

Научная статья

УДК 621.825:621.313.392

DOI: 10.24412/2658-4255-2024-1-14-25



EDN: QSQPPC

Для цитирования:

Ким К.К., Иванов С.Н.,
Азимов Х.Х. Алгоритмические
основы исследования
электромагнитных
процессов в электроприводе
герметичной задвижки //
Российская Арктика. 2024.
Т. 6. № 1. С. 14-25.
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-1-14-25>

Получена: 21.12.2023

Принята: 01.02.2024




Опубликована: 29.03.2024

For citation:

Kim K.K., Ivanov S.N.,
Azimov Kh.Kh.. Algorithmic
foundations for the study of
electromagnetic processes in
the electric drive of a sealed
valve. Russian Arctic, 2024,
vol. 6, no. 1, pp. 14-25.
(In Russian).
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-1-14-25>

Финансирование.

Исследование выполнено
за счет гранта Российского
научного фонда № 24-29-00089
<https://rscf.ru/project/24-29-00089/>

**АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ
В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ГЕРМЕТИЧНОЙ ЗАДВИЖКИ**К.К. Ким^{1*} , С.Н. Иванов² , Х.Х. Азимов² 

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

² Комсомольский-на-Амуре государственный университет,
г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

E-mail: [*kimkk@inbox.ru](mailto:kimkk@inbox.ru)**Аннотация**

Рассмотрен алгоритм исследования электромагнитных процессов в приводе герметичной задвижки, эксплуатируемой в условиях низких температур. Показана возможность установки между статором и ротором приводного электродвигателя дополнительного элемента, выполняющего функции герметизации и нагрева. Построена геометрическая модель привязки дополнительного элемента к базовой детали – статору двигателя. Приведено распределение плотности тока в герметизирующем элементе. Предложена методика учета влияния параметров герметизирующего элемента на процесс электромеханического преобразования энергии при перемещении шибера задвижки. Синтезирована математическая модель привода с использованием системы пространственных векторов статора, ротора и герметизирующего элемента. Модель содержит уравнение движения, позволяющее учесть моменты инерции и нагрузки, включающие приведенную массу шибера и потери трения в задвижке. Приведены механические характеристики привода с различными параметрами герметичного элемента. Показано, что основное влияние на электромагнитный момент оказывает активное сопротивление герметизирующего элемента. Увеличение относительного сопротивления элемента приводит к возрастанию момента. Индуктивное сопротивление дополнительного элемента существенного влияния на эффективность работы привода не оказывает. При большом активном сопротивлении энергетические характеристики привода задвижки приближаются к характеристикам привода, у которого герметизирующий элемент между статором и ротором отсутствует.

Ключевые слова: электропривод, задвижка, герметизирующий элемент, электромагнитные процессы, моделирование

**ALGORITHMIC FOUNDATIONS FOR THE STUDY
OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THE
ELECTRIC DRIVE OF A SEALED VALVE**К.К. Kim^{1*} , S.N. Ivanov² , Kh.Kh. Azimov² 

¹ Federal State Budget Educational Institution for Higher Education "Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University", St. Petersburg, Russia

² Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

E-mail: [*kimkk@inbox.ru](mailto:kimkk@inbox.ru)**Abstract**

An algorithm for studying electromagnetic processes in the drive of a sealed valve operated at low temperatures is considered. The possibility of installing an additional element between the stator and rotor of the drive electric motor that performs the functions of sealing and heating is shown.

A geometric model has been constructed for linking an additional element to the base part - the motor stator. The current density distribution in the sealing element is shown. A method for taking into account the influence of the parameters of the sealing element on the process of electromechanical energy conversion when moving the valve gate is proposed. A mathematical model of the drive has been synthesized using a system of spatial vectors of the stator, rotor and sealing element. The model contains an equation of motion that allows one to take into account moments of inertia and loads, including the reduced mass of the gate and friction losses in the valve. The mechanical characteristics of the drive with various parameters of the sealed element are given. It is shown that the main influence on the electromagnetic torque is exerted by the active resistance of the sealing element. An increase in the relative resistance of the element leads to an increase in torque. The inductive reactance of the additional element does not have a significant effect on the efficiency of the drive. With a high active resistance, the energy characteristics of the valve drive approach those of a drive that does not have a sealing element between the stator and the rotor.

Keywords: electric drive, valve, sealing element, electromagnetic processes, modeling

Введение

Развитие отечественной энергетической инфраструктуры предполагает освоение ряда перспективных территорий, перечисленных в Указе № 296 «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации» и дополнении к нему. Отличительной особенностью этих зон является не только сложный климатический режим, подробный анализ которого приведен в материалах государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации», но также удаленность и труднодоступность технологических объектов добычи в первую очередь нефтегазового сырья, требующих развитой системы магистральных трубопроводов. Протяженность отечественных трубопроводных систем, по которым перекачивается не менее 90% всех добываемых нефтегазовых ресурсов, составляет более 250 тыс. км, из которых порядка 70 тыс. км без учета введенных в эксплуатацию в 2023 году используется для транспорта нефти и нефтепродуктов [1]. Эксплуатируемые трубопроводные магистрали состоят из технологических модулей, включающих запорные элементы, расстояние между которыми достигает 30 км. Возникновение аварийных ситуаций на удаленных участках трубопроводов приводит к выбросам перекачиваемого сырья, что представляет большую опасность для окружающей среды, а в некоторых случаях приводит к необратимым последствиям [2]. По причине удаленности поиск места аварии и доставка до него оперативно-технического персонала может занимать неопределенное время, это также относится и к участкам трубопроводов, проходящих под водой. Отдельным фактором, подтверждающим актуальность рассматриваемой проблемы, являются произошедшие 26 сентября 2022 года массовые утечки газа вследствие разрушения части международных подводных газопроводов.

Очевидно, что создание автоматических приводных устройств, обеспечивающих в случае утечки оперативную локализацию места повреждения, является актуальной задачей. Своевременное устранение на основе постоянного мониторинга процессов повреждений, обусловленных техническими и антропогенными факторами, снижает прямой экономический ущерб, составляющий порядка 1,5 млрд. руб. в год, но, что в условиях Арктической зоны особенно важно, ограничивает воздействие продуктов транспортирования на окружающую среду. В настоящее время электропривода находят практическое применение в различном технологическом оборудовании, начиная с миниатюрных механизмов, например, привод клапана блока терморегулирования системы жизнеобеспечения человека в условиях сверхнизких температур, заканчивая силовыми установками для перемещения крупногабаритных объектов. При этом почти в 50% из эксплуатируемых электротехнических комплексов используются привода с линейным перемещением исполнительного механизма [3].

