

Проектирование индукционного устройства для нагрева жидкой среды^{*}

В.В. ЛЬГОТЧИКОВ^а, Т.С. ЛАРЬКИНА^б

214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»»

^а vvldrive@yandex.ru ^б tatyana.larkina.2015@yandex.ru

Проектирование индукционных устройств для нагрева жидкой среды является актуальной задачей в современной промышленности. Индукционный нагрев является эффективным и экономичным способом обеспечения равномерного и быстрого нагрева жидкости без необходимости прямого контакта с нагревательным элементом. Он находит широкое применение в различных отраслях промышленности, таких как металлургия, нефтегазовая промышленность, пищевая промышленность, в медицине и научных исследованиях. Проектирование индукционных устройств для нагрева жидкой среды требует учета множества факторов, таких как свойства жидкости, параметры индукционной катушки, тип источника питания и другие. Одним из главных преимуществ индукционного нагрева является возможность точного контроля нагрева и его эффективности, что позволяет уменьшить затраты на энергию и повысить производительность производственных процессов. В связи с этим проектирование индукционных устройств для нагрева жидкой среды имеет большое значение в современной промышленности и науке, позволяя повысить производительность и качество производственных процессов, а также уменьшить затраты на энергию и повысить безопасность производства.

В настоящей статье предложена общая структура программно-аппаратного обеспечения индукционного устройства для нагрева жидкой среды; предложена математическая модель, предназначенная для расчетов тепловых и электромагнитных процессов в рассматриваемой индукционной установке; выполнен эксперимент с выбором интересующих факторов, формулировкой целевых функций с использованием теории планирования эксперимента для получения регрессионных соотношений синтеза индуктора, состава оптимизационных процедур, реализуемых программным обеспечением микроконтроллера, и обоснования необходимости идентификационных процедур.

В ходе работы подверглись анализу математические модели в программном комплексе Maple.

Ключевые слова: индукционный нагрев, индукционное устройство, идентификация, нагрев жидкости, система управления, регулирование, теория планирования эксперимента, регрессия

^{*} Статья получена 17 мая 2023 г.

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование индукционных устройств для нагрева жидкой среды является важной задачей во многих промышленных отраслях. Индукционный нагрев является эффективным и безопасным методом нагрева, который позволяет быстро и равномерно нагреть жидкую среду без необходимости использования прямого контакта с нагревательным элементом. Применение индукционного нагрева позволяет значительно снизить затраты на энергию и повысить производительность производственных процессов. Однако проектирование индукционных устройств требует тщательной оценки характеристик жидкости, выбора подходящей обмотки индукционной катушки и наличия источника питания, а также тестирования и настройки устройства для обеспечения максимальной эффективности и безопасности. Проектирование индукционных устройств для нагрева жидкой среды имеет широкий спектр применения в различных отраслях промышленности, в науке и медицине. Кроме того, это является важным направлением в развитии новых технологий, направленных на улучшение качества и производительности производственных процессов.

Целью данного исследования является предложение общей структуры программно-аппаратного обеспечения индукционного устройства для нагрева жидкой среды; предложение математической модели, требуемой для расчетов тепловых и электромагнитных процессов в принятом комплексе; проведение эксперимента с выбором интересующих факторов, формулировкой целевых функций с использованием теории планирования эксперимента для получения регрессионных соотношений синтеза индуктора, состава оптимизационных процедур, реализуемых программным обеспечением микроконтроллера, и обоснования необходимости идентификационных процедур.

В данном контексте основная цель проектирования индукционного устройства для нагрева жидкой среды заключается в обеспечении оптимальных условий нагрева, учитывая требования конкретного производства. Для этого необходимо провести анализ свойств жидкости, выбрать соответствующую индукционную катушку и источник питания, а также оптимизировать работу устройства для достижения максимальной эффективности и безопасности. Таким образом, проектирование индукционных устройств для нагрева жидкой среды имеет большое значение в современной промышленности и науке, позволяя повысить производительность и качество производственных процессов, а также уменьшить затраты на энергию и повысить безопасность производства.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ИНДУКЦИОННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАГРЕВА ЖИДКОЙ СРЕДЫ

Общая структура программно-аппаратного обеспечения индукционного устройства для нагрева жидкой среды представлена на рис. 1. Структура задает и программу работы над проектированием эффективного нагревателя [1, 2]. Из блоков программного обеспечения с номерами 1–4 каждый самостоятелен и важен для качественного решения технологической задачи.

Результатом разработки первого блока явилась математическая модель процесса, на базе которой проведен синтез системы автоматического регулирования (САР), осуществлен выбор корректирующего устройства.

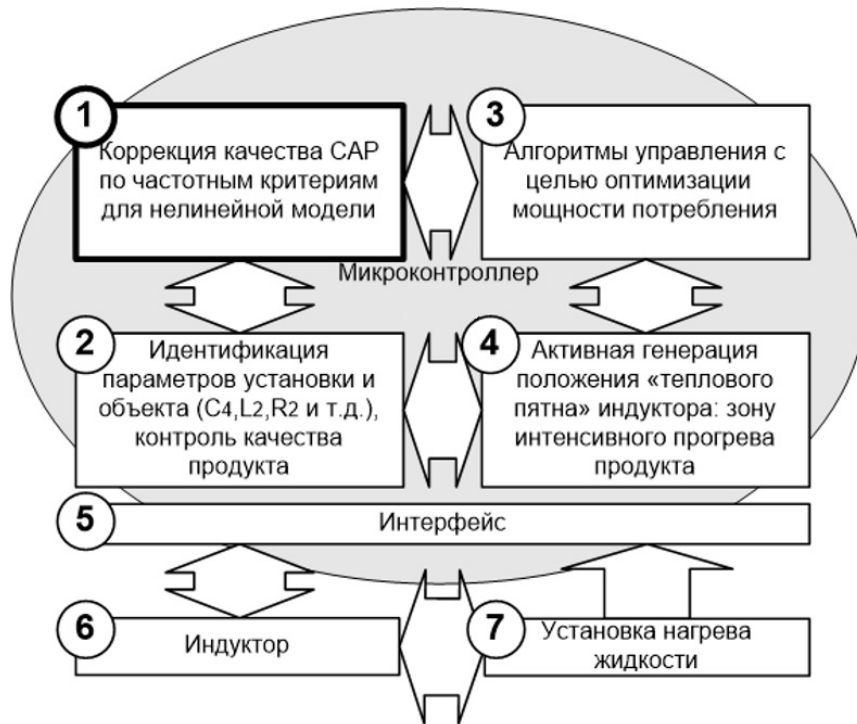


Рис. 1. Структура программно-аппаратного обеспечения индукционного устройства для нагрева жидкой среды

Fig. 1. The structure of the software and hardware of an induction device for heating a liquid medium

