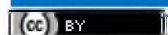


ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.313

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-2-26-39

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ МОЩНЫХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ

Дадабаев Ш.Т.¹, Абдуллазянов Э.Ю.², Грачева Е.И.²

¹Худжандский политехнический институт Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, г. Худжанд, Таджикистан

²Казанский государственный энергетический Университет, г. Казань, Россия
ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-2573-759X>, shahbozdadoboev@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. В настоящее время все большее применения получили безударные системы запуска высоковольтных электродвигателей. Эти системы ограничивают значения пусковых токов, а также устраняют знакопеременные колебания электромагнитного момента двигателей.

ЦЕЛЬ. Разработка мероприятий по повышению технического ресурса электрооборудования мощных оросительных насосных станций на основе применения систем плавного пуска для высоковольтных электродвигателей. **МЕТОДЫ.** В ходе исследования были использованы методы анализа технологических процессов насосных станций, методы математического и компьютерного моделирования систем электропривода. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Разработаны компьютерные модели для исследования режимных характеристик асинхронных и синхронных электроприводов насосных станций при прямом и плавном пуске электродвигателей. Предложена система безударного пуска высоковольтных электродвигателей оросительных насосных станций первого подъема на основе инвертора тока. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Надежность и долговечность работы электрооборудования зависит, в первую очередь, от технического ресурса, который определяется рядом факторов. Основными факторами, влияющими на технический ресурс электрооборудования крупных оросительных насосных станций, являются переходные режимы, возникающие при запуске насосных агрегатов. Предложенная в данной статье система плавного пуска высоковольтных электродвигателей оросительных насосных станций, позволяет устранить негативное воздействие переходных режимов на работу электрооборудования и, тем самым, повысить технический ресурс и надежность системы электроснабжения насосной станции в целом.

Ключевые слова: насосная станция; насосный агрегат; электропривод; асинхронный двигатель; синхронный двигатель; инвертор тока; технический ресурс.

Для цитирования: Дадабаев Ш.Т., Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И. Мероприятия по повышению технического ресурса электрооборудования мощных оросительных насосных станций // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 26-39. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-26-39.

MEASURES TO INCREASE THE TECHNICAL RESOURCE OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF POWERFUL IRRIGATION PUMP STATIONS

ShT. Dadabaev¹, EYu. Abdullazyanov², EI. Gracheva²

¹Khujand Polytechnic Institute of the Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Khujand, Tajikistan

²Kazan State Power Engineering University, Russia

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-2573-759X>, shahbozdadoev@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* At present, unstressed systems for launching high-voltage electric motors have been increasingly used. These systems limit the values of starting currents as well as eliminate alternating oscillations of engine electromagnetic torque.

THE PURPOSE. Development of measures to improve the technical resource of electrical equipment of powerful irrigation pumping stations based on the use of soft start systems for high-voltage electric motors. *METHODS.* In the course of the study, methods for analyzing the technological processes of a pumping station, methods for mathematical and computer modeling of an electric drive were used. *RESULTS.* Computer models have been developed to study the regime characteristics of asynchronous and synchronous electric drives of pumping stations with direct and soft start of electric motors. A shockless start-up system for high-voltage electric motors of irrigation pumping stations of the first lift based on a current inverter is proposed. *CONCLUSION.* The reliability and durability of electrical equipment depends primarily on the technical resource, which is determined by a number of factors. The main factors influencing the technical life of the electrical equipment of large irrigation pumping stations are the transient modes that occur when the pumping units are started. The soft start system of high-voltage electric motors of irrigation pumping stations proposed in this article makes it possible to eliminate the negative impact of transient conditions on the operation of electrical equipment and, thereby, increase the technical resource and reliability of the power supply system of the pumping station as a whole.

Keywords: *pumping station; pumping unit; electric drive; asynchronous motor; synchronous motor; current inverter; technical resource.*

For citation: Dadabaev ShT, Abdullazyanov EYu, Gracheva EI. Measures to increase the technical resource of electrical equipment of powerful irrigation pump stations. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(2):26-39. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-26-39.

Введение (Introduction)

Оросительные насосные станции (ОНС), в основном, служат для орошения сельскохозяйственных земель и, как потребитель, электроэнергии они входят в первую категорию надежности электроснабжения. В больших ОНС установлены крупные вертикальные электродвигатели, которые выполняют основную технологическую задачу насосной станции. Вопросы, связанные проектированием, монтажом и эксплуатацией крупных вертикальных электродвигателей, рассмотрены в работе [1] Неймана З.Б. и других. В работе [2] Онищенко Г.Б. и Юнькова М.Г. рассмотрены особенности турбомеханизмов, определены требования к их электроприводу, обосновано целесообразности применения регулируемых электроприводов для мощных турбомеханизмов. В работе [3] Лезнова Б.С. рассмотрены режимы работы и способы регулирования насосных установок, а также особое внимание уделено системам управления электроприводами и энергосбережению насосных установок. По упомянутым работам известно, что синхронные двигатели (СД) имеют высокий коэффициент мощности и КПД, однако каждый запуск крупных СД приводят к скачкам токов и моментов двигателя, провалам напряжения в сети, нагревом обмоток двигателя и т.д. В результате возникают дополнительные потери, и уменьшается технический ресурс электрооборудования ОНС. В работах [4-5] Ларионова В.Н. и Калинина А.Г. рассмотрены вопросы энергоэффективности и энергосбережения в электроприводах с вентиляторной нагрузкой, а также исследовано взаимное влияние электропривода и электроснабжения насосных установок. Известно, что для каждого крупного электродвигателя по инструкции завода изготовителя, указывается допустимое число пусков в год, которого необходимо строго соблюдать. С другой стороны, часто в ОНС используют дискретный способ регулирования подачи насосов, что подразумевает частые включения и отключения насосных агрегатов. Таким образом, в работе ОНС возникают проблемы связанные принятием мер по повышению надежности и технического ресурса электрооборудования ОНС без ущерба на ее технологический процесс. Настоящее время для решения указанных проблем широко применяют частотно-регулируемые электроприводы. В работе [6] Поздеева А.Д., а также в работе [7] Ковача К.П. рассмотрены

переходные процессы в машинах переменного тока и электромагнитные процессы в частотно-регулируемых электроприводах переменного тока. Благодаря работам упомянутых исследователей сегодня мы имеем широкое представление об особенностях электротехнического комплекса ирригационных сооружений, о методах и способах регулирования насосных установок и их электроприводов, о конструкторских расчетах электрических машин, насосных установок и много других вопросов. Однако новые требования и задачи, связанные с энергосбережением, регулированием технологических процессов, повышением качества работы электрооборудования, автоматизацией производства и т.д. вынуждают исследователей проводить работы по разработке и внедрению новых средств, методов и способов решения поставленных задач.

