

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЩЕГО ПОДХОДА К ОПТИМАЛЬНОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ ТИХОХОДНЫХ СИНХРОННЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

В статье предложен общий подход к созданию высокотехнологических энергоэффективных электротехнических комплексов на основе тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин. Поставлена задача оптимизации магнитной системы по критерию удельной полезной мощности при обеспечении минимума массы используемых активных материалов. Приведены оптимальные массогабаритные соотношения для магнитной системы линейного магнитоэлектрического привода, обуславливающие максимальное развиваемое электромагнитное усилие. Кроме этого, в статье представлена классификация пусковых и эксплуатационных характеристик синхронных магнитоэлектрических машин в составе электротехнических комплексов.

Ключевые слова: энергоэффективность, магнитная система, оптимизация, магнитоэлектрические машины, электротехнические комплексы, постоянные магниты, обмотка.

Прогресс в области создания новых материалов и сплавов, внедрение новых изделий и устройств на их основе определяют явно выраженную тенденцию к созданию высокотехнологических электротехнических комплексов (ВЭТК) на основе электромеханических преобразователей энергии, обладающих улучшенными пусковыми и эксплуатационными характеристиками.

Современные ВЭТК характеризуются рядом показателей, определяющих их качество, надежность и экономичность (рис. 1).

Неуклонный рост производства промышленных и потребительских товаров, повышение качества выпускаемой продукции, разнообразие ее ассортимента и конкурентоспособность с другими аналогичными товарами возможны на пути создания, модернизации и использования современных промышленных технологий. Эти технологии объединяет наметившаяся в последнее десятилетие тенденция к усложнению конструкций технических устройств и систем для повышения требований к ним по качеству, экономичности, безопасности, экологичности, расширения функциональных возможностей и другим параметрам. Ее действие обусловлено глобальной информатизацией всех сфер

производственной деятельности и повсеместным применением компьютерных технологий, что находит подтверждение в постановке вычислительных задач по исследованию и проектированию технических устройств и систем, а также в изменении подходов в формировании принципов их математического моделирования. К числу таких устройств и систем в полной мере относятся комплексы и системы, выполненные на основе электромеханических преобразователей энергии (ЭМП). На рис. 2 представлена структурная схема ВЭТК с электромеханическими преобразователями энергии.

Задачам проектирования и создания комплексов на основе электромагнитных ЭМП традиционно уделяется большое внимание со стороны многих научных творческих коллективов.

В связи с общеизвестными обстоятельствами и многолетним опытом успешной эксплуатации для привода большинства общепромышленных комплексов применяются асинхронные двигатели, при этом наибольшее распространение получил электропривод по типу «преобразователь частоты – асинхронный двигатель», или «тиристорный регулятор напряжения – асинхронный электродвигатель». Работам по созданию электротехнических



Рис. 1. Характеристики и составляющие ВЭТК



Рис. 2. Структурная схема ВЭТК с электромеханическим преобразователем

комплексов на базе асинхронных электрических машин посвящены работы многих ученых: Беспалова В. Я., Иванова-Смоленского А. В., Ковалева Ю. З., Копылова И. П., Ряшенцева Н. П. и многих других ученых. Вопросы, связанные с применением асинхронных электрических машин в составе привода, хорошо проработаны и роль асинхронного электропривода в составе современных электротехнических комплексов сложно переоценить.

Применение асинхронных электрических машин в генераторном режиме долгое время представлялось неперспективным направлением ввиду необходимости создания компактного регулируемого источника реактивной мощности [1]. Кроме этого, научный интерес представляют автономные асинхронные генераторы с конденсаторным самовозбуждением [2]. Вопросам создания электротехнических комплексов энергетических установок, включающих в свой состав электромеханические преобразователи, в качестве которых применяются асинхронные электрические машины, посвящены работы Алиева И. И., Гентковски З., Грачева П. Ю., Костырева М. Л., Онищенко Г. Б. Постникова И. М., Радина В. И., Сергеева М. Ю., Сипайлова Г. А., Торощева Н. Д. и других ученых [3–13].

В настоящее время при создании ВЭТК на основе асинхронных электромагнитных машин наибольший интерес представляют исследования в области разработки систем управления. В этом направлении наметилась устойчивая тенденция к разработке микропроцессорного «бездатчикового асинхронного электропривода».

Развитию общей универсальной теории идентификации сложных нелинейных нестационарных режимов посвящены работы Браславского И. Я., Ви-

ноградова А. Б., Гинсберга К. С., Глазырина А. С., Завьялова В. М., Костылева А. В., Лотоцкого В. А., Панкратова В. В., Толочко О. И., Asher V. K., Habetler T. G., Tolyat N. A. и других ученых.

Синхронные электромагнитные машины вращательного действия находят свое применение как в составе электропривода, так и в составе энергетических установок.

Возможность снижения потребления реактивной мощности для синхронных двигателей за счет изменения возбуждения, а также абсолютная жесткость механической характеристики, ограниченная критическим моментом сопротивления, обусловили широкое применение синхронного электропривода в промышленности.

Исследованию и особенностям эксплуатации синхронных электрических машин в составе ЭТК посвящены работы Алябьева М. И., Арутюняна В. С., Блоцкого Н. Н., Важнова А. И., Веникова В. А., Гамазина С. И., Герасимова А. Н. Калужского Д. Л., Копылова И. П., Полищук В. И. и других [14–16].

В связи с широким применением электротехнических комплексов на основе синхронных электромагнитных машин одним из актуальных направлений является разработка высокоэффективной системы технической диагностики, учитывающей особенности их конструкций и удовлетворяющей современным требованиям по техническим и экономическим показателям, работающих как автономно, так и в составе автоматизированных систем управления технологическими процессами [17].

Разработке линейных синхронных электромагнитных машин в составе электротехнических комплексов также уделяется большое внимание. Научный интерес представляют работы по соз-

данию линейных электромагнитных двигателей с улучшенными тяговыми характеристиками в составе привода конкретного назначения. Эти работы посвящены электрическим импульсным системам с линейной траекторией движения рабочих органов. Актуальность применения указанного типа привода обусловлена упрощением кинематической цепи машины за счет исключения передаточных и преобразовательных механизмов и обеспечения наилучших условий совмещения двигателя и рабочего органа машины, имеющего возвратно-поступательное движение.

Исследованию электротехнических комплексов конкретного применения включающих в свой состав линейные синхронные электромагнитные машины посвящены работы Любчика М. А., Манжосов В. К., Мошкина В. И., Нейман В. Ю., Никитенко А. Г., Буль А. Б., Ряшенцева Н. П., Саттарова Р. Р., Симонов Б. Ф., Смеягин А. И., Угарова Г. Г. и других ученых [18–26].

Кроме электротехнических комплексов, имеющих в своем составе ЭМП с электромагнитным возбуждением, в последнее время широкое применение получили ЭМП магнитоэлектрического типа с возбуждением от постоянных магнитов. К их числу относятся электротехнические комплексы с синхронными магнитоэлектрическими машинами с постоянными магнитами (СМЭМ ПМ). Органическое слияние в одно целое электромеханического преобразователя энергии и рабочей машины при отсутствии передаточных и преобразовательных механизмов делают эти комплексы специальными по назначению, а работы по их созданию и проектированию во многом исследовательскими, жестко подчиненными требованиям нагрузки и внешних воздействующих факторов.

Появление на рынке высококоэрцитивных постоянных магнитов существенно расширило сферу применения электротехнических комплексов на базе СМЭМ ПМ и обусловило прогресс в области улучшения их пусковых и эксплуатационных характеристик.

Классификация электротехнических комплексов с СМЭМ ПМ представлена на рис. 3.

Указанные в классификации ВЭТК с СМЭМ ПМ могут быть быстроходными и тихоходными. Определяющим параметром является частота движения (например, вращение или линейное перемещение) подвижной части. Для быстроходных СМЭМ ПМ частота превышает 10 Гц, в то время как для тихоходных не превышает указанного значения.

Исследованиям СМЭМ ПМ посвящены работы Балагурова В. А., Бертинова А. И., Бута Д. А.,

Галтеева Ф. Ф., Ледовского А. Н., Исмагилова Ф. Р. и многих других. Применение быстроходных СМЭМ ПМ в качестве генераторов в составе электротехнических комплексов целесообразно при скоростях ведущих приводов до 100 000 об/мин, например, в авиастроении и автономной энергетики (микротурбины) [27].

Теории расчета электротехнических комплексов с быстроходными СМЭМ ПМ уделяется большое внимание со стороны научного сообщества, что во многом определяет высокую проработку задач, связанных с этим типом ЭМП.

В то же время исследование вопросов проектирования электротехнических комплексов с тихоходными СМЭМ ПМ являются недостаточно изученными, так как при низких скоростях движения рабочего механизма при отсутствии в составе передаточных и преобразовательных механизмов получения энергоэффективных ВЭТК возможно только на пути улучшения энергетических характеристик магнитных систем, а это, в свою очередь, представляет собой сложную многофакторную задачу. Определяющими энергоэффективность ВЭТК с тихоходными магнитоэлектрическими машинами факторами являются особенности конструкций магнитных систем, позволяющие уменьшить реакцию якоря, пусковой момент, увеличить допустимый ток обмотки и т.д. [28–30].

Наряду с другими типами ЭМП в составе ВЭТК тихоходные СМЭМ с ПМ находят применение во многих отраслях производства и повседневной деятельности человека. Например, широкое распространение получили тихоходные ветроэнергетические установки (ВЭУ), устройства генерации электрической энергии в транспортных системах (в том числе железнодорожных), приводы поршневых компрессоров и насосов различного назначения, испытательные стенды для исследования свойств материалов, для изучения которых требуется механическое воздействие.

Преимуществами ВЭТК с тихоходными синхронными магнитоэлектрическими машинами в представленных отраслях являются:

- применение постоянных магнитов в конструкции магнитной системы позволяет повысить технологичность изготовления магнитоэлектрической машины и исключить потери на возбуждение;
- слияние в единое целое электромеханического преобразователя и рабочей машины при отсутствии передаточных и преобразовательных механизмов для электротехнических комплексов, в которых, по условию технологического процесса, подвижные части обладают малыми скоростями,

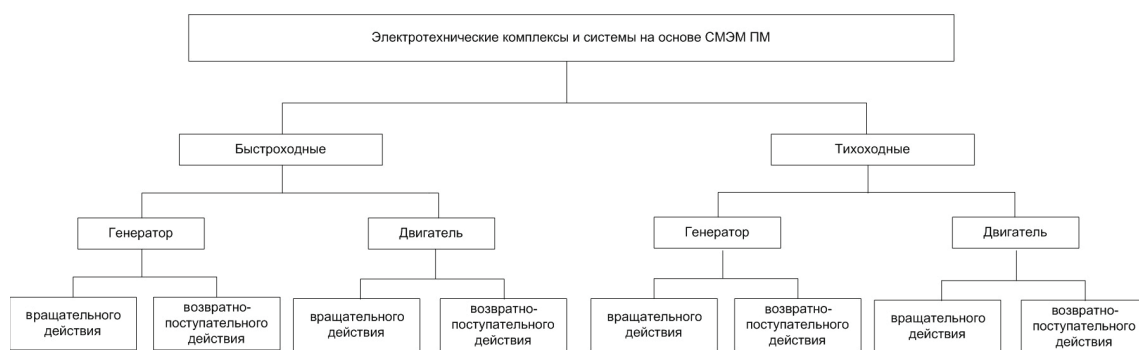


Рис. 3. Классификация ВЭТК на основе СМЭМ ПМ



Рис. 4. Классификация пусковых и эксплуатационных характеристик ВЭТК на основе тихоходных магнитоэлектрических машин

позволяет повысить надежность и уменьшить потери в электромеханической подсистеме;

— неуклонный прогресс в области производства постоянных магнитов со все возрастающими энергетическими характеристиками обуславливает научно-практический интерес в области создания электротехнических комплексов на основе тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин повышенной мощности.

Вместе с тем совмещение исполнительного механизма и рабочей машины обуславливает необходимость учета требований нагрузки при решении общей задачи разработки электротехнического комплекса. Последнее обстоятельство делает необходимым определение энергоэффективности отдельных компонентов, входящих в состав комплекса, и учет взаимосвязи процессов, протекающих в отдельных его подсистемах.

Учитывая, что современная элементная база полупроводниковых и микропроцессорных узлов используемая в системах управления и электрических преобразовательных устройствах, формирующих напряжение и токов с заданными параметрами в ВЭТК обладает высокой энергоэффективностью (малыми электрическими потерями), выходные характеристики ВЭТК в значительной степени определяются выходными характеристиками тихоходных СМЭМ ПМ. В свою очередь, выходные характеристики СМЭМ ПМ могут быть представлены двумя группами: пусковыми и эксплуатационными. Классификация выходных характеристик тихоходных СМЭМ ПМ представлена на рис. 4.

