

УДК 621.313.3:621.365.5

ОСОБЕННОСТИ НАГРЕВА НЕМАГНИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ПОЛЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Бикеев Роман Александрович,

канд. техн. наук, доцент каф. автоматизированных электротехнологических установок факультета мехатроники и автоматизации ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: bikeev@ngs.ru

Промзелев Владислав Алексеевич,

аспирант каф. автоматизированных электротехнологических установок факультета мехатроники и автоматизации ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: promzelev@mail.ru

Бланк Алексей Валерьевич,

канд. техн. наук, доцент каф. теоретических основ электротехники факультета мехатроники и автоматизации ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: kaftoe@ngs.ru

Морев Андрей Эдуардович,

студент каф. автоматизированных электротехнологических установок факультета мехатроники и автоматизации ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: glhficcup@yandex.ru

Актуальность работы обусловлена тем, что в настоящее время в области создания новых энергосберегающих электротехнологий для задач нагрева изделий из цветных металлов особое внимание уделяется установкам индукционного нагрева в поперечном магнитном поле, при этом не охваченной методом нагрева в поперечном магнитном поле оказалась большая номенклатура изделий, имеющих прямоугольное поперечное сечение, выполненных из цветных металлов. В настоящее время такие изделия нагреваются в установках индукционного нагрева в продольном переменном магнитном поле, имеющих электрический КПД, не превышающий 0,5. Привлекательностью нагрева таких изделий в поперечном вращающемся магнитном поле постоянных магнитов является его потенциальная возможность в достижении электрического КПД, равного 0,75–0,85. В представленной статье рассматриваются проведенные исследования нагрева алюминиевых изделий прямоугольного поперечного сечения до температуры 550 °С.

Цель исследования: разработка численной модели на базе программного комплекса ANSYS для расчета электромагнитных параметров системы «индуктор–загрузка» и температурного поля в нагреваемой заготовке; выполнение расчетов распределения параметров электромагнитного и температурного поля в нагреваемой заготовке.

Методы исследования: Основным инструментом научного исследования является программный комплекс ANSYS, позволяющий моделировать различные пространственные физические системы, поведение которых может быть описано дифференциальными уравнениями. За основу принят метод конечных элементов, позволяющий непрерывную область задачи, имеющую бесконечное число степеней свободы, разбить на конечное, хотя и достаточно большое, число областей, в которых параметры постоянны. В узлах системы сосредотачиваются физические свойства и внешние воздействия.

Результаты: Созданная модель позволила рассчитать связанную электромагнитную и тепловую задачу нагрева немагнитного изделия прямоугольного поперечного сечения во вращающемся магнитном поле постоянных магнитов. В статье представлены полученные зависимости максимальных температурных перепадов, получаемых в поперечном сечении прямоугольных изделий, выполненных из алюминия. Зависимости представлены, как функции скорости вращения системы постоянных магнитов, создающих поперечное магнитное поле, числа пар полюсов магнитов и зазора между нагреваемым изделием и магнитами.

Ключевые слова:

Индукционный нагрев с постоянными магнитами, температурное поле, температурный перепад, скорость вращения магнитного поля, число пар полюсов, переменное магнитное поле, теплообмен, граничные условия.

Введение

В настоящее время в области создания новых энергосберегающих электротехнологий для задач нагрева изделий из цветных металлов особое внимание уделяется установкам индукционного нагрева в

поперечном магнитном поле. Значительные успехи достигнуты к настоящему времени в направлении исследования и разработки систем индукционного нагрева металлической ленты из цветных металлов в поперечном переменном магнитном поле, создава-

емом индукторами специальной конструкции. Бесспорным преимуществом данных установок является то, что они работают на частотах 0,05–10 кГц, в отличие от индукционных систем традиционной конструкции с нагревом ленты в продольном магнитном поле, для которых требуются частоты 100–2000 кГц [1–17]. При этом стоимость электрооборудования, применяемого на частотах до 10 кГц, и энергозатраты в таких установках в несколько раз меньше, чем для частот 100–2000 кГц.

