

4. Сидоренко, В.Д. Применение индукционного нагрева в машиностроении / В.Д. Сидоренко. – Л. : Машиностроение, 1980. – 231 с.

5. Слухоцкий, А.Е. Индукторы для индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. – Л. : Энергия, 1974. – 264 с.

6. Фомин, Н.И. Электрические печи и установки индукционного нагрева / Н.И. Фомин, Л.М. Затуловский. – М.: Metallургия, 1979. – 247 с.

7. Кувалдин, А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали / А.Б. Кувалдин. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.

УДК 669.041:621.365

**И.А. ТРУСОВА**, д-р техв. наук,  
**Д.В. МЕНДЕЛЕВ**, канд. техв. наук,  
**С.М. КАБИШОВ**, канд. техв. наук,  
**П.Э. РАТНИКОВ**, канд. техн. наук (БНТУ)

### **ТЕПЛОВАЯ РАБОТА КУЗНЕЧНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ. СООБЩЕНИЕ 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ КУЗНЕЧНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ИХ РАБОТЫ**

При создании установок индукционного нагрева помимо задач расчета электрических и энергетических характеристик индукторов возникают специальные задачи, связанные с особенностями технологических процессов и электрофизических свойств нагреваемых изделий.

Так, в работе [1] отмечено, что в некоторых случаях целесообразным оказывается импульсный режим нагрева, поскольку вибрации нагреваемой поверхности при частоте тока 50 Гц оказываются в ряде случаев недостаточно интенсивными для успешного проведения технологического процесса. Реализация такого режима обеспечивается за счет питания индуктора через тиристорный выключатель с широтно-импульсным регулированием. Применение им-

пульсного нагрева связано с двумя проблемами: воздействием на питающую сеть и изменением энергетических показателей установки. Для снижения влияния на сеть целесообразно подключить к питающему трансформатору поочередно через тиристорные выключатели несколько индукторов или секций одного индуктора, добиваясь минимальных колебаний нагрузки. Изменения же амплитуды тока при импульсном нагреве приводят к изменению напряженности магнитного поля и относительной магнитной проницаемости стальной загрузки, что влияет на значения электрического КПД и коэффициента мощности. Автором рассматриваемой работы экспериментально показана энергетическая эффективность импульсного нагрева при средних значениях удельной поверхностной мощности в загрузке, меньших  $10 \text{ кВт/м}^2$ .

В рассматриваемой работе также отмечено, что при индукционном нагреве крупногабаритных изделий сложной формы возникает задача получения равномерного нагрева, что обеспечивается как распределением магнитной напряженности на поверхности изделия, то есть конфигурацией электромагнитного поля, так и значениями тепловых потерь и участков поверхности изделия, то есть теплоизоляцией.

Автор работы отмечает, что основной проблемой при управлении электрическим режимом работы является выбор параметра регулирования и метода его измерения. При низкотемпературном нагреве управление по температуре детали становится затруднительным, так как измерение ее выполняется недостаточно точно и, кроме того, измеряется лишь температура определенной точки поверхности. В ряде случаев оказывается целесообразным выбрать в качестве параметра управления усредненную температуру детали. Разработанные в Московском энергетическом институте (МЭИ) оригинальные методы измерения этой температуры позволяют решить поставленную задачу. На основе этого предложено три способа управления режимом индукционного нагрева ферромагнитной загрузки: по форме кривой тока индуктора; по конфигурации электромагнитного поля в пространстве, а именно по ориентации вектора напряженности магнитного поля; по значению сопротивления системы «индуктор – загрузка».

В работе [2] отмечено, что цифровое моделирование создает основу как для конструирования и проектирования индукционных нагревательных устройств, так и для управления ими уже в технологическом процессе нагрева. Указанная задача является традиционной при оптимизации управления системами с распределенными параметрами. При индукционном нагреве заготовок обычно считается, что конструкция и электрическая схема включения нагревательного устройства неизменны в процессе нагрева. Поэтому возможности управления ограничиваются здесь небольшим числом факторов, которые можно легко изменять и контролировать во времени. На практике мощность внутренних источников теплоты регулируется напряжением на индукторе, что и обуславливает выбор этого параметра в качестве управляющего воздействия. В рассматриваемой работе также отмечено, что при оптимизации управления индукционным нагревателем наиболее часто ставятся следующие задачи: задача быстродействия; задача наилучшего приближения; задача на минимум расхода энергии.

В работе [3] показано, что при индукционном нагреве стали и других ферромагнитных материалов принято выделять три основные стадии нагрева, различающиеся режимом работы системы «индуктор – загрузка».

Холодный режим характеризует начальную стадию нагрева, когда удельное сопротивление нагреваемого металла постоянно по всему сечению загрузки и равно исходному значению. Магнитная проницаемость в любой точке сечения определяется кривой намагничивания.

Промежуточный режим, когда температура поверхности нагреваемого тела ниже точки Кюри  $760\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На этой стадии нагрева, в отличие от предыдущей, нужно учитывать зависимость удельного электрического сопротивления от координаты (принимается равным на поверхности).

Горячий режим, в предельном случае которого тело прогрето выше точки Кюри, а значения удельного электрического сопротивления и магнитной проницаемости можно считать постоянными, причем последнее равно единице.

В работе [4] приведена область типичного применения индукционного нагрева в зависимости от частоты и требуемой мощности. Основная область нагрева определялась диапазоном от 100 кВт до 1000 МВт и от 50 Гц до 10 кГц. При напряжении в сети 380 В для амплитуды силы тока диапазон составит от 260 А до 2600 кА.

В настоящей работе рассмотрено двухмерное математическое моделирование тепловой работы кузнечного индукционного нагревателя при различной амплитуде и частоте силы тока в соленоиде (варьирование напряжением) в среде моделирования COMSOL [5]. При этом нагрев цилиндрической заготовки размерами 50×200 мм из углеродистой марки стали (теплопроводность – 44,5 Вт/(м·К), