

DOI: 10.18721/JPM.12202

УДК 537.856

РАЗРАБОТКА ИНДУКЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ НАГРЕВА ДИСКОВ

Э.Р. Маннанов¹, С.А. Галунин¹, А.Н. Никаноров²,

Б. Наке², Т.П. Козулина¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² Институт электротехнологий Ганноверского университета им. В. Лейбница, г. Ганновер, Германия

В статье представлены экспериментальные и численные результаты, полученные при нагреве стального диска индукционным методом. Исследование направлено на обеспечение локального равномерного нагрева диска при минимальном отклонении температуры от 450°C. Рассматриваемая система включала трехвитковые индукторы и нагреваемый металлический диск. Результаты компьютерных исследований были реализованы на лабораторном макете. Температурное распределение по материалу диска и его изменения регистрировались с помощью тепловизора. Моделирование электромагнитных и термических процессов при нагреве вращающейся заготовки в форме диска выполнено на базе программного пакета ANSYS APDL. Сравнение полученных численных результатов с экспериментальными данными показало, что расхождение между ними составило около 5 %, что указывает на адекватность выполненного моделирования. Проведен детальный анализ источников отклонения модели от экспериментальных данных.

Ключевые слова: индукционный нагрев, численное моделирование, термообработка, нагрев вращением

Ссылка при цитировании: Маннанов Э.Р., Галунин С.А., Никаноров А.Н., Наке Б., Козулина Т.П. Разработка индукционных систем для нагрева дисков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 2. С. 23–31. DOI: 10.18721/JPM.12202

DEVELOPMENT OF INDUCTION SYSTEMS FOR HEATING OF DISKS

E.R. Mannanov¹, S.A. Galunin¹, A.N. Nikanorov²,

B. Nacke², T.P. Kozulina¹

¹ St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russian Federation;

² Institute for Electrotechnology of the Leibniz University of Hanover, Hannover, Germany

The paper presents the experimental and numerical results obtained by the induction heating a steel disk. This study has been aimed at realizing the local uniform heating the disk at minimum temperature departure from 450°C. The system-of-interest included 3-turn inducers and a steel disk heated up. The computer-based investigation results were implemented at a laboratory mock-up. The temperature distribution over the disk material and its changes were recorded by a thermal imager. Simulation of electromagnetic and thermal processes occurring in heating a rotating disk-shaped work piece was carried out using ANSYS APDL base. A comparison between the obtained numerical data and experimental one showed a disagreement of about 5 %. It pointed to an adequacy of simulation carried out. A detailed analysis of the disagreement sources was made.

Keywords: induction heating, electrothermal task, numerical simulation, heat treatment, heating with rotation

Citation: Mannanov E.R., Galunin S.A., Nikanorov A.N., Nacke B., Kozulina T.P., Development of induction systems for heating of disks, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (2) (2019) 23–31. DOI: 10.18721/JPM.12202

Введение

Численные методы широко используются при разработке систем индукционного нагрева, поскольку создают большие возможности для получения высокоточных результатов, их высокой эффективности и наглядности. Кроме того, такие методы позволяют использовать автоматическую параметризацию, что исключает чрезвычайно высокие затраты на вероятностный спектр экспериментальных испытаний и ошибок. Однако желание воспроизвести все факторы, влияющие на процесс нагрева металла в электромагнитном поле, которое направлено на повышение качества процесса и, соответственно, достижение более высоких целевых показателей, сопряжено со значительным усложнением постановки задачи.

При численном решении задачи нагрева, для правильного воспроизведения экспериментальных результатов неизбежно следует рассматривать параметры нелинейности свойств материалов, зависящих от температуры. Кроме того, магнитная проницаемость μ зависит от самого магнитного поля, возникающего в результате магнитного насыщения.

Нелинейный характер поведения материалов требует решения задачи во временной области вместо более простой обработки данных в частотной области.