В основу математической модели процесса положена система пяти дифференциальных уравнений (1). Модель соответствует нагревателю средней мощности [3–6]:

$$\begin{cases}
 u_1(p) = i_1(p) \{ R_1 [1 + \alpha(\tau_1(p) + t_4 - 20)] + L_1 p \} - i_2(p) M_{12} p; \\
 0 = -i_1(p) M_{12} p + i_2(p) \{ R_2 [1 + \alpha(\tau_2(p) + t_4 - 20)] + L_2 p \}; \\
 i_1^2(p) R_1 [1 + \alpha(\tau_1(p) + t_4 - 20)] = A_{12} (\tau_1(p) - \tau_2(p)) + \\
 \quad + \tau_1(p) C_1 p + A_{14} \tau_1(p); \\
 i_2^2(p) R_2 [1 + \alpha(\tau_2(p) + t_4 - 20)] = A_{12} (\tau_2(p) - \tau_1(p)) + \\
 \quad + A_{23} (\tau_2(p) - \tau_3(p)) + \tau_2(p) C_2 p + A_{24} \tau_2(p); \\
 A_{23} (\tau_2(p) - \tau_3(p)) = \tau_3(p) C_3 p + A_{34} \tau_3(p).
 \end{cases} \quad (1)$$

Тепловой процесс характеризуют абсолютная температура, превышения температуры, теплоемкости отдельных элементов схемы, коэффициенты теплопередачи (t , τ_j , C_j , A_{jk} при $j = 1, 2, 3$; $k = 2, 3, 4$).

Индексы у параметров соответствуют индуктору (1), вторичному телу (2), нагреваемому токами Фуко в однослойной модели [4], объему нагреваемой жидкости (3), окружающей среде (4) (рис. 2, а).

Численные значения параметров тепловой модели: $C_1 = 500 \text{ Вт} \cdot \text{с}/^\circ\text{C}$; $C_2 = 1000 \text{ Вт} \cdot \text{с}/^\circ\text{C}$; $C_3 = 21\,000 \text{ Вт} \cdot \text{с}/^\circ\text{C}$; $A_{12} = 200 \text{ Вт}/^\circ\text{C}$; $A_{14} = 20 \text{ Вт}/^\circ\text{C}$; $A_{23} = 200 \text{ Вт}/^\circ\text{C}$; $A_{24} = 20 \text{ Вт}/^\circ\text{C}$; $A_{34} = 20 \text{ Вт}/^\circ\text{C}$.

Блок-схема процесса энергообмена нагревателя жидкости и структурная схема замкнутой системы регулирования температуры жидкой среды представлены на рис. 2, а, б.

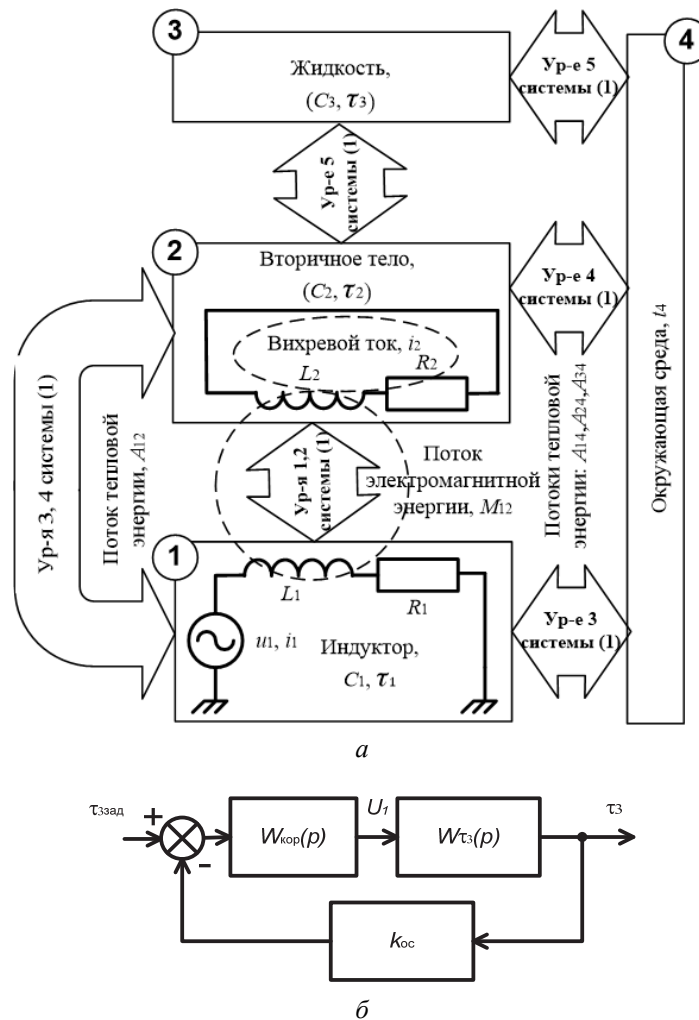


Рис. 2. Блок-схема процесса энергообмена нагревателя жидкости (а); структурная схема замкнутой системы регулирования температуры жидкой среды (б)

Fig. 2. Block diagram of the energy exchange process of the liquid heater (а); block diagram of a closed system for controlling the temperature of a liquid medium (б)

Передаточная функция корректирующего устройства, выбранного из условия обеспечения приемлемой погрешности отслеживания программного задания изменения температуры жидкой среды по технологической карте, принимает следующий вид:

$$W_{\text{кор}}(p) = \frac{(1 + T_{k1}p)(1 + T_{k2}p)}{(1 + T_{k3}p)^2}.$$

Численные значения параметров САР: $k_{\text{ос}} = 0,0154$; $T_{k1} = 273$ с; $T_{k2} = 13,3$ с; $T_{k3} = 56,2$ с. Введены обозначения для питающего напряжения, токов (u_i, i_i при $i = 1, 2$), активных и индуктивных сопротивлений, коэффициента взаимной индукции (R_i, L_i, M_{12}). Численные значения параметров электромагнитной части модели: $R_1 = 0,3$ Ом; $R_2 = 1$ Ом; $L_1 = 40 \cdot 10^{-5}$ Гн; $L_2 = 40 \cdot 10^{-4}$ Гн; $M_{12} = 40 \cdot 10^{-5}$ Гн.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РЕГРЕССИОННЫХ СООТНОШЕНИЙ

Для определения общей стратегии синтеза индуктора (рис. 1, блок 6), состава оптимизационных процедур, реализуемых программным обеспечением микроконтроллера (рис. 1, блок 3), и обоснования необходимости идентификационных процедур (рис. 1, блок 2) поставим эксперимент с выбором интересующих нас факторов, формулировкой целевых функций и использованием теории планирования эксперимента для получения регрессионных соотношений [7–9]. Представим иллюстрацию работы математической модели в виде переходных процессов программного нагрева жидкой среды при управляющем воздействии определенной частоты согласно технологической карте ($\omega_{ref} = 1,78 \cdot 10^{-2}$ 1/с) с амплитудой ($A_{ref} = 44$ °С) для сигнала задания по превышению температуры ($\tau_{3ref} = 60 + A_{ref} \sin(\omega_{ref}t)$) (рис. 3). Частота сети 50 Гц.

Расчет проводится в среде Maple [10] при достаточно широком разбросе величин постоянных времени математического описания процесса нагрева. Большие постоянные времени свойственны тепловой части модели, а достаточно малые – электротехнической части. Это ведет к увеличению времени расчета, и длительность технологического интервала выбрана значительной ($T_T = 2000$ с) с целью достижения квазиустановившегося режима изменения превышения температуры жидкости τ_3 .

Синтез и поиск структуры корректирующего звена выполнен «в малом» [11–13], моделирование позволяет убедиться в правильности результата при анализе поведения системы «в большом».

Сигнал рассогласования САР (рис. 3, ε) перерабатывается корректирующим звеном в амплитуду питающего напряжения с инверсией фазы (рис. 3, ε). По принципу действия устройства ему не присущ охлаждающий эффект,

поэтому в форме кривых превышения температуры наблюдаются нарушения синусоидальности (рис. 3, а–в). Вид графика изменения мгновенного значения тока на сетевой частоте объясняется выбором временного интервала снятия переходного процесса (рис. 3, е), соответствующего моменту смены знака амплитуды питающего напряжения (рис. 3, д).

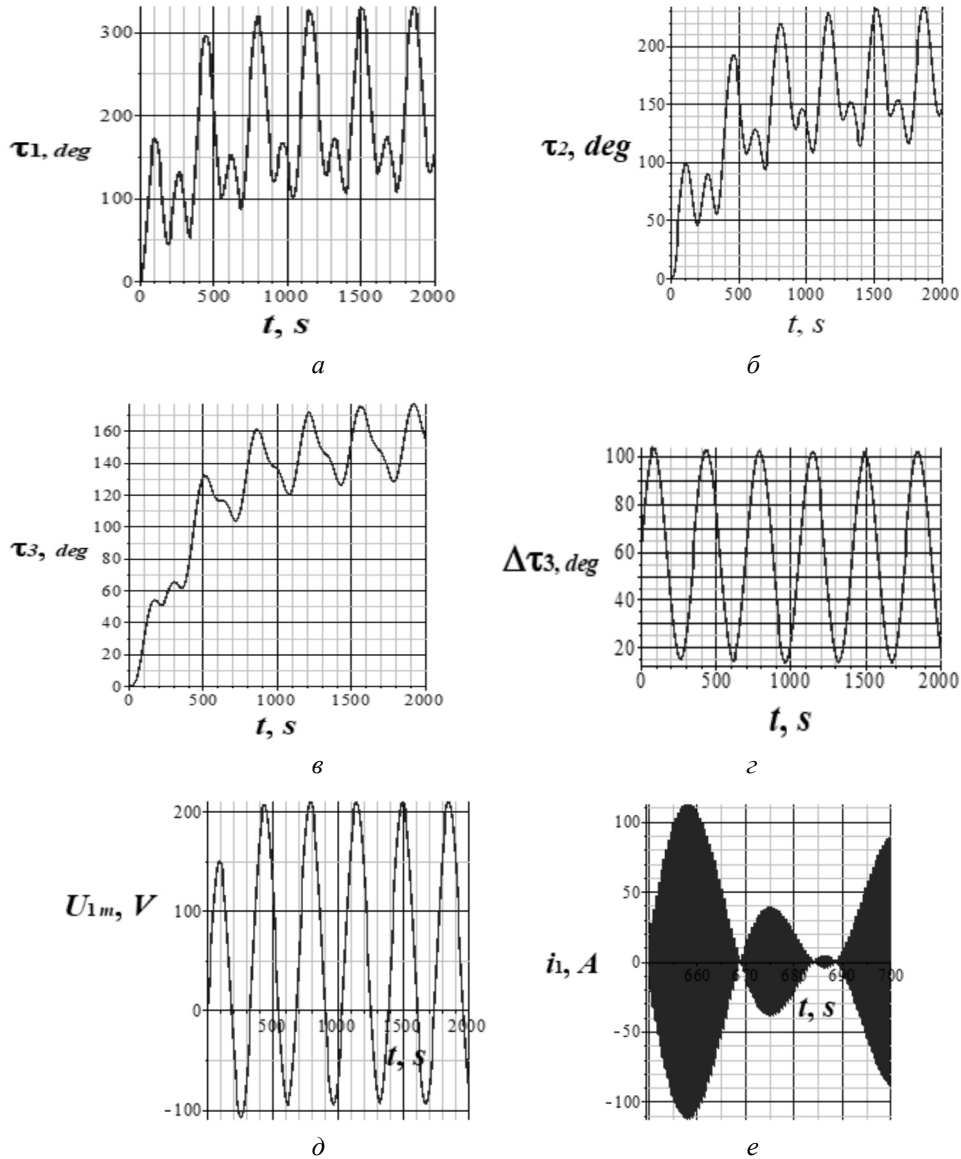


Рис. 3. Процессы изменения превышения температур индуктора τ_1 (а), вторичного тела τ_2 (б) и жидкости τ_3 (в); переходный процесс изменения сигнала рассогласования САР $\Delta\tau_3$ (г), амплитудного значения питающего напряжения U_{1m} (д) и мгновенного значения тока индуктора i_1 (е)

Fig. 3. Processes of changing the temperature rise of the inductor τ_1 (а) of the secondary body τ_2 (б) and the liquid τ_3 (в); a transient change in the ACS mismatch signal $\Delta\tau_3$ (г), the amplitude value of the supply voltage U_{1m} (д) and the instantaneous value of the inductor current i_1 (е)

Получим из модели информацию, необходимую для проектирования и управления нагревателем. Для анализа влияния на поведение САР отдельных параметров поставим эксперимент с определением регрессионных соотношений. Ограничимся четырьмя факторами ($x_1 - x_4$), связанными с параметрами системы: частотой питающей индуктор сети ($\omega_1 = x_1$); активными сопротивлениями индуктора и контура токов Фуко ($R_1 / R_2 = x_2$); индуктивными сопротивлениями индуктора и контура токов Фуко ($L_1 / L_2 = x_3$); коэффициентом взаимной индукции ($M_{12}^2 / (L_1 L_2) = x_4$).

