

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ СИММЕТРИЧНОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ ШАРООБРАЗНОЙ ФОРМЫ

В.Н. Мещеряков, С.С. Титов

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк

В последние несколько лет вышел ряд публикаций, затрагивающих вопросы симметричного индукционного нагрева под термообработку металлоизделий шарообразной формы на заданную глубину токами повышенной частоты. Следует отметить высокую степень важности разрабатываемой технологии в массовых производствах мелющих тел для горно-обогатительных фабрик и цементных заводов, шариков подшипников качения, клапанов в гидравлических системах, в том числе высокоизносостойких шариков в обратных клапанах глубинных насосов для нефтедобычи и др.

В качестве идеи технического решения задачи симметричного индукционного нагрева металлоизделий шарообразной формы в публикациях указывается новая конфигурация индуктора, направляющий желоб которого (он же транспортирующий профиль) изогнут в пространственную спираль с вертикальной осью симметрии. Кинематика движения шара по спиральному желобу в индукторе (свободное скатывание) характеризуется двухмерным, а в другом случае при переменной кривизне витков спирали (или траектории движения центра массы шара) – трёхмерным побуждением к изменению направления его оси собственного вращения от входа в индуктор до выхода из него. Указанный факт предопределяет возможность создания установок индукционного нагрева (УИН) непрерывного действия, обеспечивающих равномерное по плотности взаимодействие всей поверхности скатывающегося шара с электромагнитным полем в индукторе. Таким образом, появляется возможность достижения искомого симметричного нагрева на заданную глубину – прямого скоростного и потому высокоэнергетического, практически без окисления и обезуглероживания.

В связи с особой актуальностью разрабатываемой технологии, возникает потребность в анализе энергетических показателей УИН, обеспечивающих заявленные выше качества нагрева.

Ключевые слова: энергоэффективность, шар, термообработка, установка индукционного нагрева.

Введение

УИН с вертикальной осью симметрии согласно [1] состоит из нескольких индукторов (секционирование – с целью увеличения КПД установки и наличия возможности оперирования параметрами нагрева). Общая схема рассматриваемой УИН представлена на рис. 1, где: 1 – расходный бункер; 2 – подбункерный питатель дискретного действия; 3 – желоб задающий; 3-1, 3-2 – шарнирные соединения; 3-3 – телескопическое сочленение; 4 – транспортирующий профиль индуктора; 4-1 – беговая дорожка профиля; 4-2 – стенка вертикальная наружная; 4-3 – прямой участок профиля в индуктирующей соленоидной обмотке на впуске шаров; 5 – контур соленоида индуктора; 6 – токоподводящие шины; 7 – магнитопроводы; 8 – распорные оброчи; 9 – винты нажимные; 10 – нагреваемое изделие; 11 – параллелограмный механизм смещения положения бункера; 12 – опорная конструкция.

Транспортирующий профиль состоит из двух ступеней [2]: верхняя ступень – пространственно-спиральная с вертикальной осью симметрии, нижняя – плоскоспиральная. Математическая модель установки для симметричного индукционного нагрева металлоизделий шарообразной формы была разработана с использованием пакета математических программ Simulink программной среды MATLAB и подробно описана [3]. Число индукторов в верхней ступени было равно 30, в нижней ступени – 10.

Анализ потерь энергии при нагреве

Одним из основных энергетических показателей исследуемого комплекса является удельный расход электроэнергии при индукционном нагреве. Удельный расход электроэнергии во многом зависит от схемы питания установки [4]. Следовательно, для расчета расхода, кроме энергии расходуемой непосредственно на нагрев шара, необходимо определить потери энергии на всех элементах установки.

Рассматриваемая установка состоит из 40 индукторов, причем каждый индуктор запитан от индивидуального резонансного инвертора. Звено постоянного тока всех 40 инверторов выполнено общим и запитано от трехфазного мостового неуправляемого выпрямителя. Потери в таком выпрямителе равны [5]:

$$\Delta P_B = 2\Delta U_{дНВ} \frac{P_2}{U_d} + 2R_{дНВ} \left(\frac{P_2}{U_d} \right)^2, \quad (1)$$

где $\Delta U_{дНВ}$ – падение напряжения на диоде неуправляемого выпрямителя; $R_{дНВ}$ – дифференциальное сопротивление диода неуправляемого выпрямителя; P_2 – мощность на выходе выпрямителя; U_d – средневыходное напряжение.

