

# ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 631.371:621.365(075.8)  
DOI: 10.53083/1996-4277-2026-259-5-73-78

С.О. Бобровский, А.А. Багаев, Р.С. Чернусь  
S.O. Bobrovskiy, A.A. Bagaev, R.S. Chernus

## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКТОРА ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ НАГРЕВА МОЛОКА

### METHODOLOGY AND RESULTS OF EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE INDUCTOR OF HIGH-FREQUENCY INDUCTION UNIT FOR MILK HEATING

**Ключевые слова:** *нагреватель молока, индукционный нагрев высокой частоты, параметры индуктора.*

Перспективным средством нагрева является индукционный нагрев, позволяющий снизить непроизводительные затраты энергии на нагрев промежуточного теплоносителя, упростить конструкцию и повысить надежность. Рабочим органов ТВЧ индукционных устройств является индуктор. Одним из требований к подобным установкам является обеспечение резонансного режима колебательного контура  $R, L, C$ , для чего необходимо знать параметры индуктора: его активное сопротивление и индуктивность. Известные методы определения (вольтметра-амперметра, мостовой) не состоятельны. Возможно использование резонансного метода. Цель – количественная оценка параметров индуктора на основе анализа экспериментальных осциллограмм напряжения; экспериментальное осциллографирование переходного процесса изменения напряжения на индукторе, аналитическая обработка экспериментальных результатов. С использованием экспериментального резонансного метода определения индуктивности, дополненного аналитическим анализом осциллограмм затухающего колебательного переходного процесса напряжения при разряде батареи конденсаторов на исследуемый индуктор, установлено, что индуктивность исследуемого индуктора  $L_2$  находится в диапазоне от 0,0134 до 0,038 мкГн, а его активное сопротивление  $R_2$  – в пределах 0,0512 до 0,091 Ом. С учетом малых значений полученных величин результат можно считать удовлетворитель-

ным для дальнейших практических расчетов. Полученные результаты с использованием метода экспериментального осциллографирования колебательно-затухающего разряда батареи конденсаторов на исследуемый индуктор высокочастотной индукционной установки, дополненного аналитическим определением активного сопротивления индуктора и его индуктивности, могут быть использованы для определения сопротивлений электрической эквивалентной схемы замещения и обоснования, для совершенствования конструктивного исполнения (число витков, ток в индукторе, согласования резонансной частоты индуктора и генератора высокой частоты), в конечном итоге, для повышения показателей энергоэффективности процесса термической обработки молока (электрического и термического КПД, коэффициента мощности  $\cos\phi$ ) при работе индукционной ТВЧ установки с теплообменником-загрузкой, может применяться при моделировании системы индукционного нагрева.

**Keywords:** *milk heater, high-frequency induction heating, inductor parameters.*

Induction heating is a promising heating technique which allows reducing unproductive energy consumption for heating the intermediate coolant and simplifying the design and increasing the reliability. The working tool of HFC induction devices is an inductor. One of the requirements for such installations is to ensure the resonant mode of the oscillating circuit  $R, L, C$ ; the inductor parameters: its active resistance and inductance, should be known. The known methods of determination (volt-

meter-ampereter, bridge method) are not valid. It is possible to use the resonance method. The research goal was quantitative assessment of the inductor parameters based on the analysis of experimental voltage oscillograms. The research methods were experimental oscillographic recording of the transient process of voltage change on the inductor and analytical processing of experimental results. Using the experimental resonance method for determining inductance supplemented by an analytical analysis of the oscillograms of the decaying oscillatory transient voltage process during the discharge of a capacitor bank on the studied inductor, it was found that the inductance of the studied inductor  $L_2$  was in the range of 0.0134 to 0.038  $\mu\text{H}$ , and its active resistance  $R_2$  was within 0.0512 to 0.091  $\Omega$ . Given the small values of the obtained quantities, the result can be

considered satisfactory for further practical calculations. The results obtained using the method of experimental oscillography of the oscillatory attenuating discharge of a capacitor bank onto the studied inductor of a high-frequency induction installation, supplemented by an analytical determination of the active resistance of the inductor and its inductance may be used to determine the resistances of an electrical equivalent replacement circuit and substantiate to improve the design (number of turns, current in the inductor, matching the resonant frequency of the inductor and a high-frequency generator), ultimately, to increase the energy efficiency of the milk heat treatment process (electrical and thermal efficiency, power factor  $\cos\varphi$ ) during operation of a HFC induction device with a heat exchanger, it may be used in modeling an induction heating system.