Цель работы: разработка мероприятий по повышению технического ресурса электрооборудования мощных ОНС.

Объект исследования: асинхронные и синхронные электроприводы крупных ОНС.

Предмет исследования: технический ресурс электрооборудования мощных ОНС.

В современных условиях все большее применение получили безударные системы запуска высоковольтных электродвигателей. Эти системы ограничивают значения пусковых токов, а также устраняют знакопеременные колебания электромагнитного момента двигателей. Средствами безударного пуска крупных электродвигателей могут служить устройства плавного пуска (УПП) или преобразователи частоты (ПЧ). Сегодня рынок этих средств заполнен продукциями многочисленных компаний как отечественных, так и зарубежных фирм. В результате возникают новые проблемы, связанные с правильным и эффективным выбором оборудования для плавного пуска крупных электродвигателей. Поэтому необходимо детально исследовать технические возможности элементов и средств плавного пуска электродвигателей, эффективность и целесообразность внедрения этих систем на ОНС.

Научной и практической значимостью предлагаемой статьи является дополнение теоретической базы и обоснование практического использования системы плавного пуска электродвигателя, которая обеспечивает глубокое ограничение пусковых токов двигателя и повышает технический ресурс электрооборудования ОНС в целом.

Материалы и методы (*Materials and methods*)

В данной работе в качестве объекта исследования рассматривается ОНС Аштского района Республики Таджикистан. Указанный район является одним из крупных аграрных районов области и, соответственно, имеет крупные ОНС, где установлены более 60 насосных агрегатов (НА), и пять подъемов насосных станций (НС) [8-9]. Длина трубопроводов составляет более 33 км, а проектная площадь орошаемых земель более 12 тыс. гектаров. Аштский каскад насосных станций (АНС) начал перекачивать первые кубометры воды еще в 1979 году. Большую часть мощности в каскаде потребляет насосная станция первого подъема - АНС-1, где установлены четыре основных и два дренажных НА. В АНС-1 используются электродвигатели вертикального исполнения [10-11]. Основные насосы на станции представляют собой насосы центробежного типа марки 1200В-6,3/100-А следующими техническими параметрами: производительность насоса $Q = 22600 \text{ м}^3/\text{час}$, напор насоса $H = 88 \text{ м}$, КПД $\eta = 0,88$, скорость насоса $n_n = 375 \text{ об/мин}$, диаметр колес насоса $D = 2200 \text{ мм}$. Приводом насосов служат синхронные электродвигатели (СД) серии ВДС2-325/69-16 следующими техническими характеристиками: мощность двигателя $P_n = 8000 \text{ кВт}$, напряжение статора $U_n = 10 \text{ кВ}$, КПД $\eta = 0,9$ и частота вращения двигателя $n_n = 375 \text{ об/мин}$. Вспомогательные агрегаты оснащены насосами типа Д4000-95 и электродвигателями серии СДНЗ-15-49-6УЗ мощностью $P_n = 1600 \text{ кВт}$, напряжение статора $U_n = 10 \text{ кВ}$, частота вращения двигателя $n_n = 1000 \text{ об/мин}$. $Q-H$ характеристика насоса типа 1200В-6,3/100-А показана на рисунке 1.

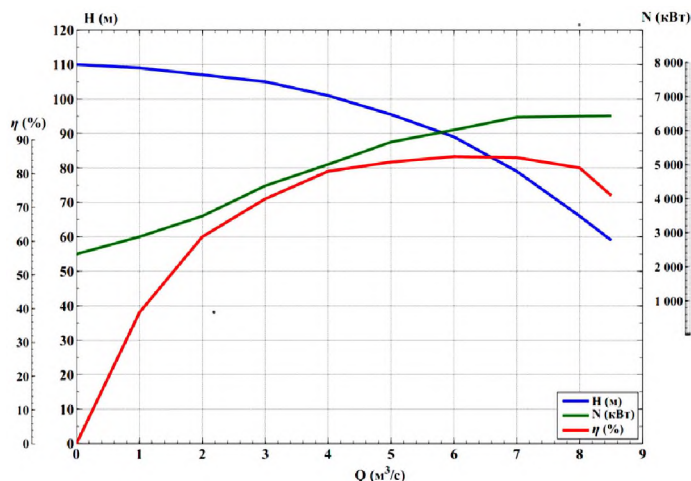


Рис. 1. Характеристика насоса 1200B-6,3/100-A (52B-11)

Fig. 1. Pump characteristic of 1200B-6,3/100-A (52B-11)

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

В приведенной характеристике (рис. 1) напор насоса изображена, синем цветом, мощность потребляемая насосом показано с кривым зеленого цвета. Кривая с красным цветом изображена характеристика изменения КПД насоса. Таким образом, по характеристике насоса (рис. 1) можно оценить рабочий и регулировочный режим насоса.

Технологическая схема станции АНС-1 показано на рисунке 2.

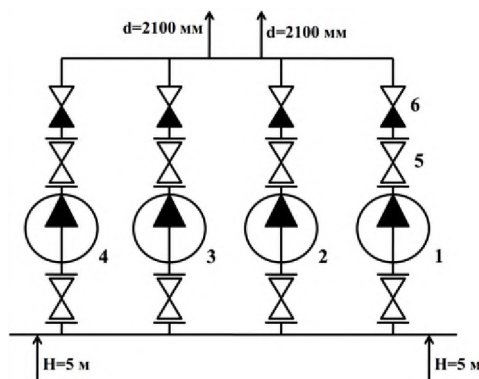


Рис. 2. Технологическая схема НС первого подъема АНС-1

Fig. 2. Technological scheme of the first lift pump station ANS-1

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

В технологической схеме (рис. 2) приведены насосы 1-4, задвижка 5, и обратный клапан 6. В агрегатах АНС-1 установлены нерегулируемые электроприводы (ЭП), параметры которых невозможно регулировать без дополнительных устройств. Кроме этого, они имеют ряд недостатков в обеспечении технологических процессов НС, таких, как отсутствие возможности регулирования производительности НА и отсутствие возможности уменьшения негативных последствий пусковых переходных процессов. Пусковые переходные процессы в НА, в основном, обусловлены, тяжелыми режимами во время пуска мощных СД. Для устранения перечисленных проблем пуск высоковольтных СД осуществляется при пониженном напряжении, т.е. плавный пуск, при котором снижается пусковой ток [12-13]. Однако при снижении напряжения длительность пуска увеличивается, что может ухудшить условия синхронизации СД и, тем самым, привести к увеличению нагрева пусковой обмотки. Поэтому для каждого объекта электроснабжения, имеющего в своем составе мощные СД, необходимо провести общий анализ всех особенностей технического и технологического характера работы объекта для выявления оптимальных условий пуска двигателей. Например, при перегрузках электрооборудования электрической сети в процессе пуска мощных СД в ОНС могут возникнуть провалы напряжения в сети, что, свою очередь, будет негативно влиять на установленные агрегаты, взаимосвязанных НС [14-15]. В крупных ОНС первого подъема обычно применяются СД вертикального

исполнения с номинальной мощностью свыше 2 МВт и явнополюсной конструкцией ротора [16-18].

