

Саяпина П. О., Крупский Р. Ф.
P. O. Sayapina, R. F. Krupsky

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

ELECTROMECHANICAL MEASURING SYSTEM

Саяпина Полина Олеговна – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: em@knastu.ru.

Polina O. Sayapina – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: em@knastu.ru.

Крупский Роман Фаддеевич – кандидат технических наук, главный научный сотрудник – руководитель научно-производственного инжинирингового центра Филиала ПАО «ОАК» – КнААЗ им. Ю. А. Гагарина (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681018, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Советская 1. E-mail: roman_krupskiy@rambler.ru.

Roman F. Krupsky – PhD in Engineering, Chief Researcher – Head of the Scientific and Production Engineering Center of the Branch of PJSC «UAC» – KnAAZ named after Yu. A. Gagarin (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681018, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, st. Sovetskaya 1. E-mail: roman_krupskiy@rambler.ru.

Аннотация. Показаны значимость разработки и внедрения в производство электрических машин специального назначения, актуальность измерительной системы на базе электромеханического комплекса. Приведена методика функционального применения электромеханической системы посредством асинхронного двигателя. Описан порядок выбора выходных параметров асинхронного двигателя и показаны этапы научно-исследовательской работы. Приводится описание структурной схемы и назначение основных блоков и модулей.

Summary. The significance of development and introduction of special-purpose electric machines into production, the relevance of the measuring system on the basis of electromechanical complex are shown. The methodology of functional application of electromechanical system by means of asynchronous motor is given. The order of selection of output parameters of asynchronous motor is described and the stages of research work are shown. The description of the structural scheme and the purpose of the basic blocks and modules are given.

Ключевые слова: проектирование, электромеханическая система, система взвешивания.

Key words: design, electromechanical system, weighing system.

УДК 621.313:621.317.39

Введение. В настоящее время человек не может обойтись в своей жизни без электромеханических преобразователей (ЭМП). Быт и производство зависят от разнообразных ЭМП: синхронных и асинхронных двигателей, генераторов, машин переменного и постоянного тока и т. д.

Для каждого типа машин в современном мире можно найти полезное применение. Рассмотрим некоторые типы ЭМП:

1. Машины постоянного тока – аппараты, которые преобразовывают механическую энергию в электрическую, а также осуществляют обратные преобразования. Машины постоянного тока подразделяются на генераторы постоянного тока и двигатели постоянного тока. Генератор постоянного тока представляет собой электрическую машину, в которой происходит процесс преобразования механической энергии в электрическую энергию постоянного тока. Двигатель постоянного тока – электрическая машина, в которой происходит процесс преобразования электрической энергии постоянного тока в механическую. Машины постоянного тока (см. рис. 1), как и все электрические машины, обратимы, т. е. они без существенных конструктивных изменений могут рабо-

тать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Имеют широкий спектр применения, наиболее часто такие устройства применяются для приводов: подъемников, устройств автоматики, прокатных станков.

Подобные электродвигатели характеризуются хорошими регулировочными свойствами, а также показателями перегрузочной способности.

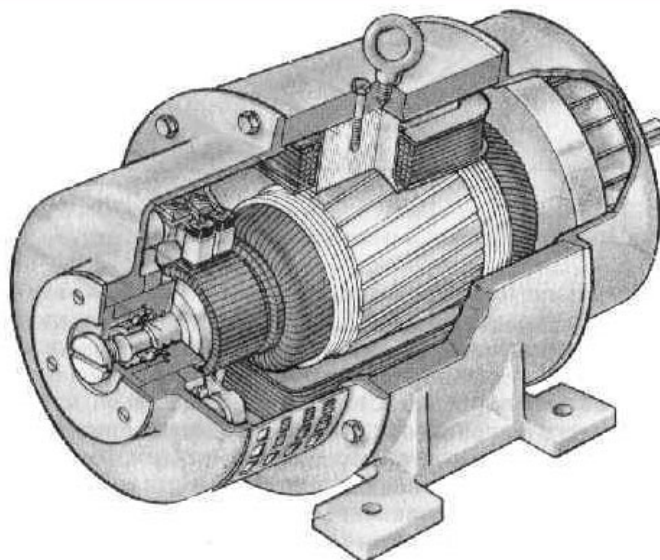


Рис. 1. Машина постоянного тока

2. Машина переменного тока – электрическая машина, применяемая для получения переменного тока (генератор) или для преобразования электрической энергии в механическую (двигатель) либо в электрическую энергию другого напряжения или частоты. Разделяют на синхронные и асинхронные.