Потери в каждом автономном резонансном инверторе равны:

$$\Delta P_{И} = \Delta P_{ИС} + \Delta P_{ИД}, \quad (2)$$

где $\Delta P_{ИС}$ – статические потери; $\Delta P_{ИД}$ – динамические потери.

Статические потери можно вычислить как:

$$\Delta P_{ИС} = \frac{1}{2\pi} (\Delta U_{ТИ} + \Delta U_{ДИ}) I_1 + (R_{ТИ} + R_{ДИ}) I_1^2 + \left(\frac{\Delta U_{ТИ} - \Delta U_{ДИ}}{U_d} \right) P_3 + \left(\frac{R_{ТИ} - R_{ДИ}}{U_d} \right) I_1 P_3, \quad (3)$$

где $\Delta U_{ТИ}$, $\Delta U_{ДИ}$ – начальные (граничные) падения напряжений на открытых IGBT-транзисторе и шунтирующем его диоде соответственно; $R_{ТИ}$, $R_{ДИ}$ – дифференциальные сопротивления откры-

тых IGBT-транзистора и шунтирующего его диода соответственно; P_3 – активная мощность на выходе инвертора; I_1 – действующее значение выходного тока инвертора.

Динамические потери вычисляются как:

$$\Delta P_{ИД} = (E_{sw(он)И} + E_{sw(оff)И}) f \frac{I_1}{I_{Ином}}, \quad (4)$$

где $E_{sw(он)И}$, $E_{sw(оff)И}$ – энергия потерь при включении и выключении транзистора инвертора; f – частота коммутации транзисторов инвертора; $I_{Ином}$ – номинальный ток инвертора.

