

УДК 621.365:66

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

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЙ МЕТОД ДЛЯ СИСТЕМЫ КОСВЕННОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ЖИДКОСТИ

UDC 621.365:66

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

PARAMETRIC IDENTIFICATION METHOD FOR THE SYSTEM OF INDIRECT INDUCTION HEATING OF A LIQUID

Аннотация

Для достижения оптимальных технологических и энергетических параметров системы косвенного индукционного нагрева жидкости отмечен интерес к исследованиям конвективных течений, опосредованно инициированных локализованным индукционным нагревом в неоднородно нагретых слоях жидкости. Показан один из возможных вариантов параметрического идентификационного метода для рассматриваемой системы. Предложены математическое описание теплового баланса, схемы для исследований параметров опосредованного локализованного нагрева жидкости и тепловых потоков и блок-схема алгоритма управления системой.

Ключевые слова:

индукционный нагрев, установка для термической обработки продуктов питания, алгоритм, управление, косвенный, индукционный, нагрев, жидкость, система нагрева, локализованный источник нагрева, локализованный нагрев.

Abstract

To achieve optimal technological and energy parameters of the system for indirect induction heating of a liquid, an interest in the studies of convective currents initiated indirectly by localized induction heating in inhomogeneously heated layers of a liquid was noted. One of the possible variants of the parametric identification method for the system under consideration is shown. A mathematical description of heat balance, schemes for studying the parameters of indirect induction heating of liquids and heat flows are proposed, as well as a block diagram of the algorithm for controlling the system.

Keywords:

induction heating, installation for heat treatment of food products, algorithm, control, indirect, induction, heating, liquid, heating system, localized heating source, localized heating.

В настоящее время системы индукционного нагрева широко используются в промышленности, потому что они обеспечивают безопасность, чистоту, лучшую производительность и более высокую эффективность по сравнению с классическими электронагревательными системами.

С развитием силовой электроники и микропроцессорной техники возможны достижение более высокой температуры и более точный контроль темпера-

турных режимов и мощностных показателей нагреваемого объекта.

Типовая система косвенного индукционного нагрева жидкости состоит в основном из [1]:

- индуктора;
- источника питания;
- преобразователя частоты;
- устройства силового ввода;
- системы охлаждения;
- блока ввода и индикации;
- системы контроля и управления.



Источник питания ставит целью гарантировать достаточную энергию для поддержания всего процесса нагрева.

Преобразователь частоты является одним из ключевых элементов. Выбор частоты очень важен, чтобы определить текущее распределение в нагреваемом объекте, а затем результат нагрева. Диапазон используемых частот начинается от 50 Гц (промышленная частота) до десятков мегагерц. По этой причине многие исследователи работают над оптимизацией такого типа преобразования.

В настоящее время с развитием силовой электроники можно найти множество решений для достижения наилучших показателей частоты и тока, требуемых для процесса косвенного индукционного нагрева жидкости [1–3].

Группа конденсаторов требуется для того, чтобы установить коэффициент мощности $\cos\phi$, по возможности, как можно ближе к 1.

Существует множество форм и конфигураций индукторов для различного назначения и применения. Это дает возможность реализовать множество видов локализованного или специального нагрева для простых и сложных нагревательных систем.

Конструкция катушки очень важна для эффективности процесса индукционного нагрева.

Чтобы достичь желаемого эффекта нагрева, важным моментом является правильное проектирование катушки индуктивности. Вначале необходимо определить, где должно вырабатываться тепло в системе нагрева, а затем выбрать геометрическую форму катушки.

Дроссели с водяным охлаждением позволяют использовать очень высокую мощность для работы с малыми и дешевыми катушками для быстрого и эффективного нагрева. Хорошая оценка параметров системы охлаждения на этапе проектирования системы косвенного индукционного нагрева жидкости имеет важное значение для увеличения срока службы индуктора и безопасности про-

цесса в целом [4].

На рис. 1 показаны типовые области применения индукционного нагрева [5].

На рис. 2 представлена условная схема теплообмена в изотермическом контейнере с жидкостью, нагреваемой косвенным способом от индукционной плиты.

На рис. 2 приняты следующие обозначения:

$q_1(x, t)$ – нагрев дна и боковых стенок изотермического загрузочного контейнера индукционной плитой;

$q_2(x, t)$ – тепловой поток от дна и боковых стенок изотермического контейнера в жидкость;

$q_3(x, t), q_4(x, t)$ – тепловой поток, характеризующий теплообмен между стенками изотермического загрузочного контейнера и жидкостью;

$q_5(x, t), q_6(x, t), q_7(x, t)$ – тепловой поток от боковых стенок и крышки изотермического загрузочного контейнера в окружающую среду.

