

DOI: 10.53078/20778481_2022_3_117

УДК 621.365:66

Т. С. Ларькина, В. В. Льготчиков, Г. С. Ленеvский

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ СИСТЕМЫ КОСВЕННОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ЖИДКОСТИ

T. S. Larkina, V. V. Lgotchikov, G. S. Lenevsky

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF ENVIRONMENT PARAMETERS OF THE SYSTEM FOR INDIRECT INDUCTION HEATING OF LIQUIDS

Аннотация

Рассматривается возможность создания системы косвенного индукционного нагрева жидкости с управлением посредством параметрического идентификационного метода. Рассмотрен состав системы косвенного индукционного нагрева жидкости. Предложено математическое описание электромагнитных и механических процессов в рассматриваемой системе. В ходе исследования приведена стратегия для определения параметров модели. Разработана поэтапная схема решения. Выполнена реализация логики управления алгоритмом в MATLAB с применением инструмента Stateflow.

Ключевые слова:

индукционный нагрев, параметрическая идентификация, MATLAB, Stateflow, алгоритм, датчики, управление, косвенный индукционный нагрев, жидкость, система нагрева, локализованный источник нагрева, локализованный нагрев.

Для цитирования:

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

Abstract

The article considers the possibility of creating a system for indirect induction heating of a liquid controlled by a parametric identification method. The composition of the system for indirect induction heating of liquids is given. A mathematical description of electromagnetic and mechanical processes in the system under consideration is proposed. The research provides a strategy for determining the parameters of the model. A step-by-step solution scheme has been developed. The algorithm control logic has been implemented in MATLAB using the Stateflow tool.

Keywords:

induction heating, parametric identification, MATLAB, Stateflow, algorithm, sensors, control, indirect induction heating, liquid, heating system, localized heating source, localized heating.

For citation:

Larkina, T. S. Parametric identification of environment parameters of the system for indirect induction heating of liquids / T. S. Larkina, V. V. Lgotchikov, G. S. Lenevsky // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 3 (76). – P. 117–125.

В настоящее время системы индукционного нагрева нашли широкое

распространение в промышленности и быту, поскольку они обеспечивают

безопасность, чистоту, лучшую производительность и более высокий КПД по сравнению с классическими системами электрического нагрева.

В ходе развития силовой электроники и микропроцессорной техники можно добиться более высокой температуры и более точного управления температурным режимом и энергетическими показателями нагреваемой среды. Особенности управления индукционными установками как объектами управления являются сложный характер взаимосвязанных электро- и теплофизических процессов и неравномерность пространственных распределений температурных полей внутреннего тепла объекта нагрева [1]. По этой причине

интерес представляет параметрическая идентификация параметров среды системы косвенного индукционного нагрева жидкости.

В настоящее время детально разработаны модели с распределёнными параметрами, решены проблемы параметрической оптимизации с целью повышения эффективности процесса нагрева жидкости [2–6]. Однако особенности каждого конкретного устройства могут потребовать отдельного исследования.

Общая структура программно-аппаратного обеспечения установки нагрева жидкой среды представлена на рис. 1 [5].

