

Список литературы

1. Каракаев А. Б. Проблемы исследования электрокоммуникаций и обеспечение устойчивости кораблей и судов к авариям / А. Б. Каракаев, А. В. Луканин // Эксплуатация морского транспорта: ежекварт. сб. науч. ст. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2011. — № 2 (64).
2. Каракаев А. Б. Сущность понятия коммутационной контролепригодности судовых сетей электрооборудования судов / А. Б. Каракаев, А. В. Луканин // Эксплуатация морского транспорта: ежекварт. сб. науч. ст. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2012. — № 1 (67).
3. Каракаев А. Б. Основные методические вопросы анализа и синтеза контролепригодности систем сложной конструктивно-технической и организационной структуры на примере СЭЭС и ее элементов / А. Б. Каракаев, А. В. Луканин // Эксплуатация морского транспорта: ежекварт. сб. науч. ст. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2013. — № 2 (72).

УДК 629.12.066

В. М. Приходько,
канд. техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

И. В. Приходько,
аспирант,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРИ СУШКЕ СУДОВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ

MATHEMATICAL MODEL OF SHIP INDUCTION MOTORS DRYING BY ENERGY SAVING TECHNOLOGY

Предложено аналитическое определение параметров управляемого токового безразборного контрольного прогрева изоляции судовых асинхронных двигателей по разработанной структурной схеме с реализацией на ПЭВМ.

An analytical determination of parameters of the controlled current to control insulation heating of marine induction motors developed for the implementation of the block diagram on the PC is offered.

Ключевые слова: асинхронные двигатели, тиристорные преобразователи, тепловая схема замещения, температура, нагрев, обмотки статора, система дифференциальных уравнений.

Key words: induction motors, thyristor converters thermal equivalent circuit, temperature, heating of the stator winding, the system of differential equations.

В СООТВЕТСТВИИ с Федеральным законом «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ, а также с постановлением правительства Санкт-Петербурга «О повышении энергетической эффективности и энергосбережении» № 1257 от 11 ноября 2009 г. разработка эффективных методов, средств контрольного прогрева, подсушки, сушки, восстановления изоляционных систем, диагностики и интенсификации комплексных испытаний электрооборудования судов по энергосберегающей технологии в судостроении и судоремонте является для морского и речного флота актуальной проблемой, требующей специальных исследований.

Разработаны портативные универсальные тиристорные преобразователи с перестраиваемыми структурами силовых вентильных модулей для обеспечения ресурсосбережения, снижения затрат энергии, повышения эффективности, интенсификации и оптимизации технологических режимов процесса контрольного прогрева, подсушки, сушки, восстановления сопротивления изоляции увлажненных обмоток судового электрооборудования после зимнего отстоя речных судов, при судоремонте, а также в эксплуатационных условиях на водном транспорте [1, с. 282–298; 2, с. 44–45; 3, с. 17–24]. Для судостроения и судоремонта рекомендован инновационный способ безразборной сушки увлажненных обмоток судовых асинхронных двигателей (АД) электрическим током, управляемым энергосберегающими универсальными портативными тиристорными преобразователями с перестраиваемыми структурами силовых вентильных модулей [4; 5].

На основании проведенных исследований предложен новый способ пропитки обмоток судовых АД при одновременном нагреве пропитанных обмоток электрическим током, управляемым универсальными тиристорными преобразователями, и разработана инновационная технология пропитки–сушки статорных обмоток ремонтируемых АД в электроцехах судостроительно-судоремонтных предприятий [6, с. 1–11].

В электроцехах судостроительно-судоремонтных предприятий и на судах речного, морского, рыбопромыслового флотов в судовых эксплуатационных условиях качество перемотки статорных обмоток в технологическом процессе ремонта асинхронных двигателей можно оценить при нагреве неподвижных электродвигателей, когда в обмотки статоров подается постоянный ток, управляемый с помощью портативных универсальных тиристорных преобразователей [7, с. 30–35; 8, с. 14–19; 9, с. 13–15].