Получены положительные результаты при разработке установок для нагрева цилиндрических заготовок из цветных металлов в поперечном магнитном поле, создаваемом либо катушками постоянного тока, либо системой постоянных магнитов [18–20].

Не охваченной методом нагрева в поперечном магнитном поле оказалась большая номенклатура изделий, имеющих прямоугольное поперечное сечение, выполненных из цветных металлов. В настоящее время такие изделия нагреваются в установках индукционного нагрева в продольном переменном магнитном поле, имеющих электрический КПД, не превышающий 0,5. Привлекательностью нагрева таких изделий в поперечном вращающемся магнитном поле постоянных магнитов является его потенциальная возможность в достижении электрического КПД, равного 0,75–0,85 [18, 19].

Выполненные исследования направлены на то, чтобы начать преодолевать этот пробел в создании энергоэффективных установок индукционного нагрева изделий прямоугольного сечения во вращающемся поперечном магнитном поле постоянных магнитов.

Постановка задачи

На рис. 1 представлена схема установки индукционного нагрева изделия прямоугольного поперечного сечения во вращающемся поле постоянных магнитов. На рисунке приняты следующие обозначения: h – высота магнитов; S, N – южный и северный полюса магнита, соответственно; A_m – угловой размер магнита; A_z – угловой размер зазора между магнитами в магнитной системе; a, b – ширина и высота нагреваемой заготовки; d – зазор между нагреваемой заготовкой и поверхностью магнитов; V – скорость вращения магнитной системы вокруг нагреваемой заготовки.

В работе выполняется нагрев алюминиевых изделий прямоугольного поперечного сечения до температуры 550 °С. Технологический зазор между ребром изделия и магнитами принимался равным $d=10, 20, 30$ мм, между изделием и магнитами располагается теплоизоляционный экран толщиной 5 мм. Высота магнитов $h=15$ мм, остаточная индукция 1 Тл, коэрцитивная сила 735 кА/А (направление намагничивания радиальное). Скорость вращения магнитной системы вокруг заготовки V изменялась от 600 до 3000 об/мин.

Процесс конвективного теплообмена поверхности вращающегося изделия заготовки с окружающей средой выполнялся при граничном условии 3 рода [20]. В силу малого значения степени черно-

ты алюминия теплопередача излучением между изделием и тепловым экраном не учитывалась.

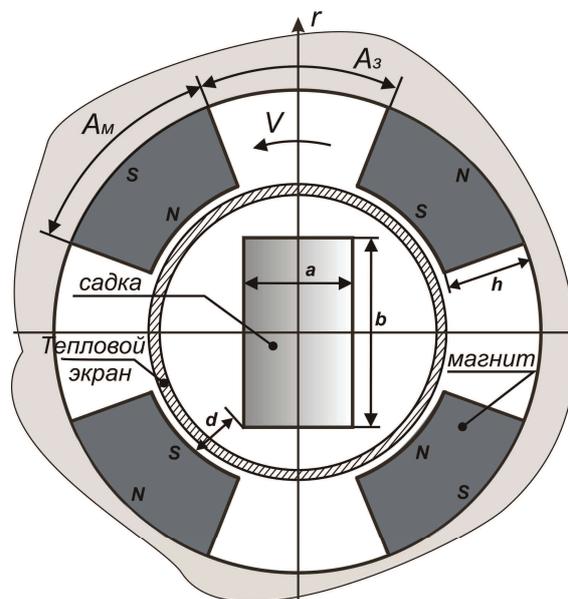


Рис. 1. Схема установки индукционного нагрева изделия прямоугольного поперечного сечения во вращающемся поле постоянных магнитов

Fig. 1. Diagram of installation for induction heating the product with rectangular cross section in rotating field of permanent magnets

Результаты расчета

Расчеты взаимосвязанной электромагнитной и тепловой задач в нагреваемом изделии выполнялись в программном комплексе ANSYS в двухмерной постановке на суперкомпьютере со следующими характеристиками: размер оперативной памяти 96 Гб; 2 процессора Intel Xeon X5680 3.33 МГц по шесть ядер каждый.

На рис. 2–4 представлены зависимости распределения температурного поля в изделии от геометрических и режимных параметров нагрева.

