

УДК 621.313.333.+621.31.03+621.314

МНОВХОДОВЫЕ И МНОГОМЕРНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ: ОБЩИЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ

MULTI-INPUT AND MULTI-DIMENSIONAL ELECTRIC MACHINES: GENERAL APPROACH TO RESEARCH

Кашин Яков Михайлович

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой электротехники
и электрических машин,
Кубанский государственный
технологический университет

Кашин Александр Яковлевич

соискатель, слушатель,
Краснодарское высшее военное
авиационное училище летчиков

Князев Алексей Сергеевич

соискатель, инженер авиационной базы, г. Липецк

Акимов Данил Александрович

курсант,
Краснодарское высшее военное
авиационное училище летчиков

Аннотация. Даны определения многомерных и многовходовых электрических машин, показано устройство и особенности конструкции и принципа действия известных двухвходовых и двухмерных электрических машин.

Ключевые слова: многомерная электрическая машина, многовходовая электрическая машина, аксиальная двухмерная электрическая машина-генератор, ротор, степень свободы.

Kashin Yakov Mikhaylovich

Candidate of Technical Sciences,
associate professor,
head of the department of electrical
equipment and electrical machines,
Kuban State University of Technology

Kashin Alexander Yakovlevich

applicant, listener,
Krasnodar highest military aviation college
of pilots

Knyazev Alexey Sergeyeovich

applicant, engineer of aviation base,
Lipetsk

Akimov Danil Aleksandrovich

Cadet,
Krasnodar highest military aviation college
of pilots

Annotation. The article deals with multi-input and multi-dimensional electric machines, it was examined the design and the features of the device, the work principle of famous multi-input and multi-dimensional electric machines.

Keywords: multi-dimensional electric machines, multi-input machines, two-way axial electric machine generator, rotor, the degree of discretion.

Многовходовыми называют электрические машины (ЭМ), которые имеют несколько входов энергии, к которым можно подключать источники соответствующих видов энергии. Под определение «многовходовых» можно отнести все электрические машины, существующие на сегодняшний день, а так же те, которые будут изобретены в будущем. При этом традиционные одновходовые (например, асинхронный двигатель) могут рассматриваться как частный случай многовходовых электрических машин (МВЭМ), имеющих только один вход энергии (в данном примере – электрический). Однако, чтобы в дальнейшем не затрагивать исследования достаточно хорошо изученных традиционных одновходовых ЭМ, под многовходовыми в настоящей работе будем понимать только ЭМ, имеющие больше одного входа энергии.

Несмотря на то, что термин «многовходовых» ЭМ был введен не так давно, нельзя сказать, что электрические машины, имеющие больше одного входа, не имеют широкого распространения.

В качестве одного из примеров можно привести генератор переменного тока, который П.Н. Яблочков совместно с заводом Грамма разработал ещё в 1878 году (рис. 1) [1].

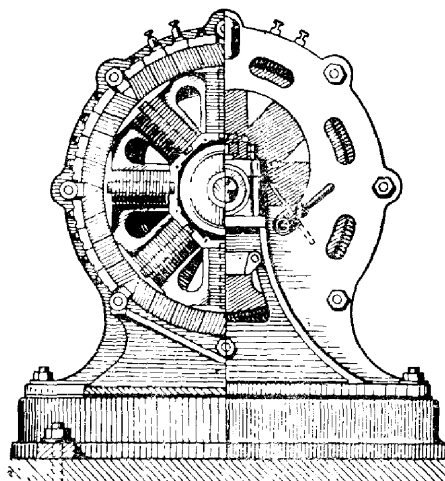


Рисунок 1 – Генератор переменного тока Яблочкова-Грамма

Такой генератор можно рассматривать в качестве МВЭМ с двумя входами, один вход которой – механический (вал ротора) подключается к источнику механической энергии, а второй вход – электрический (обмотка возбуждения), подключается к источнику электрической энергии постоянного тока. По сути, это один из первых синхронных генераторов с возбуждением от источника постоянного тока. В результате электромеханического преобразования механической энергии, поступающей на один вход (вал ротора), электрической энергии, поступающей на второй вход (обмотку возбуждения), с выхода (обмотка якоря, расположенная на статоре) снимается электрическая энергия переменного тока. При возбуждении синхронного генератора от постоянных магнитов он будет являться одноходовой ЭМ.