В этом случае можно просто, доступно, экономно, без дополнительных трудозатрат осуществить технологический процесс нагрева статорных обмоток АД и легко измерить температуру их в зависимости от времени.

Идентичность этого процесса нагрева по всем трем обмоткам статора, а также характер этого процесса позволит оценить качество пропитки статорных обмоток и межсекционных соединений, равенство витков обмоток каждой из фаз. Переходный тепловой режим АД можно описать системой дифференциальных уравнений, которые учитывают тепловые связи между частями АД, теплоемкости этих тел и потери в них, в том числе в режимах прогрева, подсушки и сушки [10].

Для судовых АД эта система дифференциальных уравнений соответствует тепловой схеме замещения (рис. 1) и имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\theta_1}{dt} C_1 + (\theta_1 - \theta_2) a_{12} + (\theta_1 - \theta_3) a_{13} + (\theta_1 - \theta_6) a_{16} &= P_1; \\ \frac{d\theta_2}{dt} C_2 + (\theta_2 - \theta_1) a_{12} + (\theta_2 - \theta_5) a_{25} &= P_2; \\ \frac{d\theta_3}{dt} C_3 + (\theta_3 - \theta_1) a_{13} + (\theta_3 - \theta_4) a_{34} &= P_3; \\ \frac{d\theta_4}{dt} C_4 + (\theta_4 - \theta_3) a_{34} + (\theta_4 - \theta_5) a_{45} &= P_4; \\ \frac{d\theta_5}{dt} C_5 + (\theta_5 - \theta_2) a_{25} + (\theta_5 - \theta_4) a_{45} + (\theta_5 - \theta_6) a_{56} &= 0; \\ \frac{d\theta_6}{dt} C_6 + (\theta_6 - \theta_5) a_{56} + \theta_6 a_{60} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

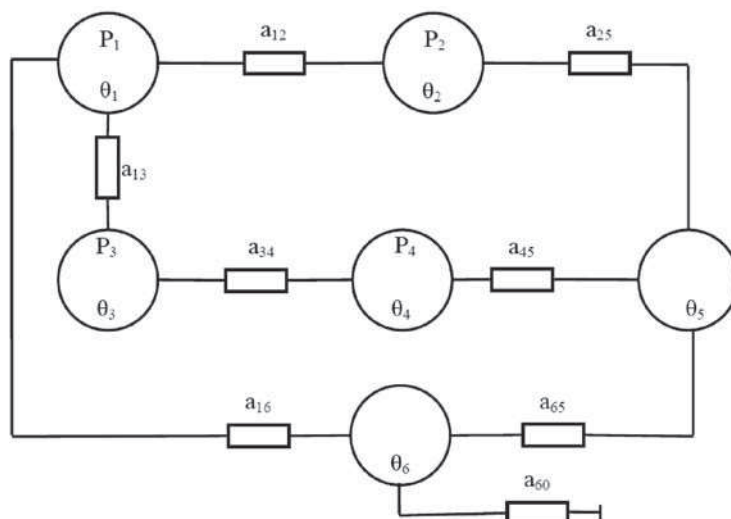


Рис. 1. Тепловая схема замещения судового асинхронного двигателя

В системе дифференциальных уравнений и на тепловой схеме замещения судового асинхронного двигателя:

- C_n — теплоемкости тел, Вт·с/град;
- a_{nk} — теплопроводности между телами, Вт/град;
- θ_n — превышение температуры тел, °К;
- P_n — мощность потерь в телах, Вт;
- 1 — магнитопровод статора;
- 2 — магнитопровод и обмотка статора;
- 3 — пазная часть обмотки статора;
- 4 — лобовая часть обмотки статора;
- 5 — внутренняя полость воздуха АД;
- 6 — корпус судового АД.

