



Т.С. Ларькина^{1,2}, Г.С. Ленецкий²
¹Филиал Национального исследовательского
 университета «МЭИ» в г. Смоленске,
²Белорусско-Российский университет

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКТОРА НА КАЧЕСТВО И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

В данной статье исследованы вопросы оптимизации системы индукционного нагрева с учетом зависимости эффективности от частоты и геометрических параметров индуктора. Экспериментальные исследования показали, что повышение частоты и оптимальный выбор геометрических параметров способствуют увеличению эффективности процесса нагрева. Наблюдаемые тренды указывают на нелинейную зависимость КПД от рассматриваемых факторов. Полученные результаты позволяют разработчикам систем индукционного нагрева принимать обоснованные решения при выборе частоты и оптимальных геометрических параметров для достижения максимальной эффективности системы. Эта работа имеет практическую значимость для промышленности, где индукционный нагрев широко применяется в различных процессах, таких как нагрев металлов и плавление материалов.

Индукционный нагрев, оптимизация, идентификация, геометрические параметры, MATLAB, оптимальные параметры, моделирование, оптимальное управление.

Индукционный нагрев представляет собой процесс, основанный на использовании электромагнитного поля для нагрева материалов, размещенных внутри индуктора. Этот процесс обладает рядом значительных преимуществ, таких как повышенная скорость и эффективность нагрева, точный контроль температуры и применимость в различных производственных процессах.

Однако для достижения максимальной эффективности и качества индукционного нагрева необходимо учитывать ряд параметров, включая параметры индуктора. Геометрические характеристики индуктора, такие как его форма, размеры, материал и расположение, имеют значительное влияние на качество и эффективность индукционного нагрева.

Для более точного проектирования и оптимизации индукционного нагрева требуется представленный в данной статье подробный анализ влияния этих параметров индуктора на качество и эффективность индукционного нагрева, с использованием соответствующих математических моделей и формул для расчета потерь.

Исследование эффективности и качества индукционного нагрева и его зависимости от параметров индуктора является активной областью исследований в научном сообществе. В ряде исследований [1–4] было установлено, что геометрические характеристики индуктора, такие как размер, форма, материал, а также его расположение относительно нагреваемого объекта, оказывают существенное влияние на эффективность и качество индукционного нагрева.

Основными параметрами индукционного нагрева являются плотность магнитного потока в индукторе, частота переменного тока в индукторе, материал и

размеры нагреваемого объекта, а также расположение и геометрия индуктора. Оптимальный выбор этих параметров позволяет достичь максимальной эффективности и качества процесса нагрева [4].

Анализ процесса индукционного нагрева можно выполнить путем расчета плотности магнитного потока в индукторе [5, 6]:

$$B = \frac{\mu NI}{l}, \quad (1)$$

где B – плотность магнитного потока в индукторе, μ – магнитная проницаемость среды; N – число витков в индукторе; I – ток в индукторе; l – длина индуктора.

Для расчета потерь энергии в материале объекта используется формула:

$$P = kB^n f^2 V^2, \quad (2)$$

где P – потери энергии в материале объекта; k – коэффициент потерь, зависящий от свойств материала; n – показатель степени, зависящий от материала и частоты тока; f – частота переменного тока в индукторе; V – объем нагреваемого объекта.

Коэффициент эффективности индукционного нагрева определяется следующей формулой:

$$\eta = \frac{P_{useful}}{P_{input}}, \quad (3)$$

где P_{useful} – полезная мощность, передаваемая нагреваемому объекту; P_{input} – мощность, потребляемая индуктором, может быть рассчитана по формуле:

$$P_{input} = V_{in} I_{in}, \quad (4)$$

где P_{input} – мощность, потребляемая индуктором; V_{in} – напряжение на входе индуктора; I_{in} – ток, потребляемый индуктором.

Часть этой мощности теряется в виде тепла в проводниках индуктора и его обмотках. Потери мощности в проводниках можно рассчитать по формуле:

$$P_c = I_{rms}^2, \quad (5)$$

где P_c – потери мощности в проводниках; I_{rms} – среднеквадратичное значение тока в проводниках; R_c – сопротивление проводников.