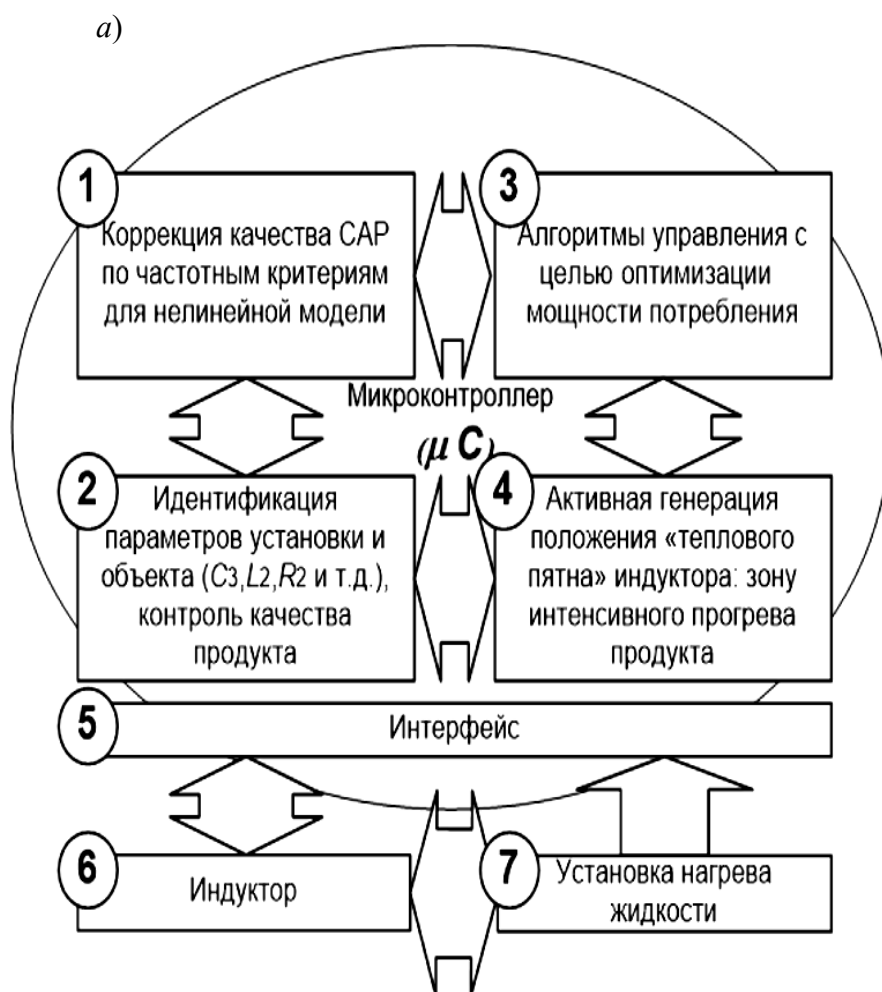
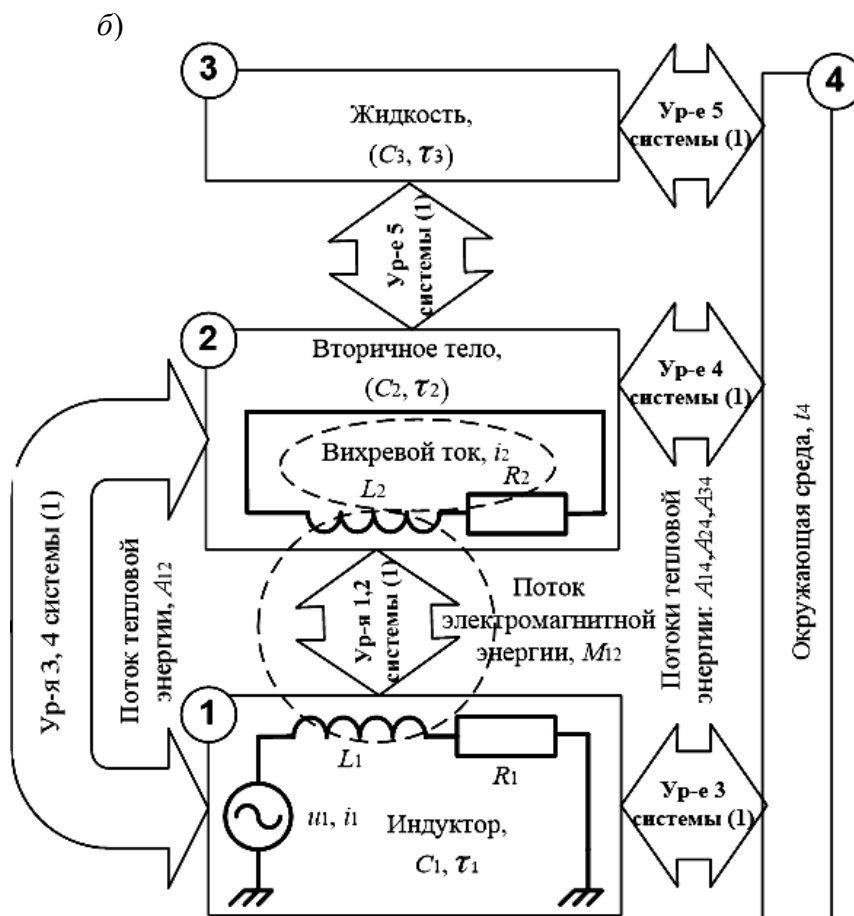