Количество тепла, которое расходуется на нагрев жидкости в контейнере, можно представить как сумму отдельных статей расхода тепла, которое выделяется вследствие различных процессов, протекающих в системе. Тем не менее основная доля энергии вносится внутренними источниками тепла, индуцируемыми электромагнитным полем индуктора.

Тепловой баланс системы косвенного индукционного нагрева жидкости можно представить следующим образом [6]:

$$V_{жс} \cdot C_{жс} \cdot t_n + Q_{нагр} - V_{жс} \cdot C_{жс} \cdot t_k - Q_{потерь} = 0, \quad (1)$$

где $V_{жс}$ – объем жидкости, нагреваемой в изотермическом загрузочном контейнере; $C_{жс}$ – теплоемкость жидкости; t_n, t_k – начальная и конечная температуры жидкости; $Q_{нагр}$ – количество тепла, выделяемое индукционной плитой; $Q_{потерь}$ – количество потерь тепла системой в окружающую среду.

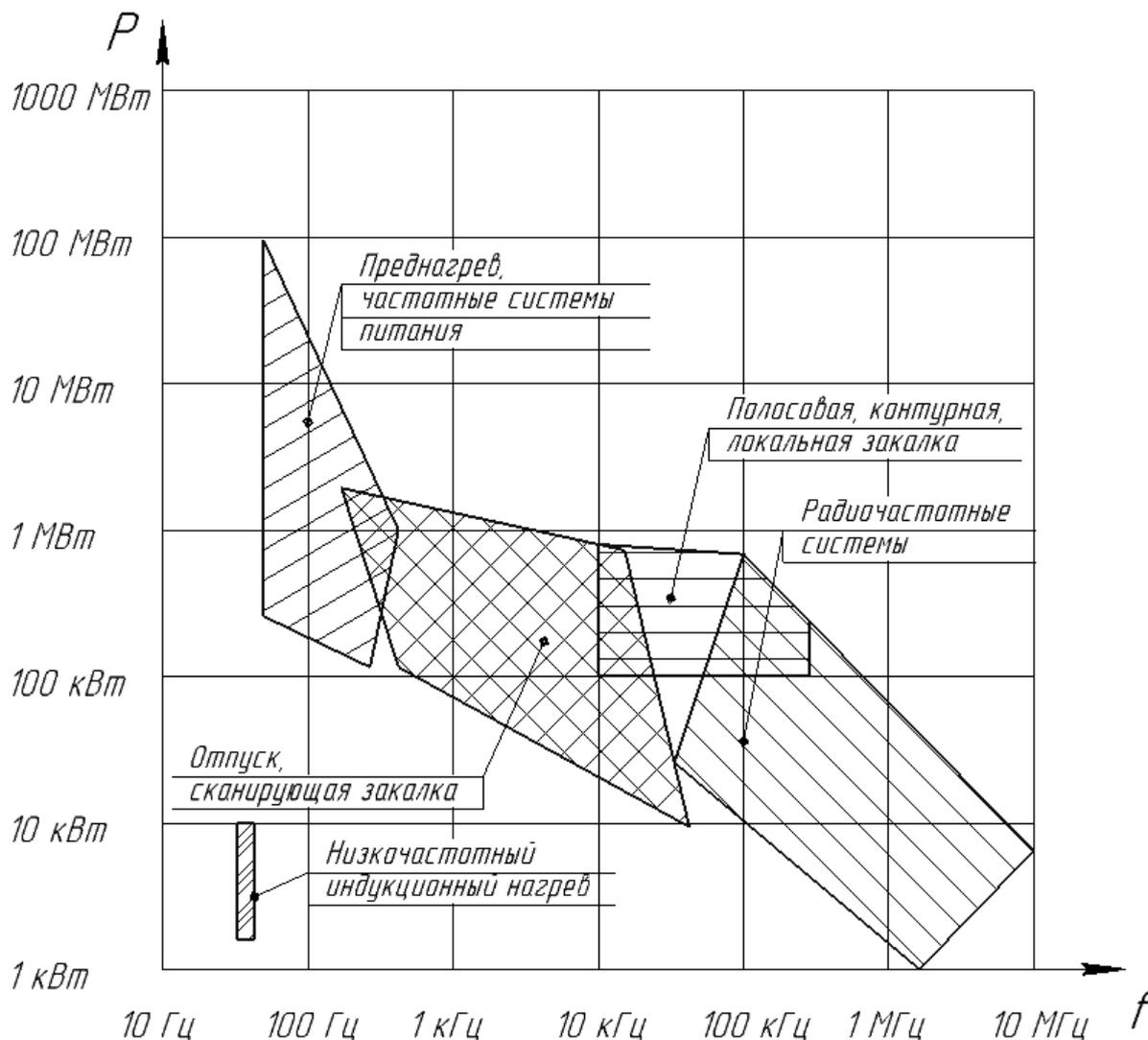


Рис. 1. Мощность и частота для различных областей применения индукционного нагрева

Данное уравнение теплового баланса решим относительно конечной температуры нагрева жидкости t_k :