Потери мощности в обмотках индуктора могут быть рассчитаны по формуле:

$$P_c = k_{eddy} B_{max}^2 t^2 V \omega^2, \quad (6)$$

где P_c – потери мощности в обмотках; k_{eddy} – коэффициент Вигнера, который учитывает вихревые токи в материале обмоток; B_{max} – максимальная индукция магнитного поля; t – толщина материала обмотки; V – объем материала обмотки; ω – частота вращения магнитного поля.

Таким образом, общие потери мощности в индукторе можно рассчитать, как:

$$P_{loss} = P_{c,wire} + P_{c,coil}, \quad (7)$$

где $P_{c,wire}$ – потери мощности в проводниках; $P_{c,coil}$ – потери мощности в обмотках индуктора.

Зная потери мощности в индукторе, можно рассчитать мощность, которая действительно используется для нагрева материала. Это может быть особенно полезно при проектировании индуктора для определенных задач нагрева, где требуется высокая эффективность и минимальные потери мощности.

Кроме потерь от материала индуктора, также важно учитывать потери, связанные с геометрическими параметрами индуктора, такими как его форма, размер и расположение. Например, диаметр индуктора может влиять на локализацию и эффективность нагрева. Форма индуктора также может оказывать влияние на распределение плотности тока и, следовательно, на потери. Расположение индуктора относи-

тельно заготовки также может влиять на эффективность и качество нагрева [2].

Потери, связанные с геометрическими параметрами, могут быть описаны с помощью формулы:

$$P_G = K_G \cdot B^2, \quad (8)$$

где P_G – потери, связанные с геометрическими параметрами, K_G – коэффициент потерь, зависящий от геометрических параметров, B – индукция магнитного поля, V – объем индуктора.

Коэффициент потерь (K_G) зависит от формы, размеров и расположения индуктора и может быть выражен следующей формулой:

$$K_G = K_{1G} \cdot K_{2G} \cdot K_{3G}, \quad (9)$$

где K_{1G} , K_{2G} и K_{3G} – коэффициенты, учитывающие влияние соответствующих геометрических параметров.

Например, для круглой катушки длиной l , диаметром d и числом витков N , коэффициент потерь (K_G) может быть определен следующей формулой:

$$K_G = \frac{\pi^2 \cdot l^2}{12d^2} \cdot \frac{1}{N^2}. \quad (10)$$

Увеличение длины катушки, уменьшение диаметра и увеличение числа витков приводят к уменьшению потерь, связанных с геометрическими параметрами. Длинная катушка обеспечивает более равномерное распределение магнитного поля, что уменьшает концентрацию магнитного потока и потери. Уменьшение диаметра катушки позволяет локализовать магнитное поле в меньшем пространстве, что также снижает потери. Увеличение числа витков увеличивает индуктивность и эффективность передачи энергии.

Однако при выборе геометрических параметров необходимо учитывать не только потери, связанные с геометрией, но и другие факторы, такие как электромагнитная совместимость, механическая прочность и экономические ограничения.

