

Исследование энергетических параметров систем индукционного нагрева с магнитами*

А.И. АЛИФЕРОВ¹, Р.А. БИКЕЕВ¹, А.В. БЛАНК¹, А.Э. МОРЕВ¹, В.Н. ТИМОФЕЕВ²

¹ Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет

² Красноярск, Сибирский Федеральный университет

Для исследования энергетических параметров индукционной системы с постоянными магнитами, была разработана модель, позволяющая решать электромагнитную задачу. Благодаря этой модели удалось рассчитать распределение параметров электромагнитного поля (векторов напряженности электрического и магнитного полей, а также плотности тока) в системе «индуктор-нагреваемая цилиндрическая заготовка». На основе полученного распределения характеристик электромагнитного поля была определена интегральная активная мощность, выделяющаяся в заготовке. Представлены зависимости активной мощности, выделяемой в нагреваемой цилиндрической алюминиевой заготовке, как функции скорости вращения, числа пар полюсов системы постоянных магнитов, отношения углового размера зазора между магнитами к их угловому размеру. Установлена зависимость активной мощности в заготовке от величины зазора между ней и магнитами. С увеличением скорости вращения магнитной системы вокруг заготовки, а также с увеличением количества пар полюсов в магнитной системе происходит значительное возрастание интегральной активной мощности, выделяющейся в заготовке. Кроме этого, изменение направления вектора намагниченности постоянных магнитов от радиального до тангенциального также приводит к возрастанию активной мощности в заготовке, однако это возрастание не столь значительно.

Ключевые слова: постоянные магниты, магнитное поле вращающихся постоянных магнитов, индукционная система с постоянными магнитами, индукционный нагрев с постоянными магнитами, активная мощность в заготовке, численное моделирование, скорость вращения магнитного поля, вектора намагниченности.

ВВЕДЕНИЕ

Индукционные системы широко применяются в промышленности для нагрева металлов перед горячей обработкой давлением (штамповкой, формовкой, прессовкой и т. п.). В этих процессах обрабатываемая область заготовок должна быть нагрета до температур, которые соответствуют диапазону пластической деформации металла, обеспечивая требуемое по технологии температурное распределение в объеме заготовок. В ряде случаев процесс индукционного нагрева таких заготовок является достаточно энергетически эффективным. Однако при нагреве немагнитных металлов с низким удельным сопротивлением (алюминий, медь и латунь) эффективность индукционного нагрева становится низкой. Современные индукционные нагревательные системы реализуют нагрев таких материалов в продольном переменном магнитном поле с электрическим КПД в диапазоне 55–60 % [1].

В последние десять лет находит применение индукционный нагрев таких цилиндрических заготовок в магнитном поле постоянного тока, создаваемого сверхпроводящей криогенно охлаждаемой катушкой. При этом заготовка вращается посредством электрического двигателя. Полный КПД процесса определяется КПД двигателя, т. е. в большом диапазоне мощностей может составлять более чем 90 %. По данному направлению сделан большой объем исследований и созданы промышленные установки [1–3]. Основным их недостатком является сложность и высокая стоимость, вызванные наличием криогенной системы охлаждения катушек индуктора.

*Статья получена 3 октября 2013 г.

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

В последние годы получило развитие новое направление технической реализации индукционного нагрева цилиндрических немагнитных материалов – нагрев во вращающемся поперечном магнитном поле постоянных магнитов. Такой интерес к данному решению обусловлен более простой конструкцией установки и меньшей ее стоимостью, чем со сверхпроводящей криогенно охлаждаемой катушкой. При этом полный КПД установки с постоянными магнитами может также достигать 90 % [4–7]. Исследования параметров данных установок авторами статьи выполнялись на основе разработанных ими аналитических методов [8–12]. В данной статье представлены результаты численного моделирования.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для исследования энергетических параметров индукционной системы с постоянными магнитами была разработана модель, позволяющая решать электромагнитную задачу. Благодаря этой модели удалось рассчитать распределение параметров электромагнитного поля (векторов напряженности электрического и магнитного полей, а также плотности тока) в системе «индуктор-нагреваемая цилиндрическая заготовка». На основе полученного распределения характеристик электромагнитного поля была определена интегральная активная мощность, выделяющаяся в заготовке.