В качестве второго примера МВЭМ с двумя входами можно рассматривать коллекторный двигатель постоянного тока с обмоткой индуктора, известный всем ещё со школьных учебников физики (рис. 2). Один вход электрической энергии – обмотка индуктора, располагаемая на статоре, второй вход электрической энергии – щеточно-коллекторный узел, через который электрическая энергия постоянного тока передается на ротор. То есть, такая ЭМ имеет два различных входа электрической энергии. В результате электромеханического преобразования энергии, поступающей на два входа электрической энергии, на выходе получается механическая энергия вращения ротора. Если в коллекторном двигателе постоянного тока вместо обмотки индуктора использовать постоянные магниты, то он будет являться одноходовой ЭМ.

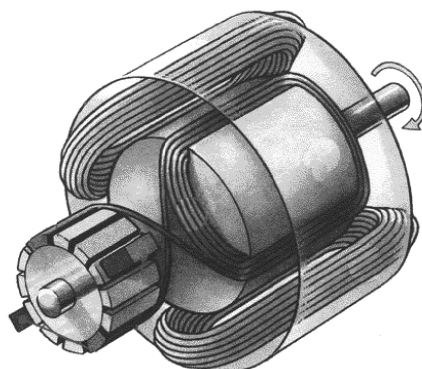


Рисунок 2 – Коллекторный двигатель постоянного тока с обмоткой индуктора

Это далеко не все широко известные примеры МВЭМ, имеющих больше одного входа. Причём многие из них достаточно глубоко исследованы, поэтому можно уверенно заявить, что МВЭМ появились не вчера, что у них есть достаточно долгая история развития. Кроме того, на протяжении многих десятилетий проводились практиче-

ские испытания и исследования, в результате которых были сформированы основы теории МВЭМ.

Необходимо так же чётко разделять понятия входа и источника энергии. Несколько входов могут подключаться к одному источнику соответствующего вида энергии. Например, в коллекторном двигателе постоянного тока, изображённого на рис. 2, оба входа электрической энергии могут подключаться к одной аккумуляторной батарее (АБ). В то же время, к каждому входу может подключаться несколько источников соответствующего вида энергии, например, к одному входу электрической энергии может одновременно подключаться несколько параллельно соединённых АБ, или АБ, соединённая параллельно с генератором постоянного тока, и т.д.

В качестве современных примеров многовходовых ЭМ можно привести аксиальную двухвходовую бесконтактную электрическую машину-генератор [2] (АДБЭМГ). АДБЭМГ содержит (рис. 3, 4): корпус 1, постоянный многополюсный магнит 2 индуктора подвозбудителя, боковой аксиальный магнитопровод 3 с многофазной обмоткой 4 якоря подвозбудителя, однофазной обмоткой 5 возбуждения возбудителя и дополнительной обмоткой 6 возбуждения возбудителя, которая подключается к источнику постоянного тока через контакты 19 (рис. 4), внутренний аксиальный магнитопровод 7 с многофазной обмоткой 8 якоря возбудителя и однофазной обмоткой возбуждения 9 основного генератора, боковой аксиальный магнитопровод 10 с многофазной (на рис. 4 – девятифазной) обмоткой 11 якоря основного генератора, вал 12, закрепленный в подшипниковых узлах 13 и 14 и жестко связанный с постоянным многополюсным магнитом 2 индуктора подвозбудителя посредством диска 15 и с внутренним аксиальным магнитопроводом 7 посредством диска 16.