$$t_k = \frac{V_{ж} \cdot C_{ж} \cdot t_n + Q_{нагр} - Q_{потерь}}{V_{ж} \cdot C_{ж}}. \quad (2)$$

Для определения составляющих уравнения теплового баланса рассматриваемой системы косвенного индукционного нагрева жидкости наиболее значимым является исследование мощностей, передачи и распределения энергии опосредованно в жидкость.

Сложную и интересную для исследования систему представляют кон-

вективные течения в неоднородно нагретых слоях жидкости в системе косвенного индукционного нагрева жидкости.

Течения, которые опосредованно инициированы локализованным индукционным нагревом, особо интересны. К образованию более крупного течения в форме тороидальной конвективной ячейки приводит подобного рода локализованный нагрев. Вторичные, более мелкие по масштабам структуры формируются в области нагрева в пограничном температурном слое. Данные процессы оказывают весьма сильное влияние на процессы теплопере-



носа [7].

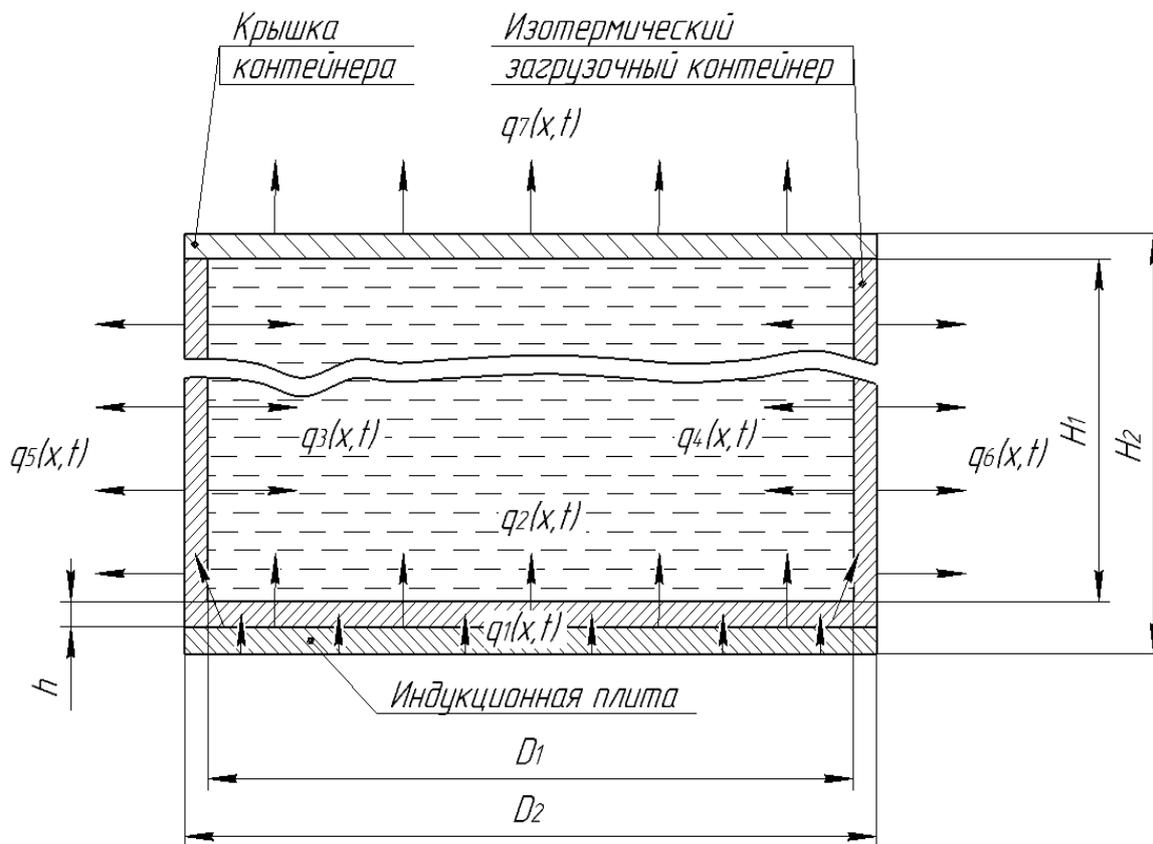


Рис. 2. Схема тепловых потоков рассматриваемой системы (изображение показано условно)