На рис. 1 показана схема, реализованная при моделировании индукционной системы для расчета электромагнитной задачи. Нагреваемая заготовка представляла собой цилиндр диаметром 80 мм и длиной 1000 мм. Технологический зазор z между поверхностью заготовки и магнитами в процессе моделирования изменялся в пределах от 5 до 30 мм. Высота магнитов $h = 50$ мм, остаточная индукция 1 Тл, коэрцитивная сила 735 кА/А. Угол α вектора намагниченности постоянных магнитов $\vec{H}_i$ принимал значение 0° , 45° и 90° относительно радиальной оси (см. рис. 1). Скорость вращения постоянных магнитов вокруг заготовки изменялась от 600 до 3000 об/мин.

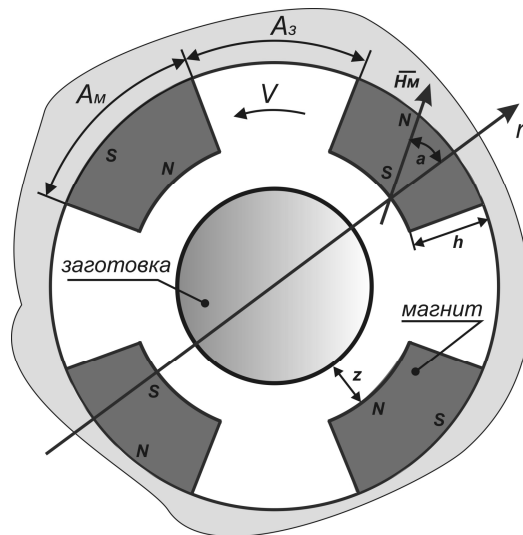


Рис. 1. Индукционная установка с постоянными магнитами

Расчеты выполнялись путем численного моделирования в программном пакете конечно-элементного анализа – ANSYS v14.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

На рис. 2 представлены зависимости активной мощности, выделяющейся в загрузке, от скорости вращения магнитной системы при технологическом зазоре $z = 10$ мм и отношении углового размера зазора к угловому размеру магнита $A_z/A_M = 1.25$ для различного количества пар полюсов, а также различных углов вектора намагниченности постоянных магнитов. С увеличением скорости вращения магнитной системы вокруг заготовки, а также с увеличением количества пар полюсов в магнитной системе происходит значительное возрастание интегральной активной мощности, выделяющейся в заготовке. Кроме этого, изменение направления вектора намагниченности постоянных магнитов от радиального до тангенциального также приводит к возрастанию активной мощности в заготовке, однако это возрастание не столь значительно.

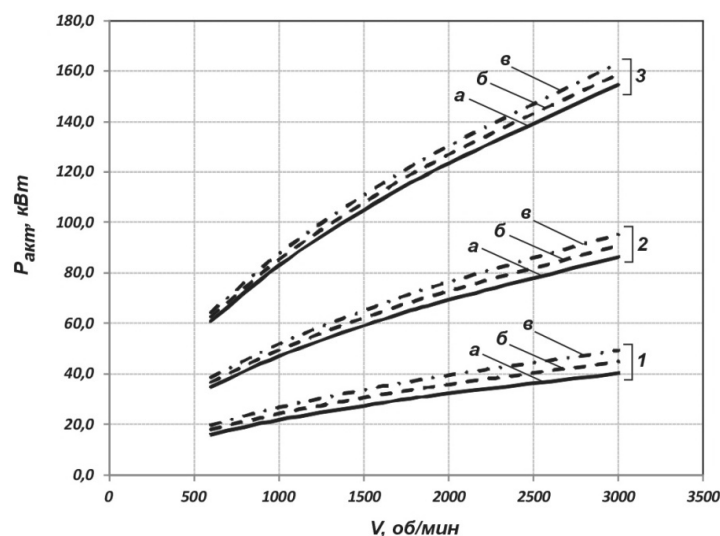


Рис. 2. Зависимость активной мощности, выделяющейся в заготовке, от скорости вращения магнитной системы:

1 — две пары полюсов в магнитной системе; 2 — три пары полюсов в магнитной системе; 3 — четыре пары полюсов в магнитной системе; а — угол вектора намагниченности $\alpha = 0^\circ$; б — $\alpha = 45^\circ$; в — $\alpha = 90^\circ$

На рис. 3 показана зависимость активной мощности, выделяющейся в заготовке, от скорости вращения магнитной системы при технологическом зазоре $z = 10$ мм и трех парах полюсов для различных отношений углового размера зазора к угловому размеру магнита A_z/A_M , а также различных углов вектора намагниченности постоянных магнитов. Как видно, увеличение соотношения A_z/A_M приводит к значительному уменьшению интегральной активной мощности, выделяющейся в нагреваемой цилиндрической заготовке. Увеличение скорости вращения магнитной системы также приводит к существенному возрастанию активной мощности в заготовке.

На рис. 4 приведена зависимость активной мощности, выделяющейся в заготовке, от величины технологического зазора между заготовкой и магнитной системой при скорости вращения магнитной системы $V = 600$ об/мин, четырех парах полюсов, угле вектора намагниченности постоянных магнитов $\alpha = 0^\circ$. С увеличением технологического зазора наблюдается значительное уменьшение вводимой в заготовку активной мощности, что определяется уменьшающейся величиной напряженности магнитного поля на поверхности заготовки.

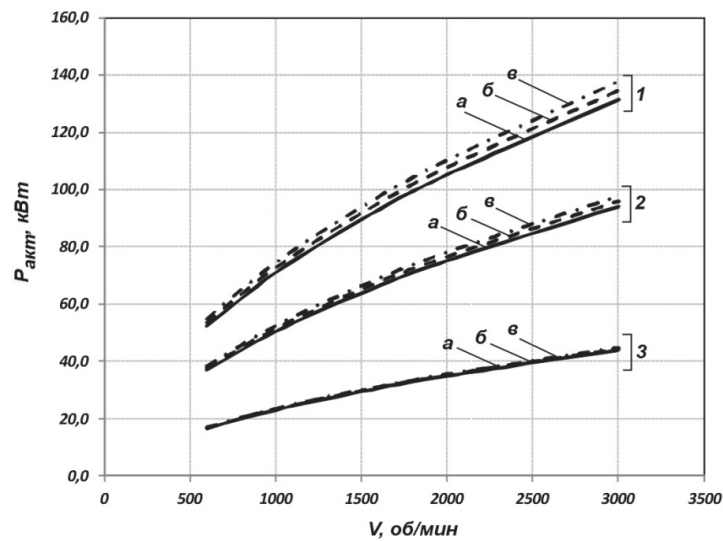


Рис. 3. Зависимость активной мощности, выделяющейся в заготовке, от скорости вращения магнитной системы:

1 – отношение углового размера зазора к угловому размеру магнита $A_g/A_m = 0.5$; 2 – $A_g/A_m = 1.25$; 3 – $A_g/A_m = 3.5$; а – угол вектора намагниченности $\alpha = 0^\circ$; б – $\alpha = 45^\circ$; в – $\alpha = 90^\circ$

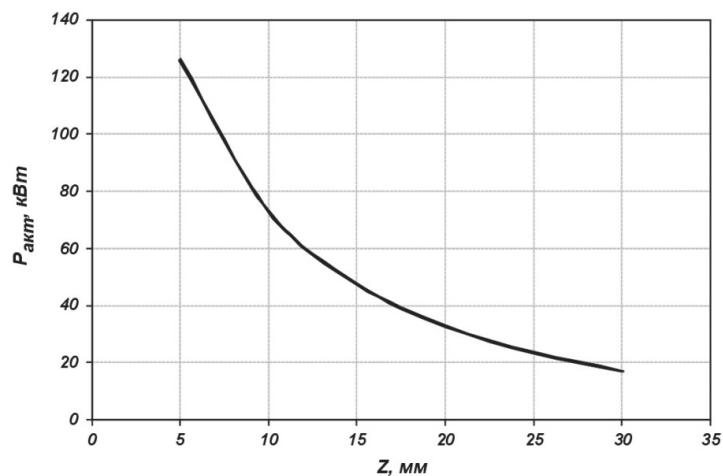


Рис. 4. Зависимость активной мощности, выделяющейся в загрузке, от величины технологического зазора между заготовкой и магнитной системой

