

Математическая модель погружного асинхронного двигателя как электротехнического комплекса

*О.В. Архипова, Р.А. Чертов, А.В. Денисенко, М.А. Крохалев,
Э.И. Хусаинов, Е.С. Балыклов*

Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

Аннотация: Объектом исследования данной статьи является погружной асинхронный электродвигатель привода центробежного насоса, широко применяемый для механизированного подъема пластовой жидкости из нефтяных скважин. Показана важность данного класса электрических машин на современном этапе развития нефтедобычи и в ближайшей перспективе. Обоснована актуальность разработки уточненных математических моделей, учитывающих особенности конструкции электродвигателя и режимов его эксплуатации. Выполнен обзор существующих моделей электродвигателя и их ограничений. Обозначен круг задач, потенциально решаемых с помощью уточненной модели. Сформулированы основные требования к уточненной математической модели и принимаемые допущения. Выявлены основные проблемы и определены задачи, которые необходимо решить для практического применения предлагаемой модели.

Ключевые слова: погружной электродвигатель, ЭЦН, пакет ротора, математическая модель, тепловые процессы.

Добыча нефти является одной из важнейших отраслей экономики нашей страны. Количество продуктивных скважин стабильно увеличивается и уже превысило 150 000 штук. Основным процессом добычи пластовой жидкости в России является механизированный подъем. Фонд скважин, оборудованных установками электроцентробежных насосов (УЭЦН), за последние 10 лет вырос на 50%, почти до 100 000 единиц, а число скважин, эксплуатируемых с помощью штанговых глубинных насосов (ШГН) снизилось на 21%, примерно до 45 000 единиц. Доля скважин, эксплуатируемых с помощью других, в том числе более современных и перспективных технологий, остается относительно небольшой в связи с их высокой стоимостью или неготовностью соответствующей инфраструктуры. Десять лет назад УЭЦН занимали 51% общего фонда, сейчас — 66%, и это долговременная тенденция, вызванная необходимостью обеспечить высокие значения отбора из скважин во все более сложных геологических условиях.

По итогам 2017 года в России с помощью УЭЦН был добыт 81% от общего объема добытой нефти [1].

Отдельно нужно отметить, что средний межремонтный период (МРП) фонда нефтяных скважин за этот период увеличился на 50%, почти до 800 суток. Позитивная тенденция увеличения МРП характерна для всех крупных нефтяных компаний. В значительной степени, указанных показателей удалось добиться благодаря применению современных интеллектуальных технологий проектирования и подбора оборудования, вывода системы «пласт-скважина-УЭЦН» на режим, мониторинга параметров работы и прогнозированию состояния оборудования.

Однако, в средне- и долгосрочной перспективе необходимо учитывать, что традиционные нефтегазоконденсатные месторождения на территории основных нефтяных регионов России истощаются. Постепенно растет обводненность, что приводит к повышению удельного расхода энергии на единицу добытой нефти и, как следствие, к росту себестоимости добычи. В значительной степени это касается и основного по объему добычи региону – Западной Сибири, которая обеспечивает более 57% всей нефти.

Ведущие нефтегазодобывающие компании и научные центры готовятся к промышленному освоению новых, не традиционных месторождений, в частности, Баженовской свиты и месторождений арктического шельфа. В новых геологических и эксплуатационных условиях иные требования будут предъявляться и к используемому добывающему оборудованию, в первую очередь к наиболее массовому и не имеющему реальных альтернатив – УЭЦН. Как правило этот тип электрооборудования работает в режиме непрерывных нагрузок в вязких субстанциях, находящихся глубоко под землей в нестационарном тепловом режиме [2].

Добиться снижения затрат и сокращения сроков внедрения новых методов эксплуатации ПЭД в составе УЭЦН, снизить риски возникновения

аварийных ситуаций при проведении натурных экспериментов возможно с помощью предварительного математического моделирования на всех этапах работ. Успех математического моделирования в первую очередь зависит от адекватности применяемых математических моделей исследуемым процессам и точности определения параметров моделей [3].

