены основные блоки экспресс-магнетометра, а на рисунке 16 – результаты обработки данных в режиме экспресс флаксометром и магнетометром.

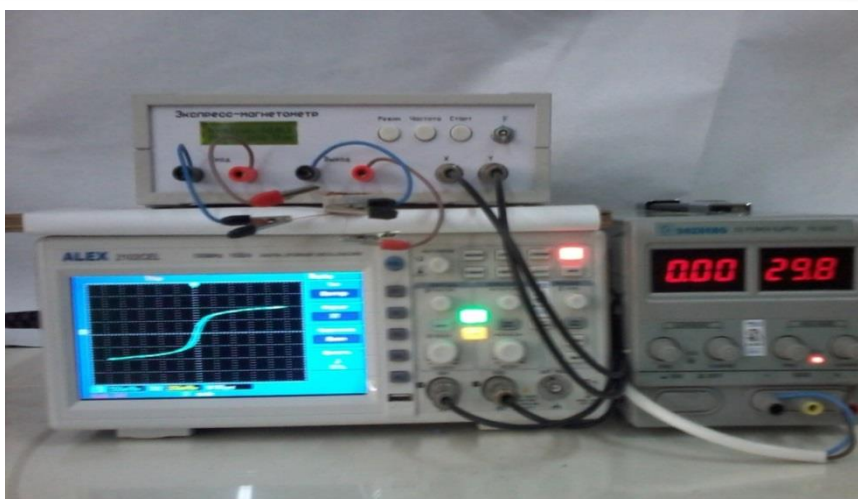
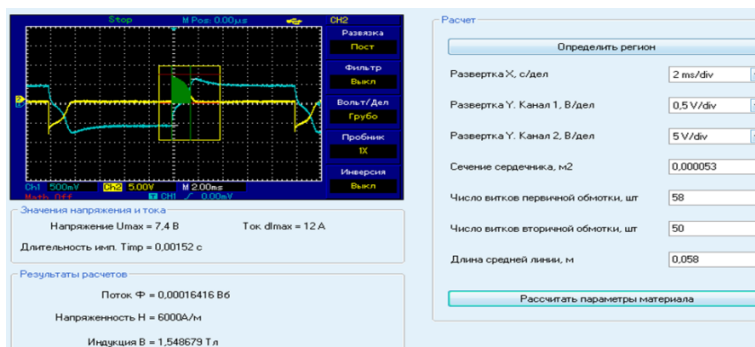
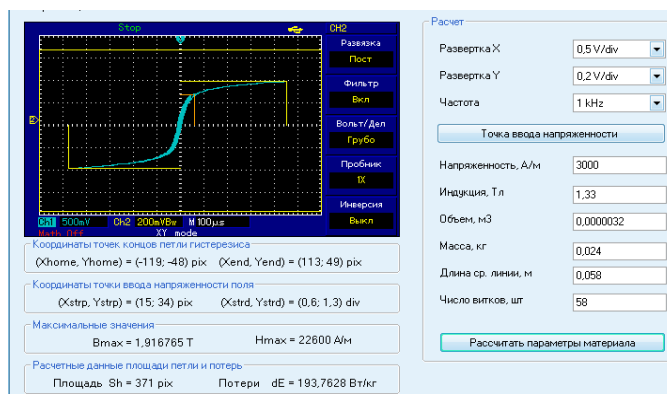


Рисунок 2. – Внешний вид магнетометра

Исследования основных магнитных характеристик магнитопроводов с использованием порошков железа ASC100.29 (Китай, Horganas) проведены в сравнении с аналогичными параметрами для электротехнической стали Э320. Для этой цели изготовлены сердечники  $24 \times 13 \times 10$  мм из ленточной стали и композиционных магнитных материалов плотностью  $\rho = 7,6$  г/см<sup>3</sup>. Изучены их статические, динамические магнитные характеристики, определена величина гистерезисных потерь. Образцы магнитопроводов из композиционного магнитного материала подвергались отжигу в вакууме при температуре 400°C в течение 3 часов. Статические характеристики исследовались с использованием микровеберметра Ф5050, а динамические характеристики и потери – флаксометром и экспресс-магнетометром в частотном диапазоне до 10 кГц и магнитных полей до 30 кА/м.



а)



б)

Рисунок 3. – Результаты обработки данных в режиме экспресс флакметра (а) и в режиме экспресс магнетометра (б)

Полевые зависимости намагниченности и потерь на частоте 1 кГц для низкочастотного образца магнитопроводов на основе порошка ASC100.29 при отжиге в вакууме 350°C на протяжении трех часов, приведены на рисунке 4. Из рисунка следует, что сохраняется линейная зависимость в изменении магнитной индукции и величины потерь.