Для исследования и определения параметров опосредованного локализованного нагрева жидкости в системе косвенного индукционного нагрева предложена схема, представленная на рис. 3.

На данной схеме приняты следующие допущения – пренебрегли потерями тепла системой в окружающую среду.

Математическое описание вышеуказанной системы можно представить следующим образом:

$$u_u(t) = i_u R_u + L_u \frac{di_u}{dt} + W_u \frac{d\Phi}{dt}; \quad (3)$$

$$0 = i_{em} R_{em} + W_{em} \frac{d\Phi}{dt}, \quad (4)$$

где R_{em} – функция частоты, тока индуктора.

Баланс мощности будет представлен как

$$(i_{em}^2 R_{em} + i_u^2 R_u) dt = cmdQ + AdQ. \quad (5)$$

Умножим каждую сторону уравнения (3) на $1/R_u$, а уравнения (4) – на $1/R_{em}$. Получим

$$\frac{u_u(t)}{R_u} = i_u + T_u \frac{di_u}{dt} + \frac{W_u}{R_u} \frac{d\Phi}{dt}; \quad (6)$$

$$0 = i_{em} + \frac{W_{em}}{R_{em}} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (7)$$



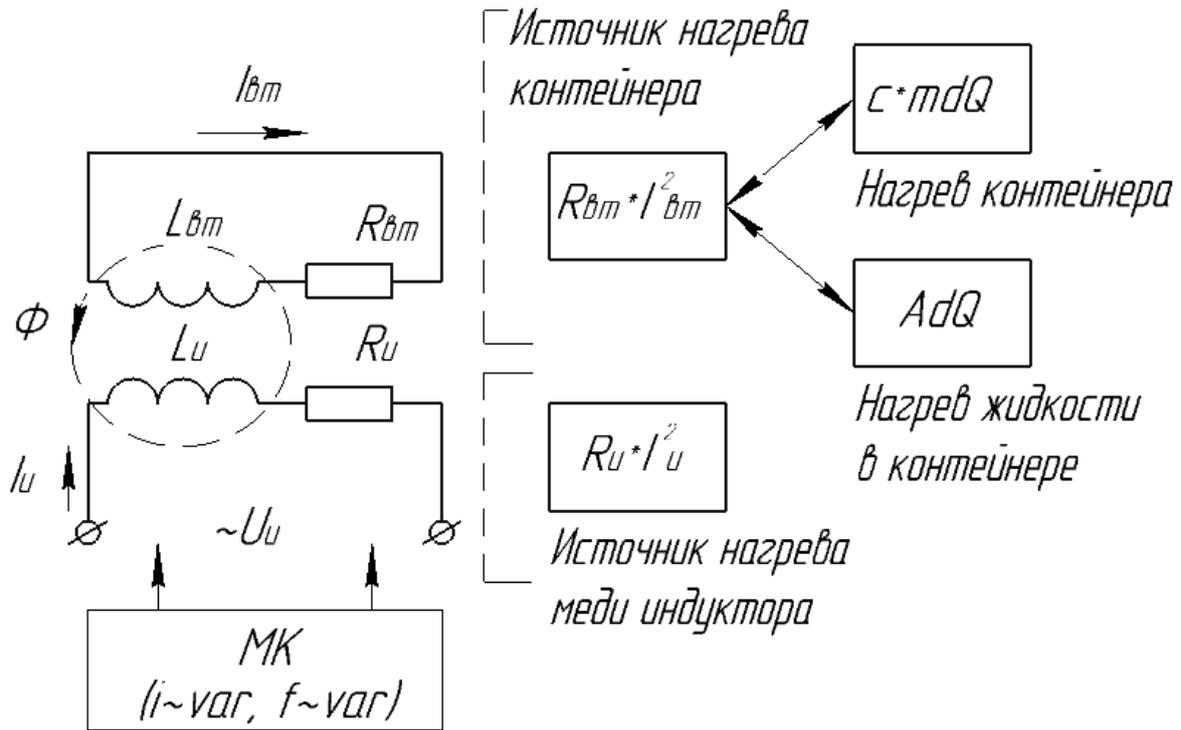


Рис. 3. Схема для исследования и определения параметров опосредованного локализованного нагрева жидкости