Проведенный авторами анализ показал, что в условиях Арктической зоны существующие привода не полностью удовлетворяют требованиям надежности, в частности вследствие конструкционной сложности. Повышение надежности приводных механизмов линейного перемещения при обеспечении требуемых усилий и переме-

щений может рассматриваться как одно из приоритетных направлений увеличения эффективности объектов энергетического комплекса. Актуальность исследования также подтверждается информацией о существующих системах электропривода возвратно-поступательного движения на базе электромеханических преобразователей, показывающей заинтересованность производителей и потребителей энергетического оборудования в его дальнейшей модернизации и совершенствовании с целью улучшения технико-экономических характеристик [4-12].

Задача разработки электроприводов, адаптированных к условиям низких температур и характеризующихся высокой надежностью, может быть решена с использованием результатов, полученных авторами при создании теплогенерирующих перекачивающих устройств на основе электромеханических преобразователей. В данной статье приведен алгоритм проектирования и исследования электромагнитных процессов в приводном устройстве герметичной задвижки, а также примеры его реализации.

Материалы и методы

Состояния проблемы создания высоконадежных электроприводов показывает, что научные исследования в данной области ведутся во всех промышленно развитых странах [13-19].

Российскими учеными опубликовано достаточно много результатов, полученных при анализе эксплуатационных режимов электромеханических приводов для задвижек в нефтегазовой промышленности. Наиболее значимыми работами в данной области являются публикации А.Г. Гарганеева, А.С. Каракулова, А.И. Удовиченко, О.В. Потетенко, Н.Г. Шевченко, Е.С. Коваль, А.О. Смирнова, Н.И. Куракина, Р.А. Мышко, Г.В. Кулинченко и ряд других.

В статье [5] приводится экспериментальная оценка эффективности привода запорной арматуры на основе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с редуктором и безредукторного синхронного двигателя с вращающимся ротором. Авторами разработаны две модели привода на основе приведенных типов двигателей, протестированы методы оценки эффективности в реальном времени и получены данные для оценки энергоэффективности привода в процессе позиционирования. При использовании асинхронного двигателя в приводе запорных арматур наблюдается снижение его коэффициента полезного действия (КПД) с 60 % до 22 % (с учетом КПД редуктора). Применение синхронного двигателя связано со сложностью конструкции, трудностью пуска и регулирования скорости.

Сравнение типов редукторов (волнового, планетарного, червячно-колесного) по показателям «выходной крутящий момент/масса» применительно к мехатронным системам трубопроводной арматуры сделано в статье [6]. По мнению авторов, преимуществом редукторов червячно-колесного типа является естественная статическая самоблокировка. Таким же преимуществом обладает и винтовая пара. Авторы также отмечают, что невозможно однозначно сказать, какой тип привода выбрать в данном конкретном случае, они делают заключение, что по показателям веса, габаритов и цены невозможно спроектировать электропривод без редуктора, способный развивать крутящий момент аналогичный электроприводу с редуктором.

В работе [7] рассмотрены электродвигатели для бесступенчатого привода запорных арматур на базе различных электродвигателей, в том числе и с постоянными магнитами. Отмечено, что процесс пуска электродвигателя с большим пусковым моментом является сложной научной и практической проблемой. Такой режим возникает, например, в момент открытия заслонки трубопровода, когда на нее оказывается максимальная нагрузка. Оптимальным решением, по мнению авторов, является использование привода, содержащего асинхронный двигатель и редуктор, работающего с частотой вращения вала 10...120 об/мин.

Анализ имеющихся работ показывает, что создание приводов, непосредственно ориентированных на экстремальные температурные условия в большинстве публикаций не рассматривается.

Подробное описание конструкции привода герметичной задвижки, рассматриваемой в данной статье, приведено в работах [20, 21]. Информация о непосредственном приводе герметичной задвижки на базе асинхронного двигателя с интегрированным механизмом «винт-гайка» приведена в [21]. Авторами показано, что использование электромеханического преобразователя с линейным перемещением исполнительного элемента в качестве привода герметичной задвижки является перспективным вследствие существенного упрощения

конструкции, что обеспечивает высокую надежность и экологическую безопасность трубопроводной системы. Адаптация конструкции привода для низких температур обеспечивается электропроводящим герметизирующим элементом, выполняющим функции дополнительного теплового источника.

Оценка выполнимости привода герметичной задвижки с учетом влияния герметизирующего элемента, представляющим собой короткозамкнутую неподвижную обмотку, может быть сделана на основе алгоритмического и математического исследования и анализа эффективности преобразования электромагнитной энергии в механическую с учетом эксплуатационных условий. Теоретическую базу исследования наряду с традиционными методиками проектирования, разработками в областях электро-, термо- и гидродинамики, составляют методы автоматизированного проектирования, инженерного анализа и статистическое планирование эксперимента. Выбор в качестве силового элемента привода асинхронного двигателя с герметичным статором и короткозамкнутым ротором со встроенным элементом «винт-гайка» позволяет использовать математические модели, реализованные на основе теории обобщенного электромеханического преобразователя энергии.

На начальном этапе с использованием технологии построения виртуальных трехмерных моделей создается геометрическая форма объекта исследования, которая обеспечивает гибкую параметризацию и возможность учета определяющих факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики привода.

Реализация системного подхода включает поэтапное решение задачи исследования путем построения трехмерной параметрической модели привода герметичной задвижки, увязки форм и размеров сопрягаемых элементов, полного описания геометрической формы, вариативное проектирование исследуемого устройства. Для разработки и анализа параметрической модели, обеспечивающей реализацию алгоритма исследования электромагнитных процессов, использованы методы твердотельного проектирования. Для определения значимых проектных параметров в алгоритме может быть предусмотрен блок планирования вычислительного эксперимента с использованием статистической обработки и анализа данных на базе критериев оптимизации проектных параметров комплекса при переменном векторе внешних возмущений. Проведение вычислительного эксперимента для нахождения характеристик потоковых процессов реализуется численными методами инженерного анализа, что обусловлено нелинейностью математических моделей. Принятие решения о завершении задачи исследования осуществляется сравнением результатов вычислительного и натурального экспериментов. Физическая реализация исполнительной части привода, необходимая для проведения экспериментальной верификации данных имитационного моделирования, осуществляется быстрым прототипированием.

Структурно электропривод герметичной задвижки рассматривается как сложная иерархическая модель, состоящая из алгоритмически упорядоченных элементов, отдельно выполняющих целевые задачи, но при этом охваченных централизованными глобальными связями.

Стратегической основой исследования и реализации такой модели на системном уровне является алгоритм ее функционирования и определяющие критерии: количественная оценка эффективности выполнения приводом целевой функции – перемещение исполнительного элемента на заданное расстояние с требуемой скоростью в условиях реального нагружения.

Исследование электромагнитных процессов является частью общего алгоритма проектирования привода с учетом тепловых, механических и гидравлических составляющих в задвижке, который приведен на рис.1.

Концептуально проектирование рассматривается как синтез структурной схемы и обоснование выбора ее элементов на основе глобального алгоритма, реализующего выполнение целевых функций, отражающих мультифизический технологический процесс. Для его реализации необходима информация о функциональных возможностях и принципах работы объекта исследования. Под «мультифизичностью» понимается одновременность протекания и взаимовлияния электромагнитных, механических, тепловых и гидравлических процессов.

Результаты

Параметрическая модель асинхронного двигателя с привязкой герметизирующего элемента к внутренней расточке корпуса статора, являющегося базовой деталью, выполненная в системе проектирования T-Flex CAD, приведена на рис.2.

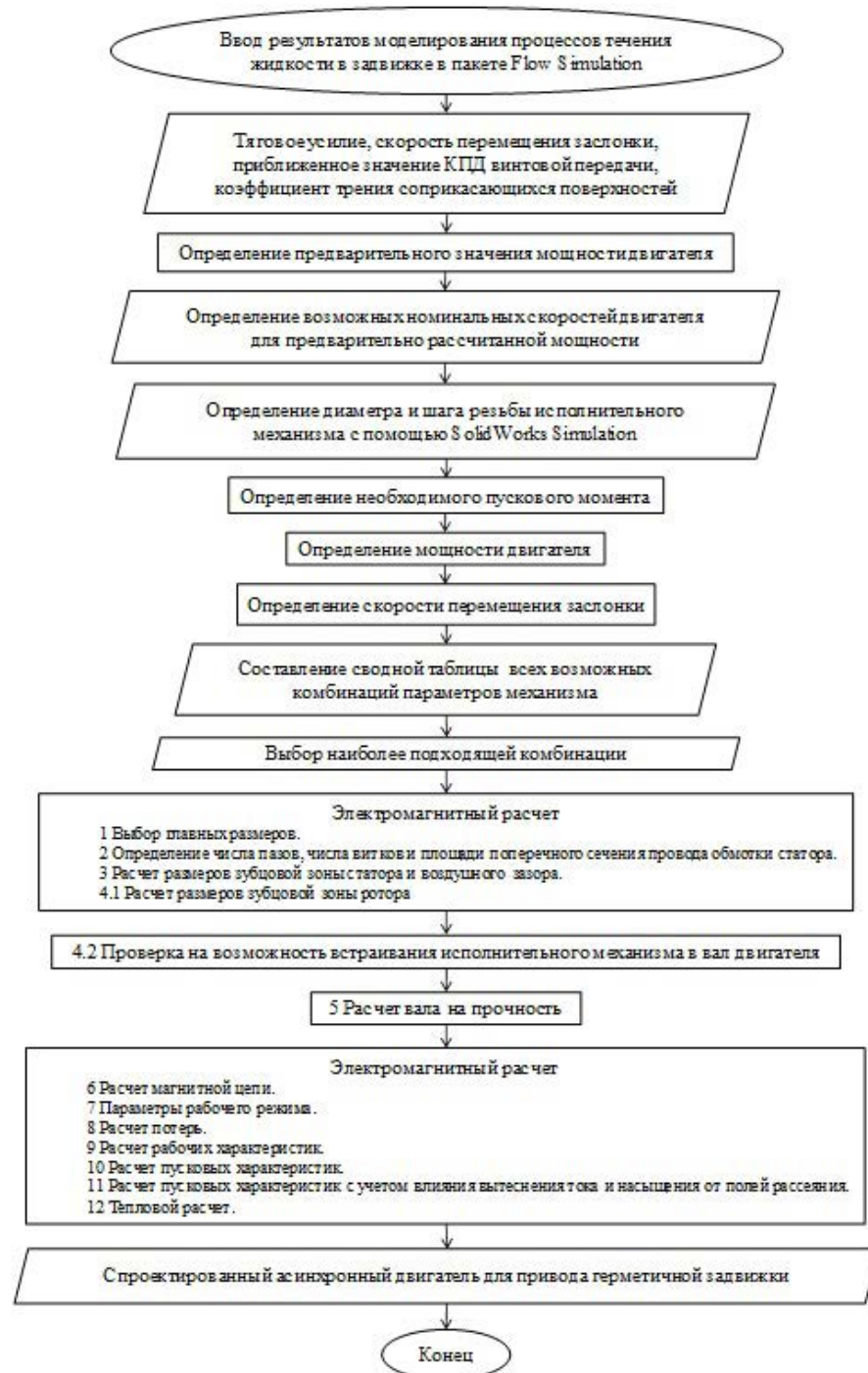


Рисунок 1. Общий алгоритм проектирования привода задвижки

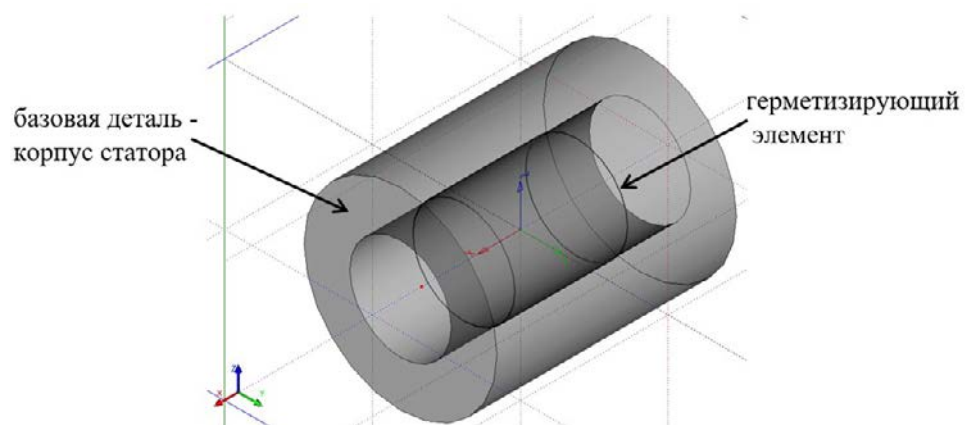


Рисунок 2. Позиционирование герметизирующего элемента в корпусе статора

При исследовании электромагнитных процессов в построенной геометрической модели с целью оценки влияния герметизирующего элемента на характеристики привода, требуется учесть следующее:

- наличие элемента из немагнитного материала увеличивает зазор между статором и ротором;
- способ непосредственного охлаждения ротора не связан со статором.
- для уменьшения потерь на трение ротора с жидкостью и потерь в герметизирующем элементе целесообразно обеспечить соотношение длины активной части l_t к полюсному делению τ не меньше 2;
- короткозамкнутый ротор выполнен с полым валом;
- пазовые клинья исключают деформации герметизирующего элемента от внутреннего давления в нем.

Герметизирующий элемент рассматривается в виде тороидальной короткозамкнутой обмотки, соответственно схема замещения электромеханического преобразователя для одной фазы включает параметры трех обмоток: статора, ротора и герметизирующего элемента. Очевидно, что последний будет препятствовать прохождению магнитного поля в ротор вследствие индуцированных вихревых токов, значения которых обусловлены физическими характеристиками элемента [22-25]. Результаты моделирования, полученные в программе ANSYS и приведенные на рис.3, показывают, что точная оценка эффекта влияния герметизирующего элемента невозможна вследствие неравномерного распределения в нем плотности вихревых токов (рис. 3: l_t – длина элемента; l_b – длина вылета, определяемая длиной лобовых частей обмотки; материал – бронза).

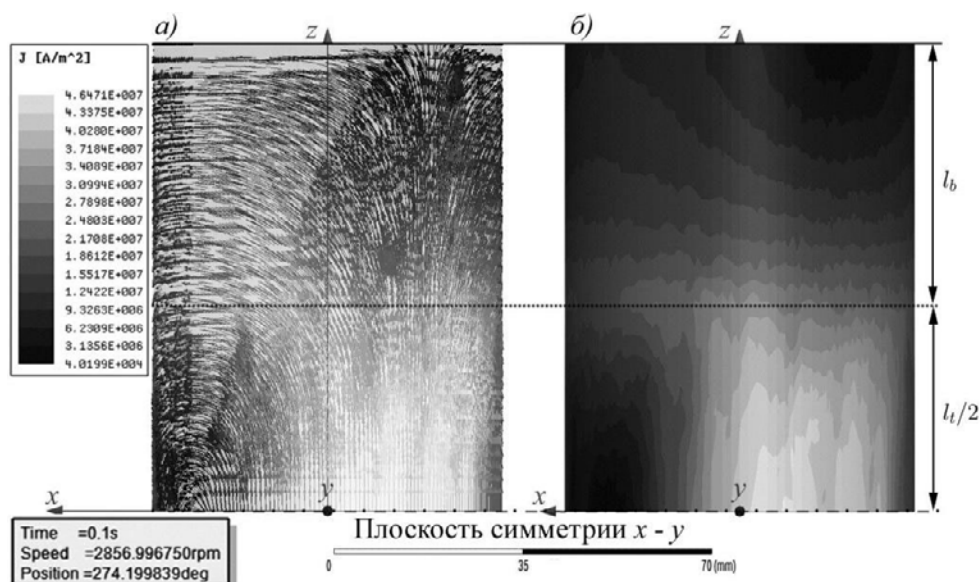


Рис. 3. Распределение плотности тока в герметизирующем элементе: а) вектор плотности тока; б) модуль плотности тока

Для математической формализации привода герметичной задвижки использовано описание в виде системы пространственных векторов [26].

В математической модели с синхронно вращающейся системой координат, реализованной с векторным представлением переменных, входные величины описываются сигналами постоянного тока, которые изменяются только в переходных режимах. Пространственный вектор \bar{U}_1 вращается с частотой ω_0 и является управляющим. Модель включает матрицы-столбцы фазных напряжений, связанных токов и потокосцеплений, в симметричном режиме токов нулевой последовательности нет, учитывается одна фаза двигателя.

Уравнения связи потокосцеплений и токов:

$$\langle \psi_1 \rangle = |L_1| \langle i_1 \rangle + |L_{12}| \langle i_1 \rangle + |L_{1x}| \langle i_1 \rangle;$$

$$\langle \psi_2 \rangle = |L_{21}| \langle i_1 \rangle + |L_2| \langle i_1 \rangle + |L_{2x}| \langle i_1 \rangle;$$

$$\langle \Psi_x \rangle = |L_{x1}| \langle i_1 \rangle + |L_{x2}| \langle i_1 \rangle + |L_x| \langle i_1 \rangle,$$

где $|L_1|$, $|L_2|$, $|L_x|$ - матрицы индуктивностей, определяемые выражениями:

$$\begin{aligned}
 [L_1] &= \begin{bmatrix} L_{m\phi} + L_{1\sigma} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} + L_{1\sigma} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} + L_{1\sigma} \end{bmatrix}; \\
 [L_2] &= \begin{bmatrix} L_{m\phi} + L_{2\sigma} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} + L_{2\sigma} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} + L_{2\sigma} \end{bmatrix}; \\
 [L_x] &= \begin{bmatrix} L_{m\phi} + L_{x\sigma} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} + L_{x\sigma} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} + L_{x\sigma} \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

В описании модели использованы следующие обозначения: мгновенные значения напряжений статора - $u_{1A'}, u_{1B'}, u_{1C'}$; мгновенные значения токов в фазных обмотках статора, ротора, герметизирующего элемента соответственно - $i_{1A'}, i_{1B'}, i_{1C'}, i_{2a'}, i_{2b'}, i_{2c'}$; $i_{xA'}, i_{xB'}, i_{xC'}$; полные потокосцепления тех же обмоток - $\Psi_{1A'}, \Psi_{1B'}, \Psi_{1C'}, \Psi_{2a'}, \Psi_{2b'}, \Psi_{2c'}, \Psi_{xA'}, \Psi_{xB'}, \Psi_{xC'}$; активные сопротивления и собственные индуктивности обмоток - $R_{1'}, R_{2'}, R_{x'}$; $L_{1'}, L_{2'}, L_{x'}$; индуктивности обмоток, обусловленные наличием потоков рассеяния, - $L_{1\sigma'}, L_{2\sigma'}, L_{x\sigma'}$; потокосцепление и индуктивность намагничивающего контура - Ψ_m, L_m ; угол поворота ротора - γ ; коэффициент рассеяния - σ .