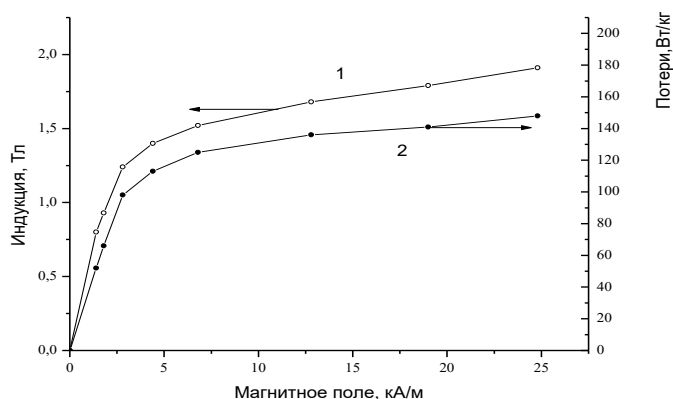


Рисунок 4 – Полевые зависимости намагниченности и потерь на частоте 1 кГц для композиционного материала на основе ASC100.29 (1) и Laiwu Taidong Powder (Китай) (2)

Исследование потерь при перемагничивании образцов магнитопроводов показало, что гистерезисные потери на 25-30% выше для образцов на основе порошков, распыленных воздухом, по сравнению с потерями для магнитопроводов на основе порошков, распыленных водой (рисунок 5).

В целом, сравнительные исследования показали некоторое преимущество в величине потерь на перемагничивание более чистых порошков железа, полученных водно-распылительным методом в сравнении с порошками, распыленными воздухом.

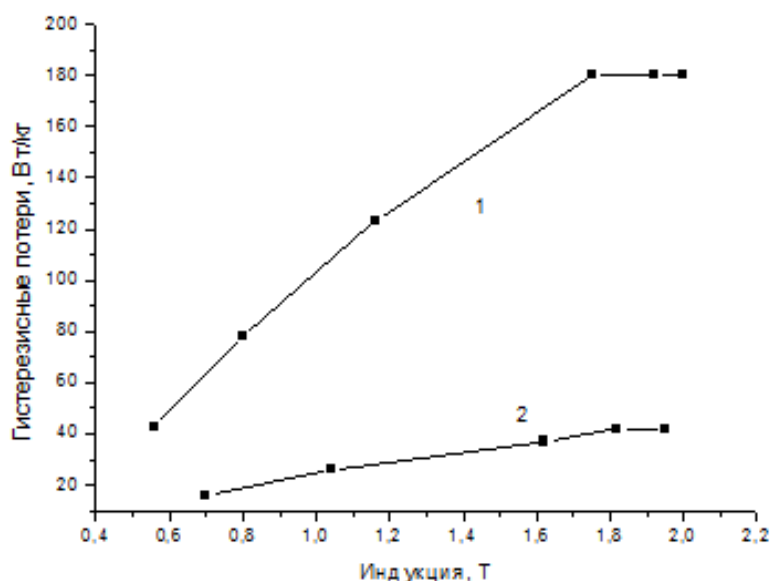


Рисунок 5. – Зависимость потерь от величины индукции для низкочастотного композиционного материала на основе ASC100.29 при перемагничивании по полному циклу – 1 и по частному от нулевой точки – 2 на частоте 1 кГц

Преимущества образцов из композиционного магнитного материала перед электротехнической сталью (рисунок 6.), несомненно, обеспечат самое широкое их применение в электрических машинах повышенной удельной мощности, в особенности с высокой скоростью вращения, где электротехнические стали имеют большие потери.

Анализ экспериментальных данных показал, что плотность магнитных компонентов для двухстаторного комбинированного электродвигателя, полученных методом прессования при давлении 0,7 – 0,8 ГПа, составляет 7,5 – 7,8 г/см<sup>3</sup>. Магнитные компоненты из разработанных композитов имеют величину твердости НВ от 83,16 до 101,86, что выше значения твердости для чистого железа НВ60. Это говорит о том, у изделий повышен предел прочности, а отсутствие трещин говорит о высокой сопротивляемости материала к возникновению и развитию трещин [7, 9].