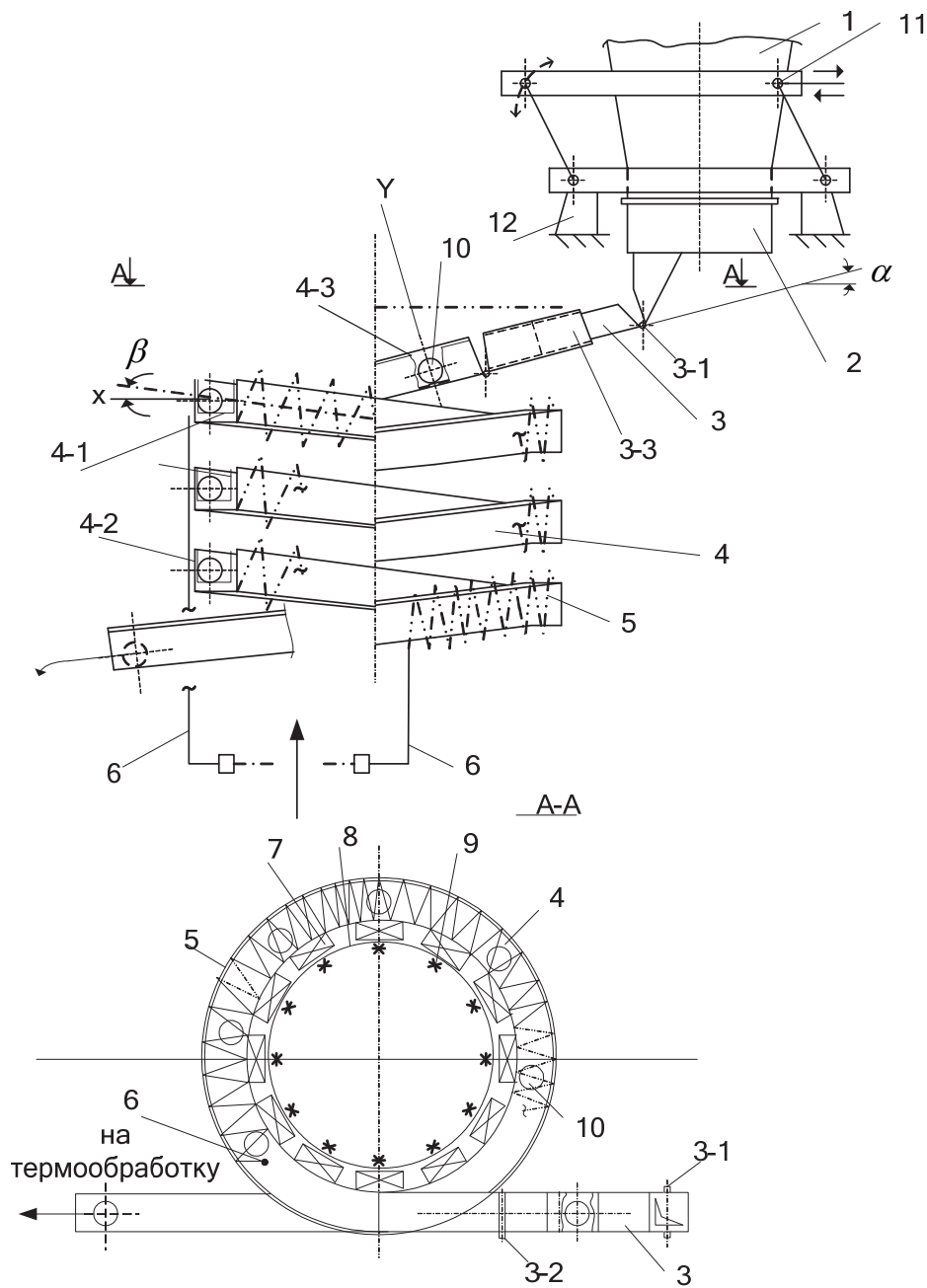


Рис. 1. Установка непрерывного действия для симметричного индукционного нагрева металлоизделий шарообразной формы

Потери в понижающем трансформаторе, расположенном между инвертором и индуктором, равны [6]:

$$\Delta P_{TP} = \Delta P_{TPM} + \Delta P_{TPCT}, \quad (5)$$

где ΔP_{TPM} – потери в меди обмоток; ΔP_{TPCT} – потери в стали магнитопровода.

Потери в меди рассчитываются по формуле:

$$\Delta P_{TPM} = I_1^2 r_{TP1} + (I_2')^2 r_{TP2}, \quad (6)$$

где I_1 – действующее значение тока первичной обмотки; I_2' – приведенное действующее значение тока вторичной обмотки; r_{TP1} – активное сопротивление первичной обмотки; r_{TP2} – приведенное активное сопротивление вторичной обмотки.

Потери в стали вычисляются по формуле:

$$\Delta P_{TPCT} = \psi_{TPM}^2 k_c f^\beta, \quad (7)$$

где k_c – постоянный коэффициент, характеризующий удельный вес потерь в стали; ψ_{TPM} – главное потокоцепление; $\beta \approx 1,3$.

Потери в проводах индуктора можно вычислить исходя из схемы замещения индуктора согласно рисунку по формуле:

$$\Delta P_{Инд} = I_m^2 r_l. \quad (8)$$

Активное сопротивление проводов индуктора r_l определяется по формуле:

$$r_l = \frac{\pi D_{и} W^2 \rho_{и}}{L_{и} \Delta_{и}}, \quad (9)$$

где $D_{и}$ – диаметр индуктора; $L_{и}$ – длина индук-

тора; W – число витков индуктора; $\rho_{и}$ – удельное сопротивление материала проводов индуктора; $\Delta_{и}$ – активная глубина проникновения тока в провода индуктора.

Суммарный расход электроэнергии на нагрев n шаров при числе индукторов равно 40 определяется по формуле:

$$Q_{\Sigma n} = T_n \times \left(\sum_{k=1}^{40} [I_{mk}^2 r_{mk} + \Delta P_{Ик} + \Delta P_{TPk} + \Delta P_{Индк}] + \Delta P_B \right), \quad (10)$$

где T_n – время прохода n шаров через все 40 индукторов.