Как электрическая машина, СД является конструктивно достаточно сложным объектом при исследовании динамических режимов работы, так как физические модели требуют больших материальных затрат, а математические расчёты требуют существенных затрат времени и математических навыков исследователя [19-21]. Для решения указанных проблем в настоящее время многими исследователями широко используются прикладные программы компьютерного моделирования. Данный подход не требует финансовых затрат и времени для решения сложных математических задач. Одной из таких программ является MATLAB/Simulink, которая имеет в своем составе множество библиотек компонентов для моделирования энергетических и электротехнических объектов при исследовании переходных процессов динамических режимов работы [22-23]. Однако, при использовании программы MATLAB необходимо, в первую очередь, составить математическую модель исследуемого объекта. Затем преобразовать полученные уравнения и математические описания элементов системы к виду, удобному для применения компьютерной программы. В таких компьютерных программах используемые для моделирования технических систем структурные схемы, в основном, составляются при помощи математических выражений в операторном виде [24-25]. При исследовании сложных объектов и систем с помощью компьютерного моделирования вводится ряд допущений и упрощений для получения идеальных условий функционирования системы. Для упрощения математического описания явнополюсного СД используем модель двухфазного СД и модель СД в осях d, q (рис. 3 и 4).

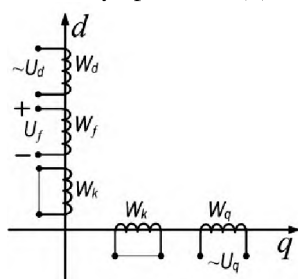


Рис. 3. Модель синхронного двигателя в осях d - q .

Fig. 3. Synchronous motor model in d - q axes

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

В модели СД (рис. 3) приведены потокоцепления обмоток двигателя W_d, W_f, W_k, W_q по осям d и q . Кроме этого в данной модели приведены напряжения питания двигателя, для обмоток статора U_d, U_q , а для обмотки возбуждения двигателя U_f .

Система дифференциальных уравнений Парка - Горева для модели СД (рис. 3) будет иметь следующий вид

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{d\psi_d}{dt} + R_1 i_d - \omega \psi_q, \\ -U_q &= \frac{d\psi_q}{dt} + R_1 i_q + \omega \psi_d, \\ U_f &= \frac{d\psi_f}{dt} + R_f i_f, \\ 0 &= \frac{d\psi_{kd}}{dt} + R_{kd} \cdot i_{kd}, \\ 0 &= \frac{d\psi_{kq}}{dt} + R_{kq} \cdot i_{kq}, \\ M_{эм} &= p_n (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d), \\ M_{эм} - M_c &= \frac{J}{P_n} \frac{d\omega}{dt}. \end{aligned} \quad (1)$$

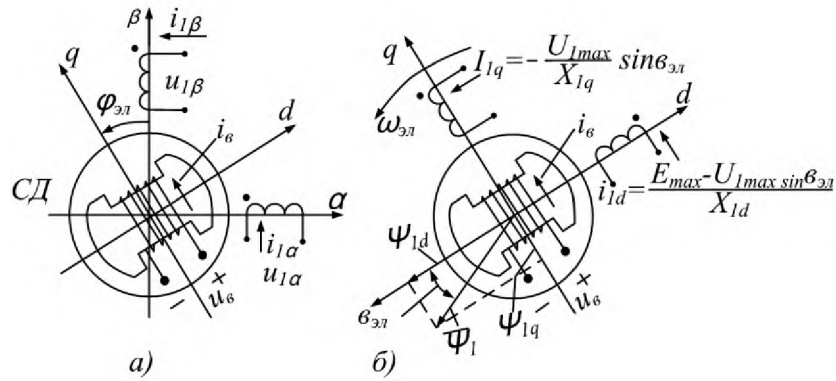


Рис. 4. Модель явнополусного СД: а) в осях α, β, d, q; б) в осях d, q

Fig. 4. Model of salient-pole SM: a) in axes α, β, d, q; b) in the axes d, q

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Напряжения, подводимые к зажимам обмоток статора СД описываются следующими выражениями

$$\begin{aligned} U_{1\alpha} &= U_{1\max} \sin \omega_{0\text{эл}} t, \\ U_{1\beta} &= U_{1\max} \cos \omega_{0\text{эл}} t. \end{aligned} \quad (2)$$

Для модели СД напряжения по осям определяются формулами прямого преобразования координат (рисунок 4).

$$\begin{aligned} U_d &= U_{1\max} \sin \theta, \\ U_q &= -U_{1\max} \cos \theta. \end{aligned} \quad (3)$$

Для модели СД (рисунок 4) потокосцепления СД можно описать уравнениями

$$\begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d + L_{df} i_f + L_{dk} i_{kd}, \\ \psi_q &= L_q i_q + L_{qk} i_{kq}, \\ \psi_f &= L_f i_f + L_{df} i_d + L_{fk} i_{kd}, \\ \psi_{kd} &= L_{kd} i_{kd} + L_{dk} i_{dk} + L_{fk} i_f, \\ \psi_{kq} &= L_{kq} i_{kq} + L_{qk} i_{qk}. \end{aligned} \quad (4)$$

В системах уравнений (1) и (4) параметры обозначаются следующим образом: ψ – потокосцепление в СД; i – ток в обмотках СД; ω – угловая скорость СД; θ – угол между продольной осью ротора и осью поля статора СД. Индексы обозначают: d – продольная ось d ; q – поперечная ось q ; f – обмотка возбуждения СД; k – демпферная обмотка СД.