Система уравнений с использованием пространственных векторов во вращающейся системе координат имеет вид:

$$\begin{cases} \vec{U}_1 = R_1 \vec{I}_1 + \frac{\partial \vec{\Psi}_1}{\partial t} + j\omega_0 \vec{\Psi}_2 \\ 0 = R_2 \vec{I}_2 + \frac{\partial \vec{\Psi}_2}{\partial t} + j\omega_2 \vec{\Psi}_2 \\ 0 = R_x \vec{I}_x + \frac{\partial \vec{\Psi}_x}{\partial t} + j\omega_0 \vec{\Psi}_x \\ \vec{\Psi}_1 = L_1 \vec{I}_1 + L_m \vec{I}_2 + L_m \vec{I}_x \\ \vec{\Psi}_2 = L_m \vec{I}_1 + L_2 \vec{I}_2 + L_m \vec{I}_x \\ \vec{\Psi}_x = L_m \vec{I}_1 + L_m \vec{I}_2 + L_x \vec{I}_x \end{cases} \quad (1)$$

В (1) внешними управляющими воздействиями являются не только составляющие пространственного вектора \vec{U}_1 , но и частота, поэтому необходимо преобразование в систему, связанную с вектором $\vec{\Psi}_2$. Пространственный вектор $\vec{\Psi}_2$ в комплексном виде при совмещении действительной оси с α , а мнимой - с β :

$$\vec{\Psi}_2 = \Psi_{2a} + j\Psi_{2b}.$$

Для согласования систем координат необходимо выполнение условия:

$$\Psi_{2b} = 0.$$

Уравнение электрического равновесия применительно к ротору имеет вид:

$$0 = R_2 \vec{I}_2 + \frac{d\vec{\Psi}_2}{dt} + j\omega_2 \vec{\Psi}_2 \quad \frac{d\vec{\Psi}_2}{dt} = -R_2 i_{2a}; \quad \omega_0 = \frac{R_2 i_{2b}}{\Psi_{2a}} + p_{\Pi} \omega. \quad (2)$$

Вектор намагничивающего тока:

$$\vec{I}_m = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_x.$$

С учетом уравнений (2) система (1) принимает вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\vec{\Psi}_1}{dt} &= \vec{U}_1 - R_1\vec{I}_1 - jw_0\vec{\Psi}_1; \quad \frac{d\Psi_{2a}}{dt} = -R_2i_{2a}; \quad \frac{d\vec{\Psi}_x}{dt} = -R_x\vec{I}_x - jw_0\vec{\Psi}_x; \\ \vec{I}_1 &= L_{1\sigma}^{-1}(\vec{\Psi}_1 - \vec{\Psi}_m); \quad \vec{I}_2 = L_{2\sigma}^{-1}(\vec{\Psi}_2 - \vec{\Psi}_m); \quad \vec{I}_x = L_{x\sigma}^{-1}(\vec{\Psi}_x - \vec{\Psi}_m); \\ \vec{\Psi}_m &= L_m\vec{I}_1 + L_m\vec{I}_2 + L_m\vec{I}_x; \quad w_0 = \frac{R_2i_{2b}}{\Psi_{2a}} + p_n w; \quad \frac{dw}{dt} = \frac{1}{J} \left(\frac{3}{2} p_n (\vec{I}_2 \cdot \vec{\Psi}_m) - M_c \right). \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Система уравнений (3) содержит уравнение движения, обусловленного взаимодействием тока \vec{I}_2 и потокосцепления $\vec{\Psi}_m$, и учитывает моменты инерции J и нагрузки M_c , включающие приведенную массу шибера и потери трения в задвижке [21]. Модель позволяет учесть изменение насыщения магнитной цепи за счет коэффициента связи основного магнитного потока и намагничивающего тока, соответствующего ненасыщенной машине с постоянными индуктивностями рассеяния $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}, L_{x\sigma}$:

$$L_1 = L_{1\sigma} + k_\psi(\Psi_m) L_m; \quad L_2 = L_{2\sigma} + k_\psi(\Psi_m) L_m; \quad L_x = L_{x\sigma} + k_\psi(\Psi_m) L_m.$$

Обсуждение

Механические характеристики электропривода герметичной задвижки, формализованного системой (3), выполненные в разных программных средах приведены на рис.4. В качестве базового варианта для расчета выбран общепромышленный асинхронный двигатель, номинальные параметры которого приведены в таблице 1. Момент трения на шибере предварительно имеет линейный характер, определяемый коэффициентом трения 0,36 (латунь-латунь).

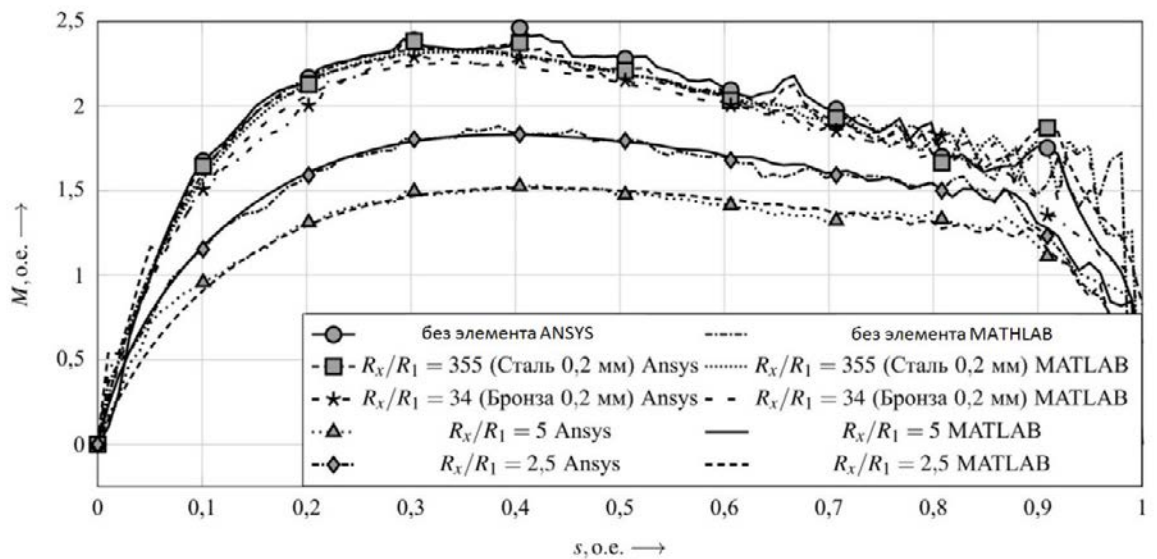


Рисунок 4. Механические характеристики электропривода герметичной задвижки

Таблица 1.

Технические данные

Мощность $P_{2н}$, кВт	30
Линейное напряжение U , В	380
Ток фазы $I_{Фн}$, А	191
Частота питания f , Гц	
Момент двигателя $M_{нr}$, Н	61
Частота вращения w_{or} , с ⁻¹	25
Число полюсов $2p_n$	4
КПД (с учетом герметизирующего элемента), %	75
Коэффициент мощности, %	80
Момент инерции ротора с учетом шибера J , кг·м ²	0,25
Скольжение $s_{нr}$, о.е.	0,16

Анализ полученных результатов показывает, что основное влияние герметизирующего элемента на электромагнитный момент связано с его активным сопротивлением R_x . Увеличение относительного сопротивления элемента R_x/R_1 (R_1 – активное сопротивление фазной обмотки статора) приводит к разнотемповому возрастанию номинального, пускового, критического моментов. Индуктивное сопротивление необходимо учитывать только при $R_x/R_1 < 2$. Теоретически при $R_x \rightarrow \infty$ и $Lx \rightarrow 0$ энергетические характеристики привода задвижки приближаются к характеристикам привода при отсутствии между статором и ротором герметизирующего элемента. При соотношении $R_x/R_1 > 100$ снижение КПД не превышает 3%.

Заключение

Создание новых типов автономных силовых приводов линейного перемещения на базе специальных электромеханических устройств с учетом удаленных эксплуатационных факторов позволяет повысить эффективность критических объектов инфраструктуры энергетического комплекса. Рассмотренный алгоритм исследования электромагнитных процессов в электроприводе герметичной задвижки на основе его описания системой пространственных векторов позволяет учесть влияние определяющих параметров на эффективность работы устройства. Математическая модель, полученная на основе векторного описания входных и выходных переменных, а также внешних и внутренних возмущений, позволяет учесть нелинейность коэффициентов, связанных с определяемыми активными сопротивлениями, индуктивностями, взаимными индуктивностями. Оценка влияния размерных соотношений, встроенных в геометрическую модель, создает возможность последующей трехмерной оптимизации основных элементов привода и задвижки с учетом тепловых и гидродинамических процессов в магистрали. Это позволяет не только обеспечить заданный технологический режим, но и устойчивость системы в условиях низких температур за счет утилизации тепловыделений в герметизирующем элементе.

Список литературы:

1. Транспорт в России. 2022: Статистический сборник. М.: Росстат, 2022. 101 с.
2. Куракина Н.И., Мышко Р.А. ГИС моделирования нефтяных разливов на магистральных трубопроводах // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 2. С. 52-60. EDN: YRLRDZ
3. Свечарник Д.В. Электрические машины непосредственного привода: Безредукторный электропривод. М.: Энергоатомиздат, 1988. 208 с.
4. Castellini L., D'Andrea M., Borgarelli N. Analysis and design of electro-mechanical actuator for gate valve in oil&gas applications // 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2014). Ischia, Italy. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Curran Associates, Inc. (Sep 2014). P. 378-384.
5. Кулинченко Г.В., Масленников А.М., Бахута В.А., Червяков В.Д. Оценка эффективности электропривода запорной арматуры // Восточно-Европейский журнал корпоративных технологий. Харьков, 2019. Т. 4. № 8. С. 36-44. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.174203
6. Гарганеев А.Г., Каракулов А.С., Ланграф С.В. Электропривод запорной арматуры как мехатронная система // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. НГТУ. 2013. № 2. С. 180-187. EDN: QBRYDX
7. Удовиченко А.В., Калужский Д.Л., Уваров Н.А., Мехтиев А.Д. Электродвигатели для регулируемого привода запорной арматуры // Электроника. 2021. Т. 21. № 10, 2727. С. 1-14. DOI:10.3390/electronics10212727
8. Jia-Yue G., Hui-Ying C. Development of the Intelligent Secondary Protection Device of Sewage Pipeline Exhaust Valve // 2015 Seventh International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. 2015. P. 388-391. DOI: 10.1109/ICMTMA.2015.99
9. Гринченков В.П., Павленко И.А. Электромагнитные приводы с возвратно-поступательным и возвратно-вращательным принципом действия для клапанов // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. № 4. С. 51 – 57. EDN: LAFQIT
10. Ганнель Л.В. Оптимизация профиля скорости позиционных линейных электроприводов // Изв. вузов. Электромеханика. 2021. Т. 64. № 2. С. 50-55. DOI:10.17213/0136-3360-2021-2-50-55
11. Ахрамеева Е.В., Кузнецова Т.Р. Модель преобразователя углового перемещения в линейное на базе передачи «винт-гайка» // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 9. С. 24-28. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-9-24-29