По рис. 2, 3 видно, что с повышением скорости вращения и числа пар полюсов магнитной системы происходит увеличение скорости нагрева и максимального температурного перепада в изделии. Это связано с возрастанием активной мощности, выделяющейся в нем. Следует отметить, что величина максимального температурного перепада растет с увеличением скорости вращения и числа пар полюсов, что связано с увеличивающейся частотой магнитного поля, проникающего в изделие и, как следствие, уменьшением глубины проникновения переменного электромагнитного поля, наведенного в изделии. В прямоугольном изделии, вне зависимости от частоты магнитного поля, более интенсивно разогреваются углы заготовки, а затем, за счет теплопроводности от зоны выделения энергии, остальная часть тела.

По рис. 4 видно, что с увеличением технологического зазора между изделием и поверхностью магнитов происходит уменьшение скорости нагре-

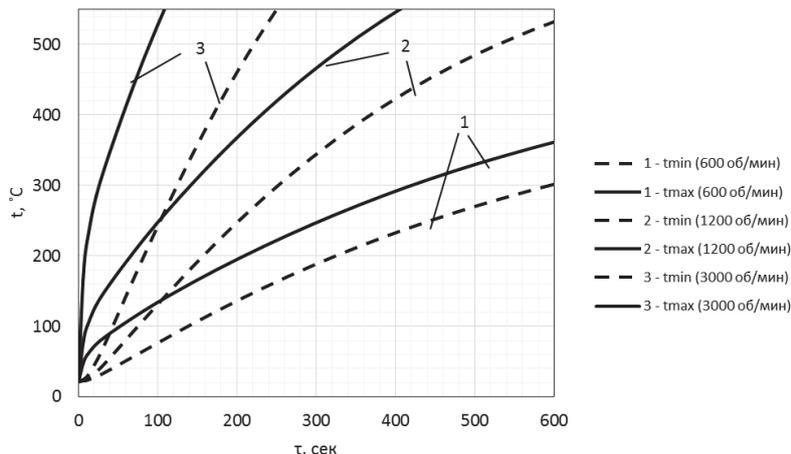


Рис. 2. Зависимость распределения температурного поля в прямоугольном изделии сечением 180×90 мм (зазора $d=10$ мм) от скорости вращения магнитной системы установки с 3 парами полюсов

Fig. 2. Dependence of temperature field distribution in rectangular product with section of 180×90 mm (the gap $d=10$ mm) on rotation speed of installation magnetic system with three pairs of poles

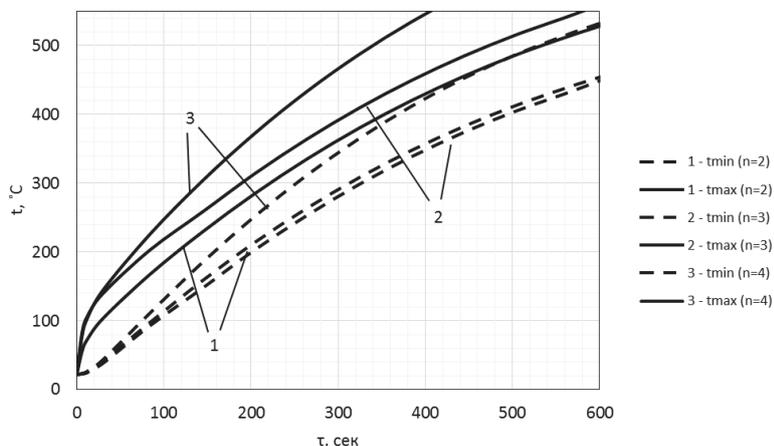


Рис. 3. Зависимость распределения температурного поля в прямоугольном изделии сечением 180×90 мм от количества пар полюсов магнитной системы установки при частоте вращения 1200 об/мин

Fig. 3. Dependence of temperature field distribution in rectangular product with section of 180×90 mm on a number of poles of the installation magnetic system at rotation frequency of 1200 r/min