Системы дифференциальных уравнений (1) и (4) преобразуем в операторный вид

$$\begin{aligned} U_d &= \psi_d p - \psi_q \omega_{\text{эл}} + i_d R_1, \\ -U_q &= \psi_q p + \psi_d \omega_{\text{эл}} + i_q R_1, \\ U_f &= \psi_f + i_f R_f, \\ 0 &= \psi_{kd} p + i_{kd} R_{kd}, \\ 0 &= \psi_{kq} p + i_{kq} R_{kq}, \\ M &= p_n (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d), \\ M - M_c &= J p \omega. \end{aligned} \quad (5)$$

Система уравнений (5) является основой для компьютерного моделирования явнополусного СД при исследовании его переходных процессов.

Результаты и обсуждение

Объектом исследования является ОНС АНС-1, где установлены вертикальные СД мощностью 8 МВт, напряжение питания статора 10 кВ. Для компьютерного моделирования используем паспортные и расчетные данные СД марки ВДС2-325/69-16. Для моделирования прямого пуска СД используем программу MATLAB, результаты моделирования представлены в относительных единицах. На рисунке 5 приведена компьютерная модель для исследования характеристик переходных процессов СД насосов при прямом пуске. Как уже отмечали, прямой пуск СД в ОНС является самой распространенной способом запуска НА, однако вместо с тем, является и самым проблемным способом, протекающая сложными условиями.

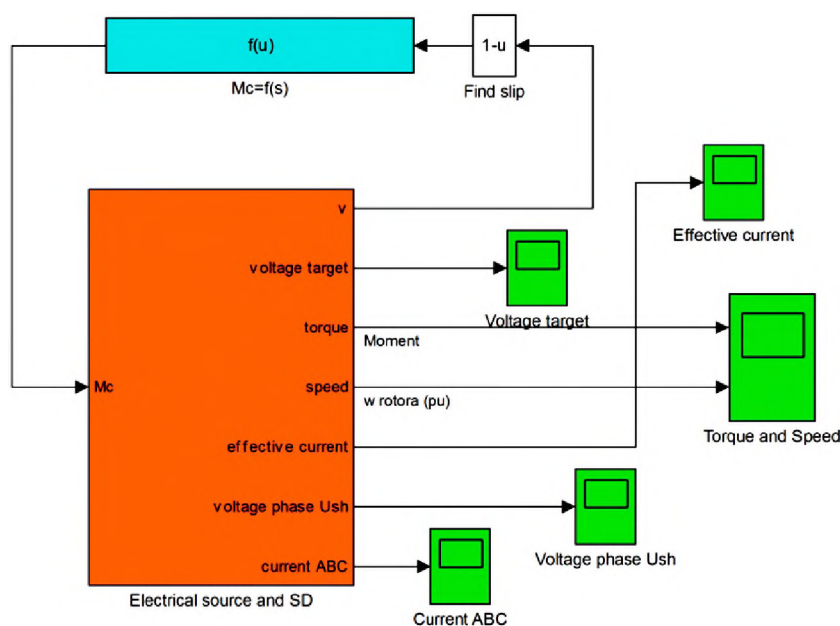


Рис. 5. Компьютерная модель для исследования переходных процессов СД насосного агрегата при прямом пуске

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Fig. 5. Computer model for the study of transient processes of the SM pumping unit during direct start

В модели (рисунок 5) блок $f(u)$ симулирует статическую нагрузку, которая приложена на вал электродвигателя. Блок *Electrical source and SD* симулирует источник электрической энергии и синхронный двигатель. Другие блоки в компьютерной модели служат для получения результатов моделирования в виде диаграмм.

Результаты компьютерного моделирования параметров ЭП показаны на рисунке 6 и рисунке 7.

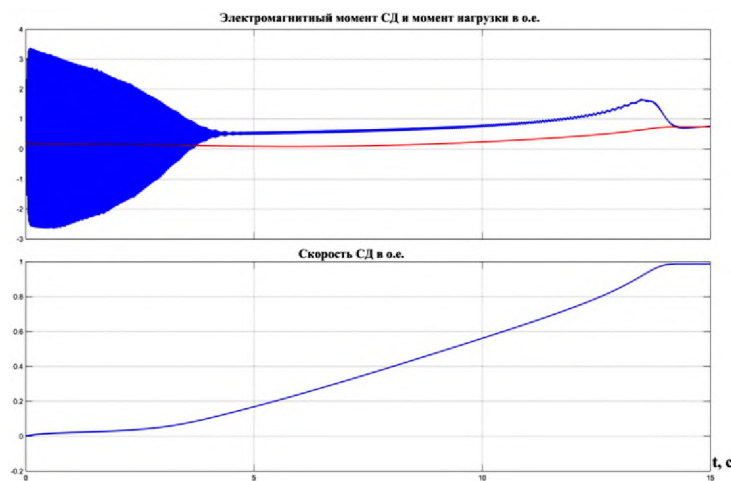


Рис. 6. Графики параметров переходных процессов при прямом пуске СД серии ВДС2-325/69-16

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Fig. 6. Graphs of parameters of transient processes during direct start of SM series VDS2-325/69-16

Графики рисунка 6 показывают, что электромагнитный момент СД при прямом пуске имеет знакопеременный характер, и продолжительность пуска составляет более 15 секунд, что соответствует паспортным данным СД данного типа и класса. Знакопеременный характер электромагнитного СД при прямом пуске приводит к вибрации и затягиванию разгона ротора двигателя, которого хорошо видно на рисунке 6 во втором окне диаграмм скорости СД.