Энергетические показатели предлагаемого оборудования

Время прохода T_n можно определить с помощью математической модели установки, описанной в [3]. Мощность, затрачиваемая на нагрев шаров в каждом индукторе, равна $I_{mk}^2 r_{mk}$, где I_{mk} – ток намагничивания, r_{mk} – активное сопротивление загрузки индуктора. Потери мощности зависят от времени, так как шар движется через индуктор, что приводит к изменению большого количества параметров. Потребляемую каждым индуктором мощность можно вычислить, используя математическую модель системы управления индуктором, описанную в [3].

На рис. 2 и 3 изображены графики изменения потребляемой мощности P и КПД η при проходе

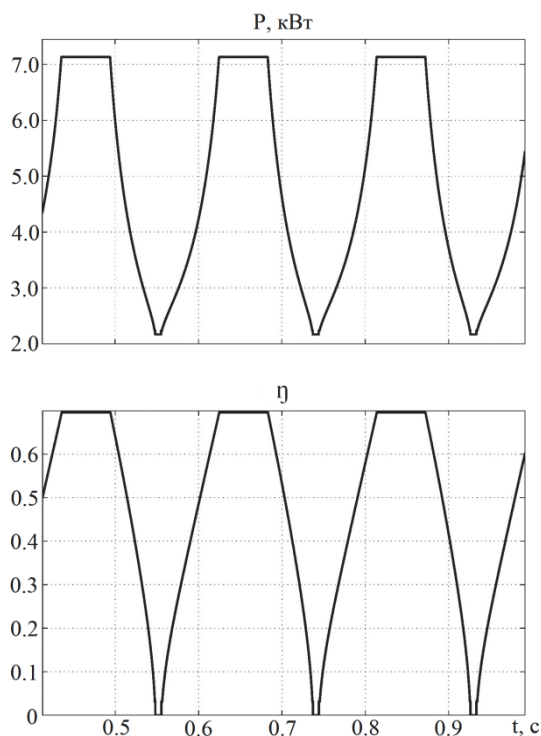


Рис. 2. Графики полезной мощности и КПД при проходе шаров с $T \approx 300$ °C через индуктор

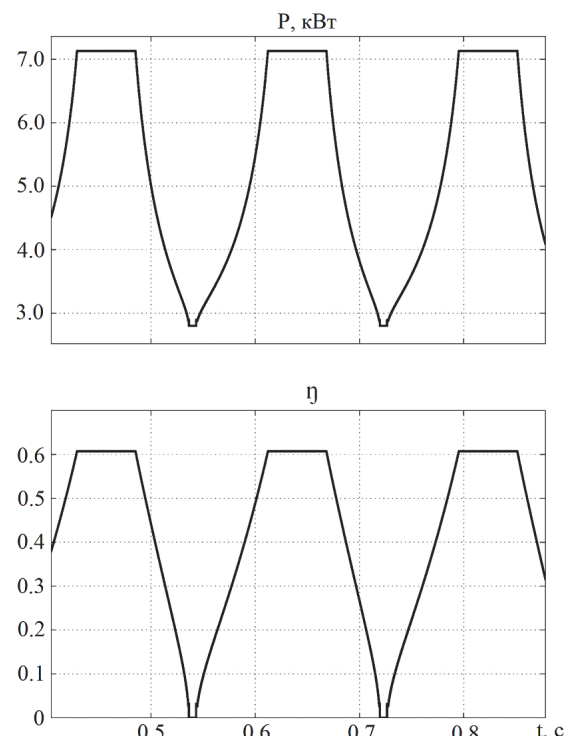


Рис. 3. Графики полезной мощности и КПД при проходе шаров с $T \approx 600$ °C через индуктор

шаров через индуктор с температурой шаров 300 °С (индуктор № 12) и с температурой шаров 600 °С (индуктор № 25). Максимальное значение мощности P приблизительно постоянно в обоих случаях, так как заданная в системе управления мощность нагрева шаров одинаковая на всех индукторах по длине профиля. Это обеспечивает равномерный нагрев шаров по мере их движения вниз по транспортирующему профилю. КПД каждого последующего индуктора по длине транспортирующего профиля несколько уменьшается, что связано с увеличением температуры нагреваемого шара. В момент времени, когда шар не находится в индукторе, вся потребляемая мощность P расходуется на потери в элементах схемы и КПД равен нулю. Общий КПД установки при нагреве n шаров определяется по формуле:

$$\eta_{\Sigma n} = \frac{T_n \sum_{k=1}^{40} I_{mk}^2 r_{mk}}{Q_{\Sigma n}}. \quad (11)$$