Частота тока, проходящего через материал, может достигать высоких значений (до сотен килогерц для процессов индукционной закалки), которые приводят к значительным колебаниям магнитного поля за одну секунду. Таким образом, периодическое электромагнитное решение может быть получено для короткого интервала времени, тогда как температурное распределение будет изменяться в более широких временных (секундных) интервалах. Можно утверждать, что распределение температуры по образцу материала реагирует на среднее значение мощности плотности магнитного поля. В случае переменного поведения величины μ эффективность вычислений не исключает обновления значения μ за каждый короткий период времени, что неизбежно приводит к неоправданно длительным вычислениям.

В уравнении теплопроводности быстро меняющийся исходный член, выражающий объемную удельную мощность внутренних источников теплоты, можно заменить усредненным значением по одному периоду

электрического тока, рассчитанного на основе ранее полученного значения магнитного поля, зависящего от времени. Такое решение позволяет оптимально обновлять значения физических параметров, отражающих свойства материалов, с учетом нового значения температуры в узлах сетки.

Численное моделирование

Цель настоящего исследования – обеспечить локальный равномерный нагрев диска при минимальном отклонении температуры от 450°C . Выбор данного значения температуры сделан на основе результатов работы [7], где приведены данные, полученные после отпуска насквозь закаленного металлического образца толщиной 3 мм.

Каждое исследование, связанное с разработкой новых или модернизацией существующих электротехнологий требует экспериментальной проверки. Результаты компьютерных исследований [1 – 6] были реализованы на лабораторном макете. В качестве инструмента для наблюдения за изменением температуры использовался тепловизор. В настройках программного обеспечения установлен коэффициент черноты, равный 0,95. Диапазон температуры был установлен в пределах от 200 до 1200°C . Это позволяло повысить чувствительность прибора в конечной температурной зоне, равной 450°C .

Системы, разработанные с помощью программного пакета ANSYS APDL, представляют собой 3D-модели индукционных систем для расчета связанных электромагнитных и тепловых задач нагрева диска. Рассматриваемая система включает трехвитковые индукторы и нагреваемый металлический диск. Диск изготовлен из закаленной стали и имеет следующие основные размеры: внешний диаметр – 410 мм, толщина – 3 мм. Рабочая частота системы составляет 2,5 кГц. Во время нагрева в объекте поддерживается постоянная мощность. Окружающей средой служит воздух; она численно описана как немагнитная непроводящая среда, не содержащая источников генерации электромагнитного поля.

Глубина проникновения тока в сталь зависит от ее марки, и при частоте тока 2,5 кГц принята лежащей в диапазоне 1,5 – 0,7 мм, при этом относительная магнитная проницаемость μ должна лежать в диапазоне 10 – 40.

Известно, что для выполнения высо-

коэффициентного отпуска стали требуется выполнять прогрев глубже, чем глубина ее закалки. Объемный индукционный нагрев с малым перепадом температур по сечению достигается за счет относительно небольшой скорости нагрева. Равномерность температуры в заданной области может быть достигнута как за счет высокой теплопроводности нагреваемого объекта, так и изменения требуемого интервала времени нагрева ввиду малой толщины изделия. Достижение заданного температурного уровня возможно при использовании и других значений частот, что обеспечит отличное от исходного распределение температуры по поверхности диска при неизменности исходных данных. Также, если предполагать наличие сложного профиля образца, изготовленного штамповкой, то для нагрева такого образца с целью последующего отпуска использование частот свыше 2500 Гц может повлечь за собой возникновение горячих точек.

В численных моделях геометрическая форма индукторов и позиционирование объекта нагрева полностью повторяет натурные образцы. Заготовка крепится к системе передачи крутящего момента, связанной с электрическим двигателем. Вихревые токи создают (по умолчанию) локальное нагревание электропроводящей заготовки под индуктором, но зафиксировать это явление с помощью тепловизора можно толь-

ко на поверхности. Именно поэтому в данном случае необходимо провести численное моделирование.

На рис. 1 – 3 представлены результаты первого этапа исследования. 3D-модель разбивается на конечно-элементную сетку следующим образом: на толщину диска приходится пять разбиений на каждый ее миллиметр; по диаметру диска конечные элементы сетки более крупные, однако их размер позволяет получить неплохие результаты. Удастся построить зависимости между основными параметрами, выполнить оценку соответствия численных результатов экспериментальным данным.

Электромагнитные и теплофизические характеристики, а именно относительная магнитная проницаемость, удельное сопротивление, коэффициент теплопроводности, коэффициент теплоотдачи, теплоемкость имеют нелинейный характер и зависят как от температуры закаленного стального диска, так и от температуры окружающей среды. Плотность материала диска предполагается постоянной и равномерной.

Принципы построения модели для решения связанных задач электромагнетизма и теплофизики, учет вращения, нелинейность магнитной проницаемости μ и алгоритм обновления данных при динамическом изменении температуры подробно описаны в докладе [4].

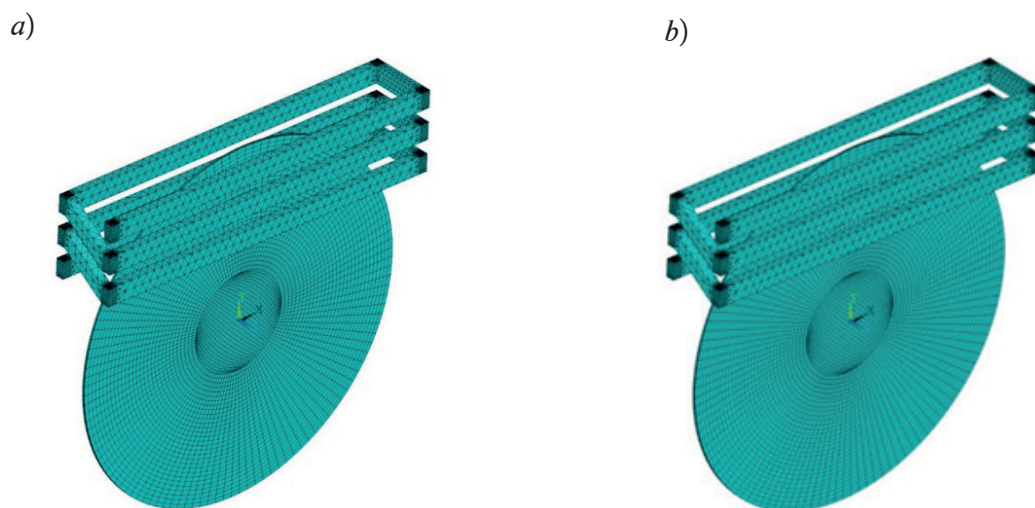
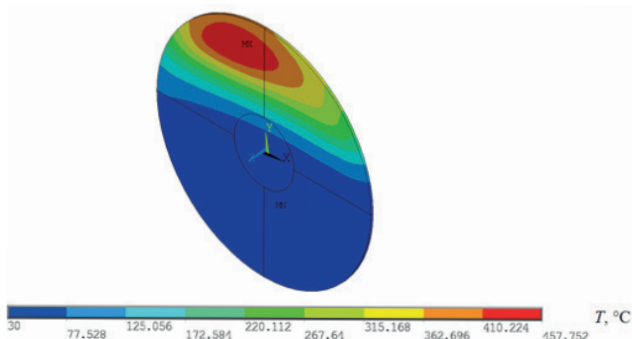


Рис. 1. 3D-модели индукционной системы нагрева в продольном (а) и поперечном (б) магнитных полях

Сравнение результатов экспериментов и численного моделирования представлено на рис. 2.

