

Н.М. Шайтор, Б.А. Якимович

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ ПРИ ЗАТОПЛЕНИИ

Аннотация. Анализируются технологии подводной электромеханики, позволяющие увеличить надежность и эффективность электродвигателей осушительных станций, препятствующих затоплению объектов. В основу исследования положено изучение тепловых явлений, так как изоляция обмоток электрических машин чувствительна к температурам и является наиболее уязвимым элементом. Показано, что основным условием эффективного исследования температурных режимов и предупреждения последствий перегрева электрической изоляции двигателей в различных условиях эксплуатации является применение системного подхода при представлении сложных организационно-технических систем в виде взаимосвязанных функциональных подсистем, объединяющих в своем составе математическое описание различных физических явлений и процессов. На основе методологии системного подхода и функционального моделирования разработана структурно-функциональная модель имитации работающего под водой асинхронного электрического привода. Она позволяет обеспечивать возможность выбора наиболее рациональных температурных режимов работы, осуществлять предупреждение перегрева и сохранение ресурса электрической изоляции двигателей, работающих в воздушной подушке. Описаны структура и процесс функционирования модели электрического привода и тепловой модели асинхронного двигателя. Их основу составляют подсистемы моделей нагрузки непосредственно электрического двигателя, энергетических показателей, электротепловой модели, системы вентиляции и охлаждения, ресурса электрической изоляции. Разработанная модель позволяет определять температуру и прогнозировать достаточный ресурс системы изоляции с учетом характера нагрузки, параметров регулирования, способов охлаждения и глубины погружения. Результаты моделирования дают возможность принимать правильные управленческие решения, связанные с режимами эксплуатации электрических машин, работающих под водой в динамической воздушной подушке.

Ключевые слова: имитационная модель, погружные двигатели, подводная электромеханика, насосные станции.

N.M. Shaitor, B.A. Yakimovich

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MODELING OF THERMAL REGIMES OF ASYNCHRONOUS MOTORS IN AN AIR BAG DURING FLOODING

Abstract. An analysis is given of the technologies of underwater electromechanics, which make it possible to increase the reliability and efficiency of electric motors of pumping stations intended for draining flooded objects. The study is based on the study of thermal phenomena, since the insulation of the windings of electrical machines is sensitive to temperatures and is the most vulnerable element. Based on the methodology of the systems approach and functional modeling, a structural-functional model of imitation of an asynchronous electric drive operating under water is presented. It allows you to provide the ability to select the most rational temperature modes of operation, to prevent overheating of electrical insulation and to predict the service life of an electric motor. The structure and process of functioning of the electric drive model and the thermal model of the induction motor are described. They are based on the subsystems of load models, the electric motor itself, energy indicators, the electrothermal model, ventilation and cooling systems, and the resource of electrical insulation. It is concluded that the developed model makes

Шайтор Николай Михайлович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры возобновляемых источников энергии и электрических систем и сетей. Севастопольский государственный университет, город Севастополь. Сфера научных интересов: электротехнические системы, моделирование электромеханических структур, системный анализ. Автор более 90 опубликованных научных работ.
Электронный адрес: shaytor1950@mail.ru

Якимович Борис Анатольевич

доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заведующий кафедрой возобновляемых источников энергии и электрических систем и сетей. Севастопольский государственный университет, город Севастополь. Сфера научных интересов: системный анализ и управление, автоматизация технологических процессов и производств, математическое моделирование, проектирование технических систем. Автор более 200 опубликованных научных работ.
Электронный адрес: yakimovich52@gmail.com

it possible to determine the temperature and predict the residual life of the insulation system, taking into account the nature of the load, control parameters, cooling methods and immersion depth. The simulation results make it possible to make the right management decisions related to the operating modes of electric machines operating under water in a dynamic air cushion.

Keywords: simulation model, submersible motors, underwater electromechanics, pumping stations.

Введение

Аварийное затопление судов и подземных шахт чревато большими человеческими жертвами, поэтому разработка электрических насосных установок, способных продолжать работу под водой до полного осушения затопленных объектов, решает актуальную проблему [11; 12; 19].