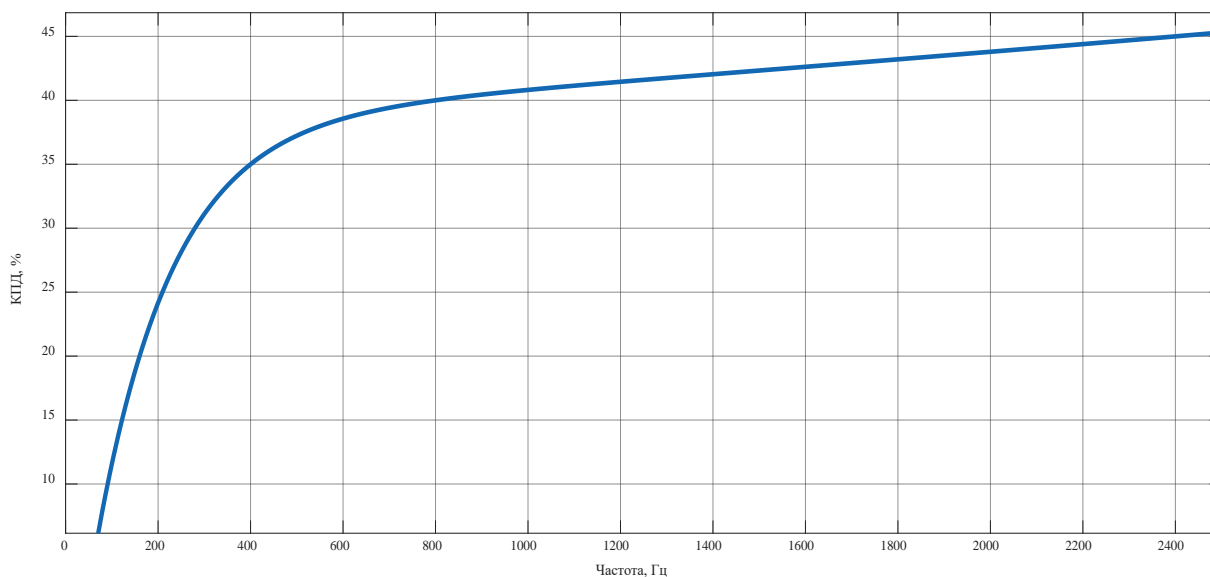


Рис. 1. Зависимость КПД индуктора от частоты источника тока

График зависимости КПД от частоты источника тока, выполненный в прикладной среде MATLAB (рис. 1), дополняет анализ, что позволяет определить оптимальную частоту для достижения максимальной эффективности. При анализе графика следует обратить внимание на точку максимального значения КПД. Из графика можно сделать выводы о влиянии частоты на эффективность нагрева и выбрать оптимальную частоту для конкретных задач.

Таким образом, оптимальный выбор геометрических параметров и частоты источника тока позволяет достичь наилучшей эффективности в процессе индукционного нагрева и минимизировать потери энергии.

Анализ графика показывает, что при низких частотах (до 400 Гц) КПД индукционного нагрева составляет менее 30 %. Это может быть связано с большими потерями энергии, вызванными низкой эффективностью передачи энергии катушке и материалу.

Однако с увеличением частоты КПД начинает возрастать и достигает значения более 45 %. Это свидетельствует о более эффективной передаче энергии и снижении потерь, связанных с геометрическими параметрами и другими факторами.

Дальнейшее увеличение частоты может продолжать увеличивать КПД, однако на графике не видно точки насыщения. Это указывает на потенциал для дальнейшего повышения эффективности индукционного нагрева с увеличением частоты источника тока.

Анализ графика подтверждает, что выбор более высокой частоты в рамках рассмотренного диапазона может

привести к увеличению КПД индукционного нагрева и более эффективному использованию энергии.

Исследование зависимости глубины проникновения от частоты и свойств материалов является важной задачей в области индукционного нагрева [7]. При увеличении частоты источника тока происходит уменьшение глубины проникновения электромагнитного поля в материал. Это объясняется явлением скин-эффекта, при котором ток сосредотачивается в более поверхностных слоях материала [8].

Таким образом, при выборе частоты индукционного источника тока необходимо учитывать требуемую глубину проникновения в материал и его электрические свойства. Высокие частоты могут быть предпочтительны для поверхностного нагрева, в то время как низкие частоты могут обеспечивать более глубокое проникновение в материал.

Анализируя график зависимости глубины проникновения от частоты индуктора, можно сделать следующие выводы (рис. 2 [9]):

- при низких частотах (до 1 кГц) глубина проникновения значительно больше и может достигать значительных значений;
- с увеличением частоты до 10 кГц глубина проникновения резко сокращается, и разница между значениями становится менее заметной.
- график также показывает, что глубина проникновения зависит от свойств материала. Материалы с высокой электрической проводимостью имеют меньшую глубину проникновения, в то время как материалы с низкой проводимостью имеют более значительные значения глубины проникновения.