Удельный расход электроэнергии на единицу массы при нагреве шаров от 20 °С до закалочных 800 °С определяется по формуле:

$$Q_{уд} = \frac{Q_{\Sigma n}}{nm}, \quad (12)$$

где m – масса одного шара.

Расчет по формулам (11) и (12) с использованием математической модели комплекса для 538 нагреваемых шаров и массе одного шара 1,86 кг (мельший шар диаметром 80 мм) показал следующие результаты $\eta_{\Sigma n} = 0,524$ и $Q_{уд} = 215 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$.

Из [7] известны удельные затраты электроэнергии при сквозном нагреве стальных заготовок, эти данные сведены в таблице.

Удельные затраты электроэнергии при нагреве стальных заготовок

Сквозной индукционный нагрев стальных заготовок от 20 до 800 °С	
Диапазон частот 1000–10 000 Гц	
Тип преобразователя	Удельные затраты электрической энергии на нагрев ($\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$)
Машинные преобразователи	460–500
Тиристорные преобразователи	370–380

Заключение

Можно констатировать тот факт, что затраты электроэнергии предлагаемого электротехнического комплекса существенно ниже, чем у индукционных установок для сквозного нагрева стальных заготовок. Это объясняется в первую очередь заменой сквозного нагрева на поверхностный, что является

гораздо актуальнее для металлоизделий шарообразной формы.

КПД установки ниже, чем у существующих установок ТВЧ, применяемых при индукционном нагреве. Этот факт объясняется особенностями геометрии нагреваемых тел в традиционном индукторе (цилиндры, параллелограммы и пр.). Классические тела для индукционного нагрева имеют площадь поперечного сечения постоянную или близкую к таковой, чего нельзя сказать касательно металлических шаров. С другой стороны шары в индукторах движутся на определенном расстоянии между собой (это связано с тем, что они не должны друг друга экранировать), что влечёт за собой неизбежность наличия таких моментов времени, когда секции индуктора пусты. В конечном итоге, можно утверждать, что с повышением качества нагрева металлоизделий шарообразной формы под термообработку был снижен незначительно КПД комплекса, но в то же время был снижен удельный расход электроэнергии на нагрев.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предпринимательства в научно-технической сфере, номер гранта 3588 ГУ2/2014.

Литература

1. Пат. 2316603 Российская Федерация, МПК С21D9/36, H05B6/36. Установка непрерывного действия для индукционного нагрева изделий шарообразной формы / Н.М. Башилов, С.С. Титов (Россия); заявитель и патентообладатель Липецкий гос. техн. ун-т. – № 2008113575/02; заявл. 10.05.2006; опубл. 10.02.2008, Бюл. № 4. – 5 с.
2. Пат. 148725 Российская Федерация, МПК H05B6/36. Индуктор непрерывного действия для равномерного осесимметричного индукционного нагрева изделий шарообразной формы «Комбиспираль» / С.С. Титов (Россия); заявитель и патентообладатель С.С. Титов. – № 2013155827/07; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34. – 2 с.
3. Титов, С.С. Разработка и исследование электротехнического комплекса для симметричного индукционного нагрева металлоизделий шарообразной формы: дис. ... канд. техн. наук / С.С. Титов. – Липецк, 2014. – 160 с.
4. Слухоцкий, А.Е. Индукторы для индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. – М.: Энергия, 1974. – 263 с.
5. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишиматов, В.Н. Поляков. – М.: Академия, 2006. – 249 с.
6. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
7. Установки индукционного нагрева / А.И. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунэр. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.

Мещеряков Виктор Николаевич, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Электропривод», Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, mesherek@stu.lipetsk.ru.

Титов Сергей Сергеевич, канд. техн. наук, младший научный сотрудник, кафедра «Электропривод», Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, algebra934@yandex.ru.