**Бобровский Сергей Олегович**, ст. преподаватель, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: sergej.bobrovskij.95@mail.ru.

**Багаев Андрей Алексеевич**, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: Bagaev710@mail.ru.

**Чернусь Роман Сергеевич**, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ Барнаул, Российская Федерация, e-mail: Chernus.Roman@mail.ru.

**Bobrovskiy Sergey Olegovich**, Asst. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: sergej.bobrovskij.95@mail.ru.

**Bagaev Andrey Alekseevich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: Bagaev710@mail.ru.

**Chernus Roman Sergeevich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: Chernus.Roman@mail.ru.

### Введение

В технологическом процессе пастеризации молока значительное место занимают средства нагрева. К традиционным относятся устройства пластинчатого и кожухотрубного типа первичным теплоносителем, в которых выступают пар или горячая вода. Перспективным средством нагрева является индукционный нагрев, позволяющий снизить непроизводительные затраты энергии на нагрев промежуточного теплоносителя, упростить конструкцию и повысить надежность [1]. Индукционный нагрев в зависимости от используемых частот подразделяется на низкочастотный (50 Гц), среднечастотный (до 10 кГц) и высокочастотный (свыше 10 кГц) [2].

Индукционный нагрев промышленной частоты обладает рядом недостатков [3], среди которых следует отметить значительные линейные размеры и низкий КПД в силу превышения значений токов в индукторе над токами в нагреваемой трубе. Перспективным направлением развития техники индукционного нагрева является уменьшение площади теплоотдающей поверхности с одновременным увеличением коэффициента теплоотдачи, применение токов высокой частоты, что может быть обеспечено с помощью нагрева токами высокой частоты (ТВЧ).

Обоснование параметров и режимов работы низкотемпературных проточных нагревателей молока токами высокой частоты является актуальной научно-технической проблемой.

Рабочим органов ТВЧ индукционных устройств является индуктор, выполненный из меди. Одно из требований к подобным установкам – обеспечение резонансного режима колебательного контура  $R, L, C$ , в связи с чем на величину индуктивности индуктора накладываются определенные ограничения, превышение которых в большую или меньшую стороны вызывает невозможность реализации резонансного режима.

В связи с этим знание параметров индуктора необходимо для обеспечения резонанса колебательного контура установки ТВЧ в заданном диапазоне частот, для оценки энергетических характеристик и определения конструктивных параметров и режимов работы ТВЧ установки.

Известные методы определения индуктивности катушек представлены на рисунке 1.

*Метод вольтметра-амперметра* применяется для измерения сравнительно больших индуктивностей от 1 до 1000 Гн при значительно меньшем активном сопротивлении обмотки, суть которого заключается в следующем: на катушку

подают заданное переменное напряжение частотой, например, 50-1000 Гц [4]. Одновременно измеряют полный ток и полное напряжение с помощью подключённых к катушке амперметра и вольтметра. Затем по закону Ома рассчитывают полное сопротивление. Для определения

индуктивности индуктора ТВЧ установки метод не может быть использован, т.к. индуктивность индуктора на несколько порядков меньше указанной выше и мала частота, на которой измеряется индуктивность.

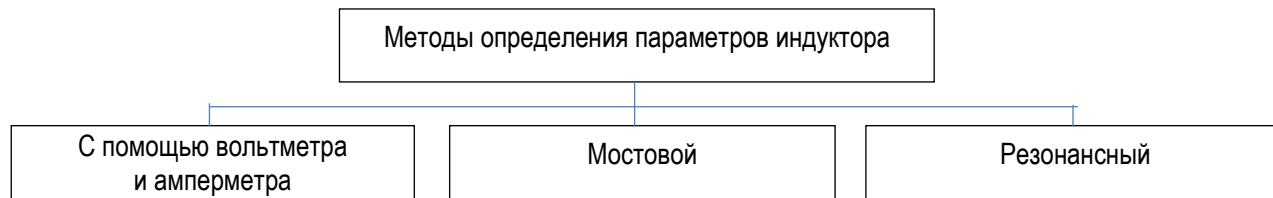


Рис. 1. Методы определения индуктивности индуктивных катушек

Основным элементом *мостового метода* является измерительный мост переменного тока с образцовой ёмкостью [5].

В этом случае катушка индуктивности включается в одно из плеч измерительной мостовой схемы, а одно из оставшихся плеч должно содержать реактивность в виде индуктивности или ёмкости для уравновешивания моста.

Недостаток метода – плохая сходимость мостового метода при измерении параметров катушек с низкой добротностью.

Погрешность метода составляет около 1-3%, пределы измерения индуктивности – 0,1-1000 Гн. Для ТВЧ индукторов это много, и не может быть использовано в силу того, что индуктивность и активное сопротивление индуктора малы и на несколько порядков меньше уравновешивающих сопротивлений измерительного моста.

*Резонансный метод* основан на использовании резонансных свойств колебательного  $R, L, C$  контура, образованного измеряемой индуктивностью и образцовой ёмкостью, и позволяет измерять индуктивность катушек, работающих на высокочастотных диапазонах колебаний.

Структурная схема прибора содержит диапазонный генератор гармонических колебаний, колебательный контур, состоящий из рабочего конденсатора и измеряемой цепи. Погрешность метода составляет 2-5%, пределы измерений индуктивности – от 0,05 мкГн до 100 мГн, что в достаточной степени соответствует задачам исследования.

В связи с вышеуказанным именно резонансный метод используется в дальнейшем. Вместе с тем резонансный метод не позволяет опреде-

лить активное сопротивление индуктора в силу его малости.

Принятый для использования резонансный метод целесообразно дополнить аналитической составляющей, позволяющей определить не только индуктивность малой величины, но и столь же малое активное сопротивление индуктора. Аналитический метод основан на осциллографировании напряжения индуктора при разряде конденсаторной батареи на исследуемый индуктор с последующим анализом переходного процесса изменения напряжения, характеристик кривой разряда и определением параметров индуктора.

**Цель** – количественная оценка параметров индуктора на основе анализа экспериментальных осциллограмм напряжения.

**Методы** исследования: экспериментальное осциллографирование переходного процесса изменения напряжения на индукторе, аналитическая обработка экспериментальных результатов.

#### Экспериментальная часть

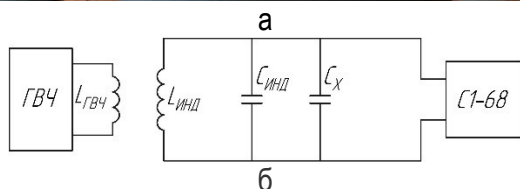
Общий вид экспериментальной установки и схема измерения индуктивности резонансным методом показаны на рисунке 2.

Внешний вид исследуемого индуктора – на рисунке 3.

Резонансные методы определения индуктивности основаны на использовании резонансных свойств колебательного контура, образованного измеряемой индуктивностью  $L_{инд}$ , мГн, и образцовой ёмкостью  $C_x$ , пФ (рис. 2 б). Изменяя  $C_x$ , настраивают контур в резонанс с генератором (на частотах от 10 кГц до 1,5 МГц); индуктивность вычисляется по формуле:

$$L_{\text{инд}} = \frac{2,53 \cdot 10^{10}}{f_0^2 \cdot C_{\text{общ}}}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{общ}} = C_{\text{инд}} + C_{\text{х}}$  – емкость колебательного разрядного контура в соответствии со схемой на рисунке 2 б.



**Рис. 2. Экспериментальная установка:**  
а – общий вид; б – схема измерения индуктивности методом резонанса:

**ГВЧ** – генератор импульсов высокой частоты Г5-15; **LГВЧ** – индуктивность витков вторичной обмотки трансформатора Г5-15; **Lинд** – измеряемая индуктивность; **Cинд** – собственная ёмкость катушки; **Cх** – образцовая ёмкость; **С1-68** – осциллограф