Имеется ряд объективных причин расхождения расчетных данных с опытными. Резкие провалы на графике температурного распределения по радиусу заготовки (рис. 3) объясняются тем, что тепловизор находился на некотором отдалении от системы нагрева. В конкретном примере указанные провалы характеризуются температурой на поверхности водоохлаждаемых витков индуктора. Ввиду частичного размещения заготовки внутри индуктора,

a)



b)

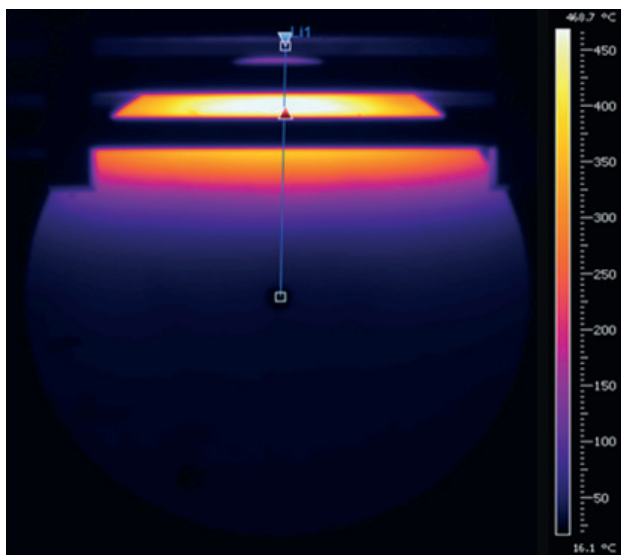


Рис. 2. Сравнение результатов моделирования (a) с экспериментальными данными (b); получены для температурного распределения по поверхности заготовки при стационарном нагреве диска в высокочастотном продольном магнитном поле;

b – прямая, проходящая от края диска к его центру, указывает направление, вдоль которого произведен замер температуры; темный треугольник указывает максимальную температуру на поверхности диска

оказалось невозможным иначе осуществить температурные измерения.

На втором этапе было промоделировано вращение диска. При скорости вращения заготовки 18 об/мин, нагрев до температуры 450 °С достигался за 30 с (рис. 4 и 5). Графики построены на основе усредненных результатов.

Время нагрева выбрано в предположении, что проводится отпуск металлического изделия. При высокочастотной закалке значительное влияние на механические свойства оказывает температура отпуска. Как уже было указано, выбор данного значения температуры сделан на основе результатов работы [7], где приведены данные, полученные после отпуска насквозь закаленного металлического образца толщиной 3 мм. Умеренная скорость нагрева способна обеспечить стабильность температурного поля, и как следствие, высокую прочность, пластичность и вязкость металла. Дальнейшее повышение температуры отпуска неизбежно приведет к снижению прочности и повышению ударной вязкости изделия.

При низкой скорости вращения металлического диска конечное температурное распределение формируется за счет процессов теплопроводности материала и тепловых потерь с его поверхностей. Полученные результаты согласуются с данными работы [8 – 10], где приведены зависимости выделяемой дополнительной мощности в диске от частоты вращения.

Как видно из представленных в настоящей работе данных, кромки диска, за счет тепловых потерь через излучение, обладают более низкой температурой относительно требуемого уровня, а максимум температуры по радиусу диска смещен в сторону центра нагреваемого образца.

Ввиду влияния рабочей частоты и конструкции индуктора на конечный температурный профиль металлического диска, нами был смоделирован его сквозной нагрев под отпуск. Это позволило обеспечить минимизацию перепада температур по сечению диска в зоне нагрева. При численном исследовании, однако, не было учтено наличие закаленного слоя. Можно предсказать, не прибегая к моделированию, что на практике это будет проявляться в неравномерном снижении твердости по радиусу диска, но твердость будет снижена оптимальным способом.