Рис. 1. Структура программно-аппаратного обеспечения установки нагрева жидкой среды: а – общая структура; б – блок-схема процесса энергообмена



Окончание рис. 1

Системы автоматического регулирования (САР) технологических установок с цифровыми устройствами управления независимо от мощности установки и масштабов производства требуют разработки алгоритмов, способных проявить все преимущества интеллектуализированного управления [7].

Проектирование САР-устройства для нагрева жидкости преследует цели улучшения управляемости технологическими параметрами, повышения производительности и энергетической эффективности установки, выбор размера массива первичных данных, использования приёмов идентификации ненаблюдаемых, но важных параметров технологического процесса, т. е. параметров среды системы косвенного индукционного нагрева жидкости.

Решены задачи получения математического описания процесса нагрева в операторной форме, использования приёмов частотного анализа и синтеза САР, формирования тепловой модели процесса для последующего учёта результатов синтеза в цифровом алгоритме работы микроконтроллера [9].

Модель должна быть информативной и по сложности приемлемой для реализации возможности построения цифрового программного алгоритма управления объектом с использованием микроконтроллера общепромышленного назначения.

В основу математической модели процесса энергообмена системы косвенного индукционного нагрева жидкости положена система пяти дифференциальных уравнений:

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

Модель соответствует нагревателю средней мощности [4].

Индексы у параметров соответствуют индуктору 1, вторичному телу 2, нагреваемому токами Фуко в однослойной модели [5], объёму нагреваемой жидкости 3, окружающей среде 4 (см. рис. 1).

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

В данном случае система состоит из фиксированной области $R \subset E$ евклидова точечного пространства E , содержащей одно или несколько движущихся через нее твердых тел, а также окружающей воздух.

Примем, что R содержит эталонную (например, начальную) $Br \subset R$ и текущую $Bc \subset R$ конфигурации среды. Они моделируются здесь как электромагнитные, тепловые и механические континуумы, характеризующиеся зависящим от времени полем деформации ξ вместе с дополнительными степенями свободы, представляющими электромагнитные поля [11].

В то время как зависящие от времени электромагнитные поля определены во всей области R , также в воздухе, окружающем неподвижные или движущиеся материальные тела, поле деформации ξ и все производные от него кинематические поля логически ограничены граничными условиями.

Следует отметить, что поскольку

соответствующие электромагнитные частоты менее 10 МГц, то волновой характер электромагнитных полей незначителен и им можно пренебречь [4]. Фактически это соответствует так называемому квазистатическому приближению. Для простоты здесь также пренебрегают любыми термоэлектрическими эффектами, а также всякой магнито-стрикцией (т. е. эффектом Холла). Это разумно для таких проводников, как алюминий или медь, при комнатной температуре и «слабых» магнитных полях. Кроме того, несмотря на повышение температуры во время электромагнитного нагрева из-за механического рассеяния и джоулева нагрева это увеличение невелико. Следовательно, для простоты предполагается принять изотермические условия.

Магнитное поле может быть смоделировано здесь как диффузное в интересующем нас масштабе длины и времени. В этом случае уравнения Максвелла и калибровочное условие Кулона $\text{div}_s \mathbf{a} = 0$ дают соотношение диффузного поля [10]

$$\partial \mathbf{a} + \nabla_s \chi - \text{кем} \text{div}_s (\nabla_s \mathbf{a}) = 0 \quad (2)$$

для векторного потенциала \mathbf{a} вместе с

$$\text{div}_s (\nabla_s \chi) = (\nabla_s)^2 \chi = 0 \quad (3)$$

для скалярного потенциала χ , где кем представляет коэффициент магнитной диффузии. Как обычно, \mathbf{a} и χ определяют магнитный поток через \mathbf{b} , а электрическое поле через $-\mathbf{e} = \partial \mathbf{a} + \nabla_s \chi$.