Чтобы выполнить требование независимости факторов [8], введем дополнительные аналитические связи между численными значениями параметров: $R_1 R_2 = 0,3 \text{ [Ом}^2\text{]}$; $L_1 L_2 = 0,16 \cdot 10^{-5} \text{ [Гн}^2\text{]}$. Кроме того, принимаем правило изменения параметров при изменении факторов x_1 и x_2 : на сколько увеличивается числитель, на столько же уменьшается знаменатель, и наоборот. Размах изменения параметров не превосходит 50 % от их первоначального значения. Дополнительные правила формирования поля значений изменяющихся параметров введены для того, чтобы меньшим числом факторов, а значит, и меньшим числом экспериментов охватить большее количество параметров: четыре фактора при шести параметрах. Значения кодированных факторов (X_i при $i = 1 - 4$) связаны с факторами (x_i при $i = 1 - 4$) формулой $X_i = (x_i - x_{imid}) / (x_{imid} - x_{imin})$, где x_{imid} – среднее значение фактора; x_{imin} – минимальное значение фактора. Выбираем ортогональный центральный композиционный план (ОЦКП) проведения эксперимента и получения регрессионных зависимостей. Общее число опытов для четырех факторов ($n = 4$) равно $N = 2^n + 2n + 1 = 25$. К плану полного факторного эксперимента (ПФЭ) добавлено по два опыта на фактор в звездных точках и один опыт в центре плана. Координаты звездных точек: $X_i = \pm 1,414$ [3].

В табл. 1 представлены уровни факторов, их кодированные значения и соответствие между этими величинами, представленное графически.

Целевыми выбраны три функции, отражающие энергетическую эффективность устройства и его управляемость. Цикловой КПД по входной мощности (η_A) рассчитывается за технологический период работы нагревателя ($T_T = 2000 \text{ с}$) как отношение усредненных мощностей активной (P_A) к полной (S), потребляемых из сети:

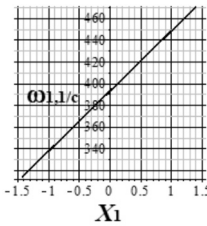
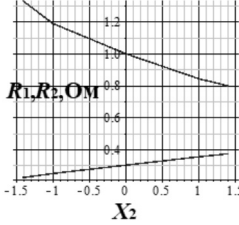
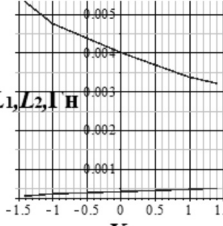
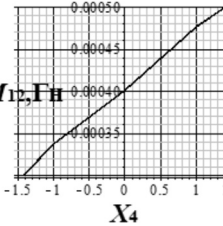
$$\eta_A = \frac{P_A}{S} = \frac{\int_0^{T_T} (U_{1m}(t) \sin(\omega_1 t) i_1(t)) dt}{\sqrt{\int_0^{T_T} i_1^2(t) dt} \int_0^{T_T} (U_{1m}(t) \sin(\omega_1 t)) dt}}. \quad (2)$$

Таблица 1

Table 1

Таблица кодировки факторов ортогонального центрального композиционного плана

Table of coding factors of the orthogonal central composition plan

X_i	-1,414	-1	0	+1	+1,414	$x_i = f(X_i)$
$\omega_1, 1/c$	314	337	392,5	448	471	
$R_1, Ом$	0,225	0,252	0,3	0,357	0,375	
$R_2, Ом$	1,333	1,188	1,0	0,84	0,80	
$L_1, мГн$	0,3	0,336	0,4	0,476	0,50	
$L_2, мГн$	5,33	4,75	4,0	3,36	3,20	
$M_{12}, мГн$	0,3	0,336	0,4	0,476	0,50	

Второй целевой функцией назначим цикловой технологический КПД (η_{τ_3}), который рассчитывается за технологический период работы нагревателя как отношение усредненной мощности, затраченной на нагрев жидкой среды (P_{τ_3}), к активной составляющей мощности, потребленной из сети (P_A):

$$\eta_{\tau_3} = \frac{P_{\tau_3}}{P_A} = \frac{C_3}{T_T} \frac{\int_0^{T_T} \tau_3(t) dt}{\int_0^{T_T} (U_{1m}(t) \sin(\omega_1 t) i_1(t)) dt} . \quad (3)$$

В качестве третьей целевой функции и меры управляемости САР предлагается использовать коэффициент (K_{con}), равный отношению гармоника изменения превышения температуры жидкой среды к амплитуде гармоника в канале задания САР на частоте ω_{ref} этого же превышения температуры. Расчет производится в квазиустановившемся режиме в конце технологического периода, когда свободные составляющие процесса незначительно сказываются на форме $\tau_3(t)$. При полной управляемости коэффициент K_{con} стремится к единице.

Временной интервал расчета принимается равным $T_{con} = (T_T - 2\pi / \omega_{ref}) - T_T$, и тогда

$$K_{con} = \frac{2}{T_{con}} \frac{\sqrt{A_{sin}^2 + A_{cos}^2}}{A_{ref}}, \quad (4)$$

где $\begin{cases} A_{sin} = \int_{T_{con}} \tau_3(t) \sin(\omega_{ref}t) dt, \\ A_{cos} = \int_{T_{con}} \tau_3(t) \cos(\omega_{ref}t) dt \end{cases}$ – составляющие первой гармоники регулируемой величины – превышения температуры жидкой среды τ_3 .

Результаты экспериментов обрабатывались авторской программой, созданной в среде Excel [14].

В базе есть возможность проводить регрессионный анализ результатов: контролировать адекватность модели по F-критерию (распределение Фишера), исключать незначимые коэффициенты с использованием критерия Стьюдента, оценивать точность регрессии. Фрагмент рабочего окна Excel (пиктограмма) обработки одной из баз данных представлен на рис. 4 в качестве примера.

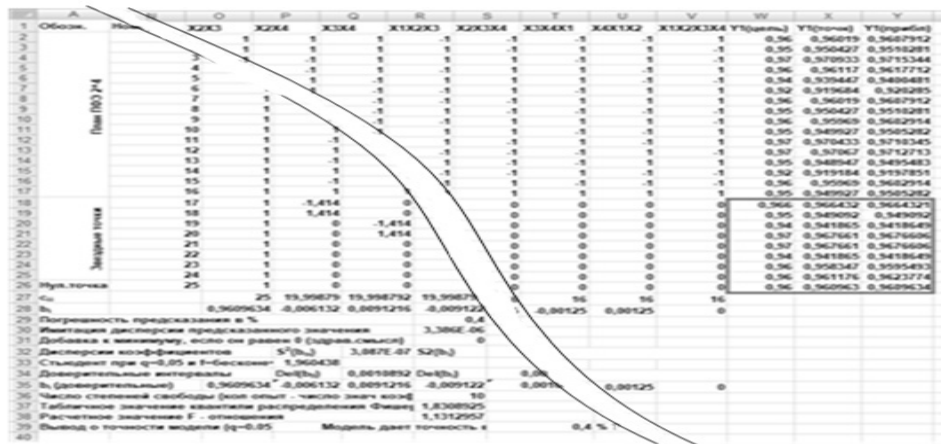


Рис. 4. Фрагмент рабочего окна базы данных ортогонального центрального композиционного плана для четырех факторов

Fig. 4. Fragment of the working window of the orthogonal central compositional plan data-base for four factors

Значимые коэффициенты регрессий или аппроксимирующих полиномов для двух целевых функций представлены в табл. 2. Для предложенных интервалов изменения факторов $\eta_{\tau 3} \equiv 0,12$.