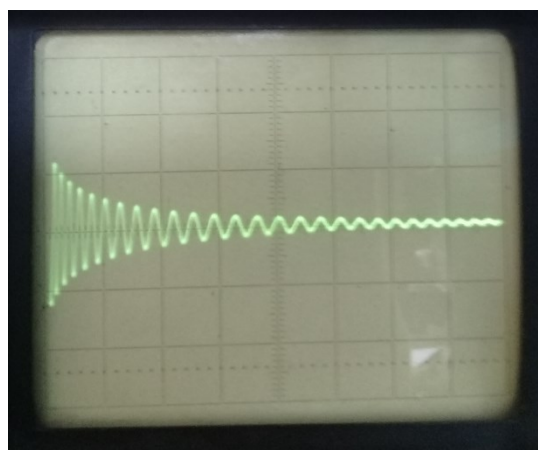


**Рис. 3. Внешний вид исследуемого индуктора**

### Результаты и обсуждение

В результате заряда и разряда конденсатора  $C_{\text{общ}}$  разной емкости на исследуемый индуктор электронно-лучевым осциллографом С1-68 регистрировались осциллограммы переходного процесса изменения напряжения при разряде батареи конденсаторов емкостью  $C_{\text{общ}}$ . Пример осциллограммы изменения напряжения на исследуемом индукторе при разряде батареи

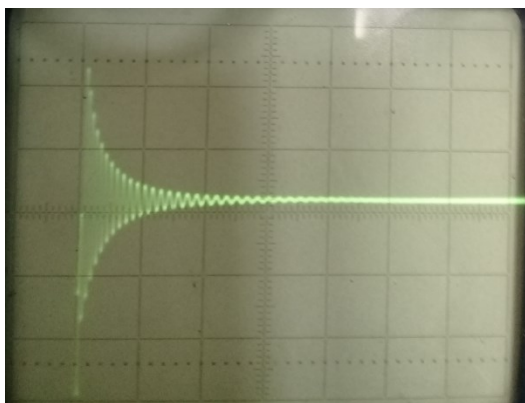
конденсаторов емкостью  $C_{\text{общ}} = 15000$  пФ представлен на рисунке 4, где 5 В/дел. – цена деления оси напряжения; 2 мкс/см – цена деления оси времени; максимальное значение напряжения  $U_{\text{max}} = 8$  В;  $U_1 = 6$  В – амплитуда напряжения, соответствующая времени  $t_1 = 0,1$  мкс первого положительного полупериода колебания;  $U_3 = 5$  В – амплитуда напряжения, соответствующая времени  $t_3 = 0,25$  мкс третьего положительного полупериода колебания;  $\Delta U = 1,2$  В – декремент затухания напряжения;  $T = 0,15$  мкс – период затухания.



**Рис. 4. Осциллограмма напряжения на исследуемом индукторе при разряде батареи конденсаторов емкостью  $C_{\text{общ}} = 15000$  пФ**

На рисунке 5 показана осциллограмма переходного процесса изменения напряжения на исследуемом индукторе при разряде батареи конденсаторов емкостью  $C_{\text{общ}} = 4710$  пФ со следующими параметрами: 2 В/дел. – цена деления оси напряжения; 2 мкс/см – цена деления оси времени; максимальное значение напряжения  $U_{\text{max}} = 6$  В;  $U_1 = 4,2$  В – амплитуда напряжения, соответствующая времени  $t_1 = 0,18$  мкс первого положительного полупериода колебания;  $U_3 = 3,8$  В – амплитуда напряжения, соответствующая времени  $t_3 = 0,23$  мкс третьего положительного полупериода колебания;  $\Delta U = 1,1$  В – декремент затухания напряжения;  $T = 0,05$  мкс – период затухания.

С целью определения параметров индуктора (активного сопротивления  $R$  и индуктивности  $L$ ) полученные осциллограммы переходного процесса изменения напряжения были подвержены анализу с использованием методики, изложенной в [6, 7], содержание которой заключается в следующем.