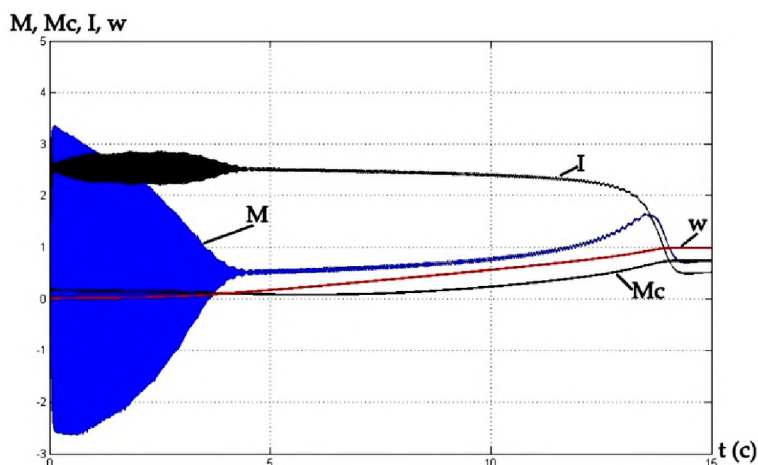


Рис. 7. Графики параметров переходных процессов действующего значения тока и момента при прямом пуске СД серии ВДС2-325/69-16

Fig. 7. Graphs of the parameters of transient processes of the effective value of current and torque during direct starting of the SM series VDS2-325 / 69-16

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Результаты моделирования (рисунки 6 и 7) показывают, что пусковой ток двигателя (кривая I) превышает номинальное значение более чем в 4 раза и составляет более 2.2 кА. Такое увеличение тока негативно влияет на все токопроводящие части электрооборудования НС. Кроме того, большие пусковые токи могут вызывать недопустимые провалы напряжения в сети и, тем самым, негативно влиять на установленные рядом с запускаемым СД агрегаты или электрооборудование НС в целом. Кривые M и Mc на рисунке 7 показывают изменения электромагнитного момента двигателя и момента сопротивления нагрузки. Кривая w показывает изменения скорости синхронного двигателя при прямом пуске.

С развитием силовой электроники стало возможным внедрение регулируемых ЭП в тех областях техники, где раньше требовались сверхсложные системы управления и значительные финансовые затраты. Внедрение современных систем в ЭП позволяет экономить электроэнергию и увеличивать технический ресурс электрооборудования. В настоящее время широкое применение получили ЭП с преобразователями частоты с элементами постоянного тока. В таких преобразователях на первом этапе переменный ток преобразуется в постоянный с помощью выпрямителя, а затем, на втором этапе, с помощью инвертора постоянный ток преобразуется в переменный. В большинстве случаев в таких преобразователях используют автономные инверторы напряжения, где регулируются напряжение и частота в сети. Однако установлено, что причиной негативных воздействий на электрооборудование являются большие значения токов при переходных процессах и при перегрузках. Поэтому задачи выбора систем плавного пуска для электродвигателей больших мощностей требует детальных исследований.

Перспективным способом плавного пуска высоковольтных ЭД является использование инверторов тока (ИТ) на базе тиристоров, где на выходе преобразователя формируется ток определенной формы, но форма напряжения будет, зависит только от нагрузки [8, 11]. Регулирование или ограничение тока при пусковых режимах ЭД является важной задачей, так как ток является одним из основных, воздействующих параметров на условия пуска. Поэтому необходимо детально исследовать данный способ плавного пуска, чтобы выявить его возможности и преимущества. Первым этапом при проведении исследований является применение метода компьютерного моделирования, при помощи которого можно получить графики переходных процессов основных параметров ЭП, таких, как токи статора, скорость и электромагнитный момент двигателя.

Для выполнения компьютерного моделирования пуска электродвигателей при наличии в ЭП ИТ используем программу *MATLAB* версии R2013a. В первом случае моделирование выполняется для асинхронного двигателя (АД) насосной установки мощностью 1600 кВт. Разработанная компьютерная модель для исследования пускового режима АД при наличии в системе ЭП ИТ приведена на рисунке 8.

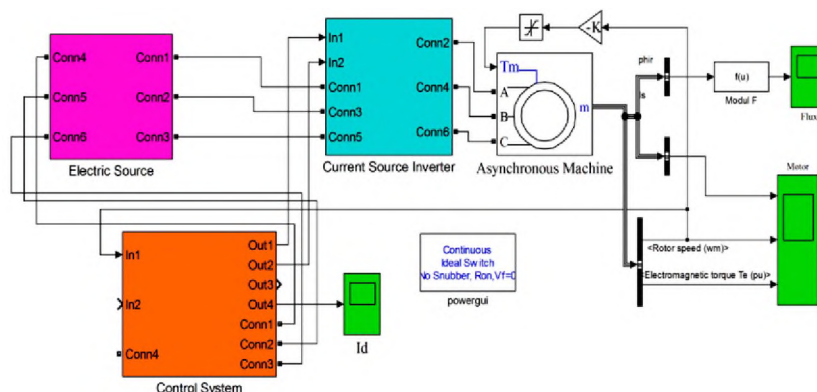


Рис. 8. Компьютерная модель для исследования пускового режима АД при наличии в схеме ЭП инвертора тока

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Fig. 8. Computer model for study of the starting mode of AM in the presence of CSI in the ED circuit

В модели (рис. 8) подсистемы *Electrical Source* и *Current Source Inverter* рассматриваются в качестве источника питания и ИТ, блок *Control System* является системой управления АД. Результаты моделирования показаны на рисунках 9 - 11.

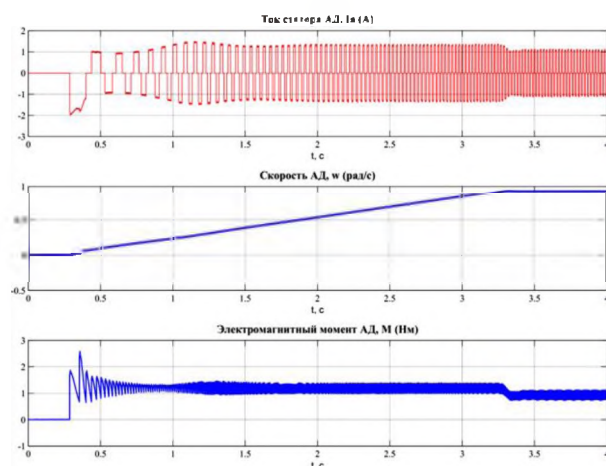


Рис. 9. Графики изменения параметров АД при пуске при наличии в схеме ЭП с ИТ

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Fig. 9. Graphs of changes in AM parameters at start-up in the presence of CSI in the ED circuit

Графики переходных процессов (рис. 9) АД при пуске с инвертором тока показывает, что пусковой ток практически устранен и составляет 1,33 кратное значение от номинального тока АД. Другой особенностью пуска АД с ИТ заключается в том, что полностью устранена знакопеременные колебания электромагнитного момента двигателя, что способствует уменьшения вибрации в машине и увеличению прочности ее механических частей.