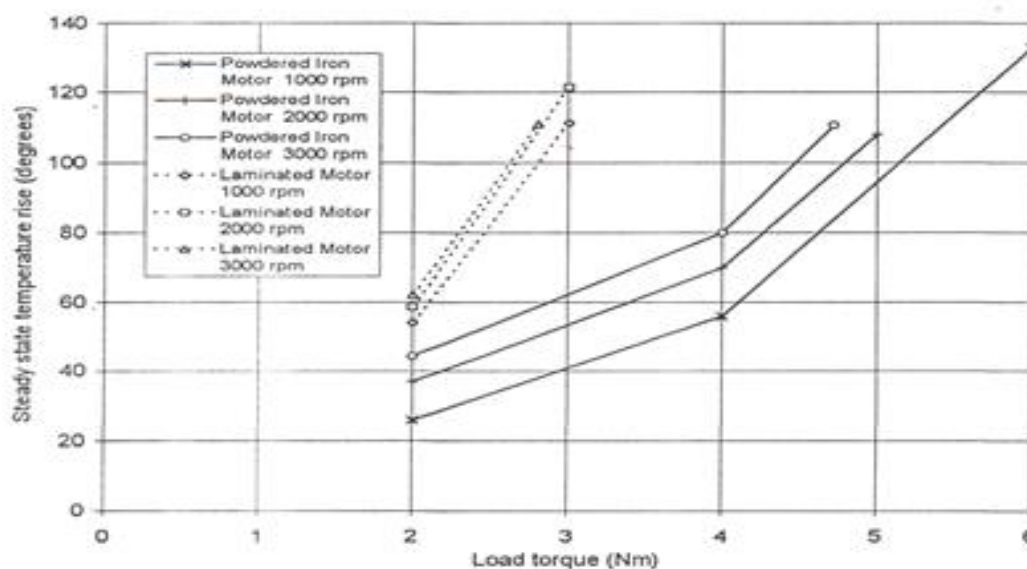


Рисунок 6. – Результаты сравнения нагрева магнитопроводов на основе нового композиционного материала и с использованием электротехнической стали в зависимости от крутящего момента

Из полученных с помощью экспресс-магнетометра полевых зависимостей намагниченности на частоте 1 кГц рассчитаны электромагнитные характеристики магнитных компонентов двухстаторного двигателя. На рисунке 7. приведены полевые зависимости гистерезисных потерь при перемагничивании по полной петле [10, 11]. Во время исследования вихревые токи практически отсутствуют из-за изоляционного покрытия диоксидом титана каждой частицы порошка оксидным слоем.

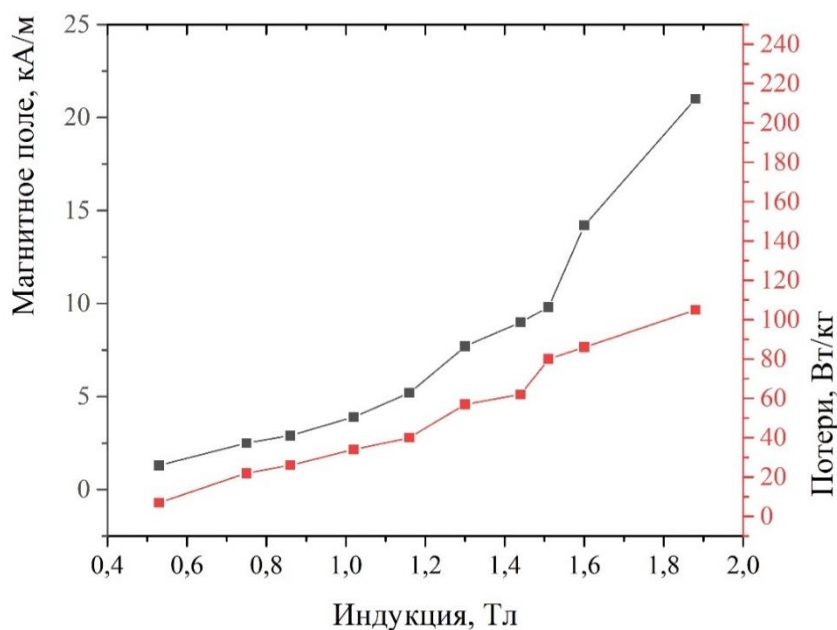


Рисунок 7. – Зависимости намагничивания, измеренные на частоте 1 кГц, и полевые зависимости гистерезисных потерь для композита на основе порошка железа, капсулированного покрытием оксида титана

Таким образом, с увеличением магнитной индукции величина электромагнитных потерь почти линейно возрастает за счёт гистерезисных потерь во всем диапазоне измерений [11, 12].