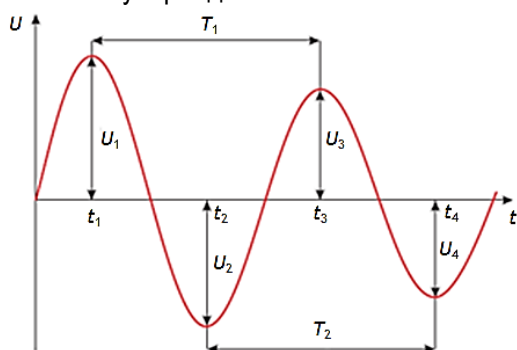
**Рис. 5. Осциллограмма напряжения на исследуемом индукторе при разряде батареи конденсаторов емкостью  $C_{общ} = 4710$  пФ**

В соответствии с осциллограммой на рисунке 6 (в последующем применено для анализа осциллограмм на рисунках 4 и 5) коэффициент (декремент) затухания по напряжению определяется выражением:

$$\Delta_U = U_1/U_3, \quad (2)$$

где  $U_1$  – амплитуда напряжения, соответствующая максимуму напряжения в первый положительный полупериод колебания;

$U_3$  – амплитуда напряжения, соответствующая максимуму напряжения во второй положительный полупериод колебания.



**Рис. 6. Мгновенное значение напряжения колебательного затухающего разряда батареи конденсаторов на исследуемый индуктор**

Опуская промежуточные рассуждения при известной величине разрядной емкости батареи конденсаторов  $C_{общ}$ , индуктивность исследуемого индуктора  $L_2$  определяется выражением

$$L_x = \frac{T^2}{C_{общ} \cdot (4\pi^2 + (\ln \Delta_U)^2)}, \quad (3)$$

а величина активного сопротивления индуктора  $R_2$ :

$$R_x = \frac{2T \cdot \ln \Delta_U}{C_{общ} \cdot (4\pi^2 + (\ln \Delta_U)^2)}. \quad (4)$$

Угловая частота, рад/с, затухания при этом:

$$\omega_0 = 2\pi f = \frac{2\pi}{T_i} = \sqrt{\frac{1}{LC} - (\ln \Delta_U)^2} \cdot \frac{1}{T_i}, \quad (5)$$

где  $T_i$  – период колебательного затухающего переходного процесса (время между двумя положительными амплитудами колебательного процесса);

$f$  – резонансная частота, Гц.

Результаты использования экспериментально-аналитического метода определения параметров индуктора представлены в таблице. Повторность измерений трехкратная, доверительная вероятность 0,95, предельная ошибка в долях среднеквадратического отклонения составляет  $\pm 3\sigma$ .

Анализ данных таблицы позволяет утверждать, что индуктивность исследуемого индуктора  $L_2$  находится в диапазоне от 0,0134 до 0,038 мкГн, а его активное сопротивление  $R_2$  – в пределах 0,0512 до 0,091 Ом. С учетом малых значений полученных величин результат можно считать удовлетворительным для дальнейших практических расчетов.

Таблица

**Результаты использования экспериментально-аналитического метода определения параметров индуктора**

| Разрядная емкость $C_{общ}$ , пФ | Индуктивность и сопротивление индуктора | Номер опыта |        |        | Среднее значение | Резонансная частота $f$ , кГц |
|----------------------------------|---|-------------|--------|--------|------------------|-------------------------------|
|                                  |   | 1           | 2      | 3      |                  |                               |
| 4700                             | $L_2$ , мкГн                            | 0,0172      | 0,0125 | 0,0105 | 0,0134           | 20000                         |
|                                  | $R_2$ , Ом                              | 0,0347      | 0,0671 | 0,0518 | 0,0512           |                               |
| 15000                            | $L_2$ , мкГн                            | 0,0466      | 0,0251 | 0,0423 | 0,038            | 6650                          |
|                                  | $R_2$ , Ом                              | 0,089       | 0,078  | 0,106  | 0,091            |                               |

**Заключение**

Полученные результаты с использованием метода экспериментального осциллографирования колебательного затухающего разряда батареи конденсаторов на исследуемый индуктор высокочастотной индукционной установки, дополненного аналитическим определением активного сопротивления индуктора и его индуктивности, могут быть использованы для определения сопротивлений электрической эквивалентной схемы замещения и обоснования, для совершенствования конструктивного исполнения (число витков, ток в индукторе, согласования резонансной частоты индуктора и генератора высокой частоты), в конечном итоге, для повышения показателей энергоэффективности процесса термической обработки молока (электрического и термического КПД, коэффициента мощности  $\cos\varphi$ ) при работе индукционной ТВЧ установки с теплообменником-загрузкой, может применяться при моделировании системы индукционного нагрева.