Коэффициенты из табл. 2 позволяют сформировать модели (суммы членов) из нулевого члена, членов вида $b_i X_i$ (линейная регрессия), членов вида $b_{ijk} X_i X_j X_k$ и $b_{1234} X_1 X_2 X_3 X_4$, отражающих взаимодействие факторов и членов вида $b_{ii} X_i^2$ (квадратичной регрессии). Отсутствующие в таблице коэффициенты равны нулю: они незначимы, выходят за пределы доверительных интервалов.

По знаку, величине коэффициентов регрессионного полинома можно судить о силе влияния на целевую функцию того или иного фактора. На целевую функцию η_A , которая характеризует эффективность использования сетевой мощности с высоким косинусом (2), существенное влияние оказывает первый фактор (частота питающей сети) через коэффициент линейной регрессии.

Таблица 2

Table 2

Коэффициенты регрессий для первого эксперимента

Regression coefficients for the first experiment

Коэффициенты регрессии для (η_A)							
b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_{11}	b_{22}	b_{33}
0,961	-0,0061	0,0091	-0,0091	0,001	-0,0016	-0,0031	-0,0031
b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}	b_{234}	b_{341}	b_{412}	
0,0025	-0,0025	0,0025	0,00125	-0,0013	-0,00125	0,00125	
Коэффициенты регрессии для (K_{con})							
b_0	b_1	b_2	b_3	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{23}
0,482	-0,0011	-0,047	-0,0022	-0,0041	0,004	-0,0035	0,0019

С ростом частоты эффективность устройства падает. Коэффициенты линейной регрессии для второго и третьего факторов больше в полтора раза. Составляющая квадратичной регрессии для первого фактора невелика, но по ее знаку можно судить о том, что поверхность регрессионной зависимости будет выпуклой (вторая производная меньше нуля). Наиболее сильно первый фактор взаимодействует со вторым и третьим факторами, причем взаимодействие по знаку разнонаправленное: если при увеличении частоты и одновременном увеличении R_1 и уменьшении R_2 КПД η_A растет, то в ситуации роста частоты, увеличения L_1 и уменьшения L_2 КПД η_A падает. Отмеченное влияние факторов можно прокомментировать так: с ростом частоты идет более энергичный энергообмен сети и потребителя реактивной мощностью, и рост активного сопротивления в первичной цепи индуктора обеспечивает энергообмен с повышением косинуса, а рост индуктивности увеличивает долю реактивной мощности с понижением косинуса. Коэффициенты регрессии при парных взаимодействиях указывают на усиление тенденции, отмеченной для линейной части

регрессии при допущенном соотношении активно-индуктивных сопротивлений первичной и вторичной цепей. Такого рода интерпретация результата может быть полезна для подтверждения непротиворечивости результатов основным представлениям экспериментатора о процессах энергообмена. Первичный анализ наряду с отдельными слагаемыми регрессии и более сложных корреляций факторов, высоких порядков взаимодействий может быть дополнен влиянием начальных уровней факторов на результат эксперимента и т. п.

Приведем несколько поверхностей отклика (несколько «сечений» регрессии), сводя модель к двухфакторному эксперименту, при фиксированном уровне двух других факторов (рис. 5). Иллюстрируются уже отмеченные закономерности изменения целевых функций. Показан фрагмент поверхности отклика с выраженным максимумом (рис. 5, б), однако эффект незначителен и находится на уровне показателей точности регрессионной модели (0,4 %).

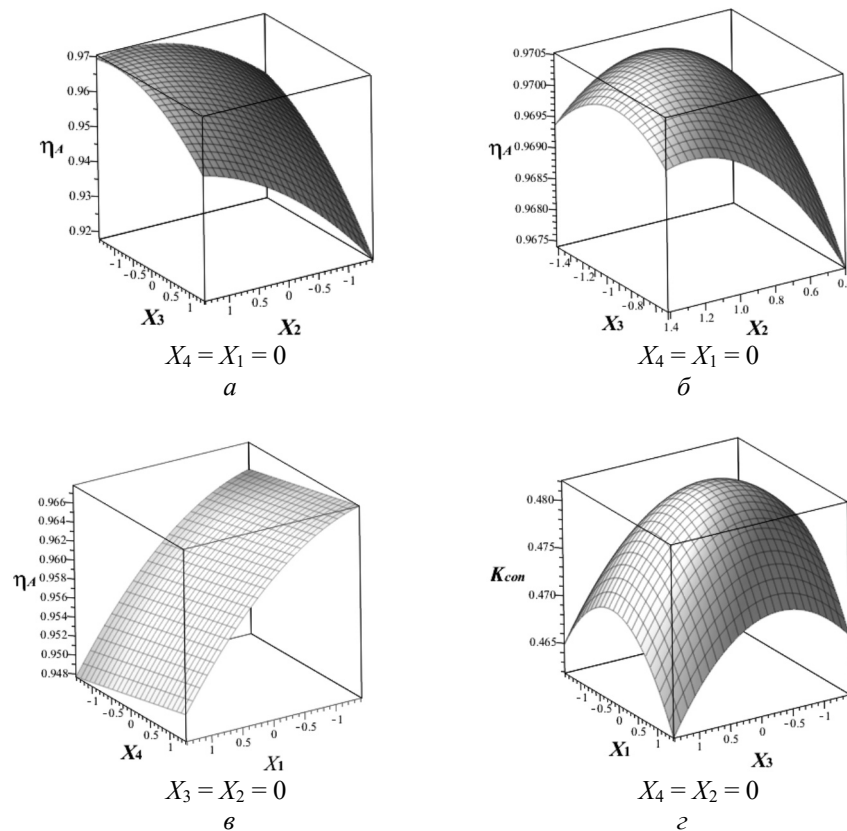


Рис. 5. Поверхности отклика η_A (а, б, в) и K_{con} (г) при указанных фиксированных значениях двух из четырех факторов для первого эксперимента

Fig. 5. Response surfaces η_A (a, b, c) and K_{con} (d) for the indicated fixed values of two of the four factors for the first experiment

Перспективным с точки зрения использования при адаптивном управлении является учет влияния параметров управления (ω_1) и цепей схемы замещения (L_1 / L_2) на эффективность программного задания температуры в соответствии с технологической картой приготовления продукта. Здесь целевая

функция в экстремуме улучшает показатель управляемости K_{con} примерно на 5 % (рис. 5, *з*). Полученная количественная связь факторов и функций цели – гораздо более важный итог эксперимента помимо качественных оценок влияния факторов на цель. Возникает основание для включения в алгоритм управления объектом оптимизационных процедур (см. рис. 1, блок 3).

