

УДК 621.36

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ИНДУКЦИОННО-РЕЗИСТИВНОМ НАГРЕВЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2024 г. М. А. Федин¹, А. И. Василенко^{1,*}, В. В. Крылов¹, Д. А. Жгутов¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

* E-mail: VasilenkoAI@mpei.ru

Поступила в редакцию 23.05.2024

После доработки 25.06.2024

Принята к публикации 31.07.2024

Изучены параметры электромагнитного поля при нагреве ферромагнитных сталей в устройствах индукционно-резистивного нагрева. Получены методики расчета, и определены характеристики электромагнитного поля в многослойных системах. Произведена оценка влияния внутреннего медного слоя нагревателя, а также наличия воздушного зазора между слоями и тока индуктора на параметры электромагнитного поля.

DOI: 10.31857/S0367676524110095, EDN: FLNEAZ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время индукционно-резистивный нагрев ферромагнитных материалов широко применяется в различных отраслях промышленности. Индукционный нагрев ферромагнитных материалов обладает рядом особенностей, к которым относятся относительно небольшие значения напряженности магнитного поля H — до 4 кА/м (нагрев в слабых электромагнитных полях) и удельной поверхностной мощности, заметный вклад перемагничивания (гистерезиса) в активную мощность, выделяющуюся в изделии при индукционном нагреве.

Конструкционное исполнение и принцип действия устройств индукционно-резистивного нагрева подробно рассмотрены в [1, 2].

Выбор конкретного конструктивного исполнения индукционно-резистивной системы нагрева (ИРСН) и используемых в ее конструкции материалов значительно влияет на характеристики электромагнитного поля (ЭМП) как в ферромагнитной трубе, так и в стержневом индукторе. Распределения таких параметров ЭМП, как вектор Пойтинга, напряженность магнитного и электрического полей, в ферромагнитной трубе и индукторе лежат в основе интегральных электрических и энергетических характеристик всей системы индукционно-резистивного нагрева. Именно по этой причине распределения параметров ЭМП должны учитываться еще на этапе проектирования исследуемых

устройств индукционно-резистивного нагрева ферромагнитных материалов.

Для реализации индукционного нагрева внешний проводник ИРСН (трубка) должен быть изготовлен из материала с высокой магнитной проницаемостью. На текущий момент для этой цели широко применяются ферромагнитные стали. Они обладают нелинейными электрофизическими свойствами: основной кривой намагничивания, образованной совокупностью вершин всех частных петель гистерезиса, из которой следует нелинейная зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля, а также нелинейной зависимостью удельных потерь на перемагничивание от напряженности магнитного поля. Стоит также отметить, что объемные потери на гистерезис и относительная магнитная проницаемость зависят еще и от температуры нагрева материала, и от частоты электромагнитного поля.

Авторами предполагается принципиальная возможность изготовления трубки (внешнего проводника ИРСН) многослойной, подразумевающей расположение трубок из различных материалов с постепенным увеличением их диаметра. Частный случай двуслойной ферромагнитной структуры рассматривается в [3]. В каждой отдельной трубке (слое внешнего проводника ИРСН) зависимость относительной магнитной проницаемости материала будет иметь свое максимальное значение, соответствующее тому диапазону напряженности магнитного поля, которое соответствует данному

слою. Таким образом, применение многослойной конструкции позволит максимально эффективно использовать индукционный нагрев в широком диапазоне изменения напряженности магнитного поля, при этом распределение параметров электромагнитного поля и плотности электрического тока будет иметь сложный характер.

Характерной особенностью ИРСН является одновременное действие поверхностного эффекта и эффекта близости. Поэтому представляется весьма эффективным в конструкции внешнего проводника ИРСН сочетать слои ферромагнитных материалов с высокой магнитной проницаемостью (ферромагнитные стали различных марок) с немагнитными материалами с высокой электропроводностью (сплавы на основе алюминия и меди, при этом последние предпочтительнее, так как сохраняют высокую электро- и теплопроводность при повышенной механической прочности и устойчивости к износу [4]).

В итоге концептуальная конструкция многослойного внешнего проводника ИРСН выглядит следующим образом: внутренний немагнитный слой (например, медный слой) и несколько ферромагнитных слоев из разных материалов (трубки из ферромагнитной стали разных марок с различными магнитными свойствами), либо только сочетание нескольких слоев из ферромагнитных материалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На примере индукционно-резистивных нагревателей с многослойной, в частности биметаллической, конструкцией авторами данной статьи проводится исследование распределения параметров ЭМП с использованием разработанных численных моделей. Поскольку в конструкциях используются материалы с различными магнитными свойствами, то это сильно влияет на распределение параметров ЭМП.