Учитывая, что электромагнитные поля (рис. 2, блок «Current») меняются во времени намного меньше, чем механические поля, конвективный член

$\mathbf{b} \times \mathbf{v}$ в электродвижущей напряженности $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{e} + \mathbf{v} \times \mathbf{b}$ намного меньше, чем \mathbf{e} , и, следовательно, $-\boldsymbol{\varepsilon} \approx \partial \mathbf{a} + \nabla s \chi$.

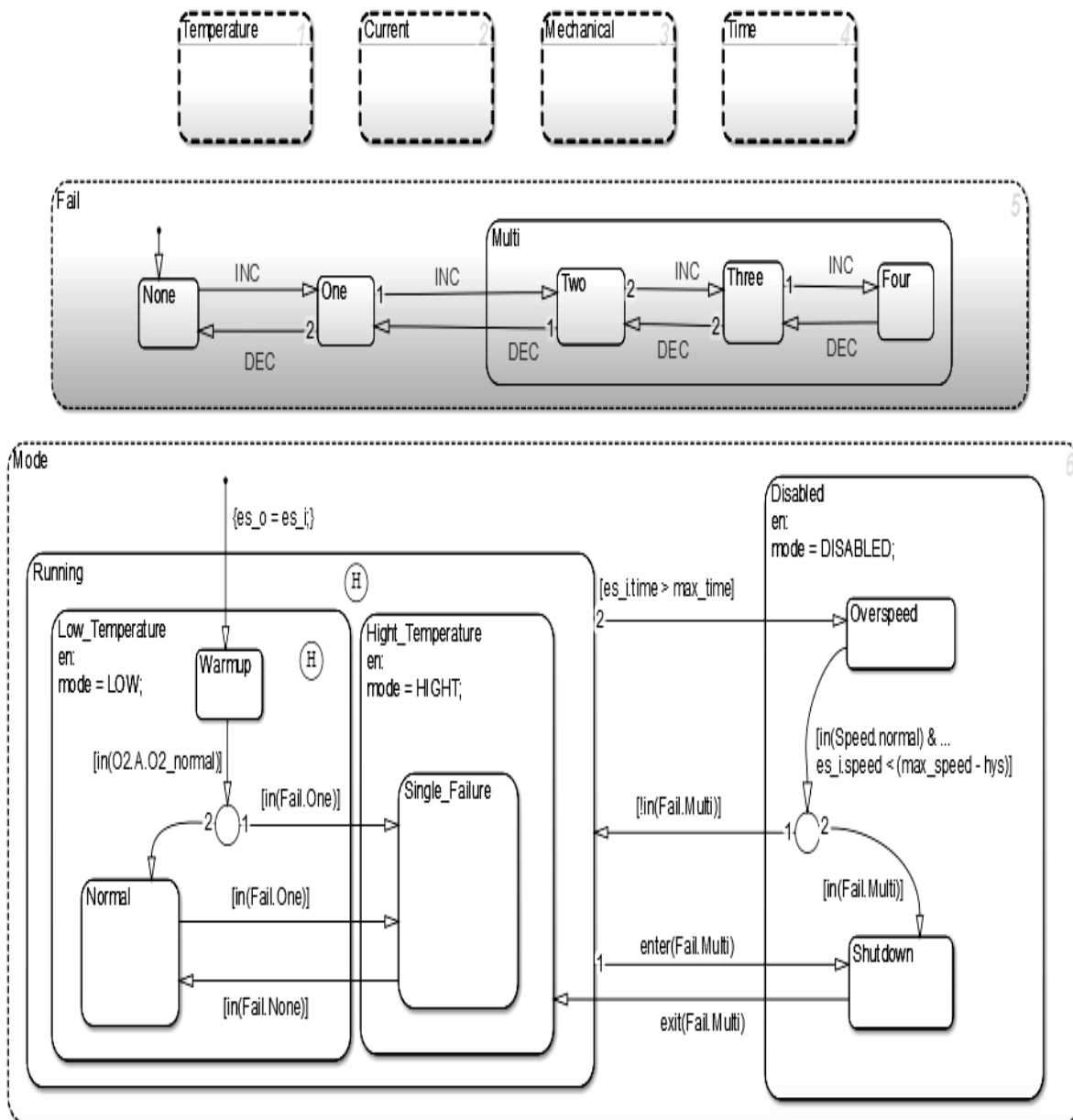


Рис. 2. Реализация алгоритма в MATLAB с применением инструмента логики управления Stateflow. Логика управления

Материальные параметры, введенные в приведенную выше модель, включают магнитопроводность κ_{EM} , электропроводность σ_{EM} , объемный модуль κ_r , модуль сдвига μ^r , а также дина-

мические параметры γ_0 , σ_0 и m_0 .
 В целях идентификации модели будем считать в хорошем приближении, что первые пять из них известны и фиксированы. В этом случае мас-

сив \mathbf{p} идентифицируемых параметров принимает вид:

$$\mathbf{p} = \mathbf{f}(\gamma_0, \sigma_0, m_0). \quad (4)$$

Значения, которые они могут принимать, подчиняются определенным физическим ограничениям, например, $\gamma_0 > 0$, $\sigma_0 > 0$ и $m_0 > 1$.

Далее кратко излагается алгоритмическая формулировка представленной выше модели.

Различие в электромагнитном и механическом масштабах времени, а также разная природа действующих полей предполагает поэтапную процедуру численного решения, включающую отдельные сетки для электромагнитных полей.