Целью исследования является разработка структурно-функциональной модели имитации затопленного асинхронного двигателя (далее – АД), работающего в воздушной подушке (см. Рисунок 1), для принятия управленческих решений, связанных с режимами эксплуатации осушительных установок.

Затопление АД связано с изменением физических факторов, которые по-разному влияют на тепловыделение, теплоотдачу и температуру электрических обмоток [3; 13; 21]. Применение системного подхода позволяет представить сложную организационно-техническую систему в виде взаимосвязанных функциональных подсистем (см. Рисунок 2), объединяющих в своем составе математическое описание различных физических явлений и процессов в АД [5; 8; 9; 15; 20].

Структурно-функциональная модель имитации работы АД под водой (см. Рисунок 2) соответствует варианту вентиляции, приведенному на Рисунке 1, з.

Конструктивная доработка для работы на значительных глубинах погружения обеспечивается созданием воздушной подушки за счет уплотнения корпуса АД, подачи сжатого воздуха внутрь плотной электрической полости и автоматического поддержания равенства давлений внутри и снаружи плотной полости [19; 21].

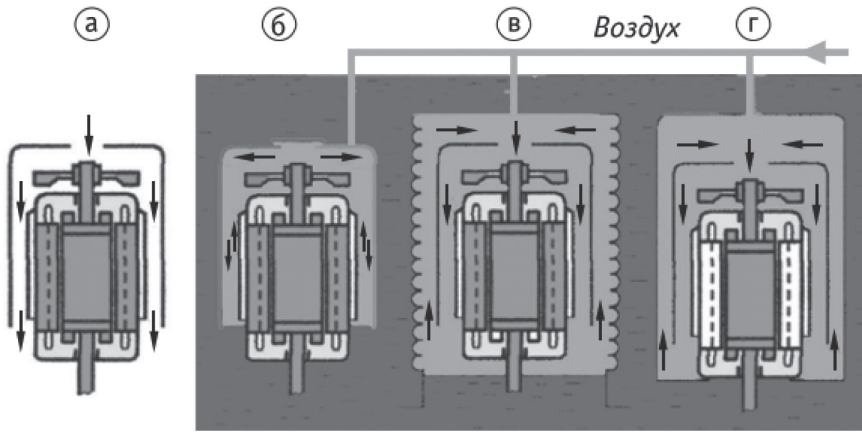


Рисунок 1. Вентиляция асинхронного двигателя: а – в нормальных условиях; б – в вентиляционном кожухе; в – в тубусе; г – в чехле

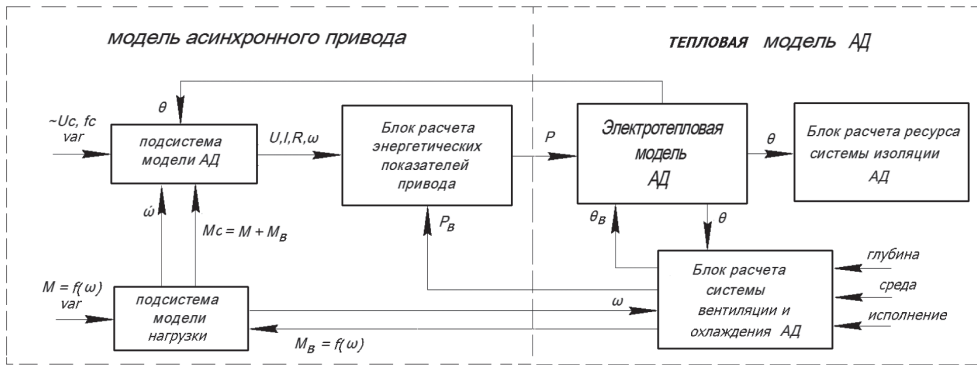


Рисунок 2. Структурно-функциональная модель имитации асинхронного двигателя под водой

Входными данными модели являются: момент на валу АД, напряжение и частота питающей сети, исполнение системы вентиляции, глубина погружения при соответствующем давлении воздуха. Модель электропривода представлена моделями АД, рабочего механизма и энергетических показателей [16; 17]. Тепловая модель включает электротепловую модель, модели вентиляции и охлаждения, ресурса системы изоляции. Она построена на методе эквивалентных тепловых схем (далее – ЭТС), которая хорошо сочетается с вентиляционным расчетом, так как опирается на критерии Рейнольдса (Re), Нуссельта (Nu), Тейлора (Ta). Полная ЭТС закрытого обдуваемого двигателя позволяет определить превышение температуры различных частей АД [1; 2; 18].