В предложенной авторами модели используется электрическая схема замещения (рис. 1) для ферромагнитной трубы с внутренним диаметром d и толщиной δ , по которой протекает ток I частотой f . При этом стенка трубы моделируется как плоская, поскольку глубина проникновения электромагнитной

волны в материал трубы значительно меньше радиуса самой трубы. В качестве примера предполагается, что стенка трубы разделена по толщине на 6 слоев (в общем случае — на n слоев), причем ток в каждом слое протекает в центре.

Заданы удельное электрическое сопротивление материала трубы ρ , основная кривая намагничивания $B(H)$ (при допущении, что магнитная индукция B и напряженность магнитного поля H изменяются во времени по синусоидальному закону) и зависимость объемных потерь на гистерезис w_r от H и f [5, 6]. В модели принято, что относительная магнитная проницаемость μ по толщине стенки трубы постоянна во времени и считается равной значению, соответствующему действующему значению напряженности магнитного поля в данной точке.

Алгоритм расчета позволяет учитывать наличие нескольких слоев в структуре индукционно-резистивного нагревателя, при этом материалы этих слоев могут быть ферромагнитными или не обладать такими свойствами. Нередко в практике встречаются ситуации, когда внешний слой устройства изготовлен из конструкционной ферромагнитной стали, а внутренний — из меди, либо оба слоя выполнены из ферромагнитных материалов с различными свойствами. Для этих вариантов конструкций внутренний и внешний слои разделяют на элементарные слои, число которых равно n_1 и n_2 соответственно (рис. 1).

Каждому слою соответствуют собственное сопротивление R_i и индуктивность L_i , а также активное сопротивление R_{gi} , учитывающее выделение мощности за счет гистерезиса. Значения R_{gi} равны 0 для слоя немагнитного материала. Расчеты проводятся в соответствии с электрофизическими свойствами материала и геометрическими параметрами каждого слоя многослойного индукционно-резистивного нагревателя [6, 7].

Следует отметить, что задача расчета параметров ЭМП в стенке трубы решается итерационным методом.

Алгоритм численного расчета ЭМП в ферромагнитной трубе содержит два итерационных цикла: внутренний цикл учитывает зависимость относительной магнитной проницаемости μ от напряженности магнитного поля H (рис. 2а), внешний цикл

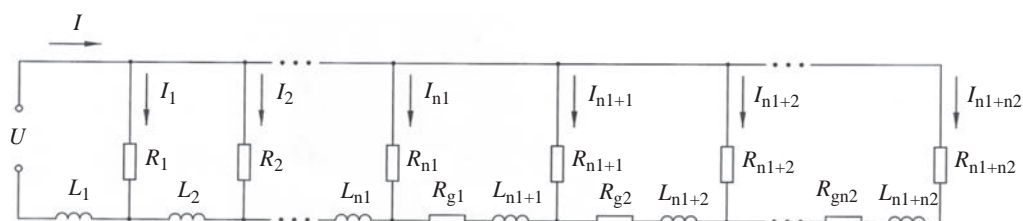


Рис. 1. Электрическая схема замещения ИРСН.

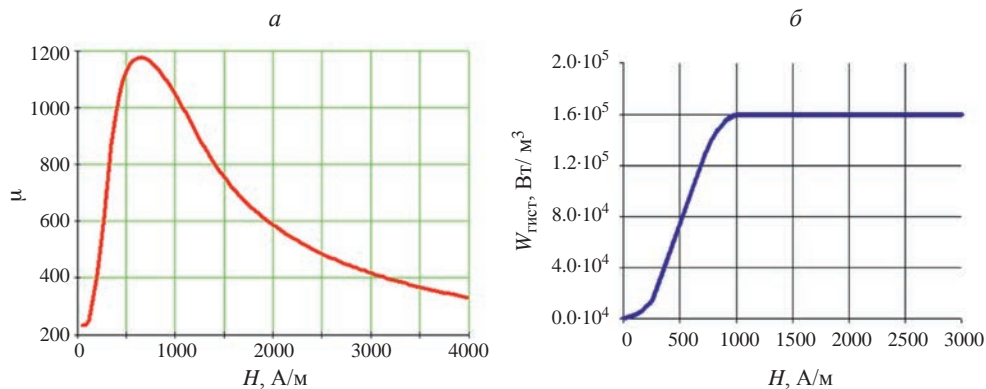


Рис. 2. Зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля для стали 10 (а); зависимость объемных потерь на гистерезис от напряженности магнитного поля для стали 10 (б).

учитывает зависимость удельных объемных потерь на гистерезис от напряженности магнитного поля (рис. 2б).

Для учета нелинейных свойств различных материалов, применяемых в конструкции ИРСН, авторами статьи были разработаны программные решения, защищенные патентами.