Асинхронный двигатель – ЭМП, электрический двигатель переменного тока, частота вращения ротора которого не равна (в двигательном режиме меньше) частоте вращения магнитного поля, создаваемого током обмотки статора (см. рис. 2).

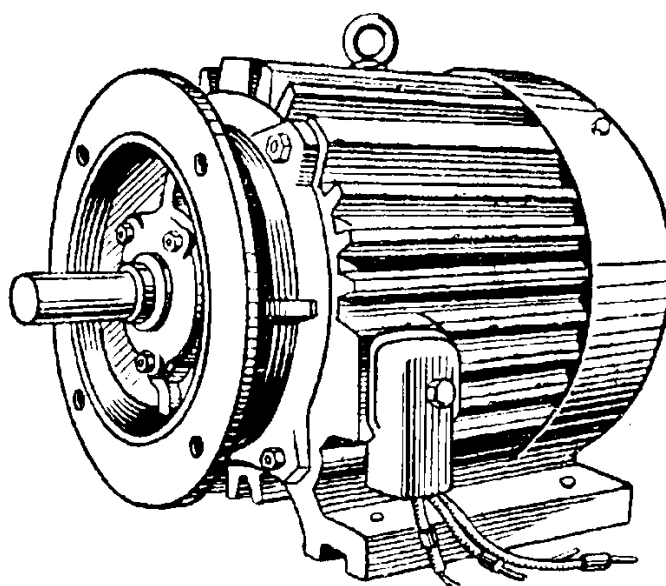


Рис. 2. Асинхронный двигатель

Синхронный двигатель – ЭМП с равной частотой вращения вала и крутящегося магнитного поля неподвижного узла (см. рис. 3). За счёт относительно сложной конструкции такие двигатели не так распространены, как асинхронные двигатели, однако в некоторых случаях являются практически незаменимыми.

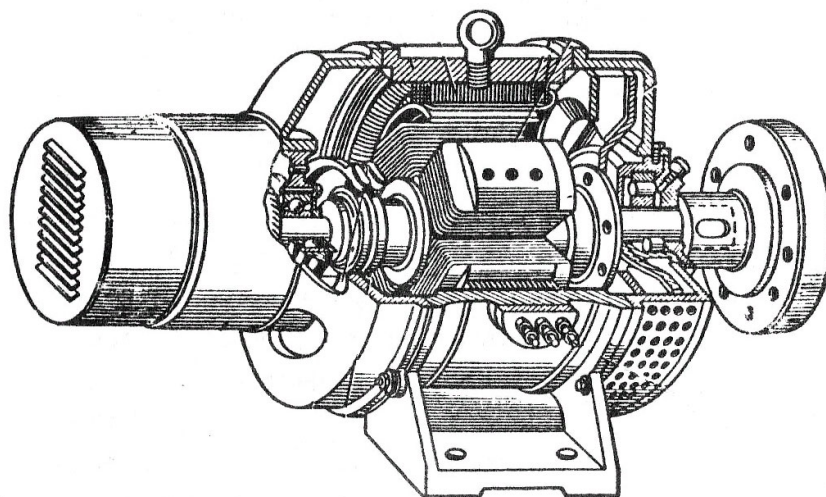


Рис. 3. Синхронный двигатель

Объектом исследования, обеспечивающим решение метрологической задачи определения весовых и/или триботехнических характеристик, является электромеханическая система на базе автоматически тарированного асинхронного электродвигателя. Целесообразность такого технического решения подтверждается исследованиями, выполненными как в нашей стране, так и за рубежом.