Таким образом, общим направлением повышения энергоэффективности ВЭТК является поиск новых оптимальных конструкций магнитных систем СМЭМ ПМ, улучшающих их выходные характеристики.

Как правило, в качестве критериев оптимальности при разработке ВЭТК конкретного назначения, включающих в свой состав СМЭМ ПМ, выбираются критерии, жестко связанные с обеспечением требований технического задания, что, в свою очередь, обуславливает большое многообразие конструкций магнитных систем эффективных в одном случае и, напротив, требующих уточнения в другом.

Таким образом, поиск общего критерия оптимальности, решение задачи оптимизации на его основе, разработка методик проектирования и практическая реализация ВЭТК различного назначения с целью проверки его энергоэффективности является важной научной задачей требующей своего рассмотрения. В предложенной статье в качестве указанного общего критерия оптимальности для тихоходных магнитоэлектрических машин, работающих в генераторном и двигательном режимах, вращательного и возвратно-поступательного движения рассматривается критерий обеспечения максимума удельной мощности, приходящейся на единицу массы при сохранении общего критерия минимума массы используемых активных материалов.

Указанный критерий является общим и определяющим выходные характеристики рабочих процессов ВЭТК систем электроснабжения и электропривода возвратно-поступательного движения потребителей малой мощности.

Математическая формулировка задачи оптимизации ЛМЭП представлена следующим образом. Требуется найти значения переменных x_1, x_2, \dots, x_n , определяющие соотношения конструктивных параметров привода, которые максимизируют критерий оптимальности (функцию цели)

$$P_{эм.уг}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \max \quad (1)$$

при ограничениях в виде уравнений связи между параметрами магнитной системы

$$q_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0,$$

$$k = 1, 2, \dots, s,$$

$$s < n \quad (2)$$

и неравенств, определяющих физическую реализуемость конструкции привода, исходя из реальных характеристик используемых активных материалов и конструктивных параметров, варьируемых при проектировании

$$p_j(x_1, x_2, \dots, x_n) < 0,$$

$$j = 1, 2, \dots, m, \quad m < n. \quad (3)$$

Общий подход к оптимальному проектированию линейного магнитоэлектрического привода требует учета комплекса факторов, определяющих значения параметров привода, которые удовлетворяли бы различным, в зависимости от требований, критериям оптимальности [31 – 34].

В случае проектного расчета привода, предусматривающего решение задачи оптимизации его магнитной системы, в качестве исходных данных могут рассматриваться выходные параметры привода, например, значение развиваемого им тягового усилия. При этом определению подлежат конфигурация магнитной системы, геометрические размеры, материал магнитопровода и постоянного магнита, обмоточные данные и другие параметры, при которых значение тягового усилия может быть реализовано наилучшим способом. Очевидно, наилучшим из множества вариантов конструктивного исполнения магнитной системы привода следует считать тот, который реализует заданные технические условия и удовлетворяет определенному критерию оптимальности.

Для магнитной системы линейного магнитоэлектрического привода, представленной на рис. 5, развиваемое удельное электромагнитное усилие:

$$F_{эм.уг} = \frac{\mu_0 H_c k_z J}{\gamma_{обм}} \frac{k_M}{(1 + k_M)} \frac{n}{\left(1 + \frac{\mu_0 H_c}{B_r} \frac{\gamma_M}{\gamma_{обм}} n^2 k_M\right)}. \quad (4)$$

Для отыскания экстремума целевой функции приравняем нулю ее частные производные и решим систему уравнений для определения неизвестных $n_{опт}$ и $k_{M,опт}$:

$$\frac{\partial F_{эм.уг}}{\partial n} = 0$$

и

$$\frac{\partial F_{эм.уг}}{\partial k_M} = 0. \quad (5)$$

Решением задачи оптимального проектирования будет

$$n_{опт} = \sqrt{\frac{B_r}{\mu_0 H_c} \frac{\gamma_{обм}}{\gamma_M}}, \quad k_{M,опт} = 1. \quad (6)$$

$$F_{эм.уг.макс} = \frac{k_z J}{4} \sqrt{\frac{\mu_0 H_c B_r}{\gamma_{обм} \gamma_M}}. \quad (7)$$

$$\left(\frac{Q_\delta}{Q_M}\right)_{опт} = \sqrt{\frac{B_r}{\mu_0 H_c} \frac{\gamma_M}{\gamma_{обм}}}. \quad (8)$$