Моделирование тепловых режимов АД

Узловые точки ЭТС: ВН – вентилятор; ВВш – внешний воздух перед вентилятором, за ним и над станиной; К – станина (корпус); Рот – клетка и зубцовый слой ротора; ВВТ – внутренний воздух; Щ – щит. Внешняя вентиляционная сеть двигателя представлена узлами ВВщ, а внутренняя сеть – узлами ВВТ (см. Рисунок 3). Тепловыделение происходит в меди обмоток, расположенных в пазах статора (МП), в лобовых частях (МЛ), в стали

Структурно-функциональное моделирование тепловых режимов асинхронных двигателей ...

зубцов (З) и спинки (С) статора. В узлы МП, МЛ, З и С введены потери в пазовой и лобовой частях обмотки, в зубцах и спинке статора; узел ДП отвечает поверхности дна пазов. Узлы соединены соответствующими термическими сопротивлениями зубцов R_z , спинки R_c , паза R_n , лобовых частей R_l , аксиальной обмотки R_a .

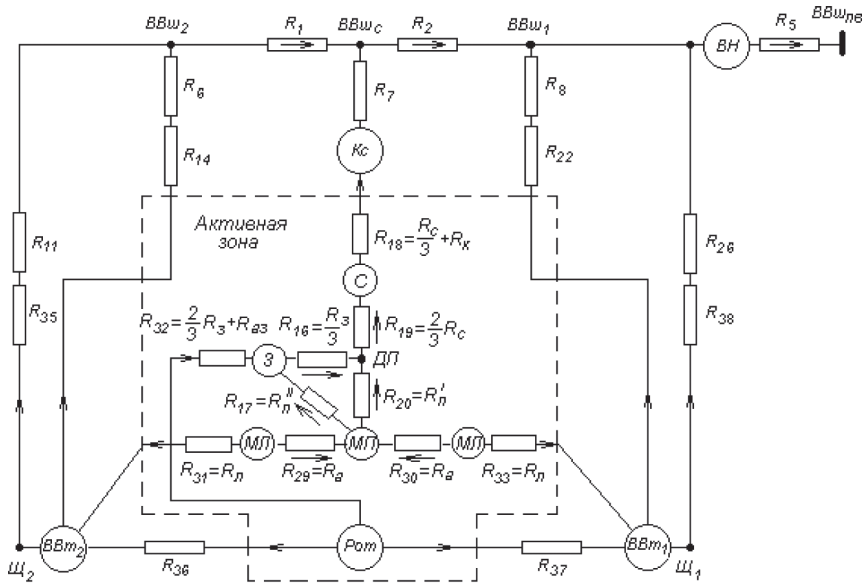


Рисунок 3. Полная ЭТС АД исполнения IP44

Теплота пазовых частей обмотки отводится к зубцам и дну паза через внутреннее сопротивление $R_{вт,н}$ и сопротивление пазовой изоляции $R_{и,н}$. Другая часть теплоты лобовых частей отводится к воздуху через сопротивления R_l , каждое из которых является суммой внутреннего сопротивления обмотки $R_{вт,л}$, сопротивления изоляции $R_{и,л}$ и конвективного сопротивления $R_{\alpha,л}$. К зубцам теплота поступает также через воздушный зазор от ротора через сопротивления $R_{\alpha,з}$, а от спинки в станину (корпус) – через контактное сопротивление R_k .

Источники тепла – это конструктивные элементы, где происходит потеря энергии. Электрические потери фазной обмотки определяются сопротивлением обмотки r и квадратом тока в ней I^2 :

$$\Delta P_E = I_2 r = I^2 \rho l / F, \tag{1}$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление; l – длина проводника; F – поперечное сечение проводника.