Решая затем уравнение (3) явно в каждом W_{ck} с учетом обычных граничных условий между идеальным проводником (медь) и изолирующей средой, получаем

$$-\nabla_S \chi = \begin{cases} 0 & \text{для } R \cup C_C \cup S_S; \\ 0 & \text{для } S_S; \\ c \left[\sigma_{EM}^{-1} \mathbf{I} + \int_{A_{ck}} \mathbf{n}_k \cdot \partial \mathbf{a} \right] \mathbf{e}_\varphi & \text{для } W_{ck} \end{cases} \quad (5)$$

для исходного члена $\nabla_S \chi$ в (2) при

$$c = \left[\kappa \int_{A_{ck}} \frac{1}{r} \mathbf{e}_\varphi \cdot \mathbf{n}_k \right]^{-1}. \quad (6)$$

Отметим, что данная величина не зависит от выбранного сечения A_{ck} при заданных геометрических условиях. Здесь \mathbf{e}_φ обозначает единичный вектор в направлении φ , а A_{ck} – поперечное сечение k -го тора с внешним единичным

вектором нормали \mathbf{n}_k .

Таким образом, обсуждавшиеся упрощения модели приводят к аналитическому решению (3) и, следовательно, к устранению χ как степени свободы в модели. Подставляя (5) в (2), формируя скалярное произведение результата с пробным векторным потенциалом \mathbf{a}^* и частичное интегрирование, получаем слабую форму

$$\int_R \partial \mathbf{a} \cdot \mathbf{a}^* + \int_R \kappa_{EM} \nabla_S \mathbf{a} \cdot \nabla_S \mathbf{a}^* = \sum_k \int_{W_{ck}} c \left[\sigma_{EM}^{-1} \mathbf{I} + \int_{A_{ck}} \mathbf{n}_k \cdot \partial \mathbf{a} \right] \mathbf{e}_\varphi \mathbf{a}^* \quad (7)$$

вместе с граничными условиями для \mathbf{a} , как обсуждалось выше. Соотношение (7) является отправной точкой для конечно-элементной дискретизации [11].