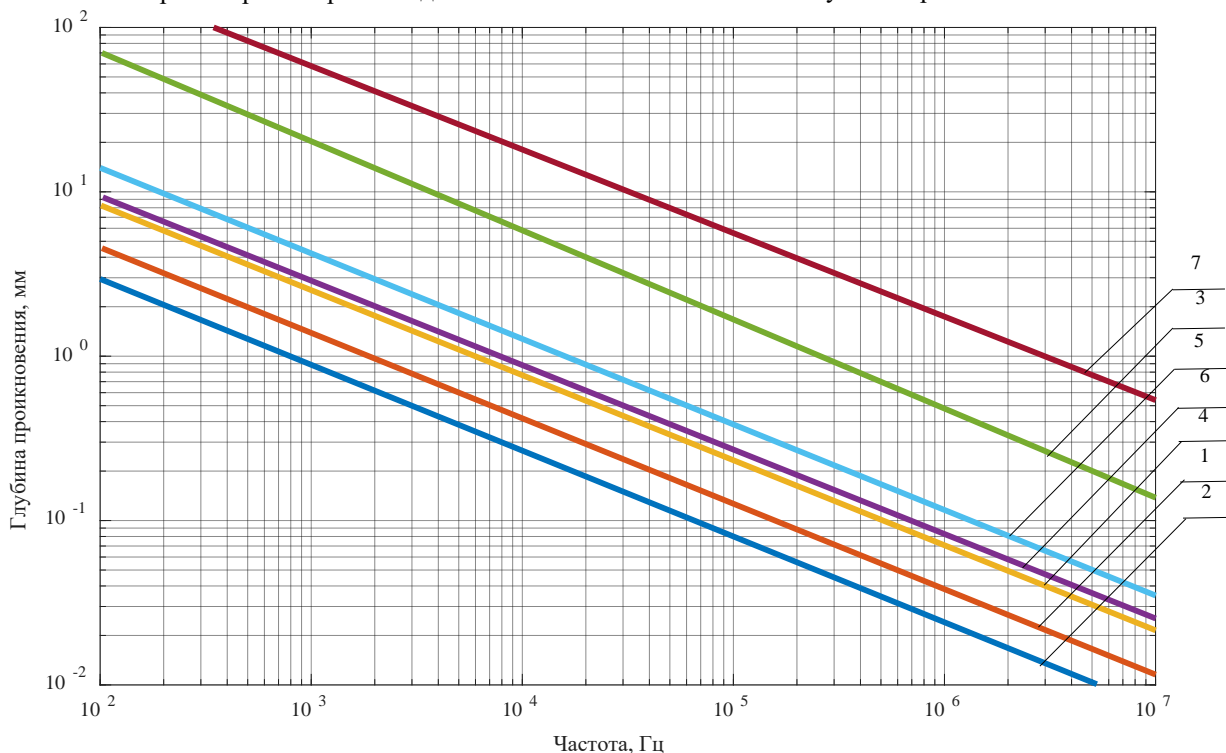


Рис. 2. Зависимость глубины проникновения от частоты и свойств материалов (выполнено в среде MATLAB): 1 – сталь ($\mu = 40$ Гн/м); 2 – сталь ($\mu = 100$ Гн/м); 3 – сталь ($\mu = 1$ Гн/м, 800 °С); 4 – медь ($\mu = 0.99$ Гн/м); 5 – медь (800 °С); 6 – алюминий ($\mu = 1$ Гн/м); 7 – графит ($\mu = 1$ Гн/м)

Этот анализ графика помогает понять, как частота индуктора и свойства материала влияют на глубину проникновения. Он может быть полезен для оптимизации процесса индукционного нагрева, выбора оптимальных параметров и материалов для конкретных задач и требований.

Исследование зависимости КПД от геометрических параметров, выполненное в прикладной среде MATLAB, позволяет проанализировать влияние размеров и формы индуктора на его эффективность (рис. 3).

Основные геометрические параметры, такие как длина, диаметр и число витков катушки, могут оказывать значительное влияние на КПД системы.

Анализ этих зависимостей позволяет определить оптимальные геометрические параметры индуктора для достижения максимальной эффективности нагрева материала. Это важный аспект проектирования и оптимизации системы индукционного нагрева.

