

# Индукционно-резистивная система нагрева с биметаллическим внешним проводником

КУВАЛДИН А.Б., СТРУПИНСКИЙ М.Л., ХРЕНКОВ Н.Н., ФЕДИН М.А.

Рассмотрена методика расчета электрических и энергетических характеристик индукционно-резистивной системы нагрева с биметаллическим внешним проводником с учетом магнитного гистерезиса. Представлены результаты расчета характеристик системы нагрева, определено влияние внутреннего шунтирования внешнего проводника системы нагрева на ее параметры.

Ключевые слова: трубопроводы, система нагрева, биметаллический внешний проводник, внутреннее шунтирование, магнитный гистерезис, схема замещения

A procedure for calculating the electrical and power performance characteristics of an induction-resistive heating system with an external bimetallic conductor that takes magnetic hysteresis into account is considered. The heating system's characteristics calculated using the described procedure are presented, and the effect of internal shunting of the external conductor on the heating system parameters is determined.

Key words: pipelines, induction-resistive heating system, external bimetallic conductor, internal shunting, magnetic hysteresis, equivalent electric circuit

Для поддержания температуры продукта в трубопроводах хорошо себя зарекомендовали индукционно-резистивные системы нагрева (ИРСН). Обычно такая система нагрева представляет собой коаксиальную структуру, состоящую из стальной ферромагнитной трубы и расположенного внутри нее изолированного проводника (рис. 1,а). На один конец ИРСН (между проводником и трубой) подается переменное напряжение, а другой проводник накоротко соединяется с трубой. Токи проводника и трубы направлены встречно, и в трубе отмечаются ярко выраженный эффект близости и

поверхностный эффект, из-за чего ток в трубе протекает по тонкому слою вблизи внутренней поверхности трубы, а падение напряжения на наружной поверхности трубы оказывается существенно меньше напряжения питания. При этом сама наружная поверхность трубы заземляется, что обеспечивает высокую электробезопасность при работе ИРСН. Это, а также такие достоинства как высокая надежность конструкции, хороший тепловой контакт между нагревателем ИРСН и нагреваемым объектом (система может быть приварена к металлической поверхности обогреваемого объекта), отсутствие

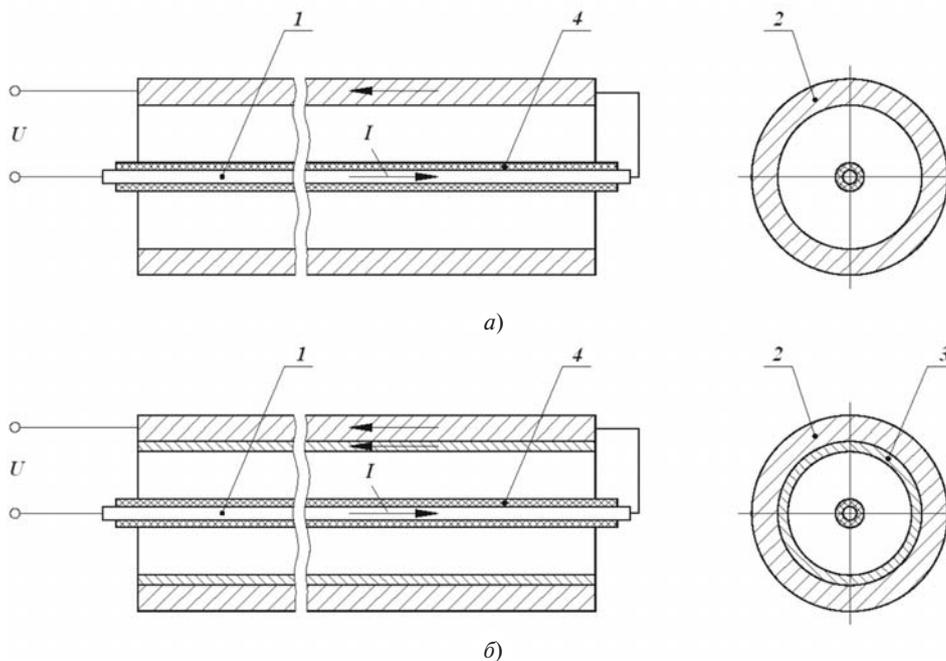


Рис. 1. Эскиз однослойной (а) и двухслойной (б) индукционно-резистивной системы нагрева: 1 – индуктор; 2 – ферромагнитный слой; 3 – медный слой; 4 – электроизоляция

сопроводительной сети позволяют ИРСН иметь преимущества перед нагревательными кабелями при решении ряда задач низкотемпературного нагрева, например при обогреве сверхдлинных трубопроводов [1].

Длина рассматриваемой системы обогрева, которая, как правило, не превышает 15 км, определяется соотношением питающего напряжения  $U$  (обычно не более 5 кВ) и линейного падения напряжения на нагревателе, равного 0,3–0,5 В/м. Значение питающего напряжения ограничено, главным образом, опасностью возникновения частичных разрядов внутри изолирующих элементов при высоких напряжениях питания. Отметим, что возможна организация питания двух ИРСН (два плеча одной ИРСН) от одной трансформаторной подстанции, что позволяет увеличить длину обогреваемого участка трубопровода и сократить число подстанций в 2 раза. Это особенно актуально в условиях, когда вдоль трассы трубопровода отсутствует подвод электроэнергии.

Удельные мощности ИРСН могут достигать 120 Вт/м. Питание системы осуществляется от источника повышенного напряжения промышленной частоты.

Одним из путей увеличения длины системы является уменьшение линейного падения напряжения при той же мощности тепловыделения, что достигается за счет внутреннего шунтирования ферромагнитной трубы с использованием проводников с различной формой поперечного сечения.

В дальнейшем будем считать, что внешний проводник ИРСН (труба) – двухслойный биметаллический, т.е. внутренний равномерный по толщине слой с хорошей проводимостью (материал – медь) плотно охватывается ферромагнитной трубой. В этом случае ток в обратном проводнике будет представлять собой сумму тока в ферромагнитном слое и тока в медном слое. На рис. 1, б представлен эскиз ИРСН с такой трубой (далее двухслойная ИРСН).

Были проведены дополнительные исследования влияния конфигурации внутреннего шунта на параметры ИРСН. Рассматривались следующие способы организации шунтирования: в виде биметаллического внешнего проводника, пластины или кабеля, проложенных внутри ферромагнитной трубы.

Проверка эквивалентности способов внутреннего шунтирования была проведена с помощью программы ELCUT при следующих допущениях:

1) относительная магнитная проницаемость ферромагнитного слоя постоянна по его толщине и равна среднему значению распределения относительной магнитной проницаемости по толщине слоя при том же значении напряженности поля на внутренней поверхности трубы;

2) активная мощность, выделяющаяся в ферромагнитном слое за счет гистерезиса, равна нулю.

С использованием программы ELCUT установлено, что картины поля в ферромагнитной трубе во всех случаях получаются одинаковыми, в то время как в воздушном зазоре между индуктором и трубой они различаются. Практически равными для всех трех вариантов оказываются и значения интегральных электрических и энергетических характеристик (мощность тепловыделения в элементах системы, напряжение питания, напряжение на поверхности трубы и др.). Таким образом, все три способа организации шунтирования являются эквивалентными, поскольку в соответствии с законом полного тока напряженность магнитного поля на внутренней поверхности ферромагнитной трубы будет одинаковой для всех случаев. Эквивалентность способов организации внутреннего шунтирования была подтверждена и экспериментально.

Однако отметим, что применение программы ELCUT для расчета интегральных электрических и энергетических характеристик при проектировании двухслойной ИРСН не дает точных результатов, так как в ELCUT не учитываются потери в стали на гистерезис [2]. Поэтому была разработана методика численного расчёта двухслойной ИРСН с учётом нелинейных зависимостей относительной магнитной проницаемости и мощности потерь на гистерезис от напряженности магнитного поля. Исходными данными для расчета являлись геометрические параметры системы, свойства материала слоев трубы, электрические характеристики (ток индуктора  $I$ , частота  $f$ ). Расчет определялись параметры электромагнитного поля, значения активной и реактивной мощностей в индукторе, ферромагнитном и медном слоях [3–5]. Для расчета электромагнитного поля в слоях трубы использовались эквивалентная электрическая схема замещения. Были приняты следующие допущения:

- 1) индуктор и труба расположены коаксиально;
- 2) стенка трубы считается плоской и может рассматриваться как плита;
- 3) магнитная индукция  $B$  и напряженность магнитного поля  $H$  изменяются во времени синусоидально;
- 4) относительная магнитная проницаемость в любой точке по толщине ферромагнитного слоя трубы постоянна во времени и равна значению, соответствующему действующему значению напряженности магнитного поля в данной точке;
- 5) при расчете не учитывается изменение удельного электрического сопротивления, а также относительной магнитной проницаемости материала слоев трубы в процессе нагрева.

С учетом указанного рассмотрим модель двухслойной плиты длиной  $l$ , шириной  $b$  и толщиной  $\delta$ , по которой протекает ток  $I$  частотой  $f$ . Толщина плиты  $\delta = \delta_1 + \delta_2$ , где  $\delta_1$  и  $\delta_2$  – толщина медного и ферромагнитного слоя соответственно. В качестве примера принято разбиение плиты по толщине на элементарных 6 слоев (в общем случае – на  $n$  слоев). Медный слой разбивается на 2 слоя, а ферромагнитный – на 4 слоя (в общем случае – на  $n_1$  и  $n_2$  слоев соответственно). Суммарное число разбиений двухслойной плиты  $n = n_1 + n_2$ . При этом принято, что ток в каждом элементарном слое протекает в его середине (рис. 2).

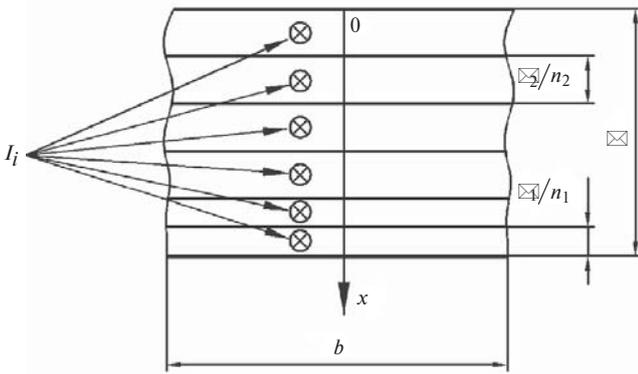


Рис. 2. Представление участка плиты слоями с токами  $I_i$

Заданы удельные электрические сопротивления материалов слоев плиты  $\rho_i$ , основная кривая намагничивания  $B(H)$  и зависимость потерь на гистерезис от напряженности магнитного поля для ферромагнитного слоя.

На рис. 3 представлена эквивалентная электрическая схема замещения для расчета параметров электромагнитного поля в двухслойной плите. В схеме для параметров элементарного слоя плиты используются следующие обозначения:  $I_i$  – ток;  $R_i$  – активное сопротивление;  $L_i$  – индуктивность;  $R_{\Gamma i}$  – активное сопротивление, учитывающее потери на гистерезис;  $i$  – номер слоя ( $i = 1, \dots, n$ ). Отсчет элементарных слоев ведется от внутренней поверхности медного слоя.

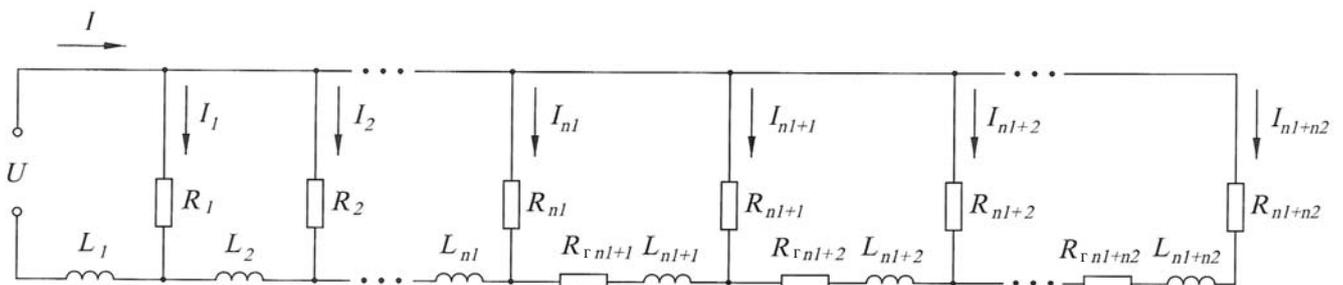


Рис. 3. Электрическая схема замещения двухслойной ИРСН

Активное сопротивление слоя  $i$  на метр длины рассчитывается по формуле:

$$R_i = \rho \frac{1}{\pi h (d_i + h)}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление меди или ферромагнитной стали (в зависимости от номера слоя);  $d_i$  – внутренний диаметр слоя с номером  $i$ ;  $h$  – толщина слоя.