Рассмотрим тепловую часть (см. рис. 2, блок «Temperature») с учетом механической (см. рис. 2, блок «Mechanical») связанной модели. Модель основана на слабом балансе импульса поля ξ . При чисто кинематических граничных условиях это определя-

ется выражением

$$\int_{B_r} (\rho_r \ddot{\xi} - \mathbf{f}) \xi^* + \mathbf{P} \nabla_r \xi = 0 \quad (8)$$

относительно референциальной конфигурации $B_r \subset R$ для всех соответствующих тестовых полей ξ^* .

Здесь

$$\mathbf{f} = \det(\mathbf{F}); \quad \mathbf{l} = \det(\mathbf{F}) \mathbf{j} \times \mathbf{b} \quad (9)$$

представляет собой силу (плотность) Лоренца (тела), \mathbf{l} – ее представление в текущей конфигурации, \mathbf{P} – первое напряжение Пиолы – Кирхгофа и градиент распространения температурного поля $\mathbf{F} = \nabla_r \xi$,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}^S & \mathbf{B}_{n+1}^S \\ \mathbf{I} & -\alpha t_{n+1,n} \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{n+1}^S \\ \dot{\mathbf{a}}_{n+1}^S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_{n+1}^S \\ \mathbf{a}_{n+1}^S + (1 - \alpha) t_{n+1,n} \dot{\mathbf{a}}_{n+1}^S \end{bmatrix}, \quad (10)$$

которая должна быть решена для \mathbf{a}_{n+1}^S и $\dot{\mathbf{a}}_{n+1}^S$ в контексте текущего поэтапного подхода с фиксированным \mathbf{x}_{n+1}^S .

Здесь \mathbf{A}^S представляет собой дискретизированную пространственную часть «жесткости», а \mathbf{B}^S – диффузионную часть «массы» в (3).

Через \mathbf{c}_{n+1}^S реализуется измеренный входной ток, управляющий операцией нагрева среды.

Величина нагрева регулируется параметром $0 < \alpha \leq 1$ [12].

Дискретизация механической слабой формы (8) с помощью метода конечных элементов и использование алгоритма Ньюмарка для интегрирования (8) на интервале времени $t_n, n+1$ дает неявную алгоритмическую систему (см. рис. 2, блок «Time»)

$$\mathbf{f}_{n+1,n}^S \{ \mathbf{x}_{n+1}^S, \mathbf{p} \} = 0 \quad (11)$$

в терминах массива \mathbf{x}_{n+1}^S узловых положений, зависящих от времени, при фиксированной силе Лоренца \mathbf{l}_{n+1} .

Решение (11) получается итерацией Ньютона – Рафсона [8] в терминах его последовательной линеаризации.

Через \mathbf{K} дискретная форма (11) зависит также и от текущих (неизвестных) значений внутренних переменных.

Получим алгоритмическое соотношение, записанное в компактной форме,

$$r_{\alpha n+1,n} \{ \mathbf{a}_{n+1}, \mathbf{F}_{n+1}, \mathbf{p} \} = 0, \quad (12)$$

где $\alpha = (\ln V_E, r_{\rho P})$; $r_{\alpha} = (r_{\ln V_E}, r_{\rho P})$.

Переходя к электромагнитной слабой форме (7), дискретизация методом конечных элементов и временное интегрирование по обобщенному правилу трапеций на интервале $t_n, n + 1$ дают систему

Последнее соотношение снова решается с помощью итерации Ньютона – Рафсона и выполняется в каждой точке интегрирования в каждом элементе системы.

Вышеупомянутая поэтапная схема решения подробно описана ниже.

1. Необходимо обновить граничные условия и параметры питания (например, ток \mathbf{I} в катушке индуктора) до $t = t_{n+1}$.

2. Необходимо обновить граничные условия и инициализировать узловые поля, т. е. $\mathbf{x}_{n+1}^{S(k)} = \mathbf{x}_n^S$, $\dot{\mathbf{x}}_{n+1}^{S(k)} = \dot{\mathbf{x}}_n^S$, $\ddot{\mathbf{x}}_{n+1}^{S(k)} = \ddot{\mathbf{x}}_n^S$ при $k = 1$.