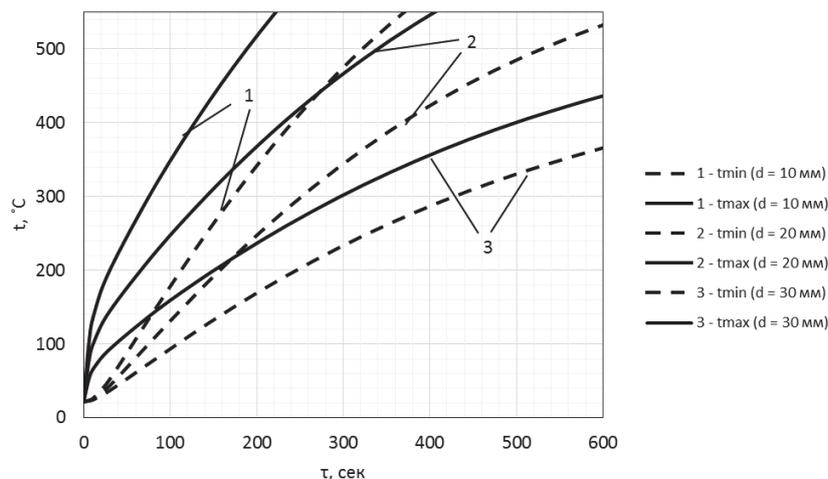


Рис. 4. Зависимость распределения температурного поля в прямоугольном изделии при частоте вращения магнитной системы 1200 об/мин установки с 3 парами полюсов от геометрических размеров заготовки

Fig. 4. Dependence of temperature field distribution in rectangular product at rotation frequency of 1200 r/min of the installation with three pairs of poles on subproduct geometry

ва заготовки. Такое поведение скорости нагрева связано с уменьшающейся удельной активной мощностью, выделяющейся в изделии.

Заключение

Модель, разработанная в программном комплексе ANSYS, позволила рассчитать связанную электромагнитную и тепловую задачу нагрева немагнитного изделия прямоугольного поперечного сечения во вращающемся магнитном поле постоянных магнитов.

Получены зависимости распределения температуры по сечению нагреваемых изделий прямоугольного сечения. Установлено, что в алюминиевых изделиях прямоугольного поперечного сечения возможно обеспечение температурных перепадов между точками ребра, образованного боковыми поверхностями и точками оси прямоугольного

сечения, менее 60 °С. Но это можно получить только при малых скоростях нагрева, обусловленных малыми скоростями вращения поперечного магнитного поля (менее 600 об/мин), при которых получается низкой энергоэффективностью (тепловой КПД) процесса нагрева.

Скорость нагрева и максимальный температурный перепад по сечению изделия увеличиваются с ростом числа пар полюсов и скорости вращения магнитной системы.

Энергетические показатели такого вида нагрева изделий прямоугольного сечения достаточно высоки (электрический КПД близок к 0,7), что определяет его перспективность при условии применения специальных способов выравнивания температурного поля по сечению нагреваемого изделия.