Целями данной работы являются анализ существующих моделей ПЭД и сфер их применения, выявление имеющихся недостатков и ограничений, формулирование требований к уточненной модели и потенциала ее применения.

Как правило, ПЭД представляет собой асинхронный трёхфазный двухполюсный двигатель переменного тока специальной конструкции с короткозамкнутым ротором. ПЭД заполнен маловязким маслом, которое выполняет функции смазки подшипников ротора и отвода тепла к стенкам корпуса двигателя, а также препятствует проникновению в двигатель пластовой жидкости.

Конструктивные особенности ПЭД определяются, в первую очередь, соотношением габаритных размеров – большой длиной и малым внешним диаметром (габаритом), ограничиваемым внутренним диаметром обсадной колонны. Стандартные ПЭД выпускаются с габаритом от 95 мм до 185 мм и диапазоном номинальной мощности от 8 кВт до 400 кВт. При этом длина электродвигателя составляет от 2 м до 10 м. В случае, если для привода насоса требуется большая мощность, применяются многосекционные двигатели мощностью более 1 МВт и общей длиной свыше 25 м. Номинальное напряжение питания ПЭД составляет от 380 В до 4,5 кВ и более.

Характерные особенности эксплуатации ПЭД, в первую очередь, связаны с условиями окружающей среды в зоне его работы – высокая температура пластовой жидкости (до 160 °С) и ее агрессивный химический

состав, высокое давление. Особенностью теплового режима работы ПЭД, помимо высокой температуры пластовой жидкости, является малая площадь наружной поверхности корпуса, с которой осуществляется отвод тепла – выполнить корпус оребренным не позволяют габариты обсадной колонны. Сопротивление теплопередаче на границе «корпус – пластовая жидкость» возрастает в процессе эксплуатации при появлении отложений на корпусе двигателя. Кроме того, необходимо отметить характер нагрузки, определяемый режимом работы приводимого центробежного насоса. В связи с неоднородностью перекачиваемой среды, высоким содержанием свободных и растворенных газов и наличием механических примесей, момент сопротивления может быстро меняться в широких пределах, вплоть до полного заклинивания вала. В следствие всех перечисленных факторов, двигатель подвергается значительному перегреву при максимальных нагрузках и в аварийных режимах. Перегрев обмоток является наиболее частой причиной отказов ПЭД [5].

Совокупность конструктивных и эксплуатационных особенностей ПЭД приводит к таким специфическим явлениям, как значительная неравномерность нагрева отдельных секций ротора и соответствующих их участков статора. На рисунке 1 приведены результаты тепловизионного обследования ротора ПЭД, извлеченного из двигателя непосредственно после длительной работы в режиме холостого хода.

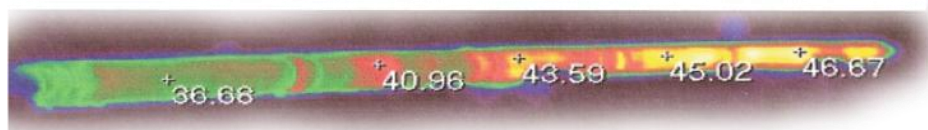


Рис. 1. – Термограмма ротора ПЭД

Очевидно, что разброс температур пакетов ротора от 36,68 °С до 46,67 °С является следствием либо различных условий охлаждения вдоль оси ПЭД,

либо разбросом параметров пакетов ротора, либо сочетанием обоих факторов. Различная температура пакетов, в свою очередь, приводит к неравномерному изменению активных сопротивлений обмоток, влияющих на вклад каждого пакета в рабочие характеристики ПЭД.

Таким образом, математическая модель ПЭД, в общем случае, должна учитывать перечисленные конструктивные особенности двигателя и описывать как установившиеся, так и динамические режимы работы электродвигателя. Кроме того, помимо традиционного описания механических и электромагнитных процессов, особое внимание должно уделяться тепловым процессам [6,7].

Для описания процессов электромеханического преобразования в ПЭД традиционно используется классическая T- или Г-образная схема замещения [7,8] (рис. 2). Данный подход не учитывает в полной мере особенности конструкции ПЭД, что частично компенсируется используемыми методами идентификации параметров схемы замещения [9].

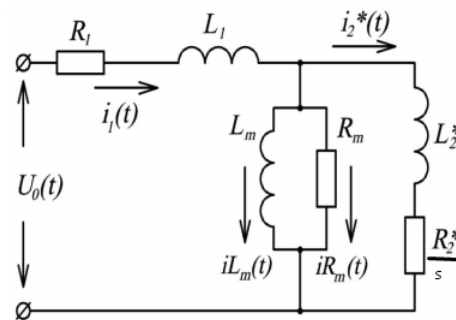


Рис. 2. – T-образная схема замещения АД с параллельным контуром намагничивания: R_1 , R_2^* , R_m - активное сопротивление обмотки статора, сопротивление активных потерь в магнитопроводе, приведенное активное сопротивление обмотки ротора; L_1 , L_2^* , L_m - индуктивности рассеяния обмотки статора, обмотки ротора, индуктивность намагничивания; s – скольжение

Расчетный метод определения величины сопротивлений по паспортным и справочным данным, применяемый для асинхронных

двигателей общепромышленного назначения, как правило, не применим в случае ПЭД, т.к. в справочниках, не приводятся значения перегрузочной способности двигателя, являющейся одной из величин, необходимых для расчета. Существует алгоритм приближенного вычисления значения сопротивлений, в котором исходными величинами являются только каталожные данные ПЭД [10]. Погрешность данного метода оценивается авторами в $\pm 10\%$ и выше.

Более точный экспериментальный метод определения параметров в классической реализации требует применения специализированного испытательного стенда, включающего в себя нагрузочный центробежный насос, крупногабаритные емкости для погружения оборудования в жидкость, мощный источник электроэнергии.

В связи с этим, перспективной видится методика экспериментального определения параметров схемы замещения, использующая интегральное преобразование затухающего тока обмотки статора и экспоненциальную аппроксимацию его переходной характеристики [11] и некоторые другие [12-14].

Независимо от способа и точности определения эквивалентных значений сопротивлений, моделирование ПЭД с помощью методов, основанных на классической схеме замещения АД не обеспечивает требуемый уровень детализации процессов энергопреобразования в, фактически, секционированном электродвигателе.

Для учета указанных особенностей считаем целесообразным взять за основу модель асинхронного двигателя в естественных координатах и дополнить ее, учитывая индивидуальные условия работы каждой «секции» или, точнее «элементарной машины». С этой целью введем в модель величину температуры каждой «элементарной машины» $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$. В таком случае, представленная в [15] пространственная модель ПЭД

приобретет вид, приведенный на рисунке 3. Соответствующая данной модели система уравнений в естественной системе координат имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi}{dt} = U - RI, \\ \Psi = MI, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(M_E - M_C), \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega, \\ M_E = \frac{dW_E}{d\gamma}, \\ W_E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [\Psi_{A_i A_i} i_{A_i} + \Psi_{B_i B_i} i_{B_i} + \Psi_{C_i C_i} i_{C_i} + \Psi_{a_i a_i} i_{a_i} + \Psi_{b_i b_i} i_{b_i} + \Psi_{c_i c_i} i_{c_i}]. \end{cases}$$

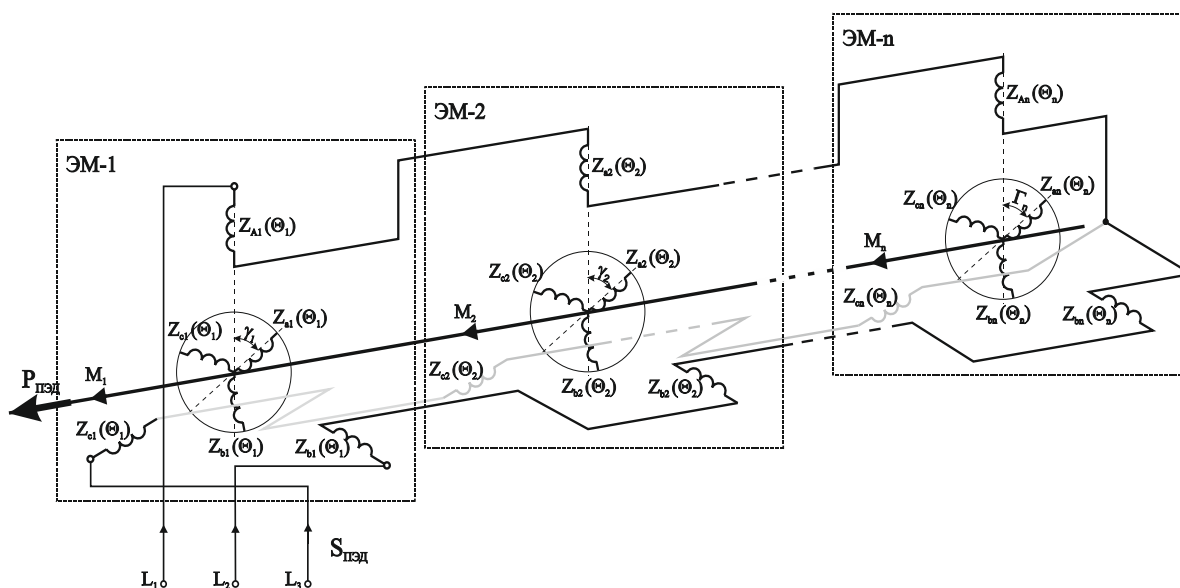


Рис. 3. – Пространственная модель ПЭД с учетом секционирования и индивидуальной температуры

В целях верификации предложенного подхода к построению математической модели ПЭД были произведены расчеты переходных процессов ПЭД при провале напряжения на 50% различной длительности. Длительности провала напряжения увеличивались с шагом 0.05 с. Провал напряжения наступал спустя 0.6с. после пуска электродвигателя. Базовые значения параметров расчетной математической модели соответствуют работе [15]. На этапе верификации принимались допущения о симметричности магнитной и электрической систем. Результаты приведены на рисунках 4,5,6.

