

УДК 621.313.3: 621.365.5

Исследование электромеханических, электрических и тепловых характеристик системы индукционного нагрева с постоянными магнитами*

Р.А. БИКЕЕВ¹, А.В. БЛАНК¹, В.Н. ТИМОФЕЕВ², В.А. ПРОМЗЕЛЕВ¹

¹Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет

²Красноярск, Сибирский Федеральный университет

В настоящее время в различных странах начинает разрабатываться оборудование индукционного нагрева немагнитных цилиндрических изделий, вращающихся в магнитном поле, создаваемом катушками постоянного тока или постоянными магнитами. В то же время электромагнитные, электромеханические и тепловые процессы в таких системах слабо изучены, а их разработка и тем более оптимизация конструктивного исполнения и режимов нагрева заготовок требуют глубокого их исследования. В представленной статье рассматриваются проведенные исследования электромеханических, электрических и тепловых характеристик системы индукционного нагрева с постоянными магнитами для нагрева изделий, выполненных из немагнитных металлов с малым удельным электросопротивлением (алюминия, меди, бронзы), вращающихся в поперечном магнитном поле. Расчеты выполнялись аналитическим методом по каскадным схемам замещения и численным моделированием в программном пакете ANSYS. Представлены зависимости плотности вихревого тока, наведенного в нагреваемой заготовке от радиальной и угловой координат, механического момента, развиваемого нагреваемой заготовкой, и температурного перепада при различных скоростях их вращений. Проведено сравнение результатов численного моделирования и аналитического расчета. Показано, что аналитический метод, основанный на применении каскадных схем замещения, имеет достаточно хорошую точность и может быть рекомендован для расчета электрических, механических и тепловых параметров индукционных установок с постоянными магнитами.

Ключевые слова: индукционный нагрев, нагрев немагнитных изделий, нагрев цилиндрических изделий, постоянными магнитами, плотность тока, механический момент, температурное поле, каскадные схемы замещения.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в различных странах начинает разрабатываться оборудование индукционного нагрева немагнитных цилиндрических изделий, вращающихся в магнитном поле, создаваемом катушками постоянного тока [1–3] или постоянными магнитами [4–7]. В то же время электромагнитные, электромеханические и тепловые процессы в таких системах слабо изучены, а их разработка и тем более оптимизация конструктивного исполнения и режимов нагрева заготовок требуют глубокого их исследования.

Практический интерес к индукционному нагреву изделий, выполненных из немагнитных металлов с малым удельным электросопротивлением (алюминия, меди, бронзы), вращающихся в поперечном магнитном поле, объясняется экономичностью и эффективностью сквозного нагрева таких изделий, по сравнению с классическими индукционными системами, нагревающими изделие в продольном переменном магнитном поле. При классическом индукционном нагреве немагнитных металлов с низким удельным электросопротивлением удается обеспечить полный КПД процесса нагрева не более 0,50–0,55, а зачастую он составляет величины 0,25–0,40. В то же время нагрев таких заготовок, вращающихся в магнитном поле постоянных магнитов, может достигать до 0,75–0,85 [4–7], а в магнитном поле постоянного тока выше 0,60 (с учетом потерь энергии в системе криогенной техники, применяемой в таких установках) [2, 3].

* Статья получена 26 сентября 2013 г.

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

Поэтому исследование эксплуатационных параметров системы нагрева с постоянными магнитами является актуальным.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе выполняется нагрев цилиндрических алюминиевых заготовок диаметром 80 мм до температуры 500 °С. На рис. 1 показана схема, реализованная при моделировании связанной электротепловой задачи. Технологический зазор между поверхностью заготовки и магнитами 30 мм, между заготовкой и магнитами располагается теплоизоляционный керамический экран (муфель) толщиной 10 мм. Высота магнитов 50 мм, остаточная индукция 1 Тл, коэрцитивная сила 735 кА/А. Скорость вращения заготовок изменялась от 500 до 6000 об/мин.

Расчеты выполнялись аналитическим методом по каскадным схемам замещения, методика которого изложена в [8, 9], и численным моделированием в программном пакете ANSYS.