Индуктивность слоя  $i$  на метр длины рассчитывается по формуле:

$$L_i = \mu_i \mu_0 h \frac{1}{\pi d_i}, \quad (2)$$

где  $\mu_i$  – относительная магнитная проницаемость слоя  $i$ ;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная.

В процессе перемагничивания стали происходит выделение мощности (потери) из-за магнитного гистерезиса, что учитывается введением в схему замещения активных сопротивлений  $R_{\Gamma i}$ , которые учитываются только для ферромагнитных слоев с номерами  $i = (n_1 + 1) - (n_1 + n_2)$ . Сопротивления  $R_{\Gamma i}$  задаются в виде функции протекающего тока  $I_i$ , полученной из зависимости потерь на гистерезис в ферромагнетике от напряженности магнитного поля  $H_i$ . По значению  $H_i$  в каждом слое рассчитывается мощность потерь за счет гистерезиса на метр длины:

$$P_{\Gamma i} = w_{\Gamma i} \pi h (d_i + h), \quad (3)$$

где  $w_{\Gamma i}$  – удельная объемная мощность потерь, Вт/м<sup>3</sup>, из-за гистерезиса, которая зависит от  $H_i$  и  $f$ .

Активное сопротивление слоя  $i$  на метр длины, учитывающее потери на гистерезис,

$$R_{\Gamma i} = \frac{P_{\Gamma i}}{I_i^2}. \quad (4)$$

Отметим, что выражения (2) и (3) представляют собой нелинейные зависимости индуктивности слоя трубы и мощности потерь из-за гистерезиса в

слое трубы от напряженности магнитного поля, поэтому задачу расчета параметров электромагнитного поля в стенке трубы необходимо решать итерационным методом. Алгоритм численного расчета электромагнитного поля в двухслойной плите представлен на рис. 4. Алгоритм содержит два итерационных цикла: внутренний цикл учитывает нелинейную зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля, внешний – нелинейную зависимость удельных объемных потерь на гистерезис от напряженности магнитного поля.

На рис. 4 обозначено:  $H[i,j]$  – напряженность в слое  $i$  на итерации  $j$  цикла;  $R_r[i,j]$  – активное сопротивление, учитывающее гистерезис, слоя  $i$  на итерации  $j$  цикла;  $\delta_1 = \max \left| \frac{H[i,j] - H[i-1,j]}{H[i-1,j]} \right|$  и  $\delta_2 = \max \left| \frac{H[i,j] - H[i,j-1]}{H[i,j-1]} \right|$  – относительные погрешности при расчете распределения напряженности магнитного поля в стенке и активных сопротивлений слоев трубы, учитывающих гистерезис, соот-

ветственно;  $\epsilon_1, \epsilon_2$  – критерии выхода из внутреннего и внешнего циклов соответственно.

На каждой итерации составляется система уравнений по первому и второму законам Кирхгофа в соответствии со схемой на рис. 3.

Для  $n-1$  независимых контуров электрической схемы замещения можно записать уравнения по второму закону Кирхгофа в виде:

$$\dot{I}_i R_i - \dot{I}_{i+1} R_{i+1} - \left( \sum_{i+1}^n \dot{I}_i \right) (R_{r_{i+1}} + j\omega L_{i+1}) = 0. \quad (5)$$

При этом в уравнении (5) для слоев с номерами  $i=1-n_1$  значение  $R_{r_i} = 0$ .

Последнее уравнение системы записываем по первому закону Кирхгофа:

$$\sum_{i=1}^n \dot{I}_i = \dot{I}. \quad (6)$$

Решение системы уравнений представим в виде вектор-столбца действующих значений токов в слоях стенки трубы. После этого по закону полного тока рассчитываются действующие значения на-