Расхождение численных результатов с

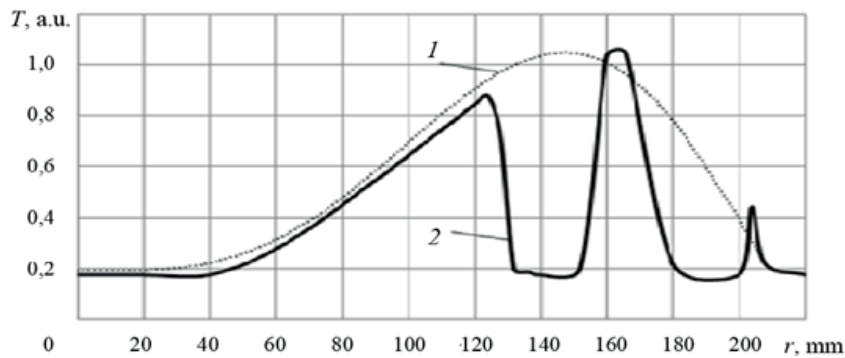
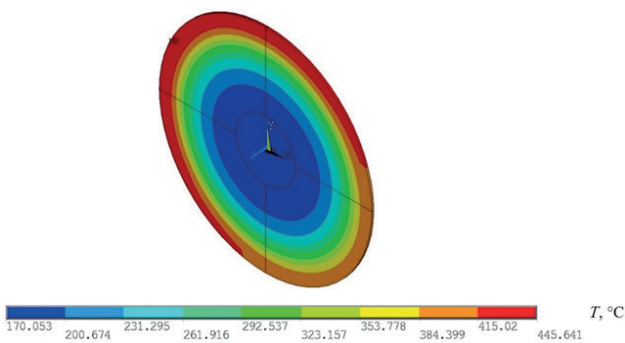


Рис. 3. Конечный температурный профиль вдоль радиуса заготовки по результатам численного моделирования (1) и эксперимента (2)

a)



b)

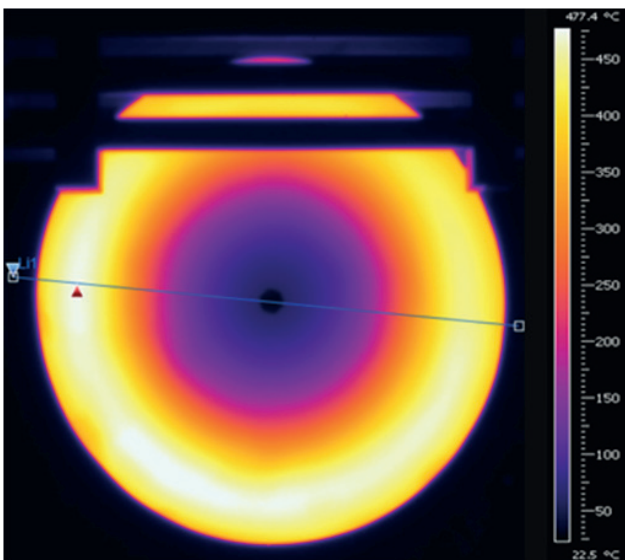


Рис. 4. Сравнение результатов моделирования (a) с экспериментальными данными (b); получены для температурного распределения по поверхности заготовки при нагреве диска вращением в высокочастотном продольном магнитном поле; b — прямая, проходящая через центр диска, указывает направление, вдоль которого произведен замер температуры; темный треугольник указывает максимальную температуру на поверхности диска

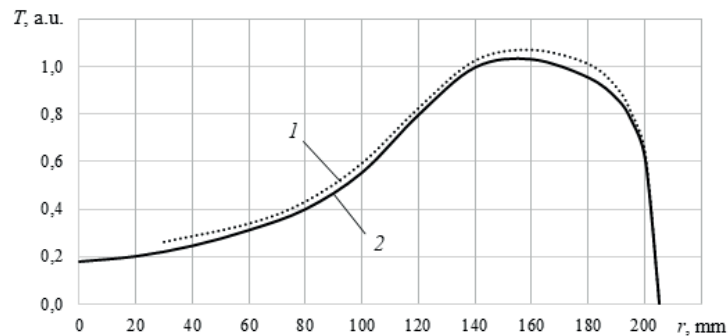
экспериментальными данными составляет около 5 %, что указывает на адекватность выполненного нами моделирования.