Магнитные потери связаны с перемагничиванием активной стали от основного потока электрической машины:

$$\Delta P_M = k_n (P / M)_{10/50} B^2 (f / 50)^{1,3} M, \tag{2}$$

где κ_n – поправочный коэффициент; $(P/M)_{10/50}$ – удельные потери в стали на единицу массы при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц; B – среднее значение индукции; f – частота; M – масса сердечника.

Вентиляционные потери определяются мощностью охлаждающего вентилятора как

$$\Delta P_V = Qp / \eta_c \eta_{об} \eta_{мех}, \quad (3)$$

где Q – расход воздуха; p – полное давление вентилятора; $\eta_c, \eta_{об}, \eta_{мех}$ – гидравлический, объемный, механический КПД соответственно.

Эквивалентной тепловой схеме из n узлов отвечает совокупность алгебраических уравнений

$$\sum_{k=1}^n a_{i,k} \Theta_k = \Delta P_i, \quad (4)$$

где $a_{i,k}$ – элементы матрицы, представленные термическими проводимостями ветвей ЭТС, Вт/К; Θ_k – температура узла k , К; ΔP_i – потери в узле i , Вт.

Потери в узлах состоят из двух видов потерь $\Delta P_i = \Delta P'_i + \Delta P_{i0}$: потерь, не зависящих от температуры, – $\Delta P'_i$; потерь, которые зависят от температуры, – ΔP_{i0} . Последние подсчитываются при температуре окружающей среды [7].

Диагональные элементы матрицы

$$a_{i,i} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n -a_{i,k} - \beta_i \Delta P_{i0} \quad (5)$$

учитывают зависимость потерь от температуры с помощью температурного коэффициента потерь β_i , 1/К.

Элементы матрицы за пределами диагонали обратно пропорциональны термическому сопротивлению с обратным знаком:

$$a_{i,k} |_{i \neq k} = -1 / R_{i,k}. \quad (6)$$

Физическими основаниями для условий, определяемых соотношениями (4)–(6), является энергетический баланс в узлах и ветвях эквивалентной тепловой схемы.

Термическое сопротивление каждого элемента определяет его материал, геометрию и скорость потока воздуха [14].

Элементы машины, передающие тепло путем теплопроводности и не являющиеся источниками тепловыделений, представляются в тепловых схемах термическими сопротивлениями вида

$$R_\lambda = \delta / \lambda S, \quad (7)$$

где δ – толщина плоской стенки элемента; λ – коэффициент теплопроводности материала при средней ожидаемой температуре; S – площадь, через которую проходит поток тепла.

Связи элементов машины с охладителем, где осуществляется передача тепла конвекцией, выражаются конвективными термическими сопротивлениями

$$R_\alpha = 1 / \alpha S, \quad (8)$$

где α – средний коэффициент теплоотдачи на поверхности площадью S .

Структурно-функциональное моделирование тепловых режимов асинхронных двигателей ...

Коэффициент теплоотдачи определяется числом Нуссельта и гидравлическим диаметром канала d_2 из уравнения

$$\alpha = Nu \cdot \lambda / d_2, \tag{9}$$

где $\lambda = 0,0276$ – коэффициент теплопроводности воздуха.

Критерий Нуссельта является неоднозначной функцией критерия Рейнольдса $Nu = f(Re)$, который представляет кинетическое подобие потоков или подобие полей скоростей в текущей вязкой среде:

$$Re = \bar{\omega} l_0 / \nu, \tag{10}$$

где $\bar{\omega}$ – условная скорость перемещения среды, в качестве которой принимается средняя скорость потока; ν – кинематический коэффициент вязкости охлаждающей среды.

Критерии подобия Re и Nu вычисляются по характерным значениям параметров. При течении в каналах таким параметром l_0 является гидравлический диаметр $d_2 = 4F / \Pi$, где F – площадь сечения канала, Π – его периметр.

Гидродинамика в воздушном зазоре δ с учетом вращения ротора дополнительно оценивается числом Тейлора (Ta), $Nu = f(Re, Ta)$:

$$Ta = Re_{\omega} \sqrt{\delta / r_2} = \omega r_2^{0,5} \delta^{1,5} / \nu, \tag{11}$$

где r_2 – радиус ротора; δ – зазор между статором и ротором.

