

DOI: 10.18721/JPM.12406

УДК 537.856

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ДЕМПФЕРНОЙ ПРУЖИНЫ ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Э.Р. Маннанов, С.А. Галунин

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

Исследованы конфигурация и работа системы для локального нагрева демпферной пружины индукционным методом. Проблемно-ориентированная 3D модель, разработанная на базе ANSYS APDL, позволила изучить влияние геометрических, электрических и позиционных параметров на температурное распределение по рассматриваемому изделию при его электромагнитной термообработке. В частности, получены температурные поля при вариации количества и длины пальцев демпферной пружины, при регулировании зоны отгиба пальцев с настройкой режима нагрева. Установлены основные связи конечных температурных распределений с геометрией нагреваемого изделия. Нагрев осуществляли с использованием как продольного, так и поперечного магнитных полей.

Ключевые слова: индукционный нагрев, численное моделирование, оптимизация, термообработка, демпферная пружина

Ссылка при цитировании: Маннанов Э.Р., Галунин С.А. Параметрическое моделирование процесса нагрева демпферной пружины индукционным методом // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 4. С. 61–68. DOI: 10.18721/JPM.12406

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

THE HEATING OF A DIAPHRAGM SPRING USING INDUCTION TECHNIQUE: PARAMETRIC MODELING

E.R. Mannanov, S.A. Galunin

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

The configuration and work of a system for local heating of a diaphragm spring by induction technique have been studied. The problem-oriented 3D model developed using ANSYS APDL, made possible to analyze effects of geometric, electrical and positional parameters on temperature distribution over the considered product in its electromagnetic heat treatment. In particular, the temperature fields were obtained varying spring finger's number and length, as well as a control of a finger's bend with setting up a heating mode. The main connections between the final temperature distributions and the geometry of the heated product were established. The heating was generated using both longitudinal and transverse magnetic fields.

Keywords: induction heating, numerical simulation, optimization, heat treatment, diaphragm spring

Citation: Mannanov E.R., Galunin S.A., The heating of a diaphragm spring using induction technique: parametric modeling, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (4) (2019) 61–68. DOI: 10.18721/JPM.12406

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Множество научно-технических исследований посвящено анализу сопряженно протекающих электромагнитных и тепловых процессов при индукционной термообработке продукции. При этом особое место отводится изделиям, обладающим вращательной симметрией. Например, нагрев заготовок, имеющих форму металлических дисков или колец, широко применяется в различных промышленных технологиях и требует повышенного внимания при проектировании индукторов [1 – 10].

В большинстве случаев нагрева требуется равномерное распределение температуры по всему объему объекта или обеспечение локальной температурной области. Для диска обычно используется классический спиральный или петлевой индуктор, который располагается под объектом, а конфигурация индукционной системы может быть одно- или многовитковой; тогда вихревые токи в диске имеют вращательную симметрию. Это дает дополнительную возможность контролировать температурное поле, используя вращение диска. В подобной постановке задачи вихревые токи имеют мертвую точку в центре, а при термообработке диска сложного профиля следует ожидать различных условий охлаждения в зоне нагрева. После нагрева или охлаждения изделия естественно появляется неоднородность температурного поля.

Характеристики демпферной пружины зависят от ее геометрических размеров. Меняются в целом и рабочие характеристики механизма, в котором находится такая пружина, например, в сцеплении автомобиля.

При необходимости термообработки невозможно изменить геометрию изделия для достижения целей нагрева и получения желаемых параметров по остаточным напряжениям. Поэтому сначала выполняются расчеты, устанавливающие необходимый уровень прочности и упругости [1]. Оптимальная форма демпферной пружины способна распределять нагрузки (динамическая и статическая, постоянная и термоциклическая, нагрузка на изгиб), а термообработка этой пружины направлена на достижение баланса между прочностью, необходимой в пальцах, и пластичностью диска демпферной пружины. В связи с этим, при выборе температуры термообработки необходимо учитывать не только геометрические параметры обрабатываемого изделия, но и тех-

нологию его изготовления.

В данной статье представлено численное исследование процесса индукционного нагрева демпферных пружин для грузовых автомобилей. Такие пружины изготавливаются штамповкой. Узел механизма сцепления грузовика подвергается закалке путем единственного удара штампом, который придает необходимую форму металлическому изделию; последующий нагрев узла до 450°C выполняется под отпуск.