Естественная конструкция нагревательной системы предполагает также наличие магнитопровода, который позволяет использовать более низкую частоту электромагнитного поля благодаря контролю полюсного шага индуктора.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенная индукционная система чувствительна к изменению геометрических параметров — геометрии индуктора и позиции витков относительно заготовки, а также к изменению электрических параметров. Следовательно, существует такая оптимальная конфигурация параметров, которая позволит достичь наилучшего результата — равномерного локального нагрева изделия в допустимом диапазоне отклонений температуры от заданного значения за наименьший промежуток времени проведения технологической операции термообработки.

Проведенное исследование показало, что применение нестандартных решений дает дополнительные возможности для регулирования технологического процесса нагрева и повышения эффективности термообработки. Таким образом, можно выделить ключевое направление повышения эффективности индукционных систем нагрева металлических изделий вращением — это модернизация существующих и разработка новых индукционных нагревательных систем на основе автоматической оптимизации геометрических, позиционных и электрических параметров (совместно с использованием компьютерного модели-

a)



b)

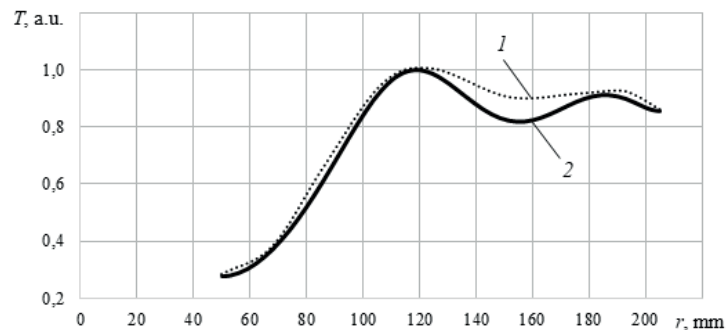


Рис. 5. Температурные профили на поверхности заготовки вдоль радиуса при нагреве диска в продольном (a) и поперечном (b) магнитных полях: 1 – результаты моделирования, 2 – экспериментальные данные

рования). Данное направление позволит успешно решать сопряженные с данной проблемой физические задачи при термобработке, проектировать форму индукторов, выбирать оптимальный режим работы, закладывать свойства новых материалов в конструкцию разрабатываемых систем, выполнять надежную оценку по внедрению нестандартных решений для сокращения материальных затрат.

Заключение

Для расчета взаимосвязанных электромагнитных и тепловых задач, в программном пакете ANSYS APDL были разработаны проблемно-ориентированные 3D-модели индукционных систем. Разработанные модели были опробованы и верифицированы экспериментально. Полученные результаты можно успешно применять для анализа и решения электротепловых задач при проектировании индукционных установок

и параметрическом поиске оптимальных конфигураций рассматриваемых систем. В свою очередь, их оптимальные характеристики обеспечат высокое качество конечного продукта и его максимальный выход, минимальную стоимость оборудования и максимальную суммарную эффективность.