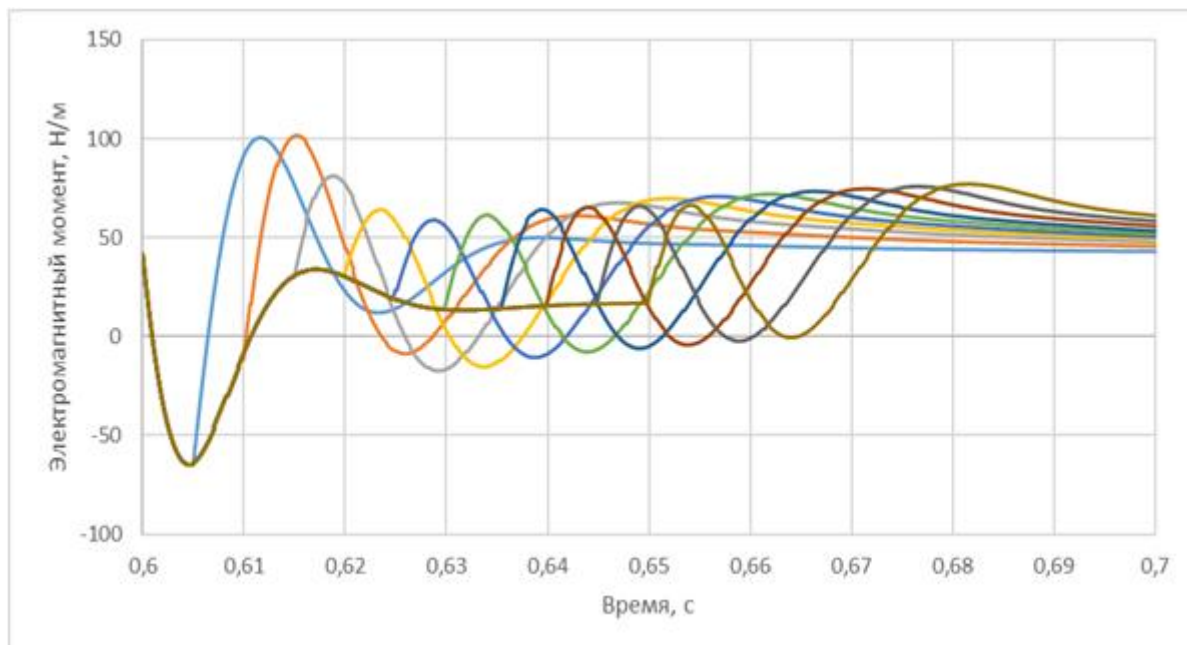


Рис.4. – Суммарный электромагнитный момент ПЭД

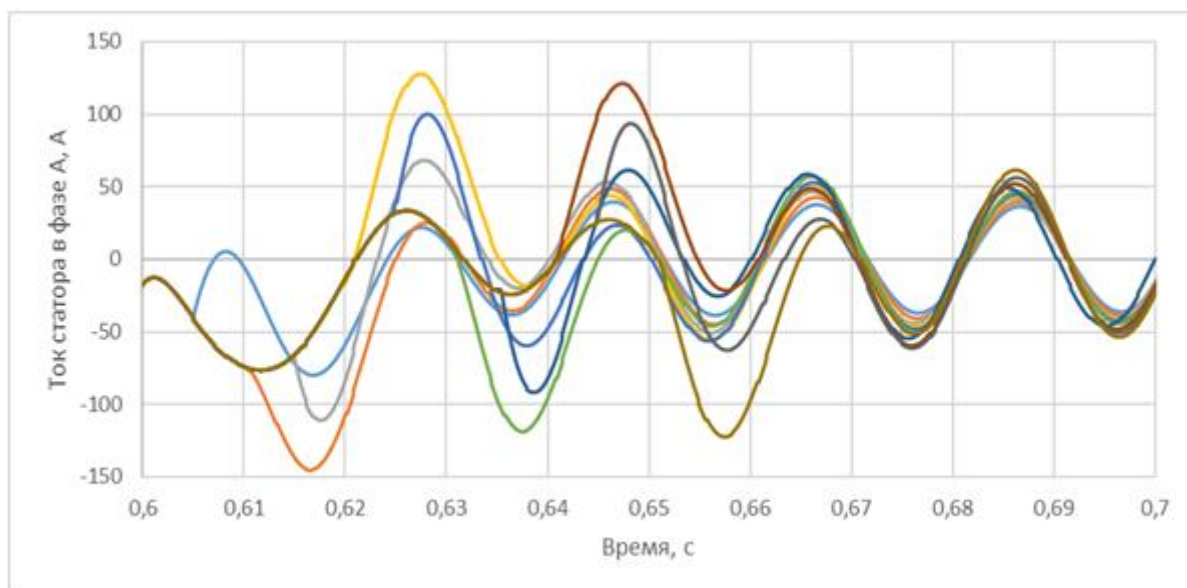


Рис.5. – Ток статора ПЭД

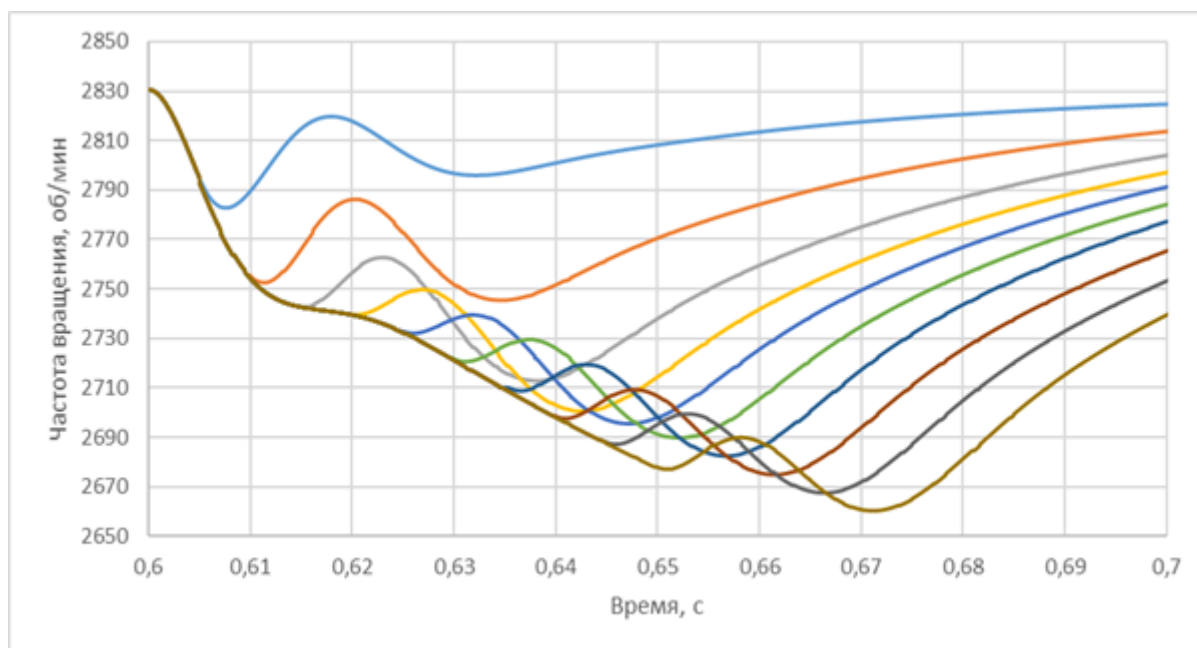


Рис.6. – Частота вращения ротора ПЭД

Заключение. Разработанная математическая модель позволяет представлять и анализировать погружной электродвигатель, как совокупность взаимодействующих и взаимовлияющих элементарных электрических машин – что соответствует понятию электротехнический комплекс. Причем, в общем случае элементарные электрические машины имеют различные значения собственных параметров. Данное представление погружного электродвигателя позволяет анализировать влияние внутренних тепловых процессов на общее состояние электрической машины и прогнозировать ее межремонтный период. Верификация модели показала ее соответствие основным теоретическим положениям, описывающим работу погружного электродвигателя в скважине.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства ХМАО — Югры в рамках научного проекта № 18-47-860017.

Литература

1. Международная практическая конференция "Механизованная добыча-2018" // Экспертный Совет по механизированной добыче нефти. URL: pumpsovet.com/upload/ctatya_pressreliz_md_2018_oil&gas_journal_№5_2018.pdf (дата обращения: 11.12.2020г).
2. Anikin V.V., Kuznetsov Ye.M. Determining computational aspects of submersible electric centrifugal pump installations electric motors parameters // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016. 16602427. pp. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819034.
3. Зюзев А.М., Метельков В.П. О проблеме перегрева обмотки ротора асинхронных двигателей в пусковых режимах высокоинерционных электроприводов нефтегазовой и горной промышленности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. №7. С. 96-103.
4. Караневская Т.Н., Шумихин А.Г. Оптимизация технологических режимов при управлении процессами промысловой подготовки нефти // Инженерный вестник Дона, 2019, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5917.
5. Шурыкин А.А., Полуянович Н.К. Оценка математического ожидания ресурса изоляции в задачах повышения надежности электрооборудования // Инженерный вестник Дона, 2019, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5756.
6. Ковшевный А.А., Лисиенко В.Г. Математическое моделирование объекта управления для систем контроля температуры // Инженерный вестник Дона, 2020, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2020/6581.
7. Метельков В.П., Зюзев А.М., Черных И.В. Система оценки остаточного ресурса изоляции обмотки асинхронного двигателя на основе

емкостных токов утечки // Электротехнические системы и комплексы. 2019. №1 (42). С. 53-58.