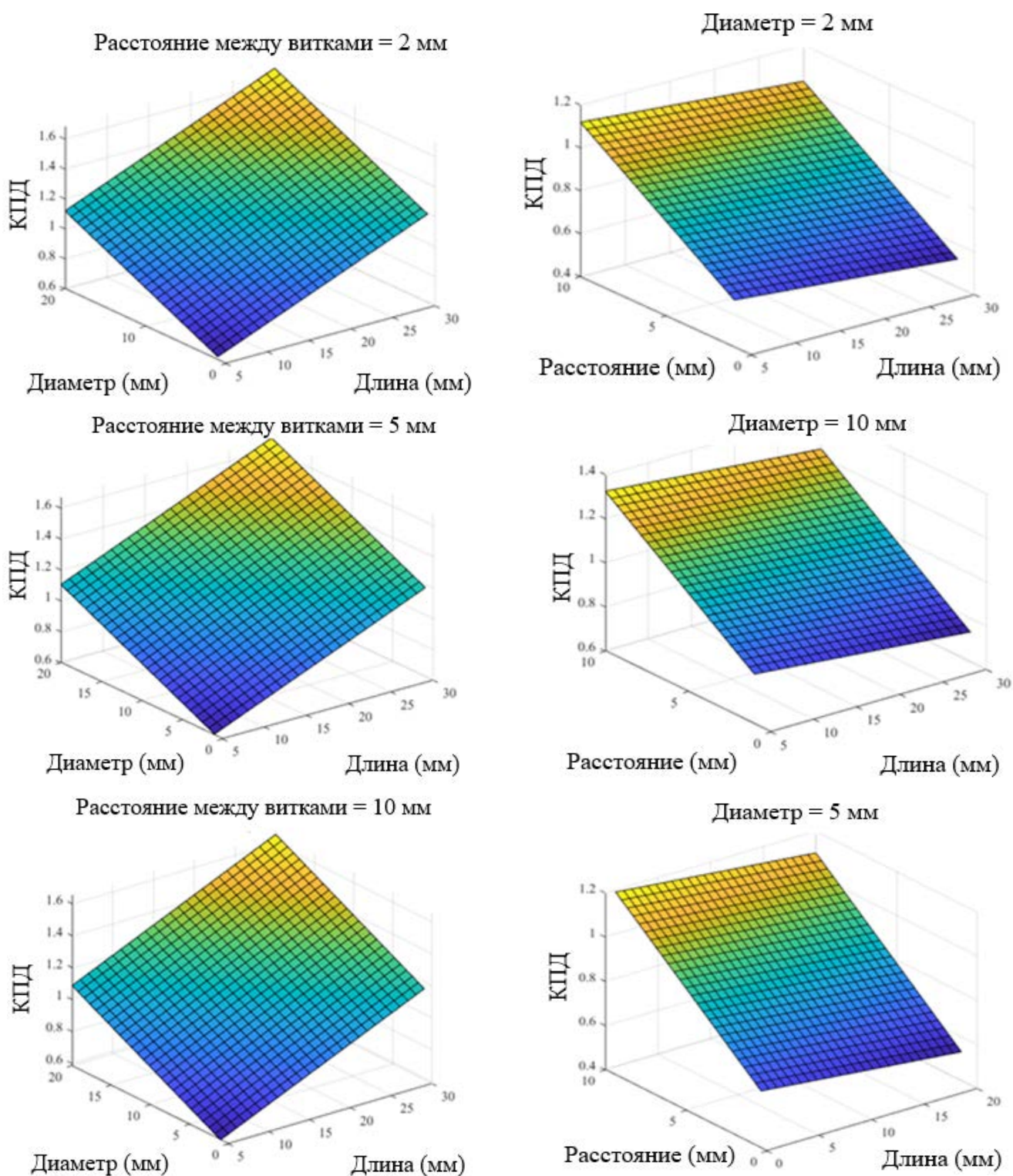


Рис. 3. Зависимости КПД от геометрических параметров индуктора

Изучая графики на рисунке 3, которые демонстрируют зависимость КПД от геометрических параметров индуктора, можно сделать следующие наблюдения:

1. Влияние длины индуктора и диаметра:

– при увеличении длины индуктора и диаметра наблюдается повышение КПД. Это объясняется увеличением площади взаимодействия магнитного поля с нагреваемым объектом, что способствует более эффективной передаче энергии;

– однако при дальнейшем увеличении длины и диаметра прирост КПД становится менее выраженным. Это может указывать на насыщение процесса нагрева, когда дополнительное увеличение размеров не приводит к существенному увеличению эффективности.