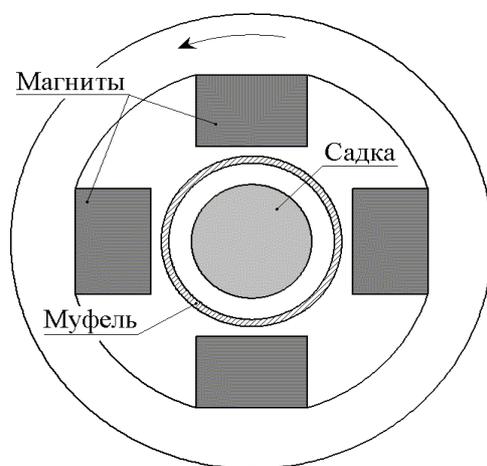


Рис. 1. Индукционная установка с постоянными магнитами

Процесс конвективного теплообмена поверхности вращающейся цилиндрической заготовки с окружающей средой выполнялся при граничном условии 3 рода [10]. В силу малого значения степени черноты алюминия теплопередача излучением между заготовкой и тепловым экраном не учитывалась.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

На рис. 2 представлены зависимости распределения мгновенной плотности тока, введенного в заготовку, по ее радиусу и угловой координате.

Графики изменения плотности тока получены в виде, близком к синусоидальному. Амплитудное значение плотности тока по мере уменьшения радиальной координаты смещается в направлении перемещения (вращения) магнитного поля относительно поверхности заготовки. При этом по мере уменьшения радиуса это смещение амплитуды увеличивается. Такое распределение плотности тока объясняет характер неравномерного мгновенного температурного поля, получаемого в заготовке [7].

На рис. 3 показана зависимость механического момента, развиваемого заготовкой, при различных частотах вращения. В пределах времени нагрева заготовок в зависимости от скорости ее вращения момент может изменяться в достаточно широких пределах (при 500 об/мин уменьшается в 2,5 раза, а при 3000 об/мин изменяется в 1,18 раза).

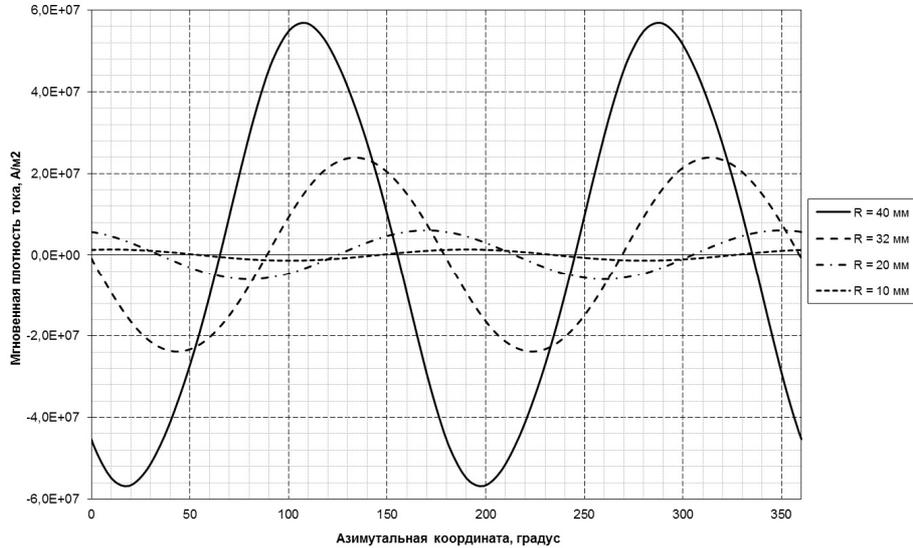


Рис. 2. Зависимость распределения мгновенной плотности тока, наведенного в заготовке, по ее радиусу и угловой координате

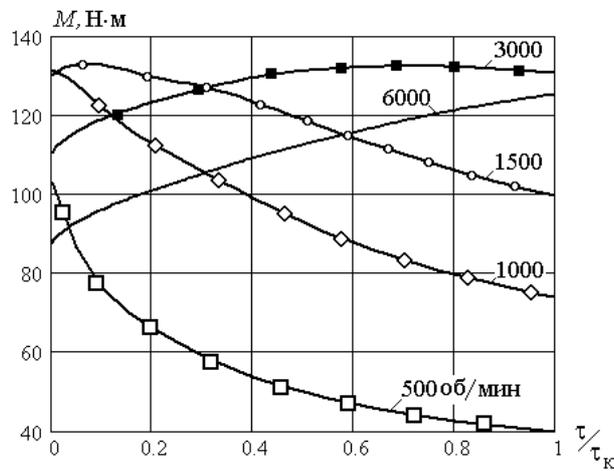


Рис. 3. Механический момент, развиваемый садкой, при различных значениях частоты вращения:

τ – текущее время, τ_k – время нагрева до температуры поверхности заготовки до 500 °С

На рис. 4, а приведены зависимости температурного перепада в функции времени и скорости вращения, а на рис. 4, б график нагрева заготовки при скорости вращения 3000 об/мин.