Решение системы дифференциальных уравнений с расчетом теплопроводностей, теплоемкостей и потерь в частях АД производится на ПЭВМ численным методом Эйлера.

Конечно-разностная система уравнений при расчете теплового процесса имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \theta_{1n} &= \theta_{1,n-1} + \frac{1}{C_1} (P_1 - \theta_1 A_{11} - \theta_2 A_{12} - \theta_3 A_{13} - \theta_6 A_{16}) \cdot h; \\ &\vdots \\ \theta_{kn} &= \theta_{k,n-1} + \frac{h}{C_k} (P_k - \sum_i \theta_{i,n-1} A_{ki}), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где h — шаг вычислений, с; A_{ki} — элементы матрицы коэффициентов при θ .

Величина шага по времени зависит от постоянных времени процесса, и его значение должно быть меньше самой малой постоянной времени системы. Оптимальное значение шага определяется опытным путем с учетом целесообразного упрощения системы уравнений (1), а также корректировкой по экспериментальным данным.

Следует отметить, что при нагреве постоянным по величине током необходимо учитывать изменение сопротивлений статорных обмоток. Это уточнение выполняется с помощью уравнений для обмоток статора:

$$\left. \begin{aligned} P_{3(k)} &= P_{3(0)} \left(1 + \frac{\theta_{3k}}{235 + t_{\text{окр}}} \right); \\ P_{4(k)} &= P_{4(0)} \left(1 + \frac{\theta_{4k}}{235 + t_{\text{окр}}} \right), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $t_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды; θ_k — превышение температуры на k -м шаге.

На рис. 2 и 3 даны экспериментальные и расчетные по (1) данные для АД типа 4АХ90Л4У3 номинальной мощностью, равной 2,2 кВт. Экспериментальные и расчетные данные с достаточной точностью совпадают. Однако необходима дальнейшая корректировка методики расчета с учетом экспериментальных данных, так как тепловые связи между статорной обмоткой и пакетом частей статора зависят от качества пропитки обмоток, которая может быть разной. Поэтому необходимо проводить дальнейшие исследования, чтобы уточнить достоверность характера процесса нагрева исправной обмотки.

При рассмотрении только качественной стороны теплового процесса в АД целесообразно упростить систему уравнений (1) таким образом, чтобы получить ее аналитическое решение.

Такое относительно простое решение получается, если рассматривать систему двух тел — обмотки статора и корпуса с магнитопроводом статора — с учетом теплоотдачи от корпуса и лобовых частей обмотки статора в окружающую среду.

Система дифференциальных уравнений для этого случая имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\theta_1}{dt} C_1 + (\theta_1 - \theta_2) a_{12} + \theta_1 a_{10} &= P_1; \\ \frac{d\theta_2}{dt} C_2 + (\theta_2 - \theta_1) a_{12} + \theta_2 a_{20} &= P_2, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где 1 — обмотка статора; 2 — магнитопровод и корпус статора; a_{10} , a_{20} — теплоотдача в окружающую среду от лобовых частей обмотки статора и корпуса, Вт/град.