Целью данного исследования является разработка и моделирование электромеханической измерительной системы [1] с использованием асинхронного двигателя с приводом линейного перемещения. Были также многочисленные попытки электрифицировать известные механические соединения винт-гайка или червяк – червячное колесо. Одной из относительно недавних таких попыток является конструкция, где муфта сцепляется с винтом лишь при подаче напряжения к подводам катушки при движении вдоль направляющей, муфта может сжимать пружину, возвращающую муфту назад при снятии напряжения с подводом.

Принцип работы измерительной системы поясняет рис. 4, на котором приведены следующие обозначения: ИП – источник питания; ЧП – частотный преобразователь; Д – асинхронный двигатель с линейным перемещением исполнительного элемента; ДД – датчик движения; ДТ – датчик тока; ВЧ – программируемое вычислительное устройство (вычислитель); БВИ – блок вывода информации величин m и коэффициента трения μ объекта измерений; ПП – измерительная платформа (передвижная платформа).

Электродвигатель с линейным перемещением исполнительного элемента состоит из магнитопровода с сетевой обмоткой, подключаемой к сети через частотный преобразователь ЧП и блок управления БУ, вращающейся короткозамкнутой вторичной обмотки, на внутренней поверхности которой нанесена резьба, а на наружной поверхности – резьба с образованием между вращающейся вторичной обмоткой и тягой резьбового соединения, обеспе-

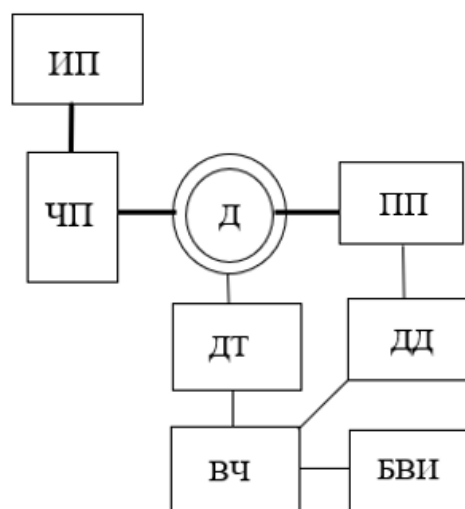


Рис. 4. Структурная схема информационно-измерительной электромеханической системы

чивающего при вращении вторичной обмотки перемещение тяги в осевом направлении, при этом один из концов тяги механически присоединён к измерительной весовой платформе.

На данный момент известны успешные варианты приводов с передачей винт-гайка и с червячной передачей, к примеру, приводы специализированных 3D-принтеров и станков с числовым программным управлением (ЧПУ). В основном в таких приводных системах используют трапецеидальную нарезку винта. Такая форма нарезки винта имеет ряд преимуществ.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что данный вид соединительной передачи подходит для разрабатываемой электромеханической измерительной системы.

В рассматриваемой системе определяющими являются силы, действующие на перемещаемый объект. Тем не менее из основных положений электромеханики следует, что силы, возникающие вследствие взаимодействия переменного магнитного поля статора с током вторичной короткозамкнутой обмотки, при детерминированных размерных соотношениях электромеханического преобразователя определяются его электромагнитными параметрами.

В некоторой степени уязвимым участком данной системы при продолжительной эксплуатации является передача винт-гайка вследствие повышенных механических нагрузок. В исследовании рассматривается замена классического смазочного материала передачи винт-гайка на твёрдосмазочное покрытие (ТСП).

Описание методики. Для определения мощности двигателя и размеров компонентов системы необходимо знать максимальную рабочую нагрузку и рассмотреть возможность использования твёрдых смазочных материалов в узле привода винт-гайка. Для получения данных о свойствах винтовой гайки трибосопряжённого типа с покрытием из твёрдой смазки была использована система моделирования смазочных материалов.

Когда поверхность винта с покрытием из твердой смазки взаимодействует с шероховатой поверхностью витка гайки, объёмное напряжение витка значительно ниже контактного напряжения (см. рис. 5).