3. Необходимо получить $\mathbf{a}_{n+1}^{S(k)}$ и $\dot{\mathbf{a}}_{n+1}^{S(k)}$ из формулы (10) в зависимости, в частности, от (например, определяемого экспериментально) значения I_{n+1} электрического тока в катушке индуктора, а также текущее пространственное распределение σ_{EM} и κ_{EM} в R .

4. Необходимо получить $\mathbf{l}_{n+1}^{(k)}$ из формулы (8).

5. Необходимо решить (11) при фиксированных $\mathbf{l}_{n+1}^{(k)}$ и \mathbf{p} , получить $\mathbf{x}_{n+1}^{S(k+1)}$, $\dot{\mathbf{x}}_{n+1}^{S(k+1)}$, $\ddot{\mathbf{x}}_{n+1}^{S(k+1)}$ и $\mathbf{e}_{n+1}^{S(k+1)}$.

6. Повторяются пп. 2–5 для $k = 2, \dots$ до тех пор, пока не будет получена сходимость, дающая \mathbf{x}_{n+1}^S , \mathbf{a}_{n+1}^S и обновленные внутренние переменные.

Описанный алгоритм реализован в пакете прикладных программ для решения задач технических вычислений

MATLAB с применением инструмента логики управления Stateflow (см. рис. 2). Stateflow представляет собой графический язык, который включает диаграммы переходов состояний и блок-схемы, создавая комбинаторную логику и логику принятия решений [13].

Модель в Stateflow базируется на потоках и позволяет разным компонентам приложения менять состояние и реагировать на изменение этого состояния.

Данный алгоритм может быть реализован в объединении Stateflow с Simulink для эффективного моделирования гибридных систем.

Представленный тип моделирования особенно полезен для систем, которые имеют множество возможных режимов работы, основанных на дискретных событиях.

При теоретическом обсуждении методов идентификации модели можно было показать, что обратный метод конечных элементов может быть расширен методами, общими для идентификации статистической модели, такими как анализ корреляции, чувствительности и ошибок.

Такие методы важны, поскольку они предлагают меры для надежности идентифицированных данных.

Включение их в обратный анализ, а также их проверка могут быть продемонстрированы в контексте идентификации высокой скорости косвенного нагрева среды.

Более того, в будущем можно показать, что идентификация определяющих параметров может быть упрощена определенным образом.

В отличие от полностью учтенной зависимости от изменения геометрии установки, существует очень малая чувствительность параметров модели материала к резкому увеличению электромагнитной нагрузки в начале процесса. Именно такая ситуация позволяет проводить идентификацию при ступен-

чато-фиксированных электромагнитных нагрузках.

Выводы

Электромагнитный косвенный нагрев является технологией, известной уже несколько десятилетий, однако в настоящее время возобновился интерес к ее промышленному применению. Наряду с этим интересом, растет заинтересованность поиска рационального набора параметров энергообмена системы косвенного индукционного нагрева жидкости.

Однако до сих пор в подходах к моделированию процесса косвенного индукционного нагрева, найденных в литературе, отсутствует комплексный подход, подходящий для идентификации параметров данного метода нагрева. Это мотивирует алгоритмическую формулировку и реализацию связанной электромагнитной и тепловой моделей поля для двумерных задач.

Алгоритмическая формулировка и численная реализация этой связанной модели основана на смешанной дискретизации тепловых и электромагнитных полей в сочетании с неявной ступенчатой схемой численного решения на двух сетках.

В ходе исследования приведена стратегия для определения параметров модели в виде общего алгоритма в MATLAB с применением инструмента логики управления Stateflow. На данном уровне исследования детализация алгоритма в MATLAB нецелесообразна и подлежит дальнейшей углубленной разработке с дальнейшим изучением и представлением результатов.