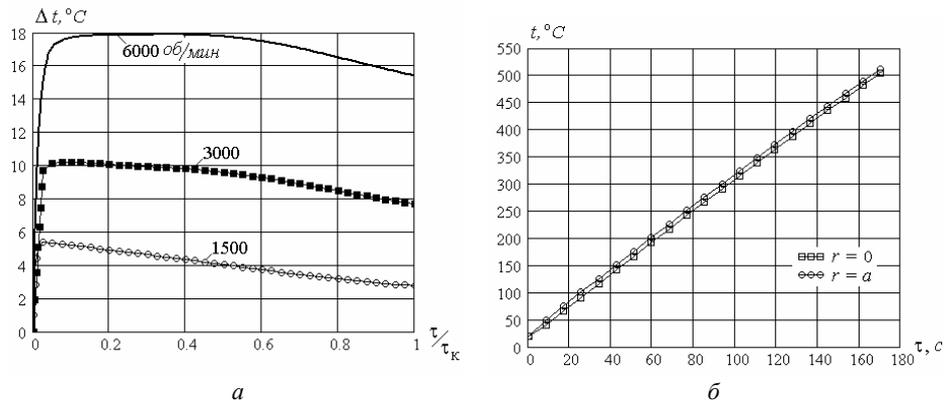


Рис. 4. Перепад температуры по радиусу заготовки при различных значениях частоты вращения (а) и график нагрева заготовки (б) (при скорости вращения 3000 об/мин, а – наружный радиус заготовки)

Сравнение результатов аналитического и численного решения при скорости вращения заготовки 3000 об/мин

Метод расчета	Время нагрева τ_k , с	Температура поверхности в конце нагрева, °С	Перепад температуры по радиусу в конце нагрева, °С	Максимальный перепад температуры, °С
Аналитический расчет	170	511.95	7.56	10.21
Численный расчет	170	511.73	8.06	15.14

Сравнение результатов численного моделирования и аналитического расчета показало достаточно высокую точность аналитических расчетов, что позволяет рекомендовать универсальные каскадные схемы для оптимизационных расчетов установок индукционного нагрева с постоянными магнитами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье исследованы зависимости плотности вихревого тока, наведенного в нагреваемой заготовке, от радиальной и угловой координат, механического момента, развиваемого нагреваемой заготовкой, и температурного перепада между поверхностью и центром изделия при различных скоростях их вращений. Показано, что аналитический метод, основанный на применении каскадных схем замещения, имеет достаточно хорошую точность и может быть рекомендован для расчета электрических, механических и тепловых параметров индукционных установок с постоянными магнитами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Dughiero F. Induction heating of aluminum billets rotating in a DC magnetic field / F. Dughiero, M. Forzan, S. Lupi // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды 8 Междунар. конф. – Самара, 2006. – С. 171–176.
- [2] Magnusson N. Prospects for rotating billet superconducting induction heating / N. Magnusson // Heating by electromagnetic sources HES-07. – Padua, 2007. – P. 479–486.

- [3] **Araneo R.** 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 // Heating by electromagnetic sources HES-07. – Padua, 2007. – P. 487–496.
- [4] 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 // Proceedings of the XVII Congress 21–25 may, 2012 St.Petersburg. – С.-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – С. 91–97.
- [5] Analytical and numerical analysis of electrical parameters of induction heating with permanent magnets / A. Aliferov, A. Blanc, M. Forzan, A. Inkin, S. Lupi // Proceedings of the XVII Congress 21–25 may, 2012 St.Petersburg. – С.-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – С. 81–90.
- [6] **Karban P.** Higher-order finite element modeling of rotational induction heating of nonferromagnetic cylindrical billets / P. Karban, F. Mach, I. Dolezel // Heating by electromagnetic sources HES-10. – Padua, 2010. – Pp. 515–522.
- [7] 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.
- [8] Исследование электромагнитных параметров установок индукционного нагрева с постоянными магнитами / А.И. Инкин, А.В. Бланк, А.И. Алиферов, Е.Г. Порсев, В.А. Промзелев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 1–1. – С. 178–182.
- [9] **Бланк А.В.** Магнитоэлектрические установки индукционного нагрева и их электротепловые расчеты на базе каскадных схем замещения / А.В. Бланк, А.В. Азанов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 65–69.
- [10] Индукционный и электроконтактный нагрев металлов: монография / А.И. Алиферов, С. Луци. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 411 с.