Для значения индукции  $B = 1,9$  Тл гистерезисные потери в прессованных компонентах составляют порядка  $P = 105$  Вт/кг, что ниже, чем величина аналогичных потерь для электротехнической стали  $P = 120$  Вт/кг. Из анализа данных можно сделать вывод, что компоненты, изготовленные из магнитомягкого композиционного материала, имеют высокое значение магнитной индукции 1,88 Тл в поле 21 кА/м.

Исследования показали, что магнитные компоненты обладают достаточной прочностью и необходимыми электромагнитными характеристиками для создания двухстаторного комбинированного электродвигателя.

#### Выводы:

Проведены комплексные исследования полученных магнитных компонентов для двухстаторного комбинированного электродвигателя. Плотность изготовленных компонентов составляет  $7,5 - 7,8$  г/см<sup>3</sup>. Измерения основных электромагнитных характеристик магнитных компонентов выполнены на экспресс-магнетометре на частоте 1 кГц. При напряженности  $H = 21$  кА/м величина магнитной индукции магнитных компонентов составляет  $B_m = 1,88$  Тл. Величина гистерезисных потерь компонентов составляет порядка  $P = 105$  Вт/кг для значения индукции  $B = 1,9$  Тл, что ниже величины аналогичных потерь для электротехнической стали  $P = 120$  Вт/кг. Комплексные исследования показали, что магнитные компоненты обладают достаточной прочностью и необходимыми





электромагнитными характеристиками для создания двухстаторного комбинированного электродвигателя.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУР:

1. Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф. (Минск 4–6 сент. 2022 г.) / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А.Ф. Ильющенко (гл.ред.) [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2022. – 730 с. – С. 188-191.
2. Structure and morphology of titanium dioxide encapsulated iron powder / A.L. Zhaludkevich, O.F. Demidenko, A.O. Larin, G.A. Govor, U.T. Berdiyev, U.B. Suleimanov, F.F. Hasanov // Book of abstracts of VIII Euro-Asian Symposium “Trends in Magnetism” (EASTMAG-2022) – August 22-26, 2022, Kazan, Russia. – 2022. – Vol. II. – P. 275-276.
3. Energy-saving materials for electrical engineering / U.T. Berdiyev, U.B. Sulaymonov, F.F. Hasanov, O.F. Demidenko // The scientific journal vehicles and roads. – 2022. – №1. – P.131-137.
4. Usan Berdiyev; Ulmasbek Berdiyev; Mukambar Toshpulatova Problems and Tasks of Creating Energy-Saving Electric Machines, AIP Conference proceedings. -5, 2022-yil. <https://doi.org/10.1063/5.0089682>
5. Tuychieva M. Control of electric locomotives with asynchronous electric motors under asymmetric operating conditions in Uzbekistan. // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 614 (2020) 012060.
6. Use of Hybrid Renewable Energy Systems to Excite Autonomous Synchronous Machines, [Pirmatov, N., Muminov, M., Akberdiyev, M., Abdullayev, J. AIP Conference Proceedingsthis link is disabled](#), 2022, 2432, 0200200
7. Fayzullayev J.S. Improvement of functional diagnostics of asynchronous motors. AIP Conference Proceedings, Uzbekistan. 2023.03. 2612,050034
8. U.T.Berdiev, A.K. Vecher, F.F.Khasanov, Investigation of the frequency characteristics of composite iron powders with insulating oxide coatings. «Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering» (CONMECHYDRO – 2021), Узбекистан, Ташкент, 1 – 3 апреля.
9. A.U. Gapparov, G. A. Govor, U. T. Berdiyev, F. F. Hasanov, and A. M. Kurbanov. Magnetic-soft materials based on iron for electromechanical engineering, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 614 (2020) 012048.
10. Nanomodified composite magnetic materials and their molding technologies / I. Timoshkov, Q. Gao, G. Govor, A. Sakova, V. Timoshkov, and A. Vetcher /AIP Advances. – 2018. – Vol. 8. – P. 056415-1 – 056415-4.
11. Govor, G.A. A composite soft magnetic material and products on its basis /G.A. Govor, A.K. Vetcher // Proceedings of the 2nd International Conference on Modern Applications of Nanotechnology, Minsk, Belarus, 6-8 May 2015. – P. 094-1 – 094-3.125.
12. G.A. Govor, M. Przybylski, A.K. Vetcher, K.I. Yanushkevich, J. Zukrowski, T.M. Tkachenko, Structure and magnetic characteristics of composites based on



encapsulated iron powders ASC100.29, Bulletin of the Fund for Fundamental Research. 1.  
pp. 105-111. (2020)