В контексте соответствующей обратной задачи цель здесь состоит в том, чтобы идентифицировать такие параметры, как величины тока и частоты в индукторе, величины температуры и времени нагрева среды, используя данные, полученные из экспериментов по косвенному нагреву жидкой среды.

Таким образом, представленное исследование демонстрирует один из

возможных вариантов идентификации параметров среды для системы кос-

венного индукционного нагрева жидкостной среды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Михеев, М. А.** Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Москва: Энергия, 1977. – 344 с.: ил.
2. **Ларькина, Т. С.** Моделирование индукционного нагрева изотермического контейнера / Т. С. Ларькина // Междунар. науч.-исслед. журн. / International research journal. – 2015. – № 7 (38). – С. 67–69.
3. **Ларькина, Т. С.** К вопросу формирования общей конструкции системы индукционного нагрева / Т. С. Ларькина // Новые горизонты: материалы Междунар. конф.-конкурса, Брянск, 19 марта 2014 г. – Брянск: БГТУ, 2014. – С. 13–14.
4. **Ларькина, Т. С.** Параметрический идентификационный метод для системы косвенного индукционного нагрева жидкости / Т. С. Ларькина, В. В. Лыготчиков, Г. С. Ленеvский // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 3 (60). – С. 70–76.
5. **Лыготчиков, В. В.** Синтез системы автоматического регулирования температуры жидкости с улучшенными динамическими показателями / В. В. Лыготчиков, Т. С. Ларькина // Вестн. МЭИ. – 2019. – № 5. – С. 73–80.
6. **Лыготчиков, В. В.** Алгоритм работы контроллера управления электромагнитным процессом в длинной линии / В. В. Лыготчиков, В. Н. Денисов, Т. С. Ларькина // Программные продукты и системы / Software & Systems. – 2018. – № 4 (31). – С. 798–802.
7. **Душкин, Р. В.** Интеллектуализация управления техническими системами в рамках функционального подхода / Р. В. Душкин // Программные системы и вычислительные методы. – 2019. – № 2. – С. 43–57.
8. **Амосов, А. А.** Вычислительные методы для инженеров: учебное пособие / А. А. Амосов, Ю. А. Дубинский, Н. П. Копченова. – Москва: Мир, 1998. – 544 с.: ил.
9. **Рапопорт, Э. Я.** Структурно-параметрический синтез оптимальных по быстродействию систем управления с распределенными параметрами в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта / Э. Я. Рапопорт, И. С. Левин // Автоматизация. – 2015. – Т. 51, № 5. – С. 3–16.
10. **Рапопорт, Э. Я.** Оптимизация процессов индукционного нагрева металла / Э. Я. Рапопорт. – Москва: Металлургия, 1993. – 279 с.
11. **Рапопорт, Э. Я.** Оптимальное управление системами с распределенными параметрами / Э. Я. Рапопорт. – Москва: Высшая школа, 2009. – 677 с.
12. **Рапопорт, Э. Я.** Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева / Э. Я. Рапопорт, Ю. Э. Плешивцева. – Москва: Наука, 2012. – 309 с.
13. **Гуревич, А. П.** Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB: учебное пособие / А. П. Гуревич, В. В. Корнев, А. П. Хромов. – Санкт-Петербург: Лань, 2016. – 464 с.

Статья сдана в редакцию 10 июня 2022 года

Татьяна Сергеевна Ларькина, ст. преподаватель, филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске. E-mail: tatyana.larkina.2015@yandex.ru.

Валерий Вениаминович Лыготчиков, д-р техн. наук, проф., филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске.

Геннадий Сергеевич Ленеvский, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

Tatiana Sergeevna Larkina, senior lecturer, Smolensk branch of Federal State Budgetary Educational Institution for Higher Education National Research University «Moscow Power Engineering Institute». E-mail: tatyana.larkina.2015@yandex.ru.

Valeriy Veniaminovich Lgotchikov, DSc (Engineering), Prof., Smolensk branch of Federal State Budgetary Educational Institution for Higher Education National Research University «Moscow Power Engineering Institute».

Gennady Sergeevich Lenevsky, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.