Параметрические исследования электротепловых процессов

Стандартное количество пальцев (рис. 1), размещенных по окружности диска демпферной пружины, составляло: 24, 20, 18 и 12.

Исследуемая система обладает симметрией, поэтому вместо того, чтобы моделировать сложную геометрию изделия, мы приняли решение промоделировать только одиночную секцию, используя при этом азимутальную периодичность структуры изделия.

Исходные данные моделирования демпферной пружины следующие:

Количество пальцев . . . 12, 18, 20, 24

Соответствующие

области моделирования,

град(мин) 15(0), 10(0), 9(0), 7(5)

Остальные исходные данные (конструктивные и электрические параметры индуктора, взаимное позиционирование и время нагрева), задача нагрева, критерий оценки достижения целевой функции (заданный температурный уровень) взяты на основе экспериментальных данных, приведенных в работе [2].

В моделируемой системе используемые нелинейные коэффициенты связаны с зависимостями свойств металлических изделий от температуры и напряженности электромагнитного поля, чем и обусловлена связь электромагнитной и тепловой задач. Алгоритм прямого моделирования задачи с сопряженным электротепловым решением индукционного нагрева диска подробно описан авторами данного исследования в работах [3, 9].

На рис. 1 показан эскиз демпферной пружины. Исходная область моделирования 2 представляет собой плоский сектор круга с центральным углом, равным 9°. Фактически это означает, что базовая конструкция демпферной пружины имеет 20 пальцев.

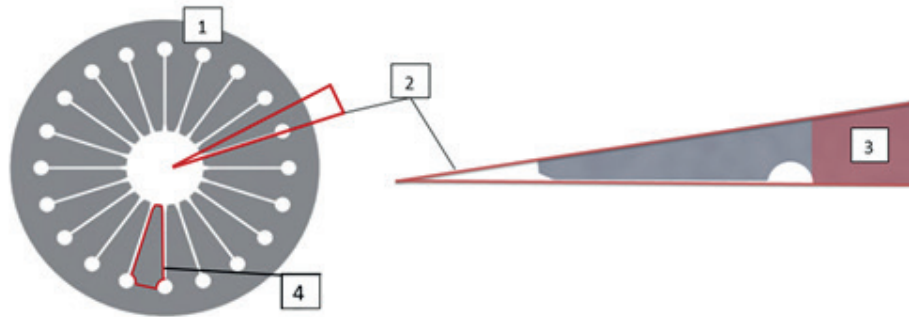


Рис. 1. Схематическое представление постановки задачи:

1 – общий вид изделия; 2 – область моделирования; 3 – зона нагрева; 4 – палец демпферной пружины



Рис. 2. Конечно-элементная 3D-система: 1 – индуктор, 2 – демпферная пружина

Расчетное время, необходимое для вычисления при заданной точности, минимизировано таким образом в 40 раз. Считаем, что общая высота ненагруженной пружины равна высоте нагруженной. Другими словами, изделие не обладает кривизной, необходимой для эксплуатации, и имеет плоскую форму под нагрузкой. При выполнении процедуры термообработки данный аспект не играет существенной роли, поскольку для обеспечения равномерного локального нагрева и витки нагревателя должны быть расположены:

- во-первых, на одной оси;
- во-вторых, строго параллельно плоскости относительно зоны нагрева.

Такое расположение, соответствующее вышеуказанным пунктам, позволяет регулировать подводимую мощность путем изменения тока индуктора, шага витков и ширины воздушного зазора.

Параметрическое исследование выполняется на базе разработанной параметрической 3D модели (рис. 2).

Предполагается, что зона отгиба пальцев является наиболее опасной с точки зрения появления горячих точек. Для учета этой опасности, на первом этапе исследования оценивалось влияние формы отгиба пальцев демпферной пружины на картину температурного поля. Для сравнения на

рис. 3 представлены расчетные распределения температуры в заготовке для случаев неудовлетворительного и желательного качества обработки зоны отгиба пальцев (рассматриваемая область). Нагрев выполнен в продольном магнитном поле.

Моделирование позволило оценить вероятность возникновения горячих точек в зоне отгиба пальцев демпферной пружины при использовании конфигурации индуктора, аналогичной описанной в работах [2, 3], где она применялась для нагрева диска с простым профилем. Наибольшая плотность наведенных токов, согласно нашей оценке, должна формироваться в зоне отгиба пальцев как следствие случайных блужданий вихревых токов. Ввиду сложной формы изделия, условия теплоотвода различаются и зависят от точки измерения. Кромки диска имеют наилучший теплоотвод благодаря своей малой толщине, и это предотвращает перегрев в зонах отгиба пальцев. При сравнении наших экспериментальных данных [2] и наших результатов численного моделирования можно утверждать, что конечный температурный профиль на поверхности в зоне нагрева имеет удовлетворительно равномерный характер с минимальным перепадом температуры по окружности диска.

На основании разработанной параметрической конечно-элементной 3D модели

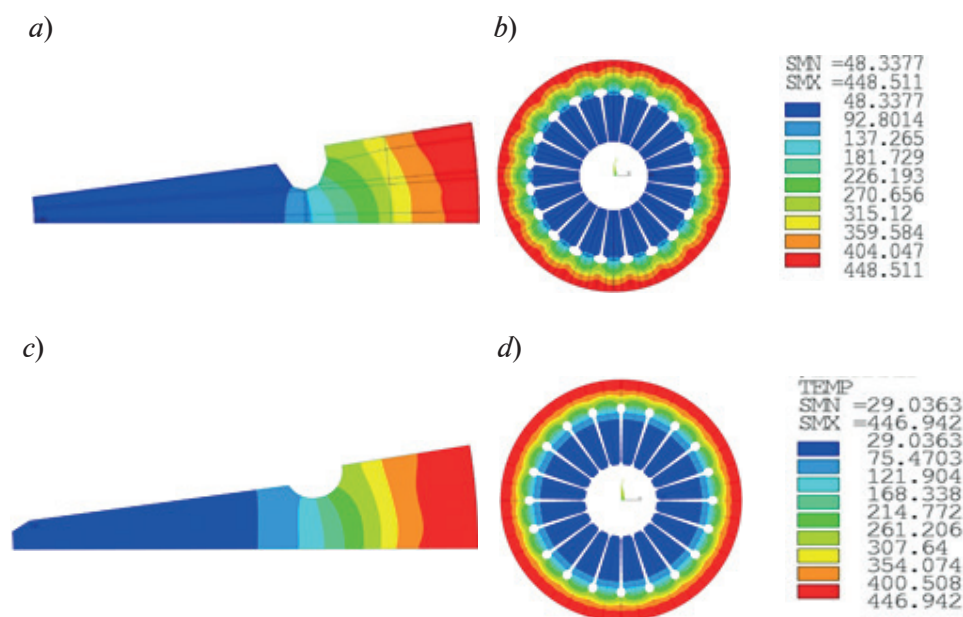


Рис. 3. Конечные температурные распределения по области моделирования 9° (a, c) и по изделию (b, d) после завершения процесса нагрева в продольном магнитном поле при некачественной (a, b) и желательной (c, d) обработках поверхности демпферной пружины в зоне отгиба пальцев.

Количество пальцев демпферной пружины – 20

проведено изучение процесса нагрева с учетом основных факторов, влияющих на картину температурного поля, путем варьирования действующих параметров системы. Указанное исследование учитывало следующие факторы влияния на температурное распределение по изделию:

габаритные размеры демпферной пружины (рис. 4 – 6);

количество пальцев указанной пружины при регулировании области моделирования (рис. 4 – 6);

нагрев в поперечном магнитном поле, для этого задано встречное включение токов в витках индуктора (рис. 6).

Анализ полученных данных моделирования позволил сделать следующие выводы.

1. Действующее значение тока влияет только на уровень максимальной температуры, но не влияет на картину температурного распределения.

2. Удлинение пальцев демпферной пружины улучшает теплоотвод от зоны нагрева, что обеспечивает высокий температурный перепад и обеспечивает понижение температуры относительно установленного целевого температурного уровня.

3. Регулирование количества пальцев демпферной пружины за счет варьирования моделируемой расчетной области приводит к качественному изменению формируемого

температурного поля.

4. Существенную роль в формировании температурного распределения играют размеры демпферной пружины (внешний диаметр, толщина диска, ширина ее зоны нагрева). Увеличение массы изделия сопровождается ростом необходимого энергозатрата для обеспечения нагрева до заданного температурного уровня, и наоборот (ее уменьшение сопровождается спадом энергозатрата). Например, при внешнем диаметре демпферной пружины 420 мм, толщине 3 мм, частоте нагревающего электромагнитного поля в 2,5 кГц, при воздушном зазоре изделие – индуктор, равном 10 – 11 мм, необходима мощность источника в 44 кВт, чтобы обеспечить высокоэффективный нагрев до требуемого температурного уровня; при уменьшении диаметра до 268 мм, достаточно мощности 15 кВт.

5. Равномерного распределения температуры по заданной области в диапазоне целевого температурного уровня можно достичь путем применения индукционного нагрева в продольном магнитном поле.

Проведенное исследование позволяет выработать практические рекомендации для оптимизации процесса нагрева. В частности, рекомендуется применять скругленные фаски в зоне отгибов пальцев во избежание концентрации тепла и

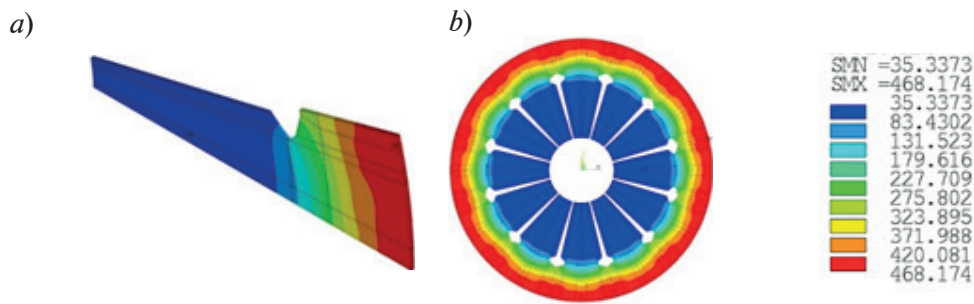


Рис. 4. Конечное температурное распределение после завершения процесса нагрева демпферной пружины диаметром 405 мм в продольном магнитном поле при действующем значении тока 300 А:

a – область моделирования 15°, *b* – полное конечно-элементное решение.
 Количество пальцев демпферной пружины – 12

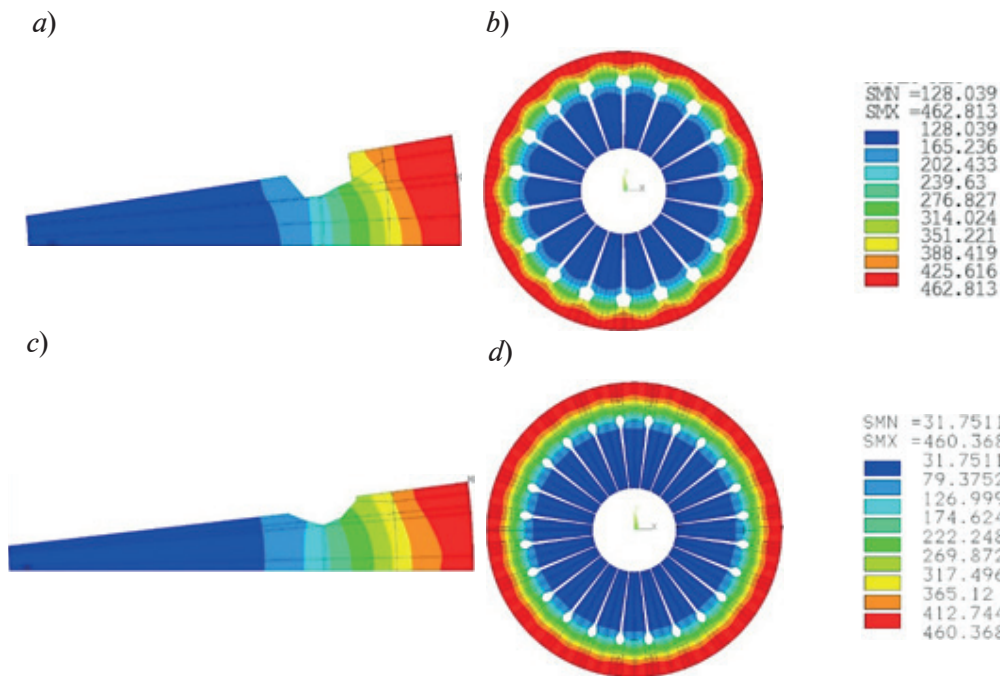


Рис. 5. Конечные температурные распределения после завершения процесса нагрева демпферной пружины диаметром 350 мм в продольном магнитном поле при действующих значениях тока 185 А (*a,b*) и 288 А (*c,d*).