Температура в каждом узле, составляющем электрическую машину, находится с помощью системы алгебраических уравнений (9)–(11).

Результаты и обсуждение

Результаты расчета термических сопротивлений двигателя АО2-31-2 номинальной мощностью 3 кВт даны в Таблице 1, а превышения средних температур – в Таблице 2.

Таблица 1

Термические сопротивления элементов двигателя

№ п/п	Расчетные термические сопротивления полной ЭТС	Обозначение	Сопротивление, К/Вт
1	Воздуха над станиной (сторона привода)	R1	0,0083
2	Воздуха над станиной (сторона вентилятора)	R2	0,0079
3	Воздуха на входе в вентилятор	R5	0,0077
4	Наружный воздух – «свисающая» станина	R6=R8	0,227
5	Наружный воздух – станина над пакетом	R7	0,115
6	Наружный воздух – щит (сторона привода)	R11	0,719
7	Внутренний воздух – «свисающая» станина	R14=R22	4,509
8	Зубцы статора	R16	0,0096
9	Пазовая часть обмотки статора – зубцы	R17	0,181
10	Спинка сердечника статора – станина	R18	0,0245
11	Спинка сердечника статора – зубцовая зона	R19	0,023

Продолжение таблицы 1

12	Обмотка статора – дно пазов	R20	1,752
13	Наружный воздух – щит (сторона вентилятора)	R26	0,436
14	Лобовая – пазовая части обмоток статора	R29=R30	0,0472
15	Внутренний воздух – лобовая часть обмотки	R31=R33	0,937
16	Ротор – воздушный зазор – сердечник статора	R32	0,1554
17	Внутренний воздух – подшипниковый щит	R35=R38	0,267
18	Внутренний воздух – ротор	R36=R37	0,772

Таблица 2

Превышение средней температуры элементов двигателя АО2-31-2

№ п/п	Элементы тепловой схемы двигателя	Обозначения	Превышение температуры, $\Delta\theta$ °С
1	Лобовая часть обмотки статора	$\Delta\theta_{м, л}$	75,93
2	Пазовая часть обмотки статора	$\Delta\theta_{м, п}$	74,53
3	Ротор асинхронного двигателя	$\Delta\theta_{рот}$	207,9
4	Сердечник статора двигателя	$\Delta\theta_{с, ст}$	36,37
5	Внутренний воздух двигателя	$\Delta\theta_{в, вт}$	62,56
6	Корпус асинхронного двигателя	$\Delta\theta_{к}$	44,98
7	В среднем по обмотке статора	$\Delta\theta_{м}$	80,87

Натурным испытаниям в воздушной подушке под давлением подвергались электрические двигатели, технические характеристики которых приведены в Таблице 3.

Таблица 3

Технические характеристики исследуемых двигателей

Тип двигателя	Напряжение, В	Сила тока, А	Частота тока, Гц	Полезная мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	cosφ	КПД, %	Предельно допустимая температура, °С
АО2-31-2	220/380	11/6,1	50	3,0	2880	0,89	84,5	120
АОМШ-21-2	380	1,75	50	0,7	2790	0,88	66	180
АОМШ-22-4	380	2,14	50	0,7	1370	0,8	66	180

АД нагружался в воздушной камере с постоянной температурой и установленным давлением. Нагрузка в длительном режиме регулировалась с помощью электромагнитного тормоза, установленного на валу двигателей [4; 6; 10].

Измерялось давление воздуха (P_a), потребляемая из сети мощность P (кВт), электрический ток I (А), скорость вращения n (об/мин), превышение температуры изоляции лобовой части обмоток $\Delta\theta$ (°С) над температурой окружающей среды θ (°С). Давление воздуха поднималось до значения 11×10^5 Па, что соответствует рабочей глубине погружения более 100 м. По результатам исследований, представленных на Рисунке 4, можно произве-

сти анализ зависимостей изменений тепловых режимов двигателей от давления внешней среды и нагрузки.

С ростом давления P_a улучшается конвективный теплообмен и охлаждение, поэтому температура перегрева $\Delta\theta$ ($^{\circ}\text{C}$) снижается. При синхронной частоте вращения до 1500 об/мин это способствует использованию АД АОМШ-22-4 с перегрузкой в 1,5 ... 2 раза.