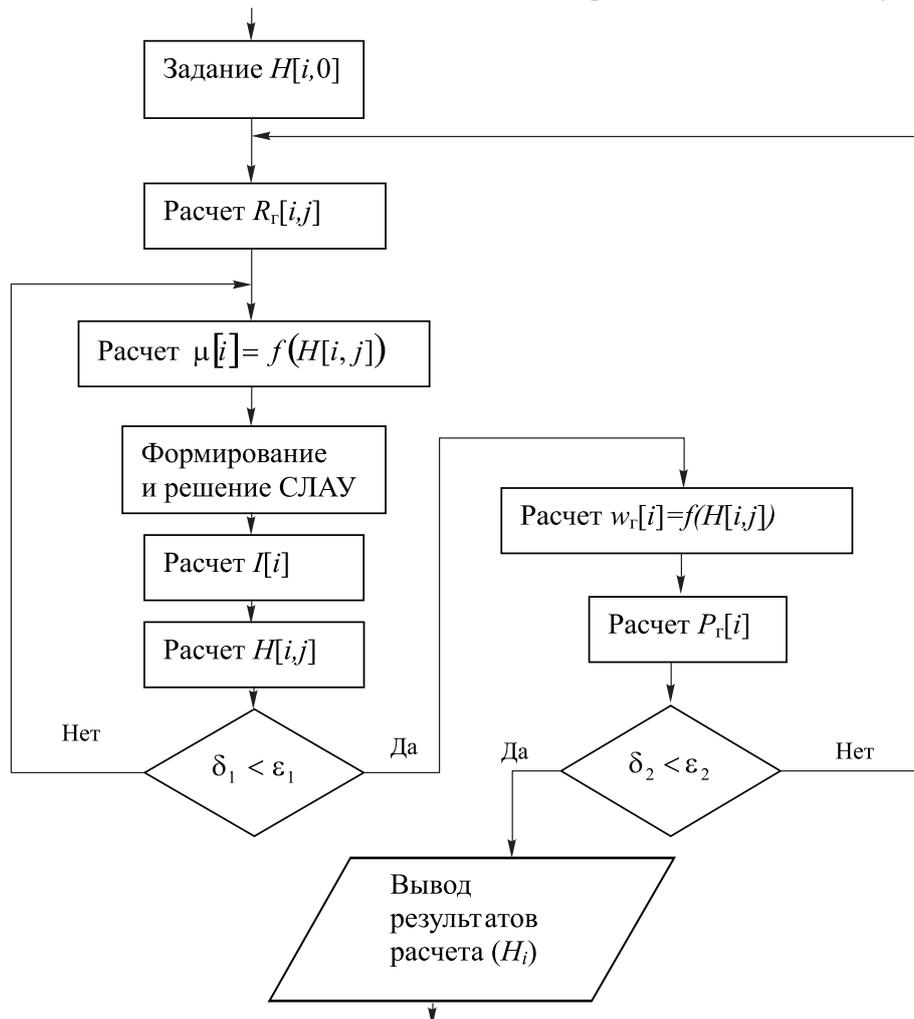


Рис. 4. Алгоритм численного расчета электромагнитного поля в двухслойной плите с учетом гистерезиса

пряженности магнитного поля в слоях на итерации  $j$  цикла:

$$\dot{H}_i = \frac{\dot{I} + \sum_{i=1}^n \dot{I}_i}{\pi d_i} \quad (7)$$

Разработанная методика расчета реализована в виде  $m$ -файла в среде MATLAB. Данный файл не имеет списка входных параметров и является примером простой процедуры без параметров (файл-сценарий). Для запуска файла-сценария из командной строки MATLAB достаточно указать его имя в этой строке.

С использованием разработанной методики в среде MATLAB были проведены расчеты двух- и однослойной ИРСН. На рис. 5 представлены рассчитанные распределения напряженности магнитного поля  $H$  в стенке трубы при следующих исходных данных: нагрев на промышленной частоте  $f=50$  Гц, материал горячекатаной трубы размерами  $32 \times 3$  – сталь 10, сечение медного индуктора  $50 \text{ мм}^2$ , ток индуктора  $150 \text{ А}$ . Для двухслойной системы сечение медного слоя  $S_M$  составляло 5, 9, 16 и  $25 \text{ мм}^2$ , что соответствует толщине медного слоя 0,06, 0,11, 0,20 и 0,31 мм соответственно. На рис. 5 область резкого снижения значения  $H$  соответствует медному слою, область для текущей координаты  $r$  от 13 до 16 мм – ферромагнитному слою.