8. Масандилов Л.Б., Кураев Н.М. Применение Т-образной схемы замещения для расчета статических характеристик и анализа энергетических режимов асинхронного двигателя // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2018. №2. С. 80-86.

9. Мугалимов Р.Г., Храмшин Р.Я., Мугалимова А.Р. Сравнительный анализ методик расчета параметров электрических схем замещения асинхронных двигателей // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2016. Т.3. №1. С. 36-40.

10. Котенев В.И., Котенев А.В., Кочетков В.В. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по справочным данным // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2016. №6. С. 13-17.

11. Глазырин А.Н., Аникин В.В., Буньков Д.С., Антяскин Д.И., Старцева Ю.Н., Ковалев В.З., Хамитов Р.Н., Кладиев С.Н., Филипас А.А. Нелинейное алгебраическое оценивание индуктивности вибрационного электромагнитного активатора по кривой затухания тока // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, №1. С. 148-157.

12. Солодкии Е.М., Даденков Д.А., Костыгов А.М. Параметрическая идентификация асинхронного двигателя на основе алгоритма фазовой автоподстройки частоты // Электротехника. 2018. №11. С. 53-57.

13. Павлюков В.А., Ткаченко С.Н. Совершенствование методов идентификации параметров эквивалентных схем замещения широкополосных асинхронных двигателей // Электричество. 2018. №10. С. 54-60.

14. Tytiuk V.K., Baranovskaya M.L., Chorny O.P., Burdilnaya E.V., Kuznetsov V.V., Bogatyriov K.N. Online-identification of electromagnetic

parameters of an induction motor // Energetika. Proceedings of cis Higher Education Institutions and Power Engineering Associations. 2020. Т.3. №5. pp. 423-440.

15. Ковалев В.З., Ковалев А.Ю., Чертов Р.А. Математическое моделирование электропогружных установок как электротехнических комплексов // Динамика систем, механизмов и машин. 2004. №1. С. 251-253.

References

1. Ekspertnyy Sovet po mekhanizirovannoy dobyche nefi [The Expert Council for the mechanized production of oil] URL: pump-sovet.com/upload/ctatya_press-reliz_md_2018_oil&gas_journal_№5_2018.pdf (accessed: 11/12/2020).

2. Anikin V.V., Kuznetsov Ye.M. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016. 16602427. pp. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819034.

3. Zyuzev A.M., Metel'kov V.P. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2018. №7. pp. 96-103.

4. Karanevskaya T.N., Shumikhin A.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5917.

5. Shurykin A.A., Poluyanovich N.K. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5756.

6. Kovshevnyy A.A., Lisiyenko V.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2020/6581.

7. Metel'kov V.P., Zyuzev A.M., CHernyh I.V. Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы. 2019. №1 (42). pp. 53-58.

8. Masandilov L.B., Kurayev N.M. Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta. Vestnik MEI. 2018. №2. pp. 80-86.

9. Mugalimov R.G., Hramshin R.YA., Mugalimova A.R. Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal. 2016. Т.3. №1. pp. 36-40.



10. Kotenev V.I., Kotenev A.V., Kochetkov V.V. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika. 2016. №6. pp. 13-17.
11. Glazyrin A.N., Anikin V.V., Bun'kov D.S., Antyaskin D.I., Starceva YU.N., Kovalev V.Z., Hamitov R.N., Kladiyev S.N., Filipas A.A. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2020. T. 331, №1. pp. 148-157.
12. Solodkii E.M., Dadenkov D.A., Kostygov A.M. Elektrotekhnika. 2018. №11. pp. 53-57.
13. Pavlyukov V.A., Tkachenko S.N. Elektrichestvo. 2018. №10. S. 54-60.
14. Tytiuk V.K., Baranovskaya M.L., Chorny O.P., Burdilnaya E.V., Kuznetsov V.V., Bogatyriov K.N. Energetika. Proceedings of cis Higher Education Institutions and Power Engineering Associations. 2020. T.3. №5. pp. 423-440.
15. Kovalev V.Z., Kovalev A.Yu., Chertov R.A. Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. 2004. №1. pp. 251-253.