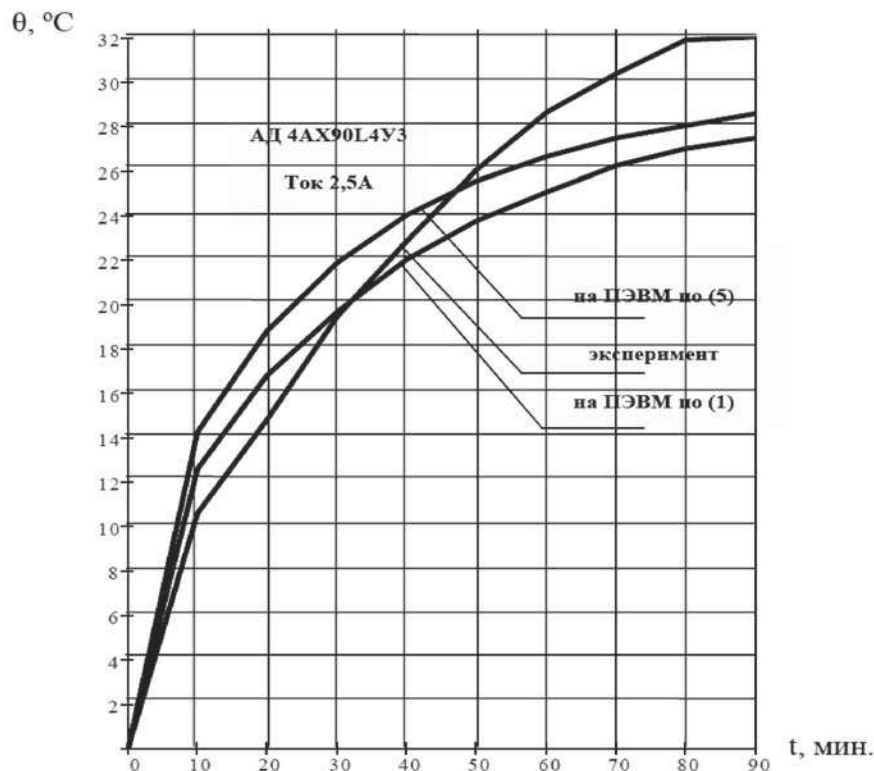


Рис. 2. Нагрев обмоток судового асинхронного двигателя постоянным током, регулируемым тиристорным преобразователем

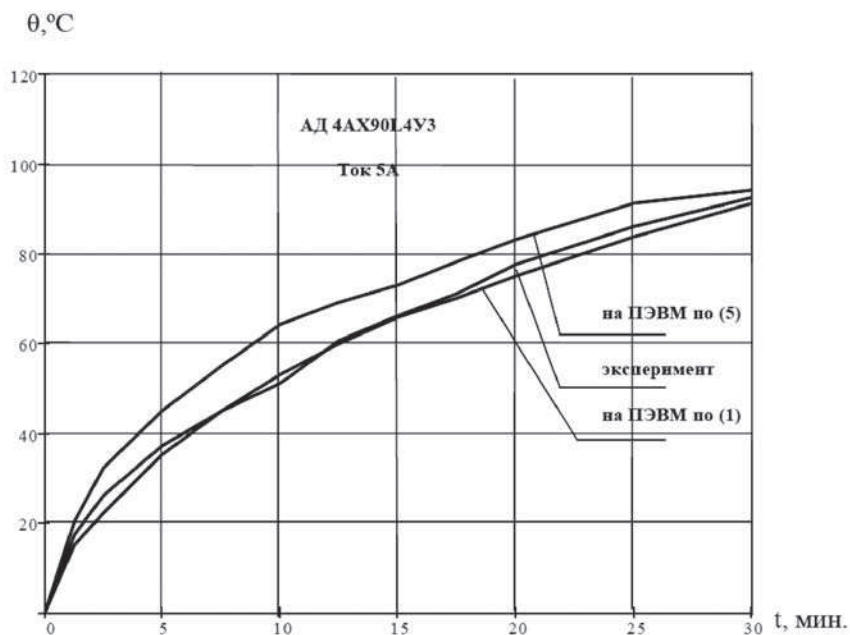


Рис. 3. Нагрев обмоток судового асинхронного двигателя постоянным током, регулируемым тиристорным преобразователем