Научные исследования проведены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 3D-FEM Simulation of Transverse-Flux Induction Heaters / V. Bukanin, F. Dughiero, V. Nemkov, S. Lupi // CEFC 94. IEEE Transaction. on Mag. – Aix les Bains, France, 5–7 July 1994. – V. 31. – № 3. – P. 2174–2177.
- Transverse Flux Heating for Heat Treatment of Precipitous Metal Strips / I. Artuso, F. Dughiero, P. Fabbro, S. Lupi, A. Tiziani // IHS-98, International Induction Heating Seminar. – Padova, Italia, 13–15 May 1998. – P. 157–166.
- Investigation, design and optimization of transverse flux induction heating / A. Nikanorov, G. Nauvertat, H. Schulbe, B. Nacke, A. Muhlbauer // International seminar on heating by internal sources. HIS-2001: Induction, dielectric and conduction. – Padua, 12–14 September, 2001. – P. 553–558.
- Schülbe H., Nikanorov A., Nacke B. Flexible transverse flux heaters of metal strip // Proc. of International Symposium HES-04: Heating by Electromagnetic Sources. – Padua, 2004. – P. 293–300.
- Tudorache T., Fireteanu V. Magneto-Thermal-Translating motion coupling in 3D FEM analysis of metallic sheets transverse flux induction heating // Proc. of International Symposium HES-07: Heating by Electromagnetic Sources. – Padua, 2007. – P. 259–266.
- Dughiero F., Forzan M., Lupi S. Induction heating of aluminum billets rotating in a DC magnetic field // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды VIII Международ. конф. – Самара, 2006. – С. 171–176.
- Magnusson N. Prospects for rotating billet superconducting induction heating // Heating by electromagnetic sources HES-07. – Padua, 2007 – P. 479–486.
- Optimization design of induction heaters in the field of rotating permanent magnets with cylindrical load of non-ferrous metals / E. Golovenko, I. Gudkov, V. Goremykin, K. Michailov, E. Kinev // Proc. of the XVII Congress. – St. Petersburg, 21–25 May, 2012. – С.-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – С. 91–97.
- Analytical and numerical analysis of electrical parameters of induction heating with permanent magnets / A. Aliferov, A. Blanc, M. Forzan, A. Inkin, S. Lupi // Proc. of the XVII Congress. – St. Petersburg, 21–25 May, 2012. – С.-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – С. 81–90.
- A new high efficiency technology for the induction heating of nonmagnetic billets / F. Dughiero, M. Forzan, S. Lupi, F. Nicoletti, M. Zerbetto // Heating by electromagnetic sources HES-10. – Padua, 2010 – P. 531–538.
- Исследование электромагнитных параметров установок индукционного нагрева с постоянными магнитами / А.И. Инкин, А.В. Бланк, А.И. Алиферов, Е.Г. Порсев, В.А. Промзевел // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 1–1. – С. 178–182.
- Бланк А.В., Азанов А.В. Магнитоэлектрические установки индукционного нагрева и их электротепловые расчеты на базе каскадных схем замещения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 65–69.
- Бланк А.В., Алиферов А.И., Инкин А.И. Каскадные Е-Н-схемы замещения для расчета магнитоэлектрических установок индукционного нагрева // Электротехника. – 2011. – № 6. – С. 36–41.
- Инкин А.И., Алиферов А.И., Бланк А.В. Установки индукционного нагрева с постоянными магнитами и их каскадные А-Н-схемы замещения для расчета электромагнитного поля // Вестник Павлодарского государственного университета. Серия энергетическая. – 2011. – № 2. – С. 64–74.
- Инкин А.И., Алиферов А.И., Бланк А.В. Электротепловые расчеты установок электронагрева на основе универсальных каскадных схем замещения: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 202 с.
- Multi-objective optimisation of induction heating processes: Methods of the problem solution and examples based on benchmark model / P. Di Barba, Y. Pleshivtseva, E. Rapoport, M. Forzan, S. Lupi, E. Sieni, B. Nacke, A. Nikanorov // International Journal of Microstructure and Materials Properties. – 2013. – № 8 (4–5). – P. 357–372.
- Di Barba P., Pleshivtseva Yu., Lupi S. Multi-objective optimization for advanced design of induction through heaters // HES-13 – Heating by Electromagnetic sources. – Padua, Italy, 21–24 May, 2013. – № P-9. – P. 507–514.
- Electromagnetic and thermal analysis of the induction heating of aluminum rotating in a DC magnetic field / R. Araneo, F. Dughiero, M. Fabbri, M. Forzan, A. Geri, S. Lupi, A. Morandi, P. Ribani, G. Vega // Proc. of International Symposium HES-07: Heating by Electromagnetic Sources. – Padua, 2007. – P. 487–496.
- Karban P., Mach F., Dolezel I. Higher-order finite element modeling of rotational induction heating of nonferromagnetic cylindrical billets // Proc. of International Symposium HES-10: Heating by Electromagnetic Sources. – Padua, 2010 – P. 515–522.
- Алиферов А.И., Луци С. Индукционный и электроконтактный нагрев металлов: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 411 с.

Поступила 22.08.2013 г.