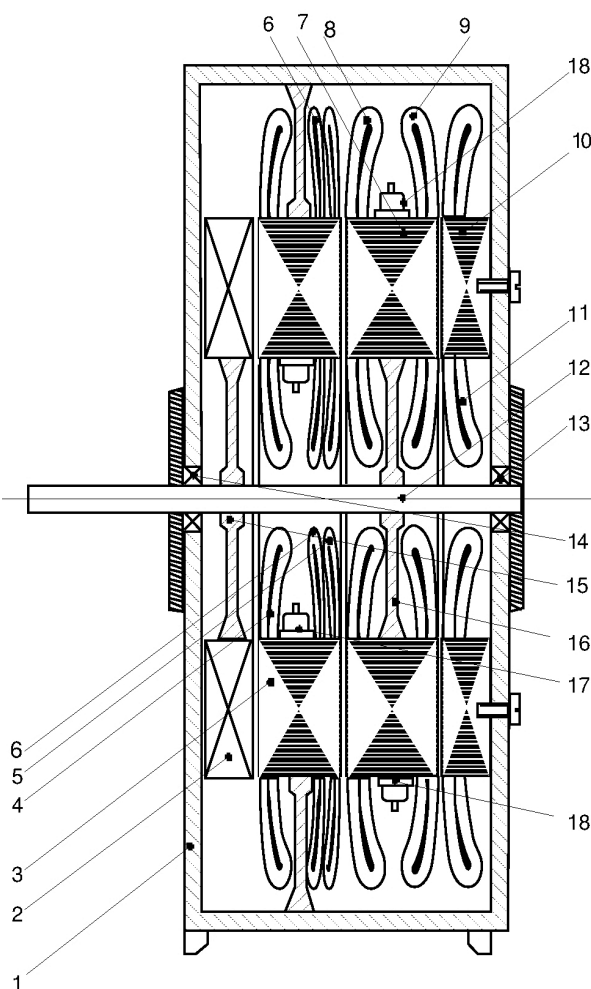


Рисунок 3 – Конструкция аксиальной двухвходовой бесконтактной электрической машины-генератора

Однофазная обмотка возбуждения 5 возбудителя подключается к многофазной обмотке 4 якоря подвозбудителя через многофазный двухполупериодный (на рис. 4 – девятифазный) выпрямитель 17. Однофазная обмотка возбуждения 9 основного генератора подключается к многофазной обмотке 8 якоря возбудителя через многофазный (на рис. 4 – девятифазный) двухполупериодный выпрямитель 18.

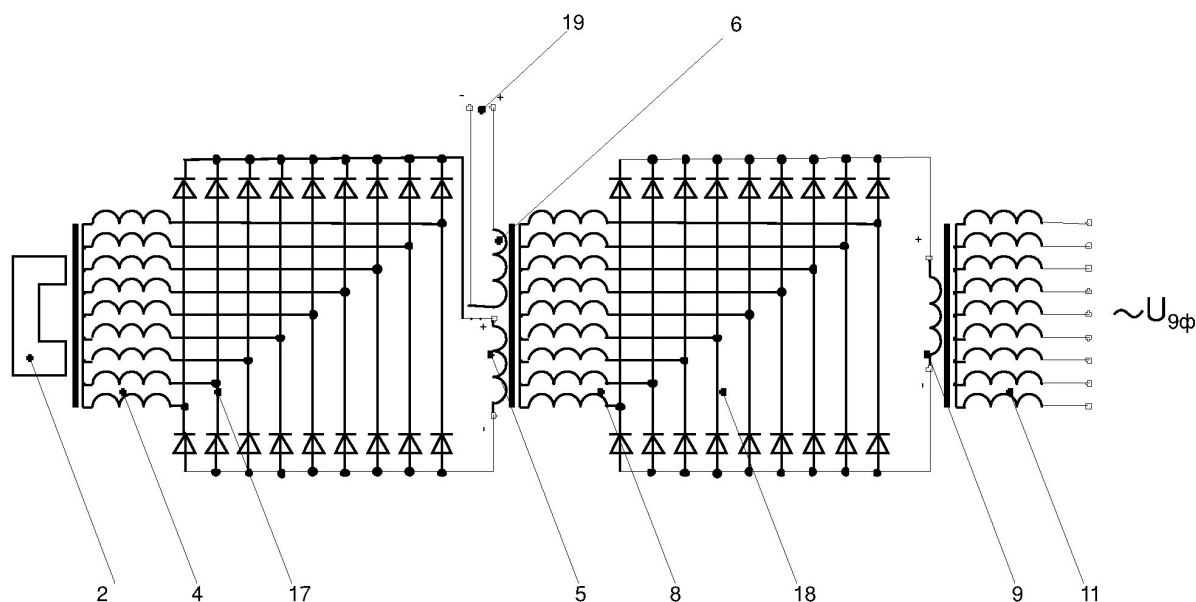


Рисунок 4 – Электрическая схема аксиальной двухвходовой бесконтактной электрической машины-генератора

Многофазная обмотка 11 якоря основного генератора может быть подключена к многофазному двухполупериодному выпрямителю.