Источником искаженных представлений о характере влияния тех или иных факторов на цель эксперимента могут явиться небольшие интервалы изменения величин факторов, влияющих на процесс нагрева жидкой среды. Поэтому был поставлен второй эксперимент с расширенным диапазоном изменения значений факторов при сокращении их числа и исключении дополнительных соотношений взаимозависимости в изменении параметров схем замещения (по сравнению с табл. 1). Для второго эксперимента в качестве факторов включены: частота питающей сети ($x_1 = \omega_1$), активное сопротивление схемы замещения контура токов Фуко ($x_2 = R_2$), теплоемкость жидкой среды ($x_3 = C_3$) и коэффициенты теплопередачи от субъектов процесса к окружающей среде ($x_4 = A_{j4}$, при $j = 1, 2, 3$).

Третий и четвертый факторы добавлены для оценки влияния на процесс типа объекта нагрева и возможности обоснованного планирования мероприятий по теплоизоляции индуктора, вторичного тела и жидкой среды.

На рис. 6 в графической форме показаны интервалы изменения факторов (x_i) и нормированного их представления X_i при $i = 1 - 4$.

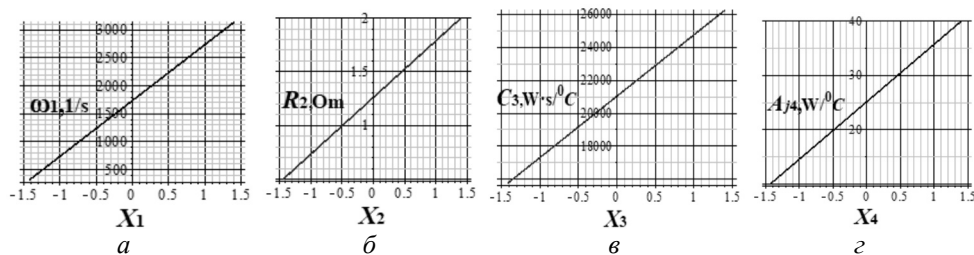


Рис. 6. Результат нормализации четырех факторов

Fig. 6. Result of normalization of four factors

Целевые функции сохранены прежними (2)–(4). План второго эксперимента соответствует рис. 4. Значимые коэффициенты регрессий собраны в табл. 3.

На рис. 7 показаны сечения регрессионных зависимостей при указанных значениях стабилизированных факторов. Выбор факторов, оставленных на фиксированном уровне, осуществлен по признаку меньшей значимости их влияния на результат.

Поверхность отклика по соотношению полной и активной составляющих потребляемой мощности устройством (η_A , рис. 7, *а*) показывает определяющую значимость только одного из четырех факторов – частоты питающей сети ($x_1 = \omega_1$). С ростом частоты устройство начинает потреблять значительную ре-

активную мощность, причем со значительной потерей управляемости процессом (K_{con} , рис. 7, б) при фиксированном виде коррекции (см. рис. 2, в) и усиливающим эти тенденции росте теплоемкости нагреваемой жидкой среды ($x_3 = C_3$).

Таблица 3

Table 3

Коэффициенты регрессий для второго эксперимента
Regression coefficients for the second experiment

Коэффициенты регрессии для η_A								
b_0	b_1	b_4	b_{44}	b_{14}				
0,582	-0,301	-0,0238	0,0115	-0,0075				
Коэффициенты регрессии для $\eta_{\tau 3}$								
b_0	b_1	b_3	b_4	b_{11}	b_{44}	b_{13}	b_{14}	b_{34}
0,113	0,0237	0,0168	-0,051	0,013	0,0155	0,0025	-0,005	-0,005
Коэффициенты регрессии для K_{con}								
b_0	b_1	b_3	b_4	b_{11}	b_{13}	b_{14}		
0,334	-0,138	-0,0476	-0,0363	-0,02	0,0213	-0,00875		

Ожидаемым является результат влияния качества теплоизоляции устройства ($x_4 = A_{j4}$ при $j = 1, 2, 3$) на эффективность использования активной мощности, потребляемой нагревателем: улучшение теплоизоляции ведет к росту КПД. А вот то, что эта взаимосвязь фактора $x_4 = A_{j4}$ и целевой функции $\eta_{\tau 3}$ усиливается на повышенных частотах, изначально не очевидно (рис. 7, в).

Последняя реплика целевой функции $\eta_{\tau 3}$ (рис. 7, з) показывает существенную связь КПД с теплоемкостью жидкой среды. Кроме формирования качественного представления о процессе, выводов по структуре алгоритма управления, по результатам эксперимента может быть произведен полезный для проектанта количественный анализ. Например, можно оценить, какие материальные затраты в денежном выражении на улучшение теплоизоляции оправданы в период службы устройства с точки зрения потребителя. По результатам второго эксперимента при активной мощности устройства 15 кВт, продолжительности включения 10 % и сроке эксплуатации 6 лет стоимость потребленной нагревателем энергии будет равна $\Pi = 0,1 \cdot 24 \cdot 364 \cdot 6 \cdot 4,85 = 25421,76$ руб., где 4,85 руб/кВт – тариф продаж электроэнергии для населения [15]. При выигрыше в КПД по рис. 7, в на 17 пунктов имеем сэкономленную сумму: $\Pi_1 = \Pi \cdot 0,17 = 4321,699$ руб. Эти средства могут быть оправданно использованы для четырехкратного уменьшения коэффициента теплоотдачи во внешнюю среду от конструктивных элементов нагревателя (рис. 6, в). Так, при желании каждое конструкторское решение может быть подвергнуто экономическому обоснованию.

Материал итогов эксперимента частично касается разработки содержательной части блоков 3, 6, 7 (см. рис. 1). Работа по реализации оставшихся составляющих структуры идет, и результат по каждому из фрагментов имеет разную степень готовности. Разработчики посчитали, что алгоритм управления не является искусственно усложненным.