При следующих независимых переменных:

$$n = \frac{d}{\delta}, \quad (9)$$

$$k_M = \frac{m_{акт.обм.}}{m_M}$$

$$m_{акт.обм.} = 2Q_\delta \delta \gamma_{обм.}'$$

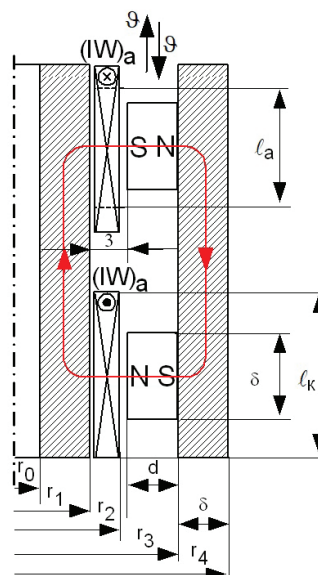


Рис. 5. Магнитная система ЛМЭП

$$m_m = Q_m \gamma_m d. \quad (10)$$

В оптимальной конструкции магнитной системы привода относительная индукция в нейтральном сечении магнита удовлетворяет условию

$$b_{m.опт} = 0,5. \quad (11)$$

Введение независимых переменных (9) в выражение удельной силы тяги, определяемое по отношению (4), позволяет исследовать полученную функцию цели на экстремум. Максимальное значение удельной силы тяги находится из выражения, идентичного выражению (7). Для оптимальной геометрии магнитной системы привода выполняется равенство (11) и справедливы соотношения (6), при которых сила тяги достигает максимума.

Библиографический список

1. Сергеев М. Ю. Импульсный генератор на базе асинхронной машины с вентильным возбуждением: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 1999. 190 с.
2. Джэндубаев А.-З. Р. Автономные асинхронные генераторы с конденсаторным самовозбуждением: развитие теории и практики: дис. ... д-ра техн. наук. Черкесск, 2006. 365 с.
3. Радин В. И. [и др.]. Применение асинхронных генераторов как автономных источников переменного тока // Электротехника. 1967. № 8. С. 17 – 20.
4. Постников И. М., Новиков А. В., Прокофьев Ю. А. [и др.]. Теория и методы расчета асинхронных турбогенераторов. Киев: Наукова думка, 1977. 176 с.
5. Онищенко Г. Б. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания. М.: Энергия, 1979. 199 с.
6. Костырев М. Л. [и др.]. Анализ электромагнитных процессов в асинхронных вентильных генераторах для автономных систем // Современные задачи преобразовательной техники. 1975. С. 82 – 90.
7. Сипайлов Г. А. [и др.]. Электромашинное генерирование импульсных мощностей в автономных инверторах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 168 с. ISBN 5-283-00638-7.
8. Сергеев М. Ю. Микропроцессорное устройство управления импульсным накопителем энергии // Информатика и управление: сб. науч. тр. 1998. С. 107 – 113.