В рамках проводимого исследования данные программы использовались для изучения характеристик ЭМП в ИРСН с двухслойной трубой, состоящей из внутреннего медного слоя или слоя из стали одной марки, а также наружного слоя из стали другой марки, разделенных между собой воздушным зазором или без него.

При исследовании были приняты следующие исходные данные: частота тока $f = 50$ Гц, сечение индуктора (центрального проводника) 10 мм^2 , толщина воздушного зазора между индуктором и трубой 4.5 мм , толщина внутреннего медного слоя 0.5 мм , толщина наружного ферромагнитного (сталь 10) слоя 1 мм , наружный диаметр двухслойной трубы 15.6 мм [7, 8, 9].

На рис. 3а показаны распределения напряженности магнитного поля в трубе ИРСН для ИРСН с внутренним медным слоем и без него. При приведенных выше исходных данных и значении тока $I = 40 \text{ А}$ на внутренней поверхности стального слоя напряженность магнитного поля незначительная и составляет $H = 46 \text{ А/м}$ (рис. 3а), что обуславливает низкое значение поверхностного напряжения на трубе ($U_{пов}$) даже при небольших значениях относительной магнитной проницаемости. При токах индуктора 100 А и выше H на внутренней поверхности существенно увеличивается и изменяется от 220 А/м (при токе 100 А) до 560 А/м (при токе 200 А), что соответствует значениям относительной магнитной проницаемости от 550 до 1200 (рис. 2а). Именно этим объясняется тот факт, что при значительных токах индуктора $U_{пов}$ для ИРСН с медным слоем также незначительно (увеличение μ приводит к снижению глубины проникновения электромагнитной волны в ферромагнитную сталь).

Рис. 3б иллюстрирует результаты, полученные при исследовании параметров ЭМП в ИРСН с двумя стальными слоями. Если заменить внутреннюю

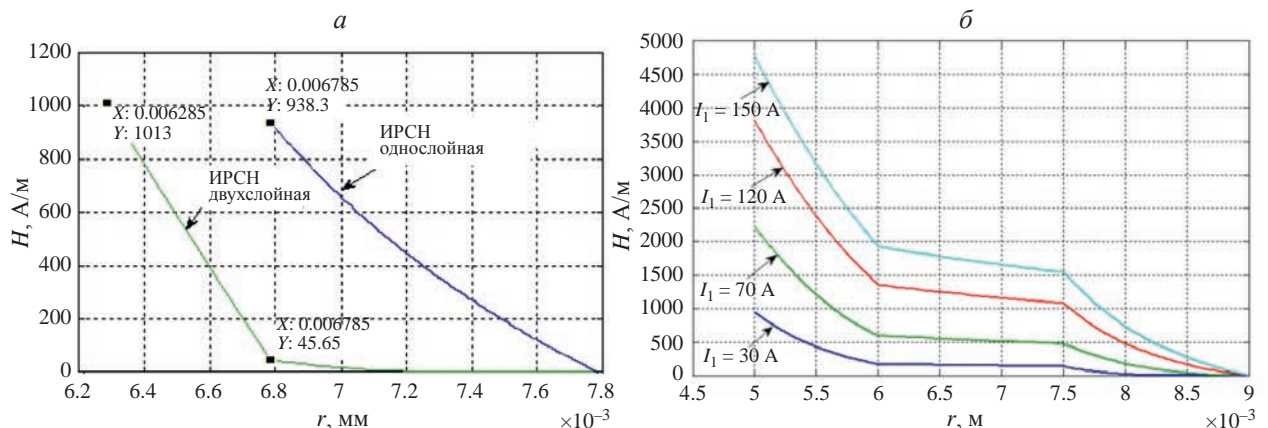


Рис. 3. Распределение напряженности магнитного поля в двухслойной и однослойной трубах ИРСН при токе индуктора 40 А (а); распределение напряженности магнитного поля в двухслойной ИРСН со стальными трубами с зазором в зависимости от тока индуктора (б).

медную трубу на стальную ферромагнитную, то распределение напряженности магнитного поля по слоям индукционно-резистивного нагревателя становится более нелинейным. На рис. 3б показано распределение напряженности магнитного поля по слоям двух труб, разделенных воздушным зазором, в зависимости от тока индуктора при следующих исходных данных: труба размером 12×1 (сталь 10) находится внутри трубы размером 18×1.5 (сталь 10), частота тока составляет 50 Гц, а сечение индуктора — 10 мм^2 .