Таким образом, проведенные исследования показали, что интегральная активная мощность, выделяемая в нагреваемой заготовке, может быть изменена посредством нескольких способов оптимизирующих энергетические показатели индукционной установки. В рассмотренном диапазоне увеличения скорости вращения магнитной системы, числа пар полюсов, технологического зазора, соотношения угловых размеров магнитной системы активная мощность повышалась для скорости и числа пар полюсов до двух раз, для технологического зазора уменьшалась до 6 раз, для соотношения угловых размеров понизилась до 3 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье исследована зависимость активной мощности, выделяемой в нагреваемой цилиндрической алюминиевой заготовке, от скорости вращения магнитной системы вокруг заготовки, числа пар полюсов в магнитной системе, отношения углового размера зазора к угловому размеру магнита, направления вектора намагниченности постоянных магнитов, а также технологического зазора между постоянными магнитами и заготовкой. Показано, что имеется несколько способов, позволяющих эффективно влиять на величину вводимой в заготовку активной мощности и, как следствие, оптимизировать конструктивное исполнение индукционной системы с постоянными магнитами для достижения необходимых технологических показателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Индукционный и электроконтактный нагрев металлов: монография / А.И. Алиферов, С. Лупи. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 410 с.
- [2] 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 // *Proceedings of International Symposium HES-07: Heating by Electromagnetic Sources, Padua*. – Padua, 2007. – P. 487–496.
- [3] Karban P. Higher-order finite element modeling of rotational induction heating of nonferromagnetic cylindrical billets / P. Karban, F. Mach, I. Dolezel // *Proceedings of International Symposium HES-10: Heating by Electromagnetic Sources, Padua*. – Padua, 2010. – P. 515–522.
- [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: Servizi Grafici Editoriali, 2010. – P. 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: Servizi Grafici Editoriali, 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] Каскадные Е-Н-схемы замещения для расчета магнитоэлектрических установок индукционного нагрева / А.В. Бланк, А.И. Алиферов, А.И. Инкин // *Электротехника*. – 2011. – № 6. – С. 36–41.
- [10] Инкин А.И. Установки индукционного нагрева с постоянными магнитами и их каскадные А-Н-схемы замещения для расчета электромагнитного поля / А.И. Инкин, А.И. Алиферов, А.В. Бланк // *Вестник Павлодарского государственного университета. Серия энергетическая*. – 2011. – № 2. – С. 64–74.
- [11] Инкин А.И. Электротепловые расчеты установок электронагрева на основе универсальных каскадных схем замещения: монография / А.И. Инкин, А.И. Алиферов, А.В. Бланк. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 202 с.
- [12] 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.

REFERENCES

- [1] Aliferov A.I., Lupi S. Indukcionnyj i jelektrokontaktnyj nagrev metallov. [Induction heating and electrical contact metals]. Novosibirsk. NSTU Publ, 2011, p. 210.
- [2] 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. *Proceedings of International Symposium HES-07: Heating by Electromagnetic Sources, Padua*. Padua, 2007. pp. 487–496. doi: 10.1108/03321640810847751
- [3] Karban P., Mach F., Dolezel I. Higher-order finite element modeling of rotational induction heating of nonferromagnetic cylindrical billets. *Proceedings of International Symposium HES-10: Heating by Electromagnetic Sources, Padua*. Padua, 2010, pp. 515–522. doi: 10.1108/03321641111152676
- [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*. LETI, 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*. LETI, 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: Servizi Grafici Editoriali, 2010, pp. 515–522. doi: 10.1108/03321641111152676
- [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: Servizi Grafici Editoriali, 2010, pp. 531–538.
- [8] Inkin A.I., Blank A.V., Aliferov A.I., Porsev E.G., Promzelev V.A. Issledovanie jelektronnagrevnykh parametrov ustanovok indukcionnogo nagreva s postojannymi magnitami. [Study parameters electromagnetic induction heating with a permanent magnet]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta system upravleniya i radioelektroniki*. 2010, № 1–1, pp. 178–182.
- [9] Blank A.V., Aliferov A.I., Inkin A.I. Kaskadnye E-N-shemy zameshheniya dlja rascheta magnitoelektricheskikh ustanovok indukcionnogo nagreva. [Cascading EH-equivalent circuit for calculating the magnetoelectric induction heating]. *Jeletrotehnika*, 2011, № 6, pp. 36–41.
- [10] Inkin A.I., Blank A.V., Aliferov A.I. Ustanovki indukcionnogo nagreva s postojannymi magnitami i ih kaskadnye A-N-shemy zameshheniya dlja rascheta jelektronnagrevnogo polja. [Induction heating of the permanent magnet and the cascade A-H-equivalent circuit for calculating the electromagnetic field]. *Vestnik Pavlodarskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya jenergeticheskaja*, 2011, № 2, pp. 64–74.
- [11] Inkin A.I., Aliferov A.I., Blank A.V. Jeletroteplovyje raschety ustanovok jelektronnagreva na osnove universal'nykh kaskadnykh shem zameshhenij. [Electrothermal calculations of electric heating systems based on universal cascade equivalent circuits]. *Novosibirsk. Publ. NSTU*, pp. 2013, pp. 202.
- [12] Blank A.V., Azanov A.V. Magnitoelektricheskie ustanovki indukcionnogo nagreva i ih jeletroteplovyje raschety na baze kaskadnykh shem zameshheniya. [Magnetoelectric induction heating installation and electrothermal calculations based on cascading equivalent circuits]. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Jeletromehanika*, 2012, № 6, pp. 65–69.

Алиферов Александр Иванович, доктор технических наук, профессор, академик АЭН РФ, заведующий кафедры автоматизированных электротехнологических установок Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – современные электротехнологии. Имеет более 120 научных публикаций, 3 монографии, 7 авторских свидетельств и патентов. E-mail: alif@ngs.ru.

Бикеев Роман Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электротехнологических установок Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – ресурса 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.

Морев Андрей Эдуардович, студент четвертого курса факультета мехатроники и автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – электронагревательные системы индукционного типа. Имеет 1 научную публикацию. E-mail: glhficcup@yandex.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.

A.I. Aliferov, R.A. Bikeev, A.V. Blanc, A.E. Morev, V.N. Timofeev
Research of energy parameters of induction heating systems with magnets

To study the energy parameters of the induction system with permanent magnets, was developed a model which allows to solve electromagnetic problems. The model has allowed calculating the distribution of electromagnetic field parameters (vectors of the electric and magnetic fields strength, as well as current density) in system "inductor – heated cylindrical billet." Based on this distribution of the characteristics of the electromagnetic field, has been defined integral active power released in the workpiece. There are presented dependences of the active power released in a heated cylindrical aluminum billet as a function of the rotational speed, of number of pole pairs of permanent magnets, of the ratio of the angular size of the gap between the magnets to their angular size. There have been found dependence of the active power in the workpiece on thickness of the gap between it and the magnets. With increasing speed of the magnet system rotation around the workpiece, and also with increasing number of pole pairs in the magnetic system, there is a significant increase in integral active power released in the workpiece. Furthermore, changing the direction of the magnetization vector of the permanent magnets from radial to the tangential leads to increase of active power in the workpiece, but this increase is not so significant.

Key words: permanent magnets, magnetic field of the rotating permanent magnets, the induction system with the permanent magnets, induction heating with permanent magnets, the active power in the workpiece, the numerical simulation, the speed of rotation of the magnetic field, the magnetization vector.