Одним входом (механическим) в АДБЭМГ является вал 12, который подсоединяется к источнику механической энергии вращения (например, к выходному валу двигателя внутреннего сгорания), другим входом (электрическим) – дополнительная обмотка 6 возбуждения возбудителя, которая подключается к источнику постоянного тока через контакты 19.

Все ЭМ, несмотря на индивидуальную специфику, как в области применения, так и в конструкции, при рассмотрении в рамках общей теории МВЭМ имеют общие признаки и принципы электромеханического преобразования энергии, и поэтому могут быть классифицированы.

Многовходовые электрические машины (МВЭМ), по своей сути являются электромеханическими преобразователями энергии, которые усиливают энергию, получаемую от одного источника за счёт энергии, получаемой от других источников. Среди всех входов энергии, которые есть в МВЭМ, можно выделить две группы – основные и дополняющие.

К основным следует отнести такие входы энергии, к которым подключаются источники, создающие или являющиеся причиной возникновения электромеханического преобразования энергии в МВЭМ. Основным входом энергии есть в каждой МВЭМ, в общем случае их может быть несколько (в АДБЭМГ основным входом – механический).

К дополнительным относят такие входы энергии, к которым подключаются источники, за счёт которых происходит усиление энергии, получаемой непосредственно или в результате электромеханического преобразования энергии от основных входов. Их может быть несколько, но может и не быть вовсе.

Если МВЭМ имеет как основные, так и дополнительные входы, то использование энергии только от дополнительных входов окажется безрезультатным, в то время как использование энергии только от основных входов приведёт лишь к уменьшению уровня выходной энергии по сравнению с одновременным использованием энергии от

всех входов. Разделять входы на основные и дополнительные для каждой МВЭМ необходимо индивидуально с учётом особенностей конструкции.

Помимо вышесказанного, необходимо учитывать факт обратимости ЭМ, то есть если в двигательном режиме на вход электрической энергии поступает постоянный ток, то не исключено, что в генераторном режиме этот вход может использоваться как выход электрической энергии постоянного тока. Поэтому говоря про ЭМ с несколькими входами нужно понимать, что в общем случае их так же можно рассматривать как ЭМ с несколькими выходами. Такой подход имеет право на существование и может быть использован при решении специальных задач, например, для одновременного обеспечения мощности на валу ротора и для обеспечения электроэнергией различных потребителей. При этом ЭМ, имеющие несколько выходов будут иметь такую же аббревиатуру МВЭМ, что и многовыходовые, поэтому для обобщения теории не будем разделять эти понятия.

При проектировании МВЭМ необходимо учитывать особенности области и условий их применения, и в зависимости от них определять количество необходимых входов для каждого из видов энергии, которые предполагается использовать для работы МВЭМ.

Многомерными называют ЭМ, имеющие несколько степеней свободы. Количество степеней свободы определяется суммой степеней свободы всех частей ЭМ, имеющих возможность перемещения (вращения) относительно осей инерциальной системы координат (ИСК). При определении количества степеней свободы каждой части ЭМ оси ИСК располагают таким образом, чтобы число степеней свободы было наименьшим.

В общем случае, если ЭМ содержит m степеней свободы, то она называется m -мерной. Под определение «многомерных» можно отнести все электрические машины, существующие на сегодняшний день, а так же те, которые будут изобретены в будущем. При этом традиционные одномерные (например, тот же асинхронный двигатель) могут рассматриваться как частный случай многомерных электрических машин (ММЭМ), имеющих только одну степень свободы. Однако, чтобы в дальнейшем не затрагивать исследования достаточно хорошо изученных традиционных одномерных ЭМ, под многомерными ЭМ будем понимать только ЭМ, имеющие больше одной степени свободы.

Наличие нескольких степеней свободы придаёт ЭМ дополнительные возможности, которые могут быть использованы при решении определённого круга задач. Например, при вращении двух роторов в противоположные стороны, их относительные угловые скорости складываются, в результате чего можно получить лучший результат электромеханического преобразования энергии, чем при сложении энергий, получаемых при вращении каждого из роторов относительно неподвижного статора.