Перспективы использования разработанных моделей связаны с исследованием различных индукционных систем для нагрева заготовок различной формы. Разработанные методы и подходы можно применять для других электротехнических процессов. Предлагаемые решения допускают успешное использование полученных результатов для стальных колец, дисков, зубчатых колес, валов, пружин и других симметричных заготовок различных типоразмеров, для проектирования индукционных установок и параметрического поиска оптимальных системных конфигураций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zlobina M., Nacke B., Nikanorov A.** Numerical investigation of different concepts to control the temperature field at the induction heating of aluminium billets by rotation in superconductive magnets // Proceedings of the 6th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials “EPM 2009”. Dresden (Germany), 19–23 October 2009. Dresden, 2009. Pp. 177–180.
2. **Fabbri M., Morandi A., Negrini F.** Temperature distribution in aluminium billets heated by rotation in static magnetic field produced by superconducting magnets // COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. 2005. Vol. 24. No. 1. Pp. 281–290.
3. **Nacke B., Zlobina M., Nikanorov A.** Ulferts: Numerical simulation of induction heating of aluminium billets by rotation in DC magnetic field // Proceedings of International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources. Padua. 2007. Pp. 497–504.
4. **Mannanov E., Galunin S., Nikanorov A., Nacke B.** Simulation algorithm for induction heating of rotated workpieces with complex shape // Proceedings of the 18th International UIE-Congress “Electrotechnologies for Material Processing”. Hannover (Germany), June 6 – 9, 2017. Pp. 491–496.
5. **Mannanov E., Galunin S., Blinov K.** Numerical optimization of transverse flux induction heating systems // Proceedings of the 2015 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (ElConRusNW 2015). Pp. 241–244.
6. **Mannanov E., Muratov A., Galunin S.** Numerical investigation of spatial control tools of temperature distribution in the heating systems by rotation // Research and Development of Young Scientists: The Collected Reports of the 6th International Youth Scientific and Practical Conference. Novosibirsk, 16.10. 2015. Pp. 71–75.
7. **Шепеляковский К.З.** Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве. М.: Машиностроение, 1972. 287 с.
8. **Лепешкин С.А.** Исследование петлевых индукторов для моделирования и повышения эффективности нагрева вращающихся дисков ГТД // «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век». Сб. матер. XIII международной научно-практической интернет-конференции. Орловский гос. ун-т, «Орловский региональный центр энергосбережения». 2015. С. 84–87.
9. **Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р., Лепешкин С.А.** Моделирование режимов индукционного нагрева дисков турбин ГТД с использованием специальных индукторов // Электротехника. Электротехнология. Энергетика. Сб. научн. тр. VII Международной научной конференции молодых ученых. Межвузовский центр содействия научной и инновационной деятельности студентов и молодых ученых Новосибирской области. 2015. С. 70–73.
10. **Лепешкин С.А.** Моделирование и исследование распределений температур во вращающихся дисках с учетом взаимного влияния // «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век». Матер. XII Междунар. научно-практ. интернет-конференции. 2014. С. 77–79.

Статья поступила в редакцию 20.01.2019, принята к публикации 15.04.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МАННАНОВ Эмиль Рамилевич – аспирант кафедры электротехнологической и преобразовательной техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация.

197376, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.
 emil-mannanov@mail.ru

ГАЛУНИН Сергей Александрович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой электротехнологической и преобразовательной техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация.

197376, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.
 galunin@mail.ru

НИКАНОРОВ Александр Николаевич – кандидат технических наук, научный сотрудник Института электротехнологий Ганноверского университета им. В. Лейбница, г. Ганновер, Германия.
Wilhelm-Busch-Str. 4, 30167, Hannover, Deutschland
nikanorov@etp.uni-hannover.de

НАКЕ Бернад – доктор технических наук, директор Института электротехнологий Ганноверского университета им. В. Лейбница, г. Ганновер, Германия.
Wilhelm-Busch-Str. 4, 30167, Hannover, Deutschland
etp@etp.uni-hannover.de

КОЗУЛИНА Татьяна Павловна – аспирантка кафедры электротехнологической и преобразовательной техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация.
197376, Российская Федерация, г. Санкт Петербург, ул. Профессора Попова, 5.
kozulina.tatiana@mail.ru

REFERENCES

1. **Zlobina M., Nacke B., Nikanorov A.**, Numerical investigation of different concepts to control the temperature field at the induction heating of aluminium billets by rotation in superconductive magnets, Proceedings of the 6th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials “EPM 2009”, Dresden (Germany), 19–23 October 2009, Dresden (2009) 177–180.
2. **Fabrizi M., Morandi A., Negrini F.**, Temperature distribution in aluminium billets heated by rotation in static magnetic field produced by superconducting magnets, COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. 24 (1) (2005) 281–290.
3. **Nacke B., Zlobina M., Nikanorov A.**, Ulferts: Numerical simulation of induction heating of aluminium billets by rotation in DC magnetic field, Proceedings of International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources, Padua (2007) 497–504.
4. **Mannanov E., Galunin S., Nikanorov A., Nacke B.**, Simulation algorithm for induction heating of rotated workpieces with complex shape, Proceedings of the 18th International UIE-Congress “Electrotechnologies for Material Processing”, Hannover (Germany), June 6–9 (2017) 491–496.
5. **Mannanov E., Galunin S., Blinov K.**, Numerical optimization of transverse flux induction heating systems, Proceedings of the 2015 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW 2015), (2015) 241–244.
6. **Mannanov E., Muratov A., Galunin S.**, Numerical investigation of spatial control tools of temperature distribution in the heating systems by rotation, Research and Development of Young Scientists: The Collected Reports of the 6th International Youth Scientific and Practical Conference, Novosibirsk, 16.10. 2015. (2015) 71–75.
7. **Shepelyakovskiy K.Z.**, Uprochneniye detaley mashin poverkhnostnoy zakalkoy pri induktsionnom nagreve [Machine parts strengthening by shell hardening in the induction heating], Mashinostroyeniye, Moscow, 1972.
8. **Lepeshkin S.A.**, Issledovaniye petlevykh induktorov dlya modelirovaniya i povysheniya effektivnosti nagreva vrashchayushchikhsya diskov GTD [Studies in the loop inducers for modeling and improvement of efficiency of rotating TE discs’ heating], In collected book “Energy- and Resource- Saving – The 21th century”, Proceedings of the 13th International Theoretical and Practical Internet Conference, “The Orel Region Center of Energy-Saving” (2015) 84– 87.
9. **Kuvaldin A.B., Lepeshkin A.R., Lepeshkin S.A.**, Modelirovaniye rezhimov induktsionnogo nagreva diskov turbin GTD s ispolzovaniyem spetsialnykh induktorov [Modeling of induction heating modes for turbines’ disks using special inducers], “Electrotechnics, Electrotechnology, Energetics” – Coll. Book of Scientific Papers of the 7th Intern. Sci. Conf. for Youth Reseachers, Novosibirsk Oblast (2015) 70–73.
10. **Lepeshkin S.A.**, Modelirovaniye i issledovaniye raspredeleniy temperatur vo vrashchayushchikhsya diskakh s uchetom vzaimnogo vliyaniya [Modeling and investigation of temperature distribution in the rotating disks with consideration for their mutual coupling], In: “Energy- and Resource-Saving – The 21th Century”, Proceedings of the 12th International Research-to-Practice Internet Conference (2014) 77–79.

Received 20.01.2019, accepted 15.04.2019.

THE AUTHORS

MANNANOV Emil R.

St. Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5 Professora Popova St., 197376, St. Petersburg, Russian Federation
emil-mannanov@mail.ru

GALUNIN Sergei A.

St. Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5 Professora Popova St., 197376, St. Petersburg, Russian Federation
galunin@mail.ru

NIKANOROV Alexander N.

Institute for Electrotechnology of the Leibniz University of Hanover
Wilhelm-Busch-Str. 4, 30167, Hannover, Deutschland
nikanorov@etp.uni-hannover.de

NACKE Bernard

Institute for Electrotechnology of the Leibniz University of Hanover
Wilhelm-Busch-Str. 4, 30167, Hannover, Deutschland
etp@etp.uni-hannover.de

KOZULINA Tatiana P.

St. Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5 Professora Popova St., 197376, St. Petersburg, Russian Federation
kozulina.tatiana@mail.ru