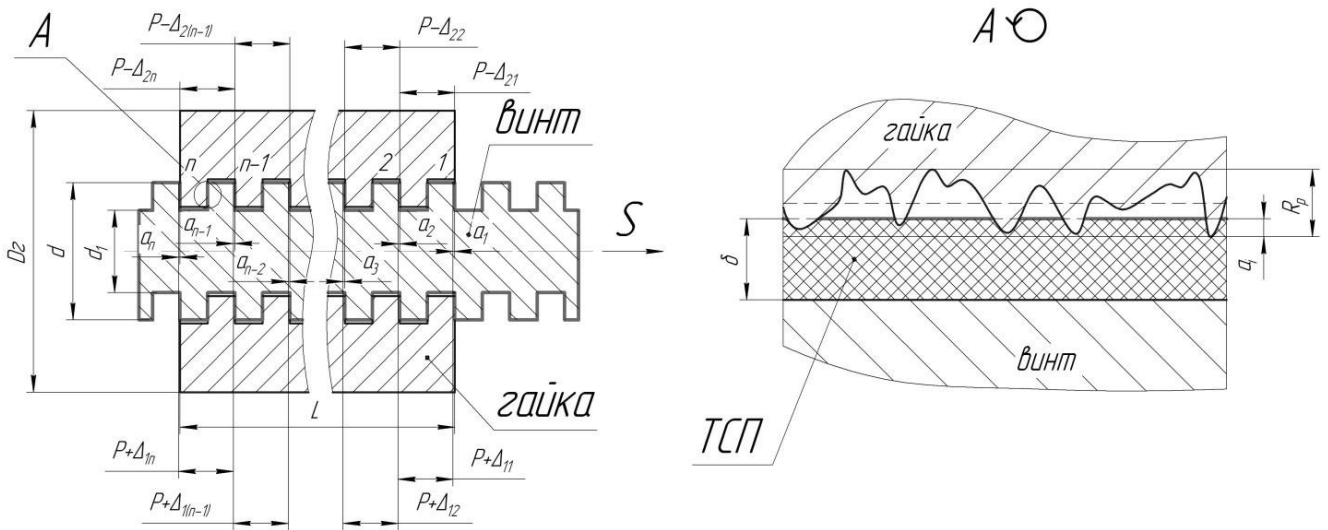


Рис. 5. Схема резьбового сопряжения с ТСП

Следовательно, в уравнении совместного перемещения [26] деформация катушки заменяется соответствующей контактной деформацией шероховатой поверхности относительно поверхности, на которую наносится ТСП. Таким образом, для представленной задачи условия уравнения и равновесия совместного взаимодействия могут быть выражены следующим образом:

$$F = F_1 + \dots + F_i + \dots + F_n,$$

$$a_1 - a_2 = \Delta_{11} + \Delta_{21},$$

$$a_i - a_{i+1} = \Delta_{1i} + \Delta_{2i},$$

$$a_{n-1} - a_n = \Delta_{1(n-1)} + \Delta_{2(n-1)},$$

где F – осевая нагрузка, воспринимаемая резьбовым сопряжением; F_i – осевая нагрузка, воспринимаемая i -м витком резьбового сопряжения; n – число витков гайки; a_i – контактная деформация шероховатой поверхностью i -го витка гайки ТСП, нанесённого на поверхность винта; $\Delta_{1i} = P \sum_{i+1}^n F_i / E_B A_B$ – удлинение тела винта между i -м и $(i+1)$ -м витками; $\Delta_{2i} = P \sum_{i+1}^n F_i / E_G A_G$ – укорочение тела гайки между i -м и $(i+1)$ -м витками; P – шаг резьбы; E_B, E_G – соответственно модули упругости материалов винта и гайки; A_B, A_G – соответственно минимальные площади поперечного сечения винта и гайки.

Для решения системы уравнений требуется знание контактных деформаций a_i , которые возникают при внедрении шероховатости в поверхность с ТСП. При нагрузках, температуре окружающей среды, размерах, физико-механических свойствах и качестве шероховатой поверхности вид деформаций, определяемый параметрами её микрогеометрии, может быть упругим или пластическим.