2. Влияние расстояния между витками:

– увеличение расстояния между витками индуктора приводит к снижению КПД. Это связано с уменьшением плотности тока в индукторе и, следовательно, снижением эффективности передачи энергии в нагреваемый объект. Более близкое расположение витков обеспечивает более интенсивное магнитное поле и, соответственно, более эффективный нагрев.

3. Взаимодействие геометрических параметров:

– графики позволяют наглядно оценить влияние комбинации геометрических параметров на КПД. Например, при одинаковой длине индуктора увеличение диаметра может компенсировать отрицательное влияние большего расстояния между витками. Это позволяет достичь более высокой эффективности нагрева путем подбора оптимальных геометрических параметров индуктора.

Литература

1. Логачев, М. В. Расчеты нагревательных устройств: учебно-методическое пособие для студентов специальностей 1-36 01 05 «Машины и технологии обработки материалов давлением», 1-36 01 02 «Материаловедение в машиностроении»: в 3 частях /

М. В. Логачев, Н. И. Иваницкий, Л. М. Давидович. – Минск : БНТУ, 2010. – 131 с.

2. Проектирование индукционных установок на основе решения задач многокритериальной оптимизации / Плешивцева Ю. Э., Рапопорт Э. Я., Наке Б. [и др.] // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2016. – Т. 24, № 2. – С. 47–57.

3. Rudnev, V. Handbook of induction heating / Rudnev V., Loveless D. – New York, Basel: Marcel Dekker Inc., 2003. – 797 p.

4. Данилушкин, А. И. Оптимальное проектирование конструкции и режимов индукционных нагревателей в специализированных комплексах обработки неэлектропроводных материалов / Данилушкин А. И., Крылов А. Н., Шумаков М. А. // Труды Академии Электротехнических Наук Чувашской республики / под редакцией профессора Миронова Ю. М. – Чебоксары : Чувашский государственный университет, 2003. – № 1. – С. 27 – 30.

5. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – Москва : Гардарики, 2007. – 701 с.

6. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле : учебник для бакалавров / Л. А. Бессонов. – Люберцы : Юрайт, 2016. – 317 с.

7. Ларькина, Т. С. Параметрическая идентификация параметров среды системы коленного индукционного нагрева жидкости / Ларькина Т. С., Лыготчиков В. В. // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 3 (76). – С. 117–125.

8. Лыготчиков, В. В. Синтез системы автоматического регулирования температуры жидкости с улучшенными динамическими показателями / Лыготчиков В. В., Ларькина Т. С. // Вестник МЭИ. – 2019. – № 5. – С. 73–80.

9. Ланин, В. Л. Высокочастотный электромагнитный нагрев для пайки электронных устройств / В. Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 5. – С. 46–49.

T.S. Larkina^{1,2}, G.S. Lenevsky²

*¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
National Research University «MPEI» in Smolensk,*

²Belarusian-Russian University

MATHEMATICAL MODELING AND ANALYSIS OF INDUCTOR PARAMETERS INFLUENCE ON INDUCTION HEATING QUALITY AND EFFICIENCY

This article presents the issues of optimizing the induction heating system, taking into account the dependence of efficiency on frequency and geometric parameters of the inductor. Experimental studies have shown that increasing the frequency and the optimal choice of geometric parameters contribute to an increase in the efficiency of the heating process. The observed trends indicate a non-linear dependence of the efficiency on the considered factors. The results obtained allow the designers of induction heating systems to make informed decisions when choosing the frequency and optimal geometric parameters to achieve maximum system efficiency. This work is of practical importance for industry where induction heating is widely used in various processes such as heating metals and melting materials.

Induction heating, optimization, identification, geometric parameters, MATLAB, optimal parameters, modeling, optimal control.