Просуммируем уравнения (6) и (7). В результате

$$\frac{u_u(t)}{R_u} = i_u + i_{em} + T_n \frac{di_u}{dt} + \left(\frac{W_u}{R_u} + \frac{W_{em}}{R_{em}} \right) \frac{d\Phi}{dt}. \quad (8)$$

Сделаем данное уравнение более удобочитаемым. Тогда полные потери примут следующий вид:

$$i_{em}^2 R_{em} + i_u^2 R_u = \Delta P. \quad (9)$$

Величина, характеризующая передачу энергии в жидкость,

$$\Delta P_{em}(t) = cm \frac{dQ_{em}}{dt} + A \alpha d Q_{em}. \quad (10)$$

Идентификацию параметров и общее оптимальное управление систе-

мой косвенного индукционного нагрева жидкости выполняет микроконтроллер.

На рис. 4 показана блок-схема алгоритма управления системой косвенного индукционного нагрева жидкости с учетом управляющих и возмущающих параметров.

На блок-схеме также отмечены параметры для каждого процесса, которые могут быть в некоторой степени изучены независимо от иных протекающих процессов.

Входными параметрами системы исследования являются ток и частота, которые определяют энергию, подаваемую на катушку.

Форма и материал катушки в сочетании с геометрическими и физическими параметрами изотермического контейнера будут влиять на электромагнитное поле, определяемое уравнениями Максвелла с принятыми граничными условиями.

При вычислении вихревого тока



из уравнений Максвелла потери на активном сопротивлении индуктора могут быть получены как результат нагрева.

Модуль передачи тепла передает информацию о температурном поле, генерируемом токовым входом. Для по-

лучения подповерхностного косвенно нагретого слоя жидкости система охлаждения помогает сформировать температурное поле, контролируя время и положение охлаждения [9].