Из-за неровного распределения нагрузок по виткам может быть одновременно несколько различных видов деформаций в одном резьбовом сопряжении. Для упрощения анализа будем рассматривать только упругие ТСП, полагая, что в резьбовом сопряжении имеют место деформации лишь одного вида.

Таким образом, задача состоит в решении для случая упругого деформирования ТСП в резьбовом сопряжении. При расчётах использовались геометрические размеры, материалы и номинальная нагрузка реальной винтовой передачи, приведённой в каталоге, с ТСП на основе ПТФЭ.

Чтобы исследовать влияние чистовой обработки поверхности на распределение нагрузки при вращении соединения с использованием ТСП, были рассмотрены два встречающихся на практике случая обработки поверхности резьбы торцевой гайки: полуфинишная и тонкое точение.

Параметры R_a , полученные в процессе изготовления резьбы, также будут применены для расчётов. Тем не менее информация о других параметрах структуры поверхности, необходимых для расчётов, отсутствует.

Для исследования влияния механических свойств покрытия на распределение нагрузки на виток резьбового соединения были численно проанализированы параметры серебряного покрытия, которое обладает самыми значительными механическими свойствами среди мягких металлов, используемых в качестве ТСП. В данной работе использовались механические свойства отечественного ТСП на основе ПТФЭ марки ФБФ-74Д. Необходимо подчеркнуть, что ТСП с содержанием ПТФЭ является самым мягким среди применяемых в технике.

Таблица 1

Механические свойства ТСП

| Механические свойства | Материал ТСП | |
|-----------------------|--------------|---------|
| | ФБФ-74Д | Серебро |
| $E_{\text{п}}$, ГПа | 0,7 | 80 |
| $\mu_{\text{п}}$ | 0,43 | 0,4 |
| HV , МПа | 23 | 900 |

Так, результаты расчётов будут охватывать весь диапазон встречающихся в инженерной практике значений параметров геометрии гайки и механических свойств ТСП.

Для того чтобы определить взаимосвязь распределения нагрузки от многих факторов при упругой деформации ТСП с винтовым интерфейсом, необходимо решить уравнения. Однако поскольку аналитически решить эту задачу не представляется возможным, для проведения расчётов было использовано специальное программное обеспечение. На ранних этапах исследования рас-

сматривалась возможность упрощения системы уравнений, т. к. при больших значениях n (более мелкие шаги, большие длины выводов) практическая реализация решения усложняется с увеличением числа витков.

При помощи расчётных формул можно предсказать, как будет распределена нагрузка на каждый виток винтовой пары с трением при изменении физических свойств покрытия, шероховатости гайки, шага резьбы, нагрузки и толщины покрытия при упругом деформировании, что в дальнейшем скажется на качестве измерений.