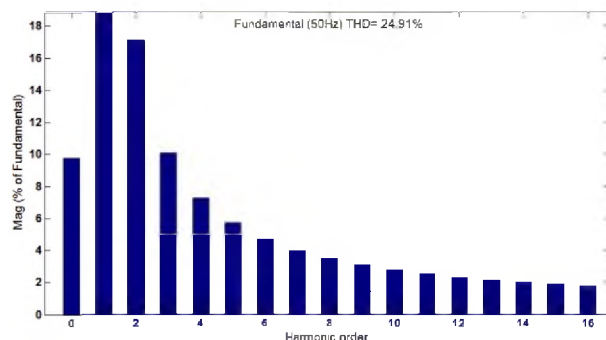


Рис. 10. Анализ гармонического состава тока фазы А при пуске с ИТ

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Fig. 10. Analysis of the harmonic content of phase A current at start with CSI

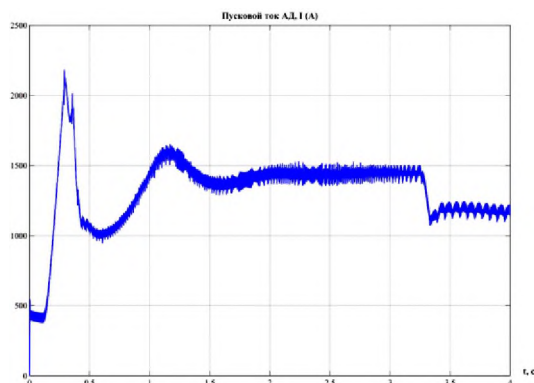


Рис. 11. Графики результирующего пускового тока переходного процесса АД для схемы ЭП с ИТ

Fig. 11. Graphs of the resulting starting current of the AM in transient process for the ED circuit with CSI

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Номинальный ток исследуемого АД составляет 1.2 кА и график рисунка 11 показывает, что максимальный кратковременный пусковой ток двигателя составляет примерно 2.2 кА, а текущие значения пускового тока не превышают 1.6 кА. Таким образом, максимальный кратковременный пусковой ток двигателя увеличился в 1.83 раза, а текущие пусковые токи в 1.33 раза относительно номинального значения тока. При этом, влияние ИТ на сеть питания соответствует требованиям стандартов и максимальное значение гармоник тока фазы А составляет 24.91% (рис. 10).

В мощных ОНС в качестве двигателей для НА обычно используют СД вертикального исполнения, где критериями для их выбора могут являться - вид пусковой характеристики, перегрузочная способность, электромагнитная совместимость и т.д. На рисунке 12 приведена компьютерная модель ЭП с СД, когда их пуск выполняется с помощью ИТ, результаты моделирования показаны на рисунках 13 и 14.

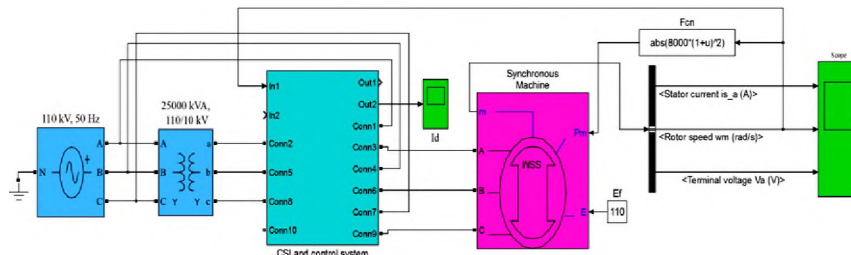


Рис. 12. Компьютерная модель электропривода с СД и ИТ

Fig. 12. Computer model of an electric drive with SM and CSI

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

В модели (рис. 12) подсистема CSI and control system играют роль инвертора тока и системы управления. Кроме этого в модели имеется источник электроэнергии и трансформатор с мощностью 25 МВА, а также синхронный двигатель (блоком Synchronous Machine).

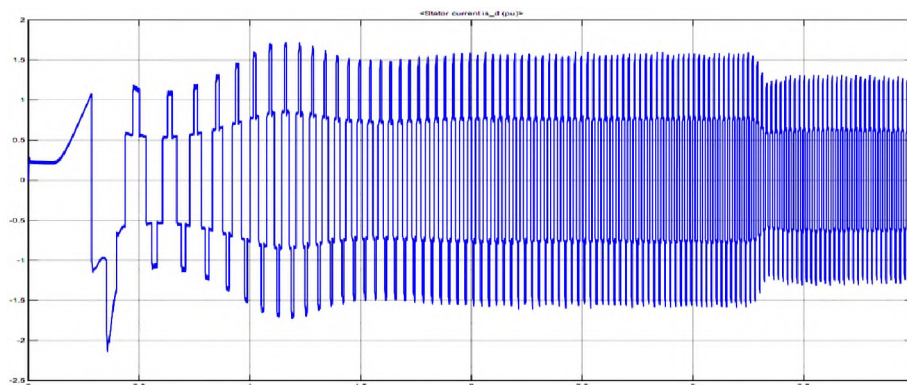


Рис. 13. Графики тока статора СД по оси d при пусковом режиме

Fig. 13. Graphs of the stator current of the SD along the d axis during the starting mode

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

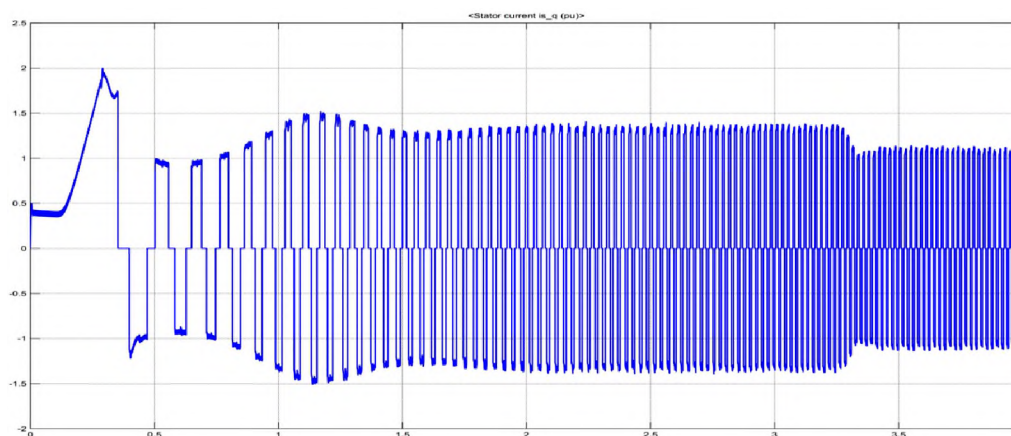


Рис. 14. Графики тока статора СД по оси q при пусковом режиме

Fig. 14. Graphs of the current of the SM stator along the q axis in the starting mode

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Моделирование параметров ЭП с СД выполнено в относительных единицах, в режиме пуска СД с ИТ получены следующие результаты: токи статора при пуске увеличились в 1,6 и 2 раза относительно номинального значения в рассматриваемых осях координат, скорость и момент СД изменились аналогично характеристикам АД (рисунок 9), что свидетельствует об эффективности использования способа пуска. По паспортным данным СД, при прямых пусках пусковые токи обычно составляют $4-8I_n$, при использовании УПП эти значения составляют примерно $3-8I_n$.