12. Васин С.А., Плахотникова Е.В. Методика расчета величины крутящего момента настройки электропривода в системе электроприводной запорной арматуры с прямолинейным перемещением запорного органа // Записки Горного института. 2018. Т. 232. С. 407-412. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.407
13. Гарганеев А.Г., Динь К.К., Сипайлова Н.Ю., Кашин Е.И. Оптимизация геометрии зубцовой зоны гистерезисной муфты запорной арматуры нефтепровода // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 7. С. 155-164. DOI: 10.18799/24131830/2019/7/2192
14. Матросов А.В. Анализ режимов многомашинного электрогидравлического привода затвора гидротурбины // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2016. № 1 (238). С. 19-27. DOI: 10.5862/JEST.238.2
15. Гарганеев А.Г. Синхронно-гистерезисный двигатель в электроприводе трубопроводной арматуры // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов международной научно-практической конференции. Томский государственный университет. 2012. № 1. С. 95-99. EDN: TKCANF
16. Garganeev A.G. Application synchronous-hysteresis motors as electrical drivers for tube armature // 11-th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE. Novosibirsk, 2012. P. 135-137. DOI: 10.1109/APEIE.2012.6629088
17. Гарганеев А.Г., Кюи Д.К., Кашин Е.И. Электропривод задвижки трубопроводной арматуры с гистерезисной муфтой // Доклады ТУСУР. Томск, 2018. Т. 21. № 1. С. 127-131. DOI:10.21293/1818-0442-2018-21-1-127-131
18. Каракулов А.С., Ланграф С.В. Разработка системы управления электроприводом запорной арматуры методом разделения математических моделей объектов управления // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2006. № 3. С. 54-56. EDN: KGCUKV
19. Вэнь-чжи Ц., Тянь-ян Чж., Дань Цз., Пин Я. Анализ магнитной силы электромагнитного шарового клапана во время гидравлических переходных процессов в трубопроводе // Международная конференция по гидроэнергетике и мехатронике (FPM). Харбин, 2015. С. 1113-1117. DOI: 10.1109/FPM.2015.7337285
20. Ким К.К., Иванов С.Н. Моделирование комбинированного электропривода // Известия вузов. Электромеханика. 2019. Т. 62. № 3. С. 44-50. DOI:10.17213/0136-3360-2019-3-44-50
21. Иванов С.Н., Ким К.К., Колесник М.Б. Определение мощности электропривода герметичной задвижки с учетом действующих нагрузок // Энергобезопасность и энергосбережение. 2023. № 1. С. 68-77. EDN: FVUMHU
22. David C. White, Herbert H. Woodson. Electromechanical Energy Conversion. New York, John Wiley and Sons, Inc. 1959. 528 p.
23. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. М. : Высш. шк., 1989. 312 с.
24. Куцевалов В.М. Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами. М.-Л.: Энергия, 1966. 304 с.
25. Фисенко В.Г. Численные расчеты электромагнитных полей в электрических машинах на основе метода конечных элементов. М. : МЭИ (ТУ), 2002. 44 с.
26. Голоколос Д.А., Иванов С.Н., Ким К.К., Бельский К.О. Синтез системы управления экранированным асинхронным двигателем на основе векторного описания // Ученые записки КнАГТУ. 2023. № I (65). С. 31-39. DOI: 10.17084/20764359-2023-65-31

References:

1. Transport v Rossii. 2022: Statisticheskiy sbornik [Transport in Russia. 2022: Statistical collection]. Moscow. Rosstat, 2022, 101 p. (In Russian).
2. Kurakina N.I., Myshko R.A. GIS modelirovaniya neftnykh razlivov na magistralnykh truboprovodakh [GIS modeling of oil spills on main pipelines]. *Izvestiya SPBGEHTU «LEHTI»* [News of St. Petersburg Electrotechnical University "LEHTI"], 2020, no. 2, pp. 52-60. (In Russian). EDN: YRLRDZ
3. Svecharnik D.V. *Elektricheskiye mashiny neposredstvennogo privoda: Bezreduktorny elektropriwod* [Direct drive electric machines: Gearless electric drive]. Moscow. Energoatomizdat, 1988, 208 p. (In Russian).
4. Castellini L., D'Andrea M., Borgarelli N. Analysis and design of electro-mechanical actuator for gate valve in oil&gas applications // 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2014). Ischia, Italy. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Curran Associates, Inc. (Sep 2014), pp. 378-384.
5. Kulinchenko G.V., Maslennikov A.M., Bahuta V.A., Chervyakov V.D. Ocenka ehffektivnosti ehlektroprivoda zapornoj armatury [Evaluation of the efficiency of the electric drive of shut-off valves]. *Vostochno-Evropejskiy zhurnal korporativnykh tekhnologij* [East