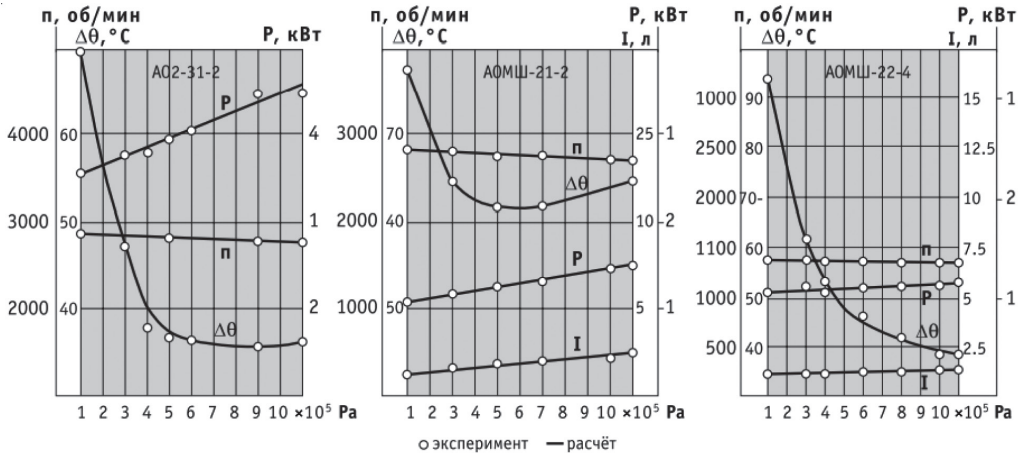


Рисунок 4. Результаты исследования АД

Одновременно растет кинематическая вязкость воздуха, потери на вентиляцию и дополнительный нагрев, что характерно для АД с синхронной частотой вращения 3000 об/мин (АО2-31-2, АОМШ-21-2). При повышении давления до 1,1 мПа (глубина более 100 м) потребляемая мощность АД АО2-31-2 возрастает на 30 %, а АД АОМШ-21-2 – на 40 %. При давлениях 0,3 ... 0,5 мПа температура перегрева $\Delta\theta$ ($^{\circ}\text{C}$) этих АД замедляет снижение, а при 0,6 ... 0,8 мПа начинает возрастать. Поэтому при частотах вращения более 1500 об/мин на глубине свыше 50 ... 60 м рекомендуется снижение нагрузки для соблюдения температурного режима и сохранения ресурса изоляции.

Выводы

Промышленные электрические машины способны надежно работать на значительных глубинах при соответствующей доработке их конструкции. Теоретическая имитационная модель позволяет достоверно определять и прогнозировать температурные режимы асинхронных двигателей, работающих в воздушной подушке на различных глубинах затопления. Полученные результаты являются основанием для принятия решений о нагрузочных режимах эксплуатации затопленных насосных установок для осушения объектов и сохранения ресурса электрической изоляции приводных двигателей.

Литература

1. Беспалов В.Я., Мощинский Ю.А., Цуканов В.И. Упрощенная математическая модель нестационарного нагрева и охлаждения обмотки статора асинхронного двигателя // Электричество. 2003. № 4. С. 20–26.
2. Борисенко А.И., Костиков А.И., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.

3. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2001. 430 с.
4. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин. М.: Высшая школа, 2000. 255 с.
5. Еришов М.С., Феоктистов Е.А. Модели и алгоритмы прогнозирования нагрева асинхронного двигателя при изменении режимов его работы // Электротехника. 2021. № 11. С. 82–90.
6. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. Ленинград: Энергоатомиздат, 1984. 408 с.
7. Зюзев А.М., Метельков В.П. Учет влияния колебаний температуры обмотки статора на термический ресурс асинхронного двигателя // Электротехника: сетевой электронный научный журнал 2015. Т. 2, № 1. С. 62–71.
8. Козлов Н.Д., Семенова Ю.В. Моделирование режимов работы асинхронного электропривода с частотным регулированием в среде SIMULINK // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2020. № 2 (53). С. 81–85.
9. Копырин В.А., Смирнов О.В. Имитационное моделирование режимов работы погружного асинхронного электродвигателя // Омский научный вестник. 2018. № 1 (157). С. 58–62.
10. Лихачев В.А. Электродвигатели асинхронные. М.: СОЛОН-Р, 2002. 304 с.
11. Овчинников Н.П. О причинах низкой эксплуатационной надежности секционных насосов подземных кимберлитовых рудников // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 2. С. 63–67.
12. Потапов А.В. Энциклопедия выживания на море. СПб.: Политехника, 2012. 310 с.
13. Сарачева Д.А., Вахитова Р.И., Уразаков К.Р. Зависимость теплового состояния электроцентробежного насоса от частоты вращения двигателя // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 12. С. 03–110.
14. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. М.: Высшая школа, 1989. 239 с.
15. Третьяков А.С., Капионов О.А. Моделирование тепловентиляционных режимов работы асинхронных электродвигателей при питании от синусоидального источника напряжения // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2018. № 2 (73). С. 66–73.
16. Хитров А.И., Хитров А.А. Определение параметров электромеханической модели асинхронного двигателя // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Технические науки. 2019. № 9. С. 31–39.
17. Чекунов К.А. Теория судового электропривода. Ленинград: Судостроение, 1982. 336 с.
18. Шайтор Н.М., Велияев А.С. Расчет и анализ температурных полей асинхронных двигателей // Энергетические установки и технологии. 2021. Т. 7, № 2. С. 112–118.
19. Шайтор Н.М., Якимович Б.А. Инновационные технологии подводной электромеханики // Энергия: экономика, техника, экология. 2021. № 11. С. 22–29.
20. Mazurenko L.I., Vasylyv K.M., Dzhura O.V. (2018) Mathematical model and working regimes of induction motors operating within thermal power stations. Technical Electrodynamics, No. 4, pp. 79–83.
21. Shaitor N. and Więcek D. (2021) Protection of industrial electrical machines from flooding in mines. Acta Montanistica Slovaca, vol. 26 (3), pp. 555–565.

References

1. Bepalov V.Ya., Moshchinskiy Yu.A., Tsukanov V.I. (2003) *Uproshhennaja matematicheskaja model' nestacionarnogo nagreva i ohlazhdenija obmotki statora asinhronnogo dvigatelja* [Simplified mathematical model of non-stationary heating and cooling of the stator winding of an asynchronous motor]