Области моделирования составляли 10°0' (*a*) и 7°5' (*c*).
 Количество пальцев демпферной пружины – 18 (*a, b*) и 24 (*c, d*)

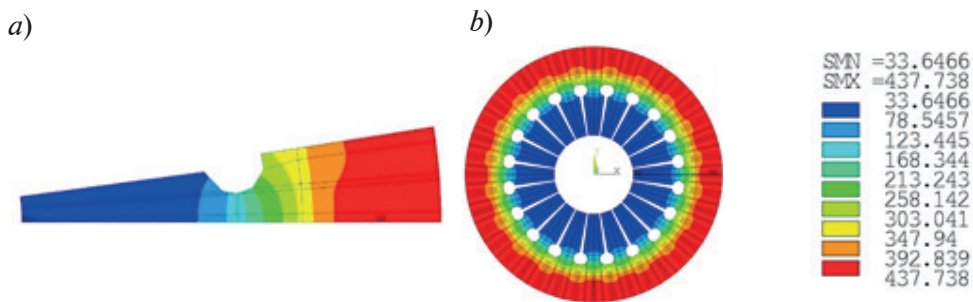


Рис. 6. Конечное температурное распределение после завершения процесса нагрева демпферной пружины диаметром 405 мм в поперечном магнитном поле при действующем значении тока 450 А. Область моделирования составляла 9°.

Количество пальцев демпферной пружины – 20

возникновения горячих точек.

Возможность модификации свойств материала при подборе температуры термообработки представляет большой интерес для расчета рабочей нелинейной характеристики упругости материалов в широком диапазоне температур. В зависимости от марки стали и ее назначения, температура обработки разная, поэтому механические свойства термообрабатываемого изделия, полученные на выходе, могут существенно различаться. Данное утверждение справедливо для целого ряда применяемых технологий: закалки,ковки,отжига, нормализации, отпуска, а также комбинаций различных термообработок, в частности таких как предварительный нагрев – закалка – отпуск, нормализация – отпуск, закалка – самоотпуск, закалка – старение и т. п. При необходимости следует проводить предварительное исследование и анализ конкретных случаев, чтобы оптимизировать свойства материала

для заданной цели. Температуру и зону нагрева под отпуск следует определять с учетом требуемых свойств материала.

Заключение

Параметрическое моделирование процесса нагрева демпферной пружины индукционным методом успешно использовано для исследования и поиска геометрических, позиционных и электрических конфигураций системы индуктор – изделие для задачи локального нагрева демпферной пружины под отпуск. Дальнейшее применение разработки связано с поиском оптимальных конфигураций системы для того чтобы проводить индукционную термообработку демпферных пружин в широком диапазоне типоразмеров, а также металлических заготовок в форме дисков, колец и других осесимметричных металлических изделий простого и сложного профиля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rupnar A.** Design and analysis of diaphragm spring of a single plate dry clutch // *International Journal of Science Technology & Engineering*. 2016. Vol. 2. No. 12. Pp. 26–30.

2. **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.

3. **Маннанов Э.Р., Ермекова М.Р., Мазалов В.О., Галунин С.А.** Численное моделирование электротепловых процессов при индукционном отпуске изделия кольцеобразной формы // *Наука. Технологии. Инновации*. Сб. научных трудов в 10 ч. Под ред. Б.Ю. Лемешко, А.А. Попова, М.Э. Рояка, В.С. Тимофеева. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. Ч. 2. С. 128–131.

4. **Маннанов Э.Р., Галунин С.А.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614128. «Численная проблемно-ориентированная 3D электротепловая модель нагрева диска индукционным методом». Правообладатель ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; заявл. 24.03.2019; зарегистр. 01.04.2019. 1 с.