Решение системы (4) следующее:

$$\begin{aligned}\theta_{1\text{уст}} &= \frac{P_1(a_{20} + a_{12})}{a_{10}a_{20} + a_{10}a_{12} + a_{20}a_{12}}, \text{ К}; \\ \theta_{2\text{уст}} &= \frac{P_1}{a_{20}} - \theta_{1\text{уст}} \frac{a_{10}}{a_{20}}, \text{ К}; \\ T_1 &\approx \frac{C_1}{a_{10} + a_{12}}, \text{ с}; \\ T_2 &\approx \frac{C_1(a_{10} + a_{12})}{a_{10}a_{20} + a_{10}a_{12} + a_{20}a_{12}}, \text{ с}; \\ \theta_{11} &= \frac{\frac{P_1}{C_1}T_1T_2 - \theta_{2\text{уст}}T_2}{T_1 - T_2}, \text{ К}; \\ \theta_{21} &= \frac{\frac{P_2}{C_1}T_1T_2 - \theta_{2\text{уст}}T_2}{T_1 - T_2}, \text{ К}; \\ \theta_{12} &= \theta_{1\text{уст}} - \theta_{11}, \text{ К}; \\ \theta_{22} &= \theta_{2\text{уст}} - \theta_{21}, \text{ К}; \\ \theta_1 &= \theta_{11}(1 - e^{-t/T_2}) + \theta_{12}(1 - e^{-t/T_1}), \text{ К}; \\ \theta_2 &= \theta_{21}(1 - e^{-t/T_2}) + \theta_{22}(1 - e^{-t/T_1}), \text{ К},\end{aligned}\tag{5}$$

где T_1, T_2 — постоянные времени процесса, с; $\theta_{1уст}, \theta_{2уст}$ — установившиеся превышения температуры, К.

На рис. 2 и 3 показаны кривые нагрева обмоток статора судового асинхронного двигателя постоянным током, регулируемым тиристорным преобразователем, в сравнении с опытными и расчетными данными по (1) и (5), где видно, что точность расчетов по (5) для больших токов ниже. Однако выражение (5) после соответствующей корректировки по опытным данным может служить основой для управления процессом нагрева АД в режиме прогрева, подсушки, сушки с помощью микропроцессора с учетом допустимой погрешности.

Для обеспечения ресурсосбережения, снижения энергетических затрат, повышения эффективности, интенсификации и оптимизации технологических режимов процесса прогрева, подсушки, сушки, восстановления сопротивления изоляции увлажненных обмоток судовых асинхронных двигателей после зимнего отстоя речных судов, при судоремонте, а также в эксплуатационных условиях на водном транспорте проведены исследования процессов внутреннего тепломассопереноса в увлажненной изоляционной системе при управляемом токовом нагреве статорных обмоток электродвигателей судового исполнения.

Теоретически обоснован и разработан инновационный энергосберегающий рациональный способ повышения эффективности и увеличения интенсивности токовой сушки изоляции отсыревших обмоток асинхронных двигателей при судоремонте на судостроительно-судоремонтных предприятиях.

В связи с тем, что за основу был принят способ сушки постоянным током, было проведено изучение электрических характеристик обмоток судовых асинхронных двигателей, получивших наибольшее распространение в отрасли водного транспорта.

На рис. 4 и 5 представлены экспериментальные характеристики нагрева обмоток статоров судовых асинхронных двигателей новой серии 4А номинальной мощностью 1,1 и 2,2 кВт, как в собранном виде, так и только одного статора, при пропускании через обмотки постоянного тока различного значения, управляемого тиристорным преобразователем переносного типа.