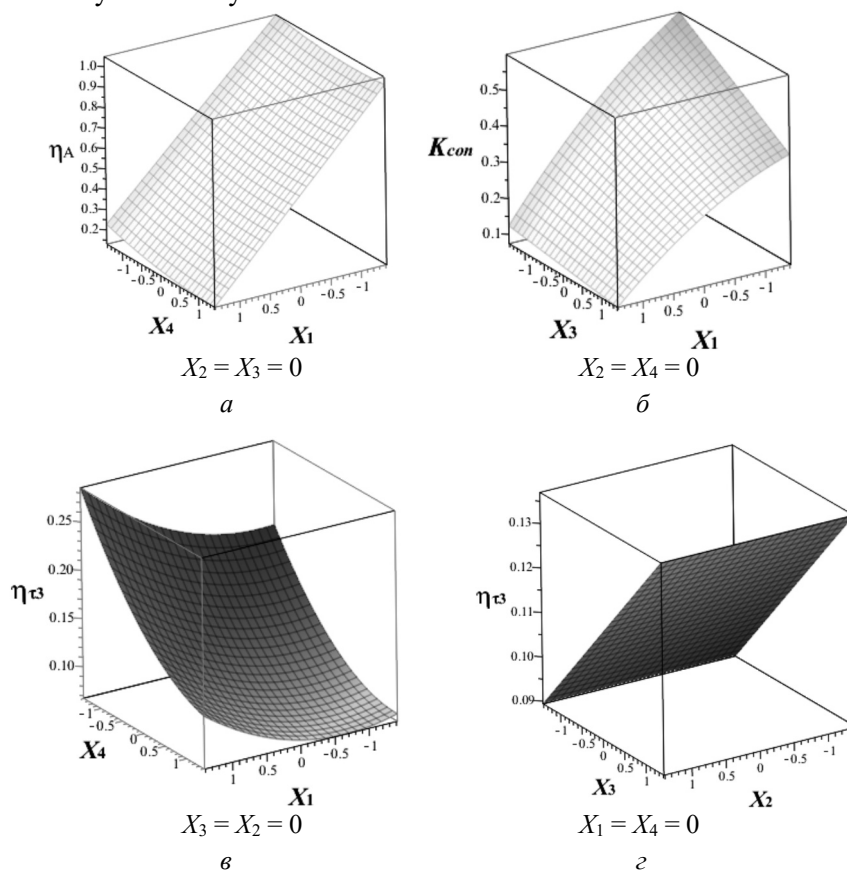


Рис. 7. Поверхности отклика η_A (а), K_{con} (б) и $\eta_{т3}$ (в, г) при указанных фиксированных значениях двух из четырех факторов для второго эксперимента

Fig. 7. Response surfaces η_A (a), K_{con} (b) and $\eta_{т3}$ (c, d) for the indicated fixed values of two of the four factors for the second experiment

Использование цифровой техники, микроконтроллера позволяет решать технологические задачи с новым качеством результата. Значительные величины постоянных времени технологического процесса способствуют выполнению сложных алгоритмов управления в реальном масштабе времени. Важно также постоянное удешевление микроконтроллеров, среди которых даже контроллеры общепромышленного назначения имеют значительный ресурс, разнообразный состав аппаратной части. Кроме того, из-за очевидной взаимозависимости физических процессов, происходящих в нагревателе, результатов решения задач управления, обозначенных блоками структурной схемы программно-аппаратной реализации САР (см. рис. 1), ожидается проявление синергетического эффекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенной работы была предложена общая структура программно-аппаратного обеспечения индукционного устройства для нагрева жидкой среды; предложена математическая модель, предназначенная для расчетов тепловых и электромагнитных процессов в рассматриваемой индукционной установке; выполнен эксперимент с выбором интересующих факторов, формулировкой целевых функций с использованием теории планирования эксперимента для получения регрессионных соотношений синтеза индуктора, состава оптимизационных процедур, реализуемых программным обеспечением микроконтроллера, и обоснования необходимости идентификационных процедур.

В ходе работы подверглись анализу математические модели в программном комплексе Maple.

Исходя из результатов проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Нелинейная математическая модель дополняет линеаризованную, подтверждает анализ результатов ее работы и благодаря полному моделированию тепловых и электротехнических процессов дает базу для всестороннего анализа режимов работы нагревателя, в том числе и энергетических показателей.

2. Использование теории планирования эксперимента позволяет построить регрессионные модели для ряда целевых функций, охватывающих энергетическую и технологическую эффективность работы устройства. Предлагаются целевые функции по анализу работы устройства по отношению к питающей сети (2), эффективности использования активной составляющей потреблённой энергии (3), способности к сохранению управляемости устройства, как элемента САР (4).

3. Регрессионные модели являются основой качественного и количественного анализа влияния технологических и конструктивных параметров на результат управления процессом нагрева жидкой среды, составляют базу для планирования экономически оправданных мероприятий по улучшению потребительских свойств нагревателя.

4. Для повышения качества САР необходимо включение в алгоритм работы контроллера управления процедуры идентификации параметров установки, меняющихся в процессе ее работы, ненаблюдаемых и влияющих на параметры корректирующего устройства и энергетическую эффективность (блок 2 на рис. 1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларькина Т.С., Льготчиков В.В., Ленецкий Г.С. Параметрическая идентификация параметров среды системы косвенного индукционного нагрева жидкости // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 3 (76). – С. 117–125. – DOI: 10.53078/20778481_2022_3_117.
2. Ларькина Т.С. Моделирование индукционного нагрева изотермического контейнера // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 7 (38). – С. 67–69.
3. Льготчиков В.В., Денисов В.Н., Ларькина Т.С. Алгоритм работы контроллера управления электромагнитным процессом в длинной линии // Программные продукты и системы. – 2018. – Т. 31, № 4. – С. 798–802.

4. *Dolgikh I., Korolev A., Zakharov V.* Temperature processes of induction heating simulation // Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach. Vol. 5. Technical Sciences. – San Francisco, Calif., 2014. – P. 68–74.
5. *Горнов А.О.* Нагревание и охлаждение электрических двигателей. – М.: МЭИ, 1980. – 56 с.
6. *Дилигенская А.Н., Рапопорт Э.Я.* Аналитические условия оптимальности в обратных задачах теплопроводности // Теплофизика высоких температур – 2021. – Т. 59 (3). – С. 401–410.
7. *Ильинский Н.Ф.* Элементы теории эксперимента. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МЭИ, 1983. – 92 с.
8. *Дрейтер Н.* Прикладной регрессионный анализ. – М.: Вильямс, 2019. – 912 с.
9. *Выгодчикова И.Ю.* Алгоритм оценки параметров линейной множественной модели регрессии по минимаксному критерию. – М.: Синергия, 2019. – 216 с.
10. *Дьяконов В.П.* Maple 10/11/12/13/14 в математических расчетах. – М.: ДМК-Пресс, 2011. – 80 с.
11. *Топчев Ю.И.* Атлас для проектирования систем автоматического регулирования. – М.: Машиностроение, 1989. – 752 с.
12. *Льготчиков В.В., Ларькина Т.С.* Синтез системы автоматического регулирования температуры жидкости с улучшенными динамическими показателями // Вестник МЭИ. – 2019. – № 5. – С. 73–80.
13. *Рапопорт Э.Я., Плешищцева Ю.Э.* Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М.: Наука, 2012. – 309 с.
14. *Льготчиков В.В.* Регрессионный анализ результатов экспериментов: свидетельство о регистрации базы данных № 2005620067. – М.: РОСПАТЕНТ, 2005.
15. Постановление от 18.11.2022 № 94 «Об установлении тарифов на электрическую энергию для населения Смоленской области» / Департамент Смоленской области по энергетике, энергоэффективности, тарифной политике. – Смоленск, 2022. – 13 с.