Выводы

Использование ПЧ на основе зависимого ИТ для плавного пуска двигателей крупных НА является эффективным техническим решением. Внедрение современных систем в ЭП НА позволяет экономить электроэнергию и увеличить технический ресурс электрооборудования. Основные выводы работы заключаются в следующем:

1. В настоящее время широкое применение получили ПЧ с элементами постоянного тока, где на первом этапе переменный ток преобразуется в постоянный с помощью выпрямителя, а затем, на втором этапе, с помощью инвертора постоянный ток преобразуется в переменный.
2. Использование УПП в качестве средства плавного пуска ЭД является эффективным, при случае если регулирования скорости не требуется.
3. Перспективным способом пуска высоковольтных ЭД является использование ИТ, где на выходе преобразователя формируется ток определенной формы.
4. Применение ПЧ на основе ИТ целесообразно для ЭП с двигателями большой мощности также в случае необходимости обеспечения режима рекуперации электроэнергии в сеть.
5. Плавный пуск ЭД с глубоким регулированием пускового тока способствует к увеличению технического ресурса электрооборудования и надежности его работы.

Литература

1. Нейман З.Б. и др. Крупные вертикальные электродвигатели переменного тока. - М.: Энергия, 1974. 375 с. ил.
2. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. - М.: Энергия, 1972. 240 с. ил.
3. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоудных установках. - М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с. ил.
4. Ларионов В.Н., Калинин А.Г. Энергоэффективность и энергосбережение в электроприводах с вентиляторной нагрузкой. - Чебоксары: Изд-во. Чуваш. Ун-та, 2012. - 146 с.
5. Калинин, А.Г. Исследование и разработка энергоэффективных режимов электроприводов в системах электроснабжения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Чебоксары 2011.

6. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах/ А. Д. Поздеев – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. - 172 с.
7. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац; пер. с нем. – М. Л.: Госэнергоиздат, 1963. - 735 с.
8. Дадабаев Ш.Т., Грачева Е.И. Техничко-экономическое обоснование применения системы плавного пуска для высоковольтных электродвигателей насосных агрегатов. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 1. С. 141-150.
9. Дадабаев Ш.Т. Моделирование режимов пуска высоковольтного синхронного электропривода с устройством плавного пуска. В сборнике: САПР и моделирование в современной электронике. Сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции. Под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. 2017. С. 91-94.
10. Дадабаев Ш.Т. Компьютерное моделирование нагрева синхронных электроприводов насосных агрегатов при различных способах пуска. В сборнике: Перспективные информационные технологии (ПИТ 2017). труды Международной научно-технической конференции. 2017. С. 76-80.
11. Дадабаев Ш.Т. Компьютерное моделирование инвертора тока используемое для пуска высоковольтных электродвигателей. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 2. С. 370-375.
12. Дадабаев Ш.Т. Обзор и оценка способов управления насосными установками. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. № 12. С. 28-30.
13. Сафин А.Р., Хуснутдинов Р.Р., Копылов А.М., и др. Разработка метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма. Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. № 4 (40). С. 77-85.
14. Tsvetkov A.N., Kornilov V.Yu., Safin A.R., et al. An experimental bench for the study of electric drives of a horsehead pump // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems (JARDCS) ISSN: 1943-012X, Volume-12, 05 - SPECIAL ISSUE. 2020. pp. 1294-1298. (DOI: 10.5373/JARDCS/V12SP5/20201888)
15. Dadabaev S.T., Dadabaeva Z.A., Gracheva E.I. Study of starting transition processes of asynchronous motor at a lowered mains voltage frequency. Sustainable Energy Systems: innovative perspectives. Conference proceedings. Сер. "Lecture Notes in Civil Engineering" 2021. С. 206-213.
16. Petrov T.I., Safin A.R. Modification of the synchronous motor model for topological optimization. E3S Web of Conferences, 2020, 178, 01016
17. A. Safin, A. Kopylov, R. Gibadullin, et al. Thermal Model of a Linear Electric Machine, 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2019, pp. 426-428. (DOI: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947532)
18. Дадабаев Ш.Т., Грачева Е.И., Каримов И.Р., Валтчев С. Исследование пусковых режимов асинхронных двигателей при низком качестве электроэнергии питающей сети. Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 1 (49). С. 3-15.
19. Грачева Е.И., Алимова А.Н., Абдуллазянов Р.Э. Анализ и способы расчета потерь активной мощности и электроэнергии в низковольтных цеховых сетях. Вестник КГЭУ 2018. № 4 (40). С. 53-65.
20. P. C. Sen, Principle of Electric Machines and Power Electronics, 3rd Edition, Wiley, 2013.
21. Тошходжаева М.И., Ходжиев А.А. Математическая модель влияния природных и эксплуатационных факторов на надёжность ВЛЭП-110 кВ в условиях резко континентального климата. Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. № 1 (45). С. 71-81.
22. Gracheva E.I., Naumov O.V. Estimation of Power Losses in Electric Devices of the Electrotechnical Complex. - International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), (2019). – 6.
23. Nevelsteen, J. & Aragon, H., Starting of Large Motors – Methods and Economics, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No. 6, pp. 1012-1018, November/December 1989.
24. Tolibjonovich D.S., Islomovna T.M., Saidulloevna M.D. (2020). Modeling of starting transition processes of asynchronous motors with reduced voltage of the supply network.

European Journal of Electrical Engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 23-28.
<https://doi.org/10.18280/ejee.220103>

25. Gracheva E.I., Toshkhodzhaeva M., Rahimov O., et al. Modeling the reliability of high-voltage power transmission lines taking into account the influence of the parameters of a sharply continental climate. International Journal of Technology. 2020. T. 11. № 8. С. 1557-1569.

Авторы публикации

Дадабаев Шахбоз Толибджонович – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение и Автоматика» Худжандского политехнического института Таджикского технического Университета имени академика М.С. Осими, г. Худжанд, Таджикистан.