9. Алиев И. И. Динамические режимы асинхронного генератора с гарантированным самовозбуждением // *Электричество*. 2002. № 6. С. 37–40.
10. Гентковски З. Процессы и характеристики автономных асинхронных генераторов с полупроводниковыми регуляторами напряжения: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2000. 255 с.
11. Грачев П. Ю., Ежов Е. В. Асинхронный стартер-генератор для комбинированного энергетического привода гибридного автомобиля // *Электротехника*. 2004. № 12. С. 35–39.
12. Джендубаев А.-З. П. Определение границ области самовозбуждения асинхронного генератора с фазным ротором // *Электричество*. 1998. № 10. С. 44–48.
13. Торопцев Н. Д. Асинхронные генераторы автономных систем. М.: Знак, 1998. 288 с. ISBN 5-87789-025-5.
14. Розум Т. И., Полищук В. И. Разработка архитектуры интеллектуальной системы функциональной диагностики турбогенератора // *Вестник науки Сибири*. 2015. № 1s (15). С. 83–86.
15. Арутюнян В. С. Расчет токов в цепи дополнительной обмотки синхронной машины // *Электричество*. 1982. № 12. С. 37–40.
16. Важнов А. И. Основы теории переходных процессов синхронной машины. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. 312 с.
17. Полищук В. И. Развитие теории построения систем диагностики синхронных машин: дис. ... д-ра техн. наук. Самара, 2016. 292 с.
18. Угаров Г. Г., Нейман В. Ю. Анализ показателей электромагнитных ударных машин // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 1996. № 2. С. 72–80.
19. Мошкин В. И. Сравнение магнитных циклов импульсного линейного электромагнитного двигателя с учетом мощности потерь в его обмотке // *Известия Томского политехнического университета*. 2012. Т. 321, № 4. С. 93–96.
20. Мошкин В. И., Егоров А. А., Угаров Г. Г. Об оптимальных условиях энергопреобразования в электромагнитных приводах // *Вестник Курганского государственного университета*. Сер. Технические науки. 2005. № 2. С. 239–240.
21. Ряшенцев Н. П., Львицын А. В., Угаров Г. Г. К выбору типа магнитной системы пресса с линейным электромагнитным приводом // *Вопросы теории и проектирования электрических машин*. 1978. С. 63–67.
22. Никитенко А. Г. Автоматизированное проектирование электрических аппаратов. М.: Высшая школа, 1983. 192 с.
23. Симонов Б. Ф., Нейман В. Ю., Шабанов А. С. Импульсный линейный электромагнитный привод для скважинного виброисточника // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017. № 1. С. 118–126.
24. Смелягин А. И. Синтез и исследование машин и механизмов с электромагнитным приводом. Новосибирск: Изд-во НГУ, 1991. 247 с. ISBN 5-7615-0028-0.
25. Нейман А. А., Шабанов С. А., Нейман В. Ю. Решение задачи учета нелинейных свойств динамической модели электромагнитного привода // *Теория и практика современной науки: сб. тр. конф.* 2015. С. 58–63. ISBN 978-5-00086-888-1.
26. Саттаров Р. Р., Исмагилов Ф. Р. Исследование виброударного режима в электромеханических реактивных преобразователях // *Известия высших учебных заведений. Электротехника*. 2010. № 2. С. 23–27.
27. Исмагилов Ф. Р., Герасин А. А., Хайруллин И. Х., Вавилов В. Е. Электромеханические системы с высококоэффициентными постоянными магнитами. М.: Машиностроение, 2014. 267 с.
28. Баль В. Б., Геча В. Я., Гончаров В. И. [и др.]. Линейные электрические машины возвратно-поступательного действия — типы и конструкции электрических машин // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*. 2015. Т. 148, № 5. С. 3–13.
29. Кашин Я. М., Кашин А. Я., Князев А. С. [и др.]. Методика расчета синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов для ветро-солнечных генераторных установок // *Вестник Адыгейского государственного университета*. Сер. 4. Естественно-математические и технические науки. 2017. № 1 (196). С. 95–106.
30. Кашин Я. М., Кашин А. Я., Князев А. С. Эквивалентные электрические машины. Исследование эквивалентных радиальных и аксиальных синхронных генераторов с постоянными магнитами // *Вести высших учебных заведений Черноморья*. 2016. № 1 (43). С. 3–12.
31. Ковалев Ю. З., Татевосян А. С., Мягков А. Д. Оптимизация параметров электромагнитных двигателей по максимуму КПД // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 1987. № 7. С. 25–31.
32. Любчик М. А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. М.: Энергия, 1974. 392 с.
33. Татевосян А. А. Расчет параметров оптимальных конструкций магнитных систем магнитоэлектрического привода по испытанию вязкоупругих свойств эластомеров // *Омский научный вестник*. 2004. № 2 (27). С. 108–113.
34. Татевосян А. А. Решение задачи оптимального управления магнитоэлектрического привода колебательного движения // *Омский научный вестник*. 2019. № 4 (166). С. 48–51.

ТАТЕВОСЯН Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрическая техника», декан энергетического института.

SPIN-код: 6456-8370

AuthorID (РИНЦ): 163175

AuthorID (SCOPUS): 56503745000

ResearcherID: M-3175-2015

Адрес для переписки: karo1@mail.ru

БУБНОВ Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрическая техника».

SPIN-код: 5358-0661

ORCID: 0000-0002-0604-3795

AuthorID (SCOPUS): 7004195241

ResearcherID: A-6669-2015

Для цитирования

Татевосян А. А., Бубнов А. В. Формирование общего подхода к оптимальному проектированию высокотехнологических энергоэффективных электротехнических комплексов на основе тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин // *Омский научный вестник*. 2019. № 6 (168). С. 46–51. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-168-46-51.

Статья поступила в редакцию 22.10.2019 г.

© А. А. Татевосян, А. В. Бубнов