5. **Маннанов Э.Р., Галунин С.А.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614441. «Численная про-

блемно-ориентированная 3D электротепловая модель нагрева изделий сложного профиля индукционным методом». Правообладатель ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; заявл. 25.03.2019; зарегистр. 04.04.2019. 1 с.

6. **Шепеляковский К.З.** Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве. М.: Машиностроение, 1972. 287 с.

7. **Лепешкин С.А.** Моделирование и исследование распределений температур во вращающихся дисках с учетом взаимного влияния // «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век». Сб. материалов XII Межд. науч.-практ. Интернет-конф., 2014. С. 77–79.

8. **Galunin S.A., Zlobina M.V., Blinov K.Yu.** Numerical model approaches for in-line strip induction heating // *IEEE Eurocon 2009*. St. Petersburg, 2009. Pp. 1607–1610. DOI: 10.1109/EURCON.2009.5167857.

9. **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.

10. **Schlesselmann D., Nacke B., Nikanorov A., Galunin S.** Coupled numerical multiphysics simulation methods in induction surface hardening



// “Coupled Problems 2015”. Proceedings of the 6th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering. May 18 – 20, 2015. San Servolo Island, Venice, Italy. Pp. 392–403.

Статья поступила в редакцию 12.09.2019, принята к публикации 13.12.2019.

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

REFERENCES

1. **Rupnar A.**, Design and analysis of diaphragm spring of a single plate dry clutch, International Journal of Science Technology & Engineering. 2(12) (2016) 26–30.
2. **Mannanov E.R., Galunin S.A., Nikanorov A.N., et al.**, Development of induction systems for disk heating, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (2) (2019) 23–31.
3. **Mannanov E.R., Yermekova M.R., Mazalov V.O., Galunin S.A.**, Chislennoye modelirovaniye elektroteplovyykh protsessov pri induktsionnom otpuske izdeliya koltseobraznoy formy [Numerical simulation of electrothermal processes in the induction tempering of a ring-shaped product], In: “Science. Engineering. Innovation” Collected volume in 10 parts (2017) 128–131.
4. **Mannanov E.R., Galunin S.A.**, Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2019614128 “Chislennaya problemno-orientirovannaya 3D elektroteplovaya model nagreva diska induktsionnym metodom” [Certificate No. 2019614128 on the state recording of a computer program “Numerical problem-oriented 3D electrothermal model of disk heating by induction technique”], Copyright holder is St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, stated on March 24, 2019, registered on April 1, 2019.
5. **Mannanov E.R., Galunin S.A.**, Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2019614441 “Chislennaya problemno-orientirovannaya 3D elektroteplovaya model nagreva izdeliy slozhnogo profilya induktsionnym metodom” [Certificate No. 2019614441 on the state recording of a computer program “Numerical problem-oriented 3D electrothermal model of a complex product by induction technique”], Stated on March 25, 2019, registered on April 4, 2019.
6. **Shepelyakovskiy K.Z.**, Uprochneniye detaley mashin poverkhnostnoy zakalkoy pri induktsionnom nagreve [Machin parts strengthening by shell hardening in the induction heating], Mashinostroyeniye, Moscow, 1972.
7. **Lepeshkin S.A.**, Modelirovaniye i issledovaniye raspredeleniy temperatur vo vrashchayushchikhsya diskakh s uchetom vzaimnogo vliyaniya [Simulation and study of a temperature distribution in the rotating disks taking into account the mutual influence], In collected book “Energy- and Resource- Saving – The 21th Century”, Proceedings of the 13th International Theoretical and Practical Internet Conf. (2014) 77–79.
8. **Galunin S.A., Zlobina M.V., Blinov K.Y.**, Numerical model approaches for in-line strip induction heating, IEEE Eurocon 2009, St. Petersburg (2009) 1607–1610, DOI: 10.1109/EURCON.2009.5167857.
9. **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.

10. **Schlesselmann D., Nacke B., Nikanorov A., Galunin S.**, Coupled numerical multiphysics simulation methods in induction surface hardening, “Coupled Problems 2015”, Proceedings of the 6th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, May 18–20, 2015, San Servolo Island, Venice, Italy (2015) 392–403.

Received 12.09.2019, accepted 13.12.2019.

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