ММЭМ имеют, как правило, более сложную конструкцию по сравнению с традиционными одномерными. Именно поэтому, а так же в силу специфики своего назначения ММЭМ значительно меньше распространены, чем одномерные ЭМ. Однако, на сегодняшний день уже разработано больше десятка ЭМ различных конструкций, попадающих под определение ММЭМ. Кроме того, в космической электротехнике даже традиционная одномерная ЭМ рассматривается как шестимерная, так как в условиях невесомости и ротор и статор перемещаются (вращаются) относительно инерциальной системы координат и при этом свободно перемещаются (вращаются) в трёхмерном пространстве. Поэтому многомерность ЭМ зависит не только от конструкции ЭМ, но и от условий её применения.

В качестве одного из примеров ММЭМ с двумя степенями свободы можно привести двухмерную аксиальную электрическую машину-генератор [3] (рис. 5), которая имеет независимо вращающиеся якорь 1 и ротор 10.

В качестве второго примера ММЭМ с двумя степенями свободы можно привести двухмерную электрическую машину-генератор радиального типа [4] (рис. 6), которая имеет независимо вращающиеся якорь 1 и ротор 8.

У ММЭМ один из независимо вращающихся роторов может рассматриваться как статор, в отличие от традиционных одномерных, где под статором понимают неподвижную часть ЭМ. В общем случае ММЭМ может не иметь на неподвижном статоре обмоток или элементов, участвующих в электромеханическом преобразовании энергии.

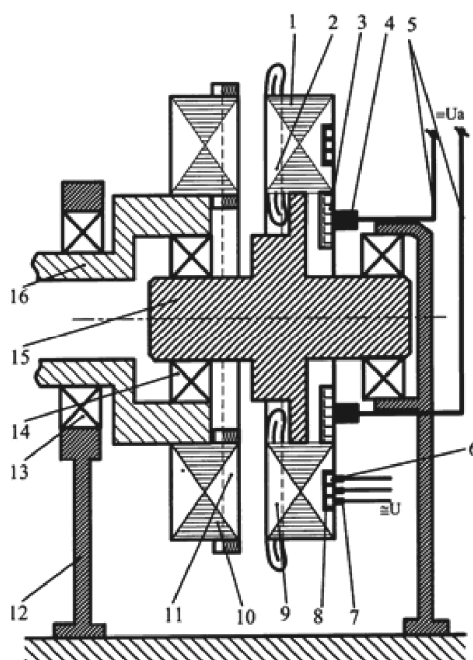


Рисунок 5 – Двухмерная аксиальная электрическая машина-генератор

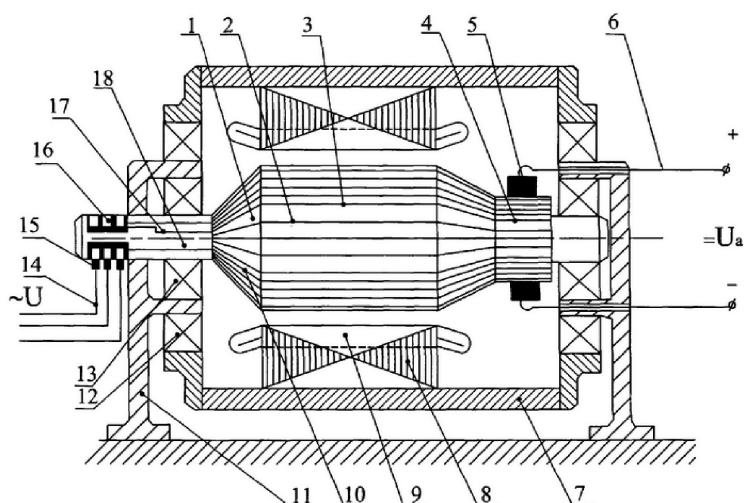


Рисунок 6 – Двухмерная электрическая машина-генератор радиального типа

ММЭМ, в силу присущих им особенностей, имеют необходимость подвода (или съёма) энергии на вращающийся ротор. С этой целью может быть выбран контактный способ передачи энергии с использованием щеточно-коллекторного узла (скользящего контакта), катящегося контакта, проводящей ленты или бесконтактный способ передачи энергии переменного тока. Использование контактного способа передачи энергии изначально предполагает невысокую надёжность, а так же прихотливость в обслуживании, а бесконтактный способ предполагает необходимость в использовании дополнительных обмоток и иных устройств, формирующих сигнал переменного тока с необходимыми параметрами.