REFERENCES

- [1] Dughiero F., Forzan M., Lupi S. Induction heating of aluminum billets rotating in a DC magnetic field. *Trudy 8 Mezhdunarodnoi konferentsii "Problemy upravleniia i modelirovaniia v slozhnykh sistemakh"*. Samara, 2006, pp. 171–176.
- [2] Magnusson N. Prospects for rotating billet superconducting induction heating. *Heating by electromagnetic sources HES-07*. Padua, 2007, pp. 479–486.
- [3] 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. *Heating by electromagnetic sources HES-07*. Padua, 2007, pp. 487–496.
- [4] 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 21–25 may, 2012 St.Petersburg* St.Peterburg, SPbSETU «LETI» Publ., 2012, pp. 91–97.
- [5] 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 21–25 may, 2012 St. Petersburg*. St. Peterburg, SPbSETU «LETI» Publ., 2012, pp. 81–90.
- [6] Karban P., Mach F., Dolezel I. Higher-order finite element modeling of rotational induction heating of nonferromagnetic cylindrical billets. *Heating by electromagnetic sources HES-10*. Padua, 2010, pp. 515–522.
- [7] 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.
- [8] Inkin A.I., Blank A.V., Aliferov A.I., Porsev E.G., Promzelev V.A. Issledovanie elektromagnitnykh parametrov ustanovok induktsionnogo nagreva s postoiannymi magnitami. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniia i radioelektroniki*, 2012, no.1–1, pp. 178–182.
- [9] Blank A.V., Azanov A.V. Magnitoelektricheskie ustanovki induktsionnogo nagreva i ikh elektrotteplovye raschety na baze kaskadnykh skhem zameshcheniia. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2012, no. 6, pp. 65–69.
- [10] Aliferov A.I., Lupi S. Induktsionnyi i elektrokontaktnyi nagrev metallov. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, 411 p.

Бикеев Роман Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электро-технологических установок Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – ресурсо- и энергосберегающие электротехнологии. Имеет более 60 научных публикаций. E-mail: bikeev@ngs.ru.

Бланк Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – исследование электромагнитных и тепловых процессов в электротехнологических установках. Имеет более 40 научных публикаций. E-mail: kaftoe@ngs.ru.

Тимофеев Виктор Николаевич, доктор технических наук, профессор, академик АЭН РФ, заведующий кафедры электротехнологии и электротехники Сибирского федерального университета. Основное направление научных исследований – методы комплексного математического и физического моделирования. Имеет более 130 научных публикаций. E-mail: viktortim0807@mail.ru

Промзелев Владислав Алексеевич, аспирант кафедры автоматизированных электротехнологических установок Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – электронагревательные системы индукционного нагрева. Имеет 7 научных публикаций. E-mail: promzelev@mail.ru.

R.A. Bikeev, A.V. Blanc, V.N. Timofeev, V.A. Promzelev

Study of electromechanical, electrical and thermal characteristics of the induction heating with permanent magnets

Currently in different countries begins developed induction heating equipment nonmagnetic cylindrical products, rotating magnetic field produced by dc coils or permanent magnets. At the same time, electromagnetic, electromechanical and thermal processes in such systems are poorly understood, and their development and optimization of the more types and modes of heating billets require deep their research. In the present article discusses studies electromechanical, electrical and thermal characteristics of the induction heating system with permanent magnets for heating products made of non-ferrous metals with low resistivity (aluminum, copper, bronze), rotating in a transverse magnetic field. The calculations were performed by an analytical method in cascade substitution and numerical simulation software package ANSYS. The dependences of the density of the eddy current induced in the heated preform from radial and angular coordinates of the mechanical torque produced by the heated workpiece, and the temperature difference at different speeds of rotation were presented. Comparison of the results of numerical simulations and analytical calculation was made. It is shown that the analytical method based on the use of equivalent circuits cascade, has a reasonably good accuracy and can be recommended for the calculation of electrical, mechanical and thermal parameters of the induction units with permanent magnets.

Key words: induction heating, heating nonmagnetic articles, heating of cylindrical articles, permanent magnets, current density, mechanical torque, temperature field, the equivalent circuit of the cascade.