**Библиографический список**

1. Bagaev, A., Bobrovskiy, S. (2023). Electro-technological Heat Treatment of Milk: Energy and Exergy Efficiency. *Food Processing: Techniques and Technology*. 53. 272-278. DOI: 10.21603/2074-9414-2023-2-2428.
2. Электротехнология / А. М. Басов, В. Г. Быков, А. В. Лаптев, В. Б. Файн. – Москва: Агропромиздат, 1985. – 256 с. – Текст: непосредственный.
3. Багаев, А. А. Методика расчета, оценка энергетической эффективности и направления совершенствования низкотемпературных индукционных коаксиальных нагревателей молока промышленной частоты / А. А. Багаев, С. О. Бобровский. – DOI 10.24412/2227-9407-2023-7-60-71. – Текст: непосредственный // Вестник НГИЭИ. – 2023. – № 7 (146). – С. 60-71.
4. Лушин, А. В. Способы измерения индуктивности / А. В. Лушин, А. Н. Долгов. – Текст: непосредственный // Приволжский научный вестник. – 2013. – № 12-2 (28). – С. 36-40.
5. Корнев, Е. А. Измерение параметров пассивных элементов универсальным измерительным мостом: методические указания / Е. А. Корнев, О. В. Худорожков; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 13 с. – Текст: непосредственный.
6. Измерение параметров индукторов установок индукционного нагрева на режимах, близких к номинальным / Ю. И. Болотовский, Л. И. Гутин, Г. И. Таназлы, А. А. Шуляк. – Текст: непосредственный // Силовая электроника. – 2005. – № 1. – С. 104-106.
7. Об одном варианте практической реализации системы измерения параметров индукторов установок индукционного нагрева на режимах близких к номинальным / З. Лазаревич, Ю. И. Болотовский, Л. И. Гутин [и др.]. – Текст: непосредственный // Силовая электроника. – 2007. – № 4. – С. 78-80.

**References**

1. Bagaev, A., Bobrovskiy, S. (2023). Electro-technological Heat Treatment of Milk: Energy and Exergy Efficiency. *Food Processing: Techniques and Technology*. 53. 272-278. DOI: 10.21603/2074-9414-2023-2-2428.
2. *Elektrotehnologiya* / A.M. Basov, V.G. Bykov, A.V. Laptev, V.B. Fayn. – Moskva: Agropromizdat, 1985. – 256 s.
3. Bagaev A.A., Bobrovskiy S.O. Metodika rascheta, otsenka energeticheskoy effektivnosti i napravleniya sovershenstvovaniya nizkotemperaturnykh induktsionnykh koaksialnykh nagrevateley moloka promyshlennoy chastoty // Vestnik NGIEI. – 2023. – No. 7 (146). – S. 60-71. DOI: 10.24412/2227-9407-2023-7-60-71.
4. Lushin, E. V. Sposoby izmereniya induktivnosti / E. V. Lushin, A. N. Dolgov // Privolzhskiy nauchnyy vestnik. – 2013. – No. 12-2 (28). – S. 36-40.
5. Kornev, E.A. Izmerenie parametrov passivnykh elementov universalnym izmeritelnyim mostom: metodicheskie ukazaniya / E.A. Kornev, O.V. Khudorozhkov; Orenburgskiy gos. un-t. – Orenburg: OGU, 2019. – 13 s.
6. Bolotovskiy Yu. I. Izmerenie parametrov induktorov ustanovok induktsionnogo nagreva na rezhimakh, blizkikh k nominalnym / Yu.I. Bolotovskiy, L.I. Gutin, G.I. Tanazly, A.A. Shulyak // Silovaya elektronika. – 2005. – No. 1. – S. 104-106.
7. Lazarevich Z. Ob odnom variante prakticheskoy realizatsii sistemy izmereniya parametrov induktorov ustanovok induktsionnogo nagreva na rezhimakh blizkikh k nominalnym / Z. Lazarevich, Yu.I. Bolotovskiy, L.I. Gutin, G.I. Tanazly, A.A. Shulyak // Silovaya elektronikazh. – 2007. – No. 4. – S. 78-80.