При проектировании ММЭМ необходимо учитывать особенности области и условий их применения, и в зависимости от них определять количество необходимых степеней свободы, от которых будут зависеть характеристики ММЭМ.

Понятия многовходовости и многомерности, имеют разные значения. Однако из определения многомерных ЭМ следует, что каждый независимо вращающийся ротор должен иметь вход энергии, к которому подключается источник соответствующего вида энергии, приводящий этот ротор в движение. Отсюда следует, что многомерность

подразумевает под собой многовходовость. А вот наличие нескольких входов вовсе не предполагает многомерности, так как МВЭМ могут иметь всего один ротор, то есть являться одномерными [2].

Двухмерные и двухвходовые ЭМ достаточно подробно рассмотрены авторами в [2, 3, 4, 5]. В двухвходовых ЭМ аксиальной конструкции в результате притяжения аксиальных магнитопроводов неизбежно возникают осевые усилия. Эти усилия ведут к преждевременному выходу из строя подшипниковых узлов. Характер осевых усилий в различных случаях взаимного расположения магнитопроводов ротора и статора в одномерных ЭМ рассмотрен в [6]. В ММЭМ распределение осевых усилий вдоль активной длины магнитопроводов носит более сложный характер.

Выводы:

Как МВЭМ, так и ММЭМ имеют свои особенности, которые могут быть использованы при решении особого круга задач. Количество входов, так же как и количество степеней свободы, изначально определяют области применения и характеристики проектируемых ЭМ независимо от конечного конструктивного исполнения. Поэтому такие ЭМ не могут разрабатываться для широкого и повсеместного применения. Однако, при создании соответствующих условий для их работы, они, несомненно, могут и должны обладать характеристиками, не свойственными для традиционных одновходовых и одномерных ЭМ как в качественном, так и в количественном отношении. В МВЭМ и ММЭМ аксиальной конструкции целесообразно исследовать осевые усилия, неизбежно возникающие в результате притяжения аксиальных магнитопроводов [6].

Литература:

1. Белькинд Л.Д. История развития электрических машин / Л.Д. Белькинд, О.Н. Веселовский и др. – М. : Государственное энергетическое издательство, 1960. – С. 322.
2. Аксиальная двухвходовая бесконтактная электрическая машина-генератор // Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б., Кашин А.Я., Пауков Д.В., Голощапов А.В. Патент на изобретение RUS № 2450411. Оpubл. 12.01.2011 г. Бюл. № 13.
3. Пат. РФ № 2349014, Оpubл. 10.03.2009 г. Бюл. № 7. Двухмерная аксиальная электрическая машина-генератор // Гайтов Б.Х., Самородов А.В., Копелевич Л.Е.
4. Пат. РФ № 2332775. Оpubл. 27.08.2008 г. Бюл. № 24. Двухмерная аксиальная электрическая машина-генератор // Гайтов Б.Х., Самородов А.В., Копелевич Л.Е.
5. Гайтова Т.Б. Нетрадиционные электротехнические комплексы (теория, расчет и конструкции) / Т.Б. Гайтова, Я.М. Кашин. – Краснодар : КВАИ, 2004. – 403 с.
6. Гайтова Т.Б. Осевые усилия в аксиальных индукционных регуляторах / Т.Б. Гайтова, Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2004. – № 6. – С. 53–57.
7. Гайтов Б.Х. Двухмерная электрическая машина-генератор для автономных систем электроснабжения / Б.Х. Гайтов, А.В. Самородов, Л.Е. Копелевич, Я.М. Кашин // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2013. – № 1–2. – С. 66–69.
8. Кашин Я.М. Обоснование и разработка перспективных конструкций генераторных установок для систем автономного электроснабжения / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, Д.В. Пауков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 46–53.
9. Многофазный трансформатор-фазорегулятор // Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Сингаевский Н.А., Жуков Ф.И., Исик С.Н. Патент на изобретение RUS № 2137586. 06.04.1988 г.
10. Зеленская Е.А. Ветро-солнечные генераторы для электроснабжения объектов нефтегазовой отрасли / Е.А. Зеленская, Б.Х. Гайтов, Л.Е. Копелевич и др. // Газовая промышленность. – 2014. – № 6 (707). – С. 114–117.
11. Кашин Я.М. Способы сложения энергии в двухвходовых электрических машинах / Я.М. Кашин, А.С. Князев, А.В. Самородов и др. // Технические и технологические системы: Материалы седьмой международной научной конференции «ТТС-15». – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2015. – С. 5–8.
12. Гайтов Б.Х. О целесообразности использования двухмерных электрических машин в системах автономного электроснабжения / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич и др. // Технические и технологические системы: Материалы седьмой международной научной конференции «ТТС-15». – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2015. – С. 8–11.
13. Аксиальный двухвходовый бесконтактный ветро-солнечный генератор. Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Кашин А.Я., Копелевич Л.Е., Самородов А.В. Патент на изобретение RUS № 2561504. 16.06.2014.