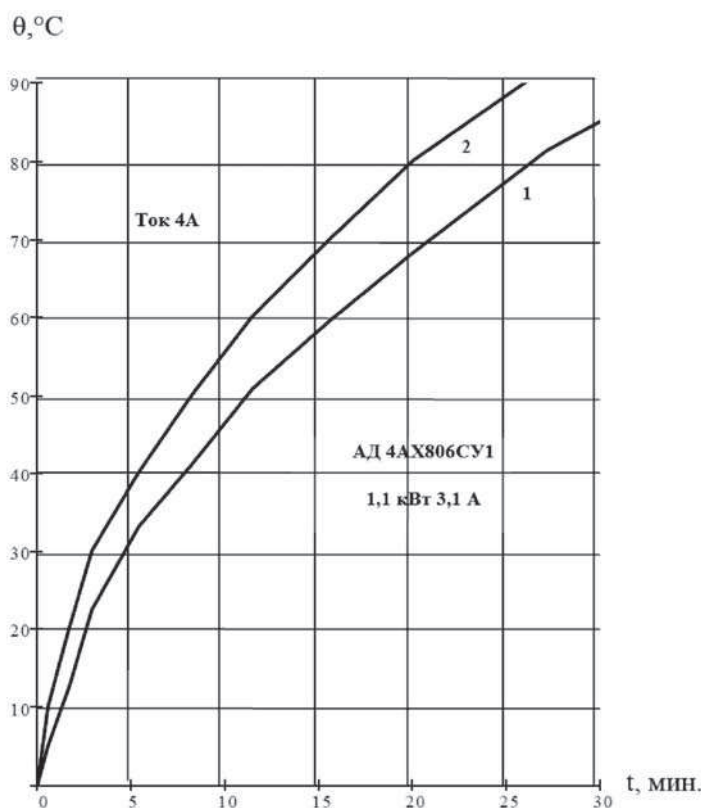


Рис. 4. Нагрев обмоток статора АД постоянным током, управляемым с помощью тиристорного преобразователя: 1 — АД в сборе; 2 — только статора АД

Получена серия графиков нагрева судовых асинхронных двигателей различной мощности токами, величина которых регулируется с помощью переносного тиристорного преобразователя.

При разработке способа и устройств ускоренной сушки изоляции увлажненных обмоток в процессе экспериментальных исследований решен ряд задач: определено температурное поле АД; определена предельно допустимая величина тока при форсированном режиме; определены величины напряжения, активной мощности, времени и расхода электрической энергии при сушке.