При небольших токах (до 80 А) относительная магнитная проницаемость слоев внутренней трубы высокая ($\mu > 900$), а слоев внешней трубы — низкая ($\mu < 300$). При увеличении тока магнитная проницаемость слоев внутренней трубы снижается, а слоев внешней трубы возрастает. Было выявлено, что воздушным зазор между двумя ферромагнитными трубами приводит к уменьшению μ слоев внешней трубы примерно на 18–20%, что объясняется дополнительным уменьшением напряженности магнитного поля в зазоре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Путем изменения толщин слоев, материалов, обладающих различными зависимостями $\mu(H)$, и величины воздушного зазора можно получить устройство индукционно-резистивного нагрева с наименьшим линейным падением напряжения на поверхности внешней трубы, что особенно важно при использовании системы электрообогрева во взрывоопасных зонах. Это обусловлено тем, что можно добиться ситуации, в которой каждый слой будет находиться в области изменения H , соответствующей максимальным значениям $\mu(H)$. В результате плотность электрического тока на поверхности внешней трубы будет наименьшей.

Дальнейшее исследование многослойной конструкции ИРСН могут касаться оптимального сочетания проводящих слоев из различных материалов, обладающих различной толщиной и электрофизическими свойствами. Так, имеет смысл сравнить эффективность применения хорошо электропроводящих материалов (мель, алюминий, серебро, их сплавов с другими легирующими элементами) и изучить технологически осуществимые методы интеграции такого слоя в конструкцию ИРСН, например посредством гальванического нанесения покрытия, использования вставных труб с минимальным зазором или шунта, сосредоточенного, в виде пластины или провода.

Также в слоях, где используются ферромагнитные материалы для увеличения относительной магнитной проницаемости и, соответственно, эффективности индукционного нагрева, необходимо изучить температурные и частотные зависимости намагниченности (современные исследователи

освещают данные характеристики ферромагнетиков [10]) и других электрофизических свойств конструкционных ферромагнитных сталей и их влияние на характеристики ИРСН. Целесообразным представляется исследование возможности применения в верхнем слое специальных защитных материалов (например, нержавеющей стали, титана и их сплавов) для защиты от коррозии.

Как и в случае с электропроводящим слоем, необходимо изучить технологии изготовления многослойной конструкции из ферромагнитных сталей различных марок. Здесь возможно применение метода ламинирования, например прокатки или прессования слоев стали под высоким давлением и температурой. Либо применение метода лазерной или электронно-лучевой сварки для соединения слоев стали с минимальными изменениями их магнитных свойств. Возможно провести эксперименты с соединением слоев посредством высокотемпературной пайки. В свете развития сквозных технологий перспективным представляется исследование возможности использования аддитивных технологий (3D-печати) для создания сложных многослойных структур.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00727, <https://rscf.ru/project/24-29-00727/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федин М.А., Качалина Е.В., Молостова А.В. и др. // Пром. энергетика. 2023. № 12. С. 2.
2. Федин М.А., Качалина Е.В., Молостова А.В. и др. // Пром. энергетика. 2024. № 2. С. 2.
3. Абромовский И.Е., Власов В.С., Плешев Д.Е. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 5. С. 721; Abromovsky I.E., Vlasov V.S., Pleshev D.E. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 5. P. 606.
4. Саркаева Е.А., Александров И.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 11. С. 1553; Sarkaeva E.A., Alexandrov I.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 11. P. 1286.
5. Кувалдин А.Б., Федин М.А. Теория индукционного нагрева. Ч. 1. М.: Изд. МЭИ, 2018. 68 с.
6. Зайцев С.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 2. С. 213; Zaitsev S.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 2. P. 178.
7. Локк Э.Г., Луговской А.В., Герус С.В., Анненков А.Ю. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 11. С. 1546; Locke E.G., Lugovskoy A.V., Gerus S.V., Annenkov A.Yu. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 11. P. 1209.
8. Кувалдин А.Б., Федин М.А., Поляков О.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 2. С. 161; Kuvaldin A.B., Fedin M.A., Polyakov O.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 2. P. 122.

9. Пятоков М.А., Поляков П.А., Русакова Н.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. № 5. С. 719; Pyatokov M.A., Polyakov P.A., Rusakova N.E. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V 85. No. 5. P. 593.
10. Ильин Н.В., Комогорцев В.С., Крайнова Г.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 9. С. 1234; Ilyin N.V., Komogortsev V.S., Krainova G.S. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 9. P. 945.

Study of electromagnetic field parameters during induction-resistive heating of ferromagnetic materials

M. A. Fedin¹, A. I. Vasilenko^{1,*}, V. V. Krylov¹, D. A. Zhgutov¹

¹ National Research University "Moscow Energy Institute", Moscow, Russia

* e-mail: VasilenkoAI@mpei.ru

We studied the parameters of the electromagnetic field when heating ferromagnetic steels in induction-resistive heating devices. Calculation methods were obtained and the characteristics of the electromagnetic field in multilayer systems were determined. An assessment was made of the influence of the internal copper layer of the heater, as well as the presence of an air gap between the layers and the inductor current on the parameters of the electromagnetic field.