Заключение. Измерительная система на базе асинхронного электродвигателя с линейным перемещением исполнительного элемента для определения весовых и/или триботехнических характеристик объектов позволяет вычислить массу и/или коэффициент трения объекта измерения относительно опорной поверхности. Предложенный подход повышает метрологические характеристики измерительной системы, расширяет функциональные характеристики электромеханических преобразователей и повышает надёжность. Использование ТСП значительно снижает внутренние механические нагрузки на передаче винт-гайка, что впоследствии влияет на точность измерений и продолжительность использования данной измерительной электромеханической системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Информационно-измерительная электромеханическая система / П. О. Саяпина [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № I (65). – С. 94-101.
2. Ким, К. К. Электрические измерения неэлектрических величин / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. – 134 с.
3. Ким, К. К. Электрические измерения неэлектрических величин / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, А. А. Ткачук. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 137 с.
4. Особенности проектирования электромеханических преобразователей для систем комплексной безопасности / О. С. Амосов [и др.] // Известия вузов. Электромеханика. – 2017. – Т. 60. – № 5. – С. 5-11.
5. Имитационная модель трёхточечного узла процесса формования листового материала электромеханического типа / В. А. Соловьев [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № II. – С. 86-90.
6. Соловьев, В. А. К вопросу разработки математической модели объекта взаимосвязанной системы объектного формирования / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, Чжо Аунг Хтет // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № II-1 (30). – С. 54-57.
7. Гринченков, В. П. Электромагнитные приводы с возвратно-поступательным и возвратно-вращательным принципом действия для клапанов / В. П. Гринченков, И. А. Павленко // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – Т. 4. – № 2. – С. 51-57.
8. Совмещённые электрические машины для автоматики / Ю. М. Келим [и др.]; под общ. ред. Д. В. Свечарника. – М.: Энергия, 1969. – 200 с.
9. Kulinchenko, G. V. Research of dynamic parameters of the electric drive on the basis of rolling rotor motor / G. V. Kulinchenko, A. M. Maslennikov, V. A. Baguta // Electrical Engineering & Electromechanics. – 2016. – № 6. – P. 9-14. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2016.6.02>.
10. Kulinchenko, G. V. Assessment of efficiency of electric drive of stop valves / G. V. Kulinchenko [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – P. 36-44. doi: 10.15587/1729-4061.2019.174203.
11. Garganeev, A. G. Design Principles of Pipeline Valve Mechatronic Systems / A. G. Garganeev, V. V. Mashinsky // XIII International Conference And Seminar On Micro/Nanotechnologies And Electron Devices EDM. – 2012. – P. 330-332.
12. Udovichenko, A. V. Electric motors for variable-speed drive of lock valves / A. V. Udovichenko [et al.] // Electronics. – 2021. – Vol. 10, iss. 21, URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/21/2727> (access date: 30.11.2022).
13. Laitwaite, E. R. Linear motors with transverse flux / E. R. Laitwaite // Proc. IEEE. Vol. 118. № 12. – 1971. – P. 1761-1767.
14. Bahke, E. Transport system Heute und Morgen Mainz / E. Bahke // Krausskopf Verlag. – 1973. – 215 p.
15. Rummich, E. Synchrone Linear maschinen / E. Rummich // Bull. SEV. – № 23. – 1972. – P. 1338-1344.
16. Автоматизированный электромеханический привод вагонных дверей / К. К. Ким [и др.] // Электротехника. – 2019. – № 10. – С. 11-16.

17. Колесник, М. Б. Получение аппроксимирующих зависимостей для учёта влияния параметров нагрузки на энергетические показатели асинхронного двигателя / М. Б. Колесник // Учёные записки Комсомольско-го-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № III-1 (59). – С. 43-47.
18. Ким, К. К. Моделирование устойчивости электромеханического преобразователя при осевых нагрузках / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. Б. Колесник // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65. – № 2. – С. 45-50.
19. Ким, К. К. Повышение эффективности электропривода магистральных задвижек / К. К. Ким, С. Н. Иванов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2020. – № 3. – С. 71-77.
20. Ким, К. К. Моделирование комбинированного электропривода / К. К. Ким, С. Н. Иванов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62. – № 3 (197). – С. 44-51.
21. Патент № 2736387 Российская Федерация, МПК F16K 31/04(2006.01), F16K 37/00(2006.01). Электромеханическая система запорной арматуры: № 2020111602: заявлено 19.03.2020: опубликовано 16.11.2020 / Ким К. К., Иванов С. Н., Горбунов А. В.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». – 9 с.
22. Москвитин, А. И. Электрические машины возвратно-поступательного движения. Электрические молотки, вибраторы, быстроходный электромагнитный привод / А. И. Москвитин. – М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1950. – 144 с.
23. Брук, И. С. Теория асинхронного двигателя с массивным ротором / И. С. Брук // Вестник экспериментальной и теоретической электротехники. – 1929. – № 5. – С. 175-193.
24. Вевюрко, И. А. О расчёте асинхронной машины с полым ротором методом симметричных составляющих / И. А. Вевюрко // Вестник электропромышленности. – 1958. – № 5. – С. 28-32.
25. Уайт, Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. – М.: Энергия, 1964. – 528 с.
26. Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учеб. / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб.: Питер, 2007. – 320 с.
27. Ким, К. К. Средства электрических измерений и их поверка / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, А. И. Чураков. – СПб.: Лань, 2021. – 316 с.