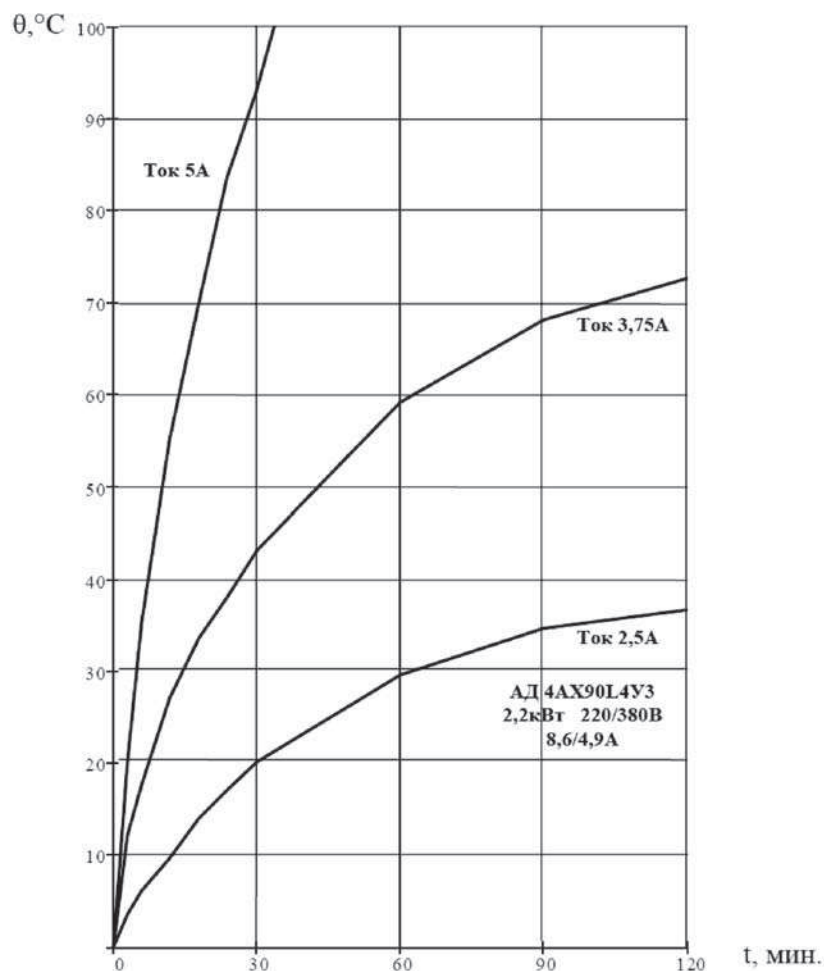


Рис. 5. Нагрев обмоток статора АД постоянным током, управляемым с помощью тиристорного преобразователя

Предложенное аналитическое определение параметров управляемого токового безразборного контрольного прогрева изоляции судовых АД по разработанной структурной схеме с реализацией на ПЭВМ соответствует наиболее оптимальному методу решения проблемы. Создан алгоритм и реализована на ПЭВМ рабочая программа, составленные на основе разработанной теплофизической модели, для исследования тепловых процессов в судовых АД при контрольном прогреве, подсушке, сушке и восстановлении сопротивления изоляции увлажненных обмоток статоров. Выбор оптимальных параметров безразборной управляемой токовой сушки изоляции увлажненных обмоток АД на штатном месте установки без демонтажа с судов речного и морского флота необходимо производить посредством расчетов на разработанной математической модели, реализованной в виде рабочей программы ПЭВМ, с учетом оценки величин токов и тепловыделений. Проведенные исследования также могут найти применение в отрасли водного транспорта для широкого круга задач по определению температуры твердых сред, находящихся в непосредственном тепловом контакте.

Список литературы

1. *Приходько В. М.* Портативный тиристорный преобразователь с перестраиваемой структурой / В. М. Приходько // Исследование, проектирование и эксплуатация судовых ДВС: тр. II Междунар. науч.-техн. семинара, 27 сентября 2007 г. — СПб.: СПГУВК, 2008.
2. *Приходько В. М.* Энергосберегающий универсальный тиристорный преобразователь / В. М. Приходько // Судостроение. — 2000. — № 1.
3. *Приходько В. М.* Компактный универсальный тиристорный преобразователь с перестраиваемой структурой / В. М. Приходько [и др.] // Наука и техника на речном транспорте. — 2001. — № 7.
4. *Приходько В. М.* Методы и технические средства комплексных испытаний элементов судовых электроэнергетических систем в судостроении и судоремонте: науч. моногр. / В. М. Приходько. — СПб.: ИПЦ СПГУВК, 2005. — 348 с.
5. *Приходько В. М.* Интенсификация комплексных испытаний судового электрооборудования по энергосберегающей технологии в судостроении и судоремонте: науч. моногр. / В. М. Приходько. — СПб.: СПГУВК, 2013. — 244 с.
6. *Приходько В. М.* Новая технология пропитки и управляемой токовой сушки электродвигателей / В. М. Приходько // Морской транспорт. Экспресс-информация. Сер. «Техническая эксплуатация флота и судоремонт». — М.: ГУП Мортехинформреклама, 2002. — Вып. 8 (920).
7. *Приходько В. М.* Переносный универсальный тиристорный преобразователь с перестраиваемой структурой / В. М. Приходько, В. И. Кравченко, А. М. Приходько // Промышленная энергетика. — 1999. — № 4.
8. *Приходько В. М.* Тиристорный преобразователь — регулятор универсального назначения / В. М. Приходько, В. И. Кравченко, А. М. Приходько // Промышленная энергетика. — 1994. — № 5.
9. *Приходько А. М.* Универсальный тиристорный преобразователь / А. М. Приходько, В. М. Приходько, В. И. Кравченко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. — 1999. — № 4.
10. *Гольберг О. Д.* Проектирование электрических машин / О. Д. Гольберг, Я. С. Гудин, И. С. Свириденко. — М.: Высш. шк., 1984. — 430 с.