Льготчиков Валерий Вениаминович, доктор технических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет “МЭИ”» в г. Смоленске, кафедра электромеханических систем. Основное направление научных исследований – микропроцессорный электропривод, системы управления, идентификация параметров, надежность электротехнических комплексов, методы оптимизации. Имеет более 40 печатных работ. E-mail: vvldrive@yandex.ru

Ларькина Татьяна Сергеевна, старший преподаватель Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет “МЭИ”» в г. Смоленске, кафедра электромеханических систем. Основное направление научных исследований – идентификация параметров, системы управления, индукционный нагрев, методы оптимизации. Имеет более 25 печатных работ. E-mail: tatyana.larkina.2015@yandex.ru

Lgotchikov Valeriy V., DSc (Engineering), professor at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research University “MPEI”» in the Smolensk, Department of Electro-Mechanical Systems. His research interests are currently focused on microprocessor electric drive, control systems, identification of parameters, reliability of electrical systems, and optimization methods. He has more than 40 publications. E-mail: vvldrive@yandex.ru

Larkina Tatyana S., senior lecturer at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research University “MPEI”» in the Smolensk, Department of Electromechanical Systems. Her research interests are currently focused on identification of parameters, control systems, induction heating, and optimization methods. She has more than 25 publications. E-mail: tatyana.larkina.2015@yandex.ru

Designing an induction device for heating a liquid medium*V.V. LGOTCHIKOV^a, T.S. LARKINA^b*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research University “MPEI”» in Smolensk, 1 Energy Driveway, Smolensk, 214013, Russian Federation*^a vvldrive@yandex.ru ^b tatyana.larkina.2015@yandex.ru**Abstract**

The design of induction devices for heating a liquid medium is an urgent task in modern industry. Induction heating is an efficient and economical way to provide uniform and rapid heating of a liquid without the need for direct contact with the heating element. It finds wide application in various industries such as metallurgy, oil and gas, food processing, medicine and scientific research. The design of induction devices for heating a liquid medium requires taking into account many factors, such as the properties of a liquid, the parameters of the induction coil, the type of power source, and others. One of the main advantages of induction heating is the ability to precisely control heating and its efficiency, which can reduce energy costs and increase the productivity of production processes. In this regard, the design of induction devices for heating a liquid medium is of great importance in modern industry and science, allowing an increase in the productivity and quality of production processes, as well as reducing energy costs and improving production safety.

This article proposes a general structure of the software and hardware for an induction device for heating a liquid medium. A mathematical model is proposed for calculating thermal and electromagnetic processes in the considered induction installation. An experiment was carried out with a choice of factors of interest, the formulation of objective functions using the theory of experiment planning to obtain regression relations for the synthesis of an inductor, as well as the composition of optimization procedures implemented by the microcontroller software, and to substantiate the need for identification procedures.

In the course of the work, mathematical models were analyzed in the Maple software package.

Keywords: induction heating, induction device, identification, liquid heating, control system, regulation, experiment planning theory, regression

REFERENCES

1. Larkina T.S., Lgotchikov V.V., Lenevsky G.S. Parametricheskaya identifikatsiya parametrov sredy sistemy kosvennogo induktsionnogo nagreva zhidkosti [Parametric identification of environment parameters of the system for indirect induction heating of liquids]. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta = The Belarusian-Russian university herald*, 2022, no. 3 (76), pp. 117–125. DOI: 10.53078/20778481_2022_3_117.
2. Larkina T.S. Modelirovanie induktsionnogo nagreva izotermicheskogo konteynera [Modeling induction heating of the insulated container]. Modeling of induction heating of an isothermal container. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal*, 2015, no. 7 (38), pp. 67–69.
3. Lgotchikov V.V., Denisov V.N., Larkina T.S. Algoritm raboty kontrollera upravleniya elektromagnitnym protsessom v dlinnoi linii [The algorithm of the controller for controlling the electromagnetic process in a long line]. *Programmnye produkty i sistemy = Software and Systems*, 2018, vol. 31, no. 4, pp. 798–802.
4. Dolgikh I., Korolev A., Zakharov V. Temperature processes of induction heating simulation. *Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach*. Vol. 5. *Technical Sciences*. San Francisco, Calif., 2014, pp. 68–74.

* Received 17 May 2023.

5. Gornov A.O. *Nagrevanie i okhlazhdenie elektricheskikh dvigatelei* [Heating and cooling of electric motors]. Moscow, MEI Publ., 1980. 56 p.
6. Diligenskaya A.N., Rapoport E.Ya. Analiticheskie usloviya optimal'nosti v obratnykh zadachakh teploprovodnosti [Analytical conditions for optimality in inverse problems of heat conduction]. *Teplofizika vysokikh temperatur = High Temperature*, 2021, vol. 59 (3), pp. 401–410. (In Russian).
7. Il'inskii N.F. *Elementy teorii eksperimenta* [Elements of the theory of experiment]. 2nd. ed., rev. Moscow, MEI Publ., 1983. 92 p.
8. Draper N.R. *Prikladnoi regressiionnyi analiz* [Applied regression analysis]. Moscow, Williams Publ., 2019. 912 p. (In Russian).
9. Vygodchikova I.Yu. *Algoritm otsenki parametrov lineinoi mnozhestvennoi modeli regressii po minimaksnomu kriteriyu* [Algorithm for estimating the parameters of a linear multiple regression model by the minimax criterion]. Moscow, Sinergiya Publ., 2019. 216 p.
10. D'yakov V.P. *Maple 10/11/12/13/14 v matematicheskikh raschetakh* [Maple 10/11/12/13/14 in mathematical calculations]. Moscow, DMK-Press, 2011. 800 p.
11. Topcheev Yu.I. *Atlas dlya proektirovaniya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Atlas for the design of automatic control systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 752 p.
12. Lgotchikov V.V., Larkina T.S. Sintez sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya temperatury zhidkosti s uluchshennymi dinamicheskimi pokazatelyami [Synthesis of a system for automatic control of liquid temperature with improved dynamic performance]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta = Bulletin of MPEI*, 2019, no. 5, pp. 73–80.
13. Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E. *Optimal'noe upravlenie temperaturnymi rezhimami induktsionnogo nagreva* [Optimum control of temperature regimes of induction heating]. Moscow, Nauka Publ., 2012. 309 p.
14. Lgotchikov V.V. *Regressiionnyi analiz rezul'tatov eksperimentov* [Regression analysis of experimental results]. The Certificate on official registration of the database. No. 2005620067, 2005.
15. *Postanovlenie ot 18.11.2022 № 94 «Ob ustanovlenii tarifov na elektricheskuyu energiyu dlya naseleniya Smolenskoj oblasti»* [Postanovlenie dated 11.18.2022 No. 94 “Ob ustanovlenii tarifov na elektricheskuyu energiyu dlya na-seleniya Smolenskoj oblasti”]. Department of the Smolensk Region for Energy, Energy Efficiency, Tariff Policy. Smolensk, 2022. 13 p.

Для цитирования:

Льготчиков В.В., Ларькина Т.С. Проектирование индукционного устройства для нагрева жидкой среды // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 3 (91). – С. 87–104. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-87-104.

For citation:

Lgotchikov V.V., Larkina T.S. Proektirovanie induktsionnogo ustroistva dlya nagreva zhidkoi sredy [Designing an induction device for heating a liquid medium]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 3 (91), pp. 87–104. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-87-104.