References:

1. Belkind L.D. History of development of electrical machines / L.D. Belkind, O.N. Veselovsky, etc. – M. : State power publishing house, 1960. – P. 322.
2. Axial dvukhvkhodovy contactless electric machine generator // Gaytov B.H, Kashin Ya.M., Gaytova T.B., Kashin A.Ya., Paukov D.V., Goloshchapov A.V. Patent for the invention of RUS № 2450411. Opubl. 1/12/2011. Bulletin № 13.
3. Stalemate. Russian Federation № 2349014, Opubl. 3/10/2009. Bulletin № 7. Two-dimensional axial electric machine generator // Gaytov B.H., Samorodov A.V., Kopelevich L.E.
4. Stalemate. Russian Federation № 2332775. Opubl. 8/27/2008. Bulletin № 24. Two-dimensional axial electric machine generator // Gaytov B.H., Samorodov A.V., Kopelevich L.E.
5. Gaytova T.B. Nonconventional electrotechnical complexes (theory, calculation and designs) / T.B. Gaytova, Ya.M. Kashin. – Krasnodar : KVAI, 2004. – 403 p.
6. Gaytova T.B. Axial efforts in axial induction regulators / T.B. Gaytova, B.H. Gaytov, Ya.M. Kashin // News of higher educational institutions. Electromecanics. – 2004. – № 6. – P. 53–57.
7. Gaytov B.H. The two-dimensional electric machine generator for autonomous systems of power supply / B.H. Gaytov, A.V. Samorodov, L.E. Kopelevich, Ya.M. Kashin // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2013. – № 1–2. – P. 66–69.
8. Kashin Ya.M. Justification and development of perspective designs of generating installations for systems of autonomous power supply / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, D.V. Paukov // News of higher educational institutions. Electromecanics. – 2012. – № 1. – P. 46–53.
9. Multiphase transformer phase-shifter // Gaytov B.H., Kashin Ya.M., Singayevsky N.A., Zhukov F.I., Isik S.N. Patent for the invention of RUS № 2137586. 4/6/1988.
10. Zelensky E.A. Vetro-solnechnye generators for power supply of objects of oil and gas branch / E.A. Zelenskaya, B.H. Gaytov, L.E. Kopelevich, etc. // Gas industry. – 2014. – № 6 (707). – P. 114–117.
11. Kashin Ya.M. Ways of addition of energy in the dvukhvkhodovykh of electrical machines / Ya.M. Kashin, A.S. Knyazev, A.V. Samorodov, etc. // Technical and technological systems: Materials of the seventh international scientific TTS-15 conference. – Krasnodar : Publishing house – South, 2015. – P. 5–8.
12. Gaytov B.H. About expediency of use of two-dimensional electrical machines in systems of autonomous power supply / B.H. Gaytov, Ya.M. Kashin, L.E. Kopelevich, etc. // Technical and technological systems: Materials of the seventh international scientific TTS-15 conference. – Krasnodar : Publishing house –South, 2015. – P. 8–11.
13. Axial dvukhvkhodovy contactless vetro-solar generator. Gaytov B.H., Kashin Ya.M., Kashin A.Ya., Kopelevich L.E., Samorodov A.V. Patent for the invention of RUS № 2561504. 6/16/2014.