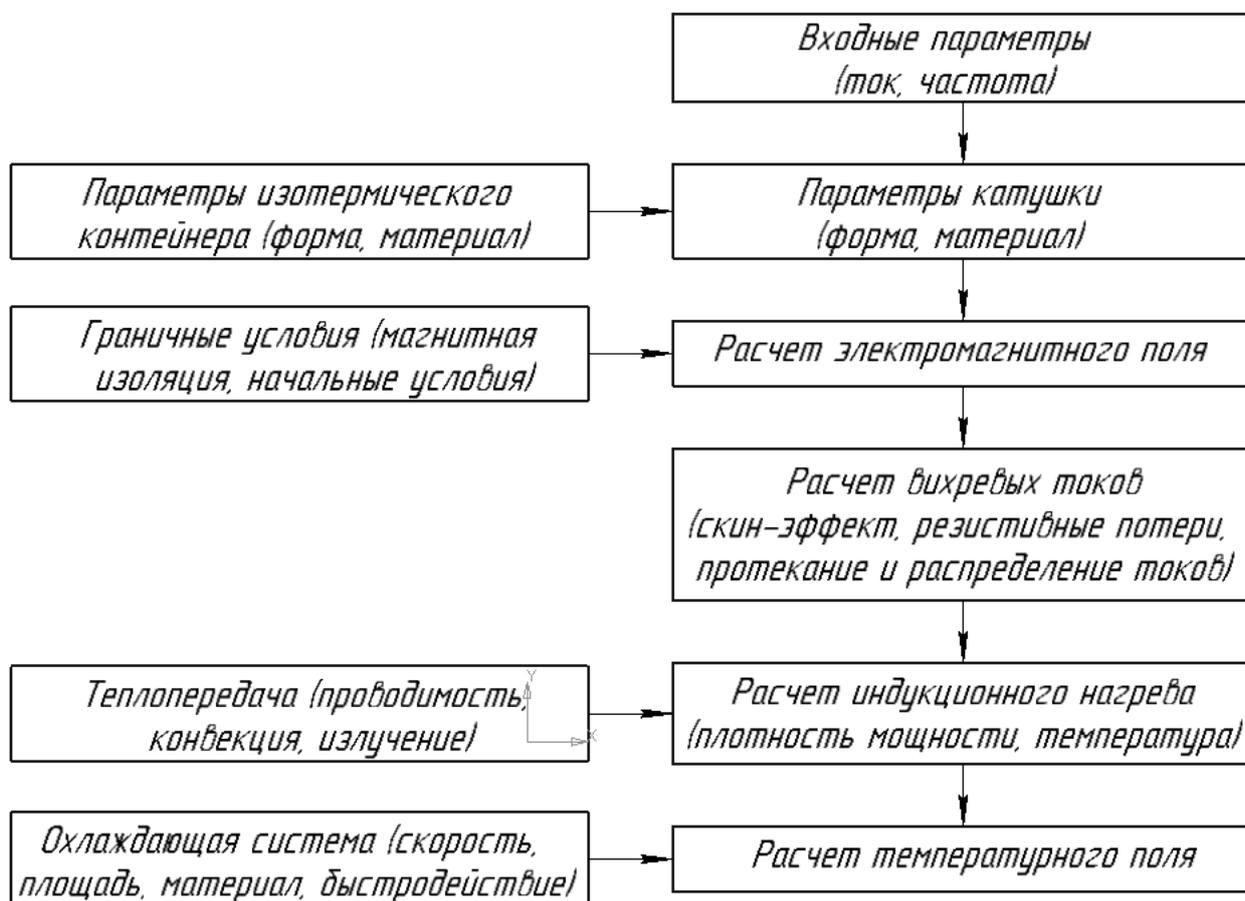


Рис. 4. Блок-схема алгоритма управления системой косвенного индукционного нагрева жидкости с учетом управляющих параметров

Дальнейшее изучение и исследование системы будет сосредоточено на распределении контуров вихревых токов с целью формирования и поддержания оптимальных технологических и энергетических параметров системы косвенного индукционного нагрева жидкости.

Выводы

Показан один из возможных вариантов параметрического идентификаци-

онного метода для системы косвенного индукционного нагрева жидкости. Предложены схема тепловых потоков рассматриваемой системы и схема для исследования и определения параметров опосредованного локализованного нагрева жидкости.

Приведено математическое описание теплового баланса для системы косвенного индукционного нагрева жидкости.

Разработана блок-схема алгоритма управления системой косвенного индукционного нагрева жидкости с учетом



управляющих параметров для достижения оптимальных технологических и энергетических параметров системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Крылов, А. Н.** Исследование и разработка системы косвенного индукционного нагрева при производстве пенополистирольных плит : дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10 / А. Н. Крылов. – Самара, 2005. – 155 л.
2. **Батищев, А. М.** Исследование и повышение эффективности системы косвенного индукционного нагрева жидкости : дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10 / А. М. Батищев. – Самара, 2007. – 156 л. : ил.
3. **Зиннатуллин, Д. А.** Исследование и разработка трубчатого индукционного нагревателя жидкости : дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10 / Д. А. Зиннатуллин. – Самара, 2007. – 128 л.
4. **Viju, N.** Frequency optimization for eddy current thermography / N. Viju, N. Ganesan // NDT&E International. – P. 42.
5. **Лавлесс, Д. Л.** Характеристики и параметры источников питания для эффективного индукционного нагрева / Д. Л. Лавлесс, Р. Л. Кук, В. И. Руднев // Силовая электроника. – 2007. – № 1. – С. 94–98.
6. **Михеев, М. А.** Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Москва : Энергия, 1977. – 344 с. : ил.
7. **Ларькина, Т. С.** Моделирование индукционного нагрева изотермического контейнера / Т. С. Ларькина // International research journal : Междунар. науч.-исслед. журн. – 2015. – № 7 (38). – С. 67–69.
8. **Ларькина, Т. С.** Формирование общей конструкции системы индукционного нагрева / Т. С. Ларькина, Г. С. Ленеvский // Новые горизонты : материалы Междунар. конференции-конкурса, Брянск, 19 марта 2014 г. – Брянск : БГТУ, 2014. – С. 13–14.
9. **Бессонов, А. А.** Методы и средства идентификации динамических объектов / А. А. Бессонов, Ю. В. Загашвили, А. С. Маркелов. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1989. – 280 с.

Статья сдана в редакцию 4 июня 2018 года

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

Валерий Вениаминович Лыготчиков, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

Геннадий Сергеевич Ленеvский, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: emos@rambler.ru.

Tatyana Sergeyevna Larkina, senior lecturer, Smolensk branch of «NRU MPEI».
E-mail: tanushka_zzz@mail.ru.

Valery Veniaminovich Lgotchikov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.

Gennady Sergeyevich Lenevsky, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: emos@rambler.ru.