- cal model of non-stationary heating and cooling of the stator winding of an asynchronous motor]. *Elektrichestvo*, No. 4, pp. 20–26 (in Russian).
2. Borisenko A.I., Kostikov A.I., Yakovlev A.I. (1983) *Okhlazhdenie promyshlennykh elektricheskikh mashin* [Cooling of industrial electrical machines]. Moscow, Energoatomizdat Publishing, 296 p. (in Russian).
 3. Gol'dberg O.D., Gurin Ya.S., Sviridenko I.S. (2001) *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow, Vysshaya Shkola Publishing, 430 p. (in Russian).
 4. Gol'dberg O.D. (2000) *Ispytaniya elektricheskikh mashin* [Electrical machine testing]. Moscow, Vysshaya Shkola Publishing, 255 p. (in Russian).
 5. Yershov M.S., Feoktistov Ye.L. (2021) *Modeli i algoritmy prognozirovaniya nagreva asinkhronnogo dvigatelya pri izmenenii rezhimov yego raboty* [Models and algorithms for predicting the heating of an asynchronous motor when changing its operating modes]. *Elektrotehnika*, No. 11, pp. 82–90 (in Russian).
 6. Zherve G.K. (1984) *Promyshlennyye ispytaniya elektricheskikh mashin* [Industrial testing of electrical machines]. Leningrad, Energoatomizdat Publishing, 408 p. (in Russian).
 7. Zyuzev A.M., Metel'kov V.P. (2015) *Uchet vliyaniya kolebaniy temperatury obmotki statora na termicheskiy resurs asinkhronnogo dvigatelya* [Accounting for the influence of temperature fluctuations in the stator winding on the thermal resource of an induction motor]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, vol. 2, No. 1, pp. 62–71 (in Russian).
 8. Kozlov N.D., Semenova Yu.V. (2020) *Modelirovaniye rezhimov raboty asinkhronnogo elektroprivoda s chastotnym regulirovaniyem v srede SIMULINK* [Simulation of operating modes of an asynchronous electric drive with frequency regulation in the CITILINK environment]. *Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii im. P. A. Solov'yeva*, No. 2 (53), pp. 81–85 (in Russian).
 9. Kopyrin V.A., Smirnov O.V. (2018) *Imitatsionnoye modelirovaniye rezhimov raboty pogruzhnogo asinkhronnogo elektrodvigatelya* [Simulation modeling of operating modes of a submersible asynchronous electric motor]. *Omskiy nauchnyy vestnik*, No. 1 (157), pp. 58–62 (in Russian).
 10. Likhachev V.L. (2002) *Elektrodvigateli asinkhronnyye* [Asynchronous electric motors]. Moscow, SOLON-R, 304 p. (in Russian).
 11. Ovchinnikov N.P. (2019) *O prichinakh nizkoy ekspluatatsionnoy nadezhnosti sektionnykh nasosov podzemnykh kimberlitovykh rudnikov* [On the reasons for the low operational reliability of sectional pumps of underground kimberlite mines]. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin*, No. 2, pp. 63–67 (in Russian).
 12. Potapov A.V. (2012) *Entsiklopediya vyzhivaniya na more* [Encyclopedia of Survival at Sea]. St. Petersburg, Politehnika Publishing, 310 p. (in Russian).
 13. Saracheva D.A., Vakhitova R.I., Urzakov K.R. (2019) *Zavisimost' teplovogo sostoyaniya elektrosentrobezhnogo nasosa ot chastity vrashcheniya dvigatelya* [Dependence of the thermal state of the electric centrifugal pump on the engine speed]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, vol. 330, No. 12, pp. 103–110 (in Russian).
 14. Sipaylov G.A., Sannikov D.I., Zhadan V.A. (1989) *Teplovyye, gidravlicheskiye i aerodinamicheskiye raschety v elektricheskikh mashinakh* [Thermal, hydraulic and aerodynamic calculations in electrical machines]. Moscow, Vysshaya Shkola Publishing, 239 p. (in Russian).
 15. Tret'yakov A.S., Kapitonov O.A. (2018) *Modelirovaniye teploventilyatsionnykh rezhimov raboty asinkhronnykh elektrodvigatelye pri pitanii ot sinusoidal'nogo istochnika napryazheniya* [Simulation of thermal ventilation modes of operation of asynchronous electric motors when powered by a sinusoidal voltage source]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo*, No. 2 (73), pp. 66–73 (in Russian).

16. Khitrov A.I., Khitrov A.A. (2019) *Opredeleniye parametrov elektromekhanicheskoy modeli asinkhronnogo dvigatelya* [Determining the parameters of the electromechanical model of an induction motor]. *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye nauki*, No. 9, pp. 31–39 (in Russian).
17. Chekunov K.A. (1982) *Teoriya sudovogo elektroprivoda* [Theory of ship electric drive]. Leningrad, Sudostroyeniye Publishing, 336 p. (in Russian).
18. Shaytor N.M., Velilyayev A.S. (2021) *Raschet i analiz temperaturnykh poley asinkhronnykh dvigateley* [Calculation and analysis of temperature fields of asynchronous motors]. *Energeticheskiye ustanovki i tekhnologii*, vol. 7, No. 2, pp. 112–118 (in Russian).
19. Shaytor N.M., Yakimovich B.A. (2021) *Innovatsionnyye tekhnologii podvodnoy elektromekhaniki* [Innovative technologies of underwater electromechanics]. *Energiya: Ekonomika, Tekhnika, Ekologiya*, No. 11, pp. 22–29 (in Russian).
20. Mazurenko L.I., Vasyliv K.M., Dzhura O.V. (2018) Mathematical model and working regimes of induction motors operating within thermal power stations. *Technical Electrodynamics*, No. 4, pp. 79–83.
21. Shaitor N. and Więcek D. (2021) Protection of industrial electrical machines from flooding in mines. *Acta Montanistica Slovaca*, vol. 26 (3), pp. 555–565.