Установлено, что при использовании медного слоя значение  $H$  на внутренней поверхности ферромагнитного слоя существенно снижается. Это приводит к уменьшению мощности тепловыделения в ферромагнитном слое. Так, при токе индуктора  $150 \text{ А}$  для однослойной ИРСН удельная мощность тепловыделения в ферромагнитной трубе составляет  $54,8 \text{ Вт/м}$ , а для двухслойной ИРСН ( $S_M=16 \text{ мм}^2$ )  $21,0 \text{ Вт/м}$ . Напряжение на поверхности трубы снижается при шунтировании и для двухслойной ИРСН уже при  $S_M=5 \text{ мм}^2$  представля-

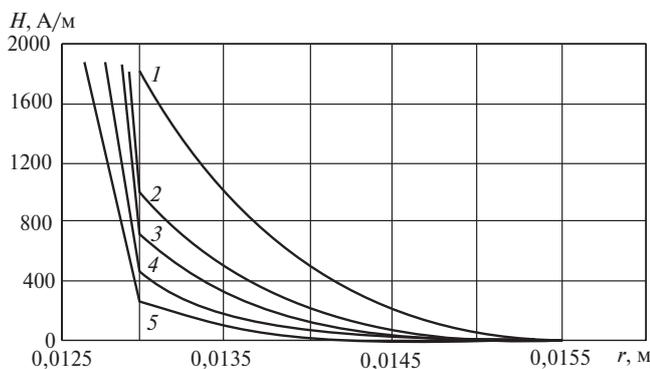


Рис. 5. Распределение напряженности магнитного поля в стенке трубы для ИРСН без шунтирования (1) и с шунтированием внешнего проводника: 2 –  $S_M=5 \text{ мм}^2$ ; 3 –  $9 \text{ мм}^2$ ; 4 –  $16 \text{ мм}^2$ ; 5 –  $25 \text{ мм}^2$

ет исчезающе малую величину. Это дает возможность уменьшить толщину и внутренний диаметр ферромагнитного слоя трубы.

Для проверки расчетных зависимостей были проведены экспериментальные исследования двух- и однослойной систем. Эксперимент проводился при исходных данных, принятых в расчете. На рис. 6 представлена схема экспериментальной установки. Были получены экспериментальные зависимости линейного падения напряжения  $U$  от суммарной мощности системы  $P$ , представленные на рис. 7 для системы с медным слоем сечением  $16 \text{ мм}^2$  и без такого слоя. Различие результатов эксперимента и расчета в широком диапазоне изменения мощности в трубе не превышало 10%.

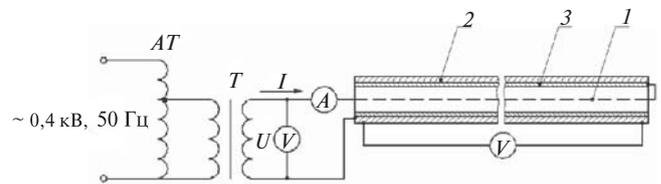


Рис. 6. Схема экспериментальной установки: 1 – индуктор; 2 – ферромагнитный слой; 3 – медный слой;  $AT$  – лабораторный автотрансформатор;  $T$  – однофазный трансформатор

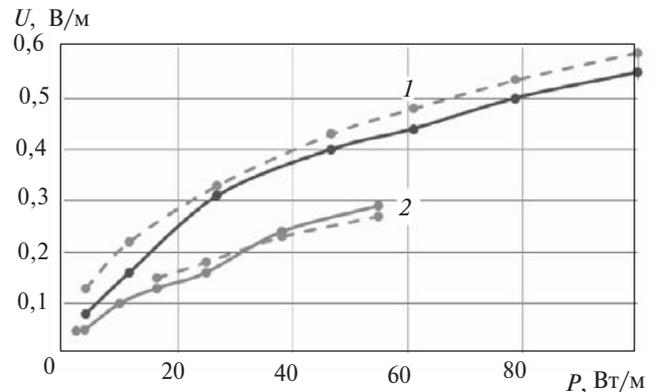


Рис. 7. Зависимость линейного падения напряжения от суммарной мощности системы (сплошная линия – эксперимент, штриховая линия – расчет): 1 – без шунта; 2 –  $S_M=16 \text{ мм}^2$

Из расчетных и экспериментальных результатов видно, что при использовании медного шунта значительно снижается линейное падение напряжения питания, необходимое для выделения в системе нагрева одинаковой мощности. При этом для ИРСН с медным слоем при  $S_M=16 \text{ мм}^2$  ток индуктора возрастает на 50–70% по сравнению с током для ИРСН без медного слоя. При этом с увеличением сечения внутреннего шунта линейное напряжение питания при одной и той же суммарной мощности тепловыделения уменьшается (см. таблицу).

| Характеристика ИРСН                                       |    | Электрические показатели ( $I$ , $A/U$ , В/м) ИРСН суммарной мощностью $P$ , Вт/м, равной |           |           |           |           |
|---|----|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
|   |    | 10  | 33        | 64        | 102       | 146       |
| Без медного шунта   |    | 50/0,2  | 100/0,366 | 150/0,491 | 200/0,593 | 250/0,669 |
| С медным шунтом сечением $S_M$ , мм <sup>2</sup> , равным | 16 | 85/0,116  | 150/0,201 | 225/0,3   | —         | —         |
|   | 25 | 100/0,117   | 175/0,187 | 250/0,266 | —         | —         |

Примечание. В числителе указаны значения  $I$ , А, в знаменателе —  $U$ , В/м.

Установлено, что при использовании ИРСН с внутренним медным слоем сечением 16 мм<sup>2</sup> напряжение питания на метр длины системы снижается на 30–40% по сравнению с системой без медного слоя в диапазоне мощностей от 20 до 60 Вт/м.

Также отметим, что наличие внутреннего медного слоя трубы приводит к увеличению коэффициента мощности ИРСН и снижению условного электрического КПД (отношение мощности тепловыделения в шунте и трубе к суммарной мощности тепловыделения в системе).

**Выводы.** 1. Разработанная методика численного расчета двухслойной осесимметричной ИРСН с учетом нелинейных зависимостей относительной магнитной проницаемости и мощности потерь на гистерезис от напряженности магнитного поля, реализованная в MATLAB, может использоваться для расчёта двухслойной ИРСН. Экспериментальные исследования подтвердили полученные расчётные данные с достаточной для практики точностью.

2. Благодаря внутреннему медному слою значительно снижается линейное падение напряжения при неизменной суммарной мощности тепловыделения, что позволяет удлинить систему нагрева. В частных случаях применение двухслойной ИРСН позволяет снизить напряжение питания на метр длины системы на 30–40% и, соответственно, увеличить длину ИРСН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Струпинский М.Л., Хренков Н.Н. Техничко-экономическое сравнение индукционно-резистивных и резистивных систем электрообогрева трубопроводов. — Материалы 2-й Международ. конф. «Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева», Санкт-Петербург, 2009.
2. Kuvadin A., Strupinskiy M., Khrenkov N., Fedin M. Simulation of electromagnetic field in ferromagnetic steel taking into account hysteresis effect. — Inter. Symposium on Heating by Electromagnetic Sources, Padua, 2010.
3. Kuvadin A.B., Strupinskiy M.L., Khrenkov N.N., Fedin M.A. Method of calculation of induction-resistive heating system with

bimetallic outer conductor taking into account hysteresis effect. — Workshop Elektroprozessechnik, Tagungsband, Ilmenau, 2010.

4. Кувалдин А.Б., Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Шатов В.А. Математические модели для исследования электромагнитного поля в ферромагнитных проводящих средах. — Электричество, 2005, №11.

5. Кувалдин А.Б., Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Федин М.А. Расчёт электрических и энергетических характеристик стержневого индуктора для нагрева ферромагнитной загрузки. — Электричество, 2009, №10.

[25.10.10]

*Авторы: Кувалдин Александр Борисович окончил факультет электрификации промышленности и транспорта Московского энергетического института (МЭИ) в 1959 г. Защитил докторскую диссертацию «Устройства индукционного нагрева ферромагнитной стали» в МЭИ в 1988 г. Профессор кафедры «Физика электротехнологических материалов и автоматизация электротехнологических комплексов» МЭИ (ТУ).*

*Струпинский Михаил Леонидович окончил конструкторско-механический факультет Московского высшего технического университета (МВТУ) в 1984 г. В 1988 г. защитил кандидатскую диссертацию «Расчет гибких стержней при больших перемещениях методом последовательных нагружений» в МВТУ. Генеральный директор ООО «Специальные системы и технологии», г. Мытищи Московской обл.*

*Хренков Николай Николаевич окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ЛПИ) в 1962 г. В 1974 г. защитил кандидатскую диссертацию «Конструкция и технология сверхпроводящих радиочастотных кабелей» в ЛПИ. Советник генерального директора ООО «Специальные системы и технологии».*

*Федин Максим Андреевич окончил институт электротехники МЭИ (ТУ) в 2007 г. В 2009 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка системы управления температурным режимом индукционных тигельных миксеров» в МЭИ. Ассистент кафедры «Физика электротехнологических материалов и автоматизация электротехнологических комплексов» МЭИ (ТУ). Инженер ООО «Специальные системы и технологии».*