- European Journal of Corporate Technologies*]. Kharkov, 2019, vol. 4, no. 8, pp. 36-44. (In Russian). DOI: 10.15587/1729-4061.2019.174203
6. Garganeev A.G., Karakulov A.S., Langraf S.V. Ehlektroprivod zapornoj armatury kak mekhatronnaya sistema [Electric drive of shut-off valves as a mechatronic system]. *Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific bulletin of the Novosibirsk State Technical University]. NSTU, 2013, no. 2, pp. 180-187. (In Russian). EDN: QBRYDX
 7. Udovichenko A.V., Kaluzhskij D.L., Uvarov N.A., Mekhtiev A.D. Ehlektroprivod dlya reguliruemogo privoda zapornoj armatury [Electric motors for adjustable drive of shut-off valves]. *Ehlektronika* [Electronics], 2021, vol. 21, no.10, pp. 1-14. (In Russian). DOI:10.3390/electronics10212727
 8. Jia-Yue G., Hui-Ying C. Development of the Intelligent Secondary Protection Device of Sewage Pipeline Exhaust Valve // 2015 Seventh International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2015, pp. 388-391. DOI: 10.1109/ICMTMA.2015.99
 9. Grinchenkov V.P., Pavlenko I.A. Ehlektromagnitnye privody s vozvratno-postupatelnyim i vozvratno-vrashchatelnym principom dejstviya dlya klapanov [Electromagnetic actuators with reciprocating and reciprocating rotary operating principles for valves]. *Izvestiya vuzov. Ehlektromekhanika* [Izv. universities Electromechanics], 2009, no. 4, pp. 51-57. (In Russian). EDN: LAFQIT
 10. Garganeev A.G., Din K.K., Sipajlova N.Yu., Kashin E.I. Optimizaciya geometrii zubcovoj zony gisterezisno mufty zapornoj armatury nefteprovoda [Optimization of the geometry of the tooth zone of the hysteresis coupling of shut-off valves of an oil pipeline]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [News of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering], 2019, vol. 330, no. 7, pp. 155-164. (In Russian). DOI: 10.18799/24131830/2019/7/2192
 11. Gannel L.V. Optimizaciya profilya skorosti pozicionnyh linejnyh ehlektroprivodov [Optimization of the speed profile of positional linear electric drives]. *Izvestiya vuzov. Ehlektromekhanika* [Izv. universities Electromechanics], 2021, vol. 64, no. 2, pp. 50-55. (In Russian). DOI:10.17213/0136-3360-2021-2-50-55
 12. Matrosov A.V. Analiz rezhimov mnogomashinnogo ehlektrogidravlicheskogo privoda zatvora gidroturbiny [Analysis of the modes of a multi-machine electro-hydraulic drive of a hydraulic turbine gate]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* [Scientific and technical bulletins of the St. Petersburg State Polytechnic University], 2016, vol. 238, no. 1, pp. 19-27. (In Russian). DOI: 10.5862/JEST.238.2
 13. Ahrameeva E.V., Kuznecova T.R. Model preobrazovatelya uglovogo peremeshcheniya v linejnoe na baze peredachi «vint-gajka» [Model of an angular to linear displacement converter based on a screw-nut transmission]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical Science], 2022, vol. 9, pp. 24-28. (In Russian). DOI: 10.24412/2071-6168-2022-9-24-29
 14. Garganeev A.G. Sinhronno-gisterezisnyj dvigatel v ehlektroprivode truboprovodnoj armatury [Synchronous-hysteresis motor in the electric drive of pipeline fittings]. Ehlektronnye sredstva i sistemy upravleniya. Materialy dokladov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii [Electronic means and control systems. Materials of reports of the international scientific and practical conference]. Tomsk State University, 2012, no. 1, pp. 95-99. EDN: TKCANF
 15. Garganeev A.G. Application synchronous-hysteresis motors as electrical drivers for tube armature // 11-th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE. Novosibirsk, 2012. pp. 135-137. DOI: 10.1109/APEIE.2012.6629088
 16. Garganeev A.G., Kyui D.K., Kashin E.I. Ehlektroprivod zadvizhki truboprovodnoj armatury s gisterezisnoj muftoj [Electric drive for pipeline valve valves with hysteresis coupling]. *Doklady TUSUR* [TUSUR reports]. Tomsk, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 127-131. (In Russian). DOI:10.21293/1818-0442-2018-21-1-127-131
 17. Vasin S.A., Plahotnikova E.V. Metodika rascheta velichiny krutyashchego momenta nastrojki ehlektroprivoda v sisteme ehlektroprivodnoj zapornoj armatury s pryamolinejnym peremeshcheniem zapornogo organa [Methodology for calculating the value of the electric drive setting torque in a system of electric drive shut-off valves with linear movement of the shut-off element]. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], 2018, vol. 232, pp. 407-412. (In Russian). DOI: 10.31897/PMI.2018.4.407
 18. Karakulov A.C., Langraf S.V. Razrabotka sistemy upravleniya ehlektroprivodom zapornoj armatury metodom azdeleniya matematicheskikh modelej upravleniya

- [Development of a control system for the electric drive of shut-off valves using the method of separating mathematical models of control objects]. *Izvestiya vuzov. Ehlektromekhanika [Izv. universities Electromechanics]*, 2006, no. 3, pp. 54-56. (In Russian). EDN: KGCUKV
19. Vehn-chzhi C., Tyan-yan Chzh., Dan Cz., Pin Ya. Analiz magnitnoj sily ehlektromagnitnogo sharovogo klapana vo vremya gidravlicheskih perekhodnyh processov v truboprovode [Analysis of Magnetic Force of Solenoid Ball Valve During Hydraulic Transients in Pipeline]. *Mezhdunarodnaya konferenciya po gidroehnergetike i mekhatronike (FPM) [International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM)]*. Harbin, 2015, pp. 1113-1117. DOI: 10.1109/FPM.2015.7337285
 20. Kim K.K., Ivanov S.N. Modelirovanie kombinirovannogo ehlektroprivoda [Simulation of a combined electric drive]. *Izvestiya vuzov. Ehlektromekhanika [Izv. universities Electromechanics]*, 2019, vol. 62, no. 3, pp. 44-50. (In Russian). DOI:10.17213/0136-3360-2019-3-44-50
 21. Kim K.K., Ivanov S.N., Kolesnik M.B. Opredelenie moshchnosti ehlektroprivoda germetichnoj zadvizhki s uchetom dejstvuyushchih nagruzok [Determination of the power of the electric drive of a sealed valve taking into account the existing loads]. *Ehnergobezopasnost I ehnergosberezhenie [Energy security and energy saving]*, 2023, no. 1, pp. 68-77. (In Russian). EDN: FVUMHU
 22. David C. White, Herbert H. Woodson. *Electromechanical Energy Conversion*. New York, John Wiley and Sons, Inc, 1959, 528 p.
 23. Ivanov-Smolenskij A.V. Ehlektromagnitnye sily I preobrazovanie ehnergii v ehlektricheskikh mashinah [Electromagnetic forces and energy conversion in electrical machines]. Moscow. Higher school, 1989, 312 p. (In Russian).
 24. Kucevalov V.M. *Voprosy teorii I rascheta asinhronnyh mashin s massivnymi rotorami [Questions of theory and calculation of asynchronous machines with massive rotors]*. Moscow-Leningrad publ. Energy, 1966, 304 p. (In Russian).
 25. Fisenko V.G. Chislennye raschety ehlektromagnitnyh polej v ehlektricheskikh mashinah na osnove metoda konechnykh ehlementov [Numerical calculations of electromagnetic fields in electrical machines based on the finite element method]. Moscow. MPEI (TU), 2002, 44 p. (In Russian).
 26. Golokolos D.A., Ivanov S.N., Kim K.K., Belskij K.O. Sintez sistemy upravleniya ehkranirovannym asinhronnym dvigatelem na osnove vektornogo opisaniya [Synthesis of a control system for a shielded asynchronous motor based on a vector description]. *Uchenye zapiski KnAGTU [Scientific notes of KnAGTU]*, 2023, vol. 65, no. I, pp. 31-39. (In Russian). DOI: 10.17084/20764359-2023-65-31