UDC 621.313.3:621.365.5

FEATURES OF HEATING NON-MAGNETIC ITEMS OF RECTANGULAR SECTION IN ROTATING FIELD OF PERMANENT MAGNETS

Roman A. Bikeev,

Cand. Sc., G.I. Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: bikeev@ngs.ru

Vladislav A. Promzelev,

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: promzelev@mail.ru

Aleksey V. Blank,

Cand. Sc., G.I. Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: kaftoe@ngs.ru

Andrey E. Morev,

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: glhficcup@yandex.ru

Relevance of the work is caused by the fact that at the present time in the field of new energy-saving electrotechnologies for heating non-ferrous metals products the focus is on induction heating in a transverse magnetic field. A large range of products with rectangular cross-section made of non-ferrous metals turned out not to be covered by the heating method in a transverse magnetic field. Currently such products are heated in the induction heating installations in alternating longitudinal magnetic field while electrical efficiency is not greater than 0,5. The attractiveness of such products heating in the transverse rotating magnetic field of permanent magnets is its potential to achieve electrical efficiency equal to 0,75–0,85. The paper considers the carried out studies of heating aluminum products with rectangular cross-section to a temperature of 550 °C.

The main aim of the study is to develop a numerical model on the basis of the program package ANSYS for calculating electromagnetic parameters of system «inductor–product» and the temperature field in the heated product; to calculate distributions of electromagnetic and temperature fields parameters in the heated product.

The methods used in the study: The main instrument of the study is the software package ANSYS, which allows modeling different spatial physical systems which behavior can be described by the differential equations. The finite element method was taken as the basic one. It allows dividing a continuous problem domain having an infinite number of freedom degrees into a finite, but sufficiently large, number of areas where parameters are constant. Physical properties and external influences are concentrated in the nodes of the system.

The results: The developed model allows calculating the coupled electromagnetic and thermal problems of heating non-magnetic product with rectangular cross-section in rotating magnetic field of permanent magnets. The paper introduces the dependencies of the maximum temperature differences obtained in the cross-sections of rectangular products made of aluminum. The dependencies are given as functions of rotational speed of permanent magnets, producing a transverse magnetic field, the number of pole pairs of the magnets and the gap between the heated product and magnets.

Key words:

Induction heating by a permanent magnet, temperature field, temperature difference, magnetic field rotational speed, number of pole pairs, alternating magnetic field, heat exchange, boundary conditions.

The research was financially supported by the State presented by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

REFERENCES

1. Bukanin V., Dughiero F., Nemkov V., Lupi S. 3D-FEM Simulation of Transverse-Flux Induction Heaters. *CEFC 94. IEEE Transaction. on Mag.* Aix les Bains, France, 5–7 July 1994. Vol. 31, no. 3, pp. 2174–2177.
2. Artuso I., Dughiero F., Fabbro P., Lupi S., Tiziani A. Transverse Flux Heating for Heat Treatment of Precipitous Metal Strips. *IHS-98, International Induction Heating Seminar.* Padova, Italia, 13–15 May, 1998. pp. 157–166.
3. Nikanorov A., Nauvertat G., Schulbe H., Nacke B., Muhlbauer A. Investigation, design and optimization of transverse flux induction heating. *International seminar on heating by internal sources. HIS-2001: Induction, dielectric and conduction.* Padua, 12–14 September, 2001. pp. 553–558.
4. Schulbe H., Nikanorov A., Nacke B. Flexible transverse flux heaters of metal strip. *Proc. of International Symposium HES-04: Heating by Electromagnetic Sources.* Padua, 2004. pp. 293–300.
5. Tudorache T., Fireteanu V. Magneto-Thermal-Translating motion coupling in 3D FEM analysis of metallic sheets transverse flux induction heating. *Proc. of International Symposium HES-07: Heating by Electromagnetic Sources.* Padua, 2007. pp. 259–266.
6. Dughiero F., Forzan M., Lupi S. Induction heating of aluminum billets rotating in a DC magnetic field. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy konferentsii «Problemy upravleniia i modelirovaniia v slozhnykh sistemakh»* [Proc. VIII International conference. Problems of control and design in complex systems]. Samara, 2006. pp. 171–176.