Абдуллазянов Эдвард Юнусович – ректор Казанского государственного энергетического университета.

Грачева Елена Ивановна – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Neyman ZB. *Krupnyye vertikal'nyye elektrodvigateli peremennogo toka*. - M.: Energiya, 1974. 375 s. il.
2. Onishchenko GB, Yun'kov MG. *Elektroprivod turbomekhanizmov*. - M.: Energiya, 1972. 240 s. il.
3. Leznov BS. *Energosberezheniye i reguliruyemyy privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovok*. - M.: Energoatomizdat, 2006. 360 s. il.
4. Larionov VN, Kalinin AG. *Energoeffektivnost' i energosberezheniye v elektroprivodakh s ventilyatornoy nagruzkoy*. – Cheboksary: Izd-vo. Chuvash. Un-ta, 2012. – 146 s.
5. Kalinin AG. *Issledovaniye i razrabotka energoeffektivnykh rezhimov elektroprivodov v sistemakh elektrosnabzheniya*. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Cheboksary 2011.
6. Pozdeyev AD. *Elektromagnitnyye i elektromekhanicheskiye protsessy v chastotno-reguliruyemykh asinkhronnykh elektroprivodakh* / A. D. Pozdeyev – Cheboksary: Izd-vo Chuvash. un-ta, 1998. - 172 p.
7. Kovach KP. *Perekhodnyye protsessy v mashinakh peremennogo toka* / K. P. Kovach, I. Rats; per. s nem. – M. L.: Gosenergoizdat, 1963. - 735 p.
8. Dadabaev ST, Gracheva E.I. Tekhniko-ekonomicheskoye obosnovaniye primeneniya sistemy plavnogo puska dlya vysokovol'tnykh elektrodvigateley nasosnykh agregatov. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2022;24(1):141-150.
9. Dadabaev ST. *Modelirovaniye rezhimov puska vysokovol'tnogo sinkhronnogo elektroprivoda s ustroystvom plavnogo puska*. V sbornike: SAPR i modelirovaniye v sovremennoy elektronike. Sbornik nauchnykh trudov I Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Pod red. L.A. Potapova, A.YU. Drakina. 2017. pp. 91-94.
10. Dadabaev ST. *Komp'yuternoye modelirovaniye nagreva sinkhronnykh elektroprivodov nasosnykh agregatov pri razlichnykh sposobakh puska*. V sbornike: Perspektivnyye informatsionnyye tekhnologii (PIT 2017). trudy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. 2017. pp. 76-80.
11. Dadabaev S.T. Komp'yuternoye modelirovaniye invertora toka ispol'zuyemoye dlya puska vysokovol'tnykh elektrodvigateley. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskoye nauki*. 2019;2:370-375.
12. Dadabaev ST. Obzor i otsenka sposobov upravleniya nasosnymi ustanovkami. *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont*. 2013;12:28-30.
13. Safin AR, Khusnutdinov RR, Kopylov AM, et al. Razrabotka metoda topologicheskoy optimizatsii elektricheskikh mashin na osnove geneticheskogo algoritma. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2018;4 (40):77-85.
14. Tsvetkov AN, Kornilov VYu, Safin AR, et al. An experimental bench for the study of electric drives of a horsehead pump. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control*

Systems (JARDCS). ISSN: 1943-012X, V.12, 05 - SPECIAL ISSUE. 2020. pp. 1294-1298. (DOI: 10.5373/JARDCS/V12SP5/20201888).

15. Dadabaev ST, Dadabaeva ZA, Gracheva EI. *Study of starting transition processes of asynchronous motor at a lowered mains voltage frequency*. Sustainable Energy Systems: innovative perspectives. Conference proceedings. «Lecture Notes in Civil Engineering». 2021. pp. 206-213.

16. Petrov TI, Safin AR. *Modification of the synchronous motor model for topological optimization*. E3S Web of Conferences, 2020, 178, 01016.

17. Safin A, Kopylov A, Gibadullin R. *Thermal Model of a Linear Electric Machine*, 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2019, pp. 426-428. (doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947532).

18. Dadabaev ST, Gracheva EI, Karimov IR, et al. *Issledovaniye puskovykh rezhimov asinkhronnykh dvigateley pri nizkom kachestve elektroenergii pitayushchey seti*. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. 2021;13:1 (49):3-15.

19. Gracheva EI, Alimova AN, Abdullazyanov RE. *Analiz i sposoby rascheta poter' aktivnoy moshchnosti i elektroenergii v nizkovol'tnykh tsekhovykh setyakh*. Vestnik KGEU 2018;4 (40):53-65.

20. Sen P.C. *Principle of Electric Machines and Power Electronics*, 3rd Edition, Wiley, 2013.

21. Toshkhodzhaeva MI, Khodzhiyev AA. *Matematicheskaya model' vliyaniya prirodnnykh i ekspluatatsionnykh faktorov na nadozhnost' VLEP-110 kV v usloviyakh rezko kontinental'nogo klimata*. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. 2020;12:1 (45):71-81.

22. Gracheva EI, Naumov OV. *Estimation of Power Losses in Electric Devices of the Electrotechnical Complex*. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), (2019). 6.

23. Nevelsteen J. & Aragon H. *Starting of Large Motors – Methods and Economics*, IEEE Transactions on Industry Applications, V. 25, No. 6, pp. 1012-1018, November/December 1989.

24. Tolibjonovich DS, Islomovna TM, Saidulloevna M.D. (2020). Modeling of starting transition processes of asynchronous motors with reduced voltage of the supply network. *European Journal of Electrical Engineering*, 2022;1:23-28. <https://doi.org/10.18280/ejee.220103>

25. Gracheva EI, Toshkhodzhaeva M, Rahimov O, et al. Modeling the reliability of high-voltage power transmission lines taking into account the influence of the parameters of a sharply continental climate. *International Journal of Technology*. 2020;11(8):1557-1569.

Authors of the publication

Shakhboz T. Dadabaev –Khujand Polytechnic Institute of the Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Khujand, Tajikistan.

Edvard Yu. Abdullazyanov – Kazan State Power Engineering University.

Elena I. Gracheva –Kazan State Power Engineering University.

Шифр научной специальности:

2.4.2. *Электротехнические комплексы и системы (технические науки)*

Смежные специальности в рамках группы научной специальности:

2.4.5 *Энергетические системы и комплексы (технические науки)*

Получено

07.02.2023г.

Отредактировано

21.02.2023г.

Принято

28.02.2023г.