Поступила в редакцию 27 января 2015 г.

DOI: 10.14529/power150107

ENERGY PARAMETERS OF THE INDUCTION HEATING EQUIPMENT FOR SYMMETRIC HEATING OF SPHERICAL METAL WARES

V.N. Meshcheryakov, *Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation, mesherek@stu.lipetsk.ru,*

S.S. Titov, *Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation, algebra934@yandex.ru*

Over last few years there have been a number of publications concerning symmetric induction heating for thermal treatment of spherical metal wares at a predetermined depth with high-frequency currents. We should note a high importance of the technology being developed for mass production of the grinding bodies for mining – concentrating plants and cement plants, balls of rolling bearings, valves in hydraulic systems, including high-wearproof balls in backpressure valves of deep pumps for oil production, etc.

The new configuration of the inductor with spout guide (same as transporting profile) bent in a spatial spiral with a vertical axis of symmetry is specified in publications as idea of an engineering solution for symmetric induction heating of spherical metal wares. The kinematics of the ball movement along the spiral chute in the inductor (free rolling) has a two-dimensional, and in another case, at a variable curvature of spiral turns (or trajectory of the center of mass of the ball) - three-dimensional impulse to change the direction of its own axis of rotation from the inductor entrance to the output. This fact determines the possibility of creating induction heating equipment (IHE) of continuous action providing a uniform density across interaction of all the ball surface with the electromagnetic field in the inductor. Thus, it is possible to achieve required symmetric heating on the predetermined depth – direct, high-speed and therefore high-energy efficient, practically without oxidation and decarburization.

Due to the particular relevance of the developed technology, there is a need for the analysis of energy parameters of IHE providing the qualities of heating declared above.

Keywords: energy efficiency, ball, thermal treatment, induction heating equipment.

References

1. Bashilov N.M., Titov S.S. *Ustanovka nepreryvnogo deystviya dlya induktsionnogo nagreva izdeliy sharoobraznoy formy* [Equipment of Continuous Induction Heating Products Spherical Shape]. Patent RF, no. 2316603, 2008.
2. Titov S.S. *Induktor nepreryvnogo deystviya dlya ravnomernogo osesimmetrichnogo induktsionnogo nagreva izdeliy sharoobraznoy formy "Kombispiral"* [Continuous Inductor for Uniform Axisymmetric Induction Heating Products Spherical Shape "Kombispiral"]. Patent RF, no. 148725, 2014.
3. Titov S.S. *Razrabotka i issledovanie elektrotekhnicheskogo kompleksa dlya simmetrichnogo induktsionnogo nagreva metalloizdeliy sharoobraznoy formy*. Dis. kand. tekhn. nauk [Development and Research of Electrical Complex for Symmetrical Induction Heating of Metal Spherical Shape. Cand. sci. diss.]. Lipetsk, 2014. 160 p.
4. Sluhotsky A.E., Riskin S.E. *Induktory dlya induktsionnogo nagreva* [Inductors for Induction Heating]. Moscow, Energy Publ., 1974. 263 p.
5. Braslavsky I.Y., Ishmatov Z.S., Polyakov V.N. *Energosberegayushchiy asinkhronnyy elektroprivod* [Energy Saving Induction Motor]. Moscow, Akademia Publ., 2006. 249 p.
6. Voldek A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electrical Machinery]. Leningrad, Energy Publ., 1974. 840 p.
7. Sluhotsky A.E., Nemkov V.S., Pavlov N.A., Bamuner A.V. *Ustanovki induktsionnogo nagreva* [Induction Heating Equipments]. Leningrad, Energy Publ., 1981. 328 p.

Received 27 January 2015

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Мещеряков, В.Н. Энергетические показатели электротехнического комплекса для симметричного индукционного нагрева металлоизделий шарообразной формы / В.Н. Мещеряков, С.С. Титов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 54–58. DOI: 10.14529/power150107

REFERENCE TO ARTICLE

Meshcheryakov V.N., Titov S.S. Energy Parameters of the Induction Heating Equipment for Symmetric Heating of Spherical Metal Wares. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 54–58. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150107