7. Magnusson N. Prospects for rotating billet superconducting induction heating. *Heating by electromagnetic sources HES-07*. Padua, 2007. pp. 479–486.
8. Golovenko E., Gudkov I., Goremykin V., Michailov K., Kinev E. Optimization design of induction heaters in the field of rotating permanent magnets with cylindrical load of non-ferrous metals. *Proceedings of the XVII Congress*. St. Petersburg, 21–25 May, 2012. St. Peterburg, SPbSETU «LETI» Publ., 2012. pp. 91–97.
9. Aliferov A., Blanc A., Forzan M., Inkin A., Lupi S. Analytical and numerical analysis of electrical parameters of induction heating with permanent magnets. *Proceedings of the XVII Congress*. St. Petersburg, 21–25 May, 2012. St. Peterburg, SPbSETU «LETI» Publ., 2012. pp. 81–90.
10. Dughiero F., Forzan M., Lupi S., Nicoletti F., Zerbetto M. A new high efficiency technology for the induction heating of nonmagnetic billets. *Heating by electromagnetic sources HES-10*. Padua, 2010. pp. 531–538.
11. Inkin A.I., Blank A.V., Aliferov A.I., Porsev E.G., Promzelev V.A. Issledovanie elektromagnitnykh parametrov ustanovok induktsionnogo nagreva s postoyannymi magnitami [Studying electromagnetic parameters of induction heating installations with permanent magnets]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniia i radioelektroniki*, 2012, no. 1–1, pp. 178–182.
12. Blank A.V., Azanov A.V. Magnitoelektricheskie ustanovki induktsionnogo nagreva i ikh elektroteplovye raschety na baze kaskadnykh skhem zameshcheniia. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2012, no.6, pp. 65–69.
13. Blank A. V., Aliferov A. I., Inkin A. I. Kaskadnye E-N-shemy zameshheniya dlja rascheta magnitoelektricheskikh ustanovok induktsionnogo nagreva [Cascading EH-equivalent circuit for calculating the magnitoelectric induction heating]. *Elektrotehnika*, 2011, no. 6, pp. 36–41.
14. Inkin A.I., Blank A.V., Aliferov A.I. Ustanovki induktsionnogo nagreva s postoyannymi magnitami i ikh kaskadnye A-N-skemy zameshcheniya dlya rascheta elektromagnitnogo polya [Induction heating installations with permanent magnets and their cascade A-H-equivalent circuits for calculating electromagnetic field]. *Vestnik Pavlodarskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya energeticheskaya*, 2011, no. 2, pp. 64–74.
15. Inkin A. I., Aliferov A.I., Blank A.V. *Elektroteplovye raschety ustanovok elektronagreva na osnove universalnykh kaskadnykh skhem zameshcheny* [Electrothermal calculations of electric heating systems based on universal cascade equivalent circuits]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2013. 202 p.
16. Di Barba P., Pleshivtseva Y., Rapoport E., Forzan M., Lupi S., Sieni E., Nacke B., Nikanorov A. Multi-objective optimisation of induction heating processes: Methods of the problem solution and examples based on benchmark model. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*. 2013, no. 8 (4–5), pp. 357–372.
17. Di Barba P., Pleshivtseva Yu., Lupi S. Multi-objective optimization for advanced design of induction through heaters. *HES-13 – Heating by Electromagnetic sources*. Padua, Italy), 21–24May, 2013. No. P-9, pp. 507–514.
18. Araneo R., Dughiero F., Fabbri M., Forzan M., Geri A., Lupi S., Morandi A., Ribani P., Vega G. Electromagnetic and thermal analysis of the induction heating of aluminum rotating in a DC magnetic field. *Proc. of International Symposium HES-07: Heating by Electromagnetic Sources*. Padua, 2007. pp. 487–496.
19. Karban P., Mach F., Dolezel I. Higher-order finite element modeling of rotational induction heating of nonferromagnetic cylindrical billets. *Proc. of International Symposium HES-10: Heating by Electromagnetic Sources*. Padua, 2010. pp. 515–522.
20. Aliferov A.I., Lupi S. *Induktsionny i elektrokontaktny nagrev metallov* [Metal induction and electrical contact heating]. Novosibirsk, NSTU publ., 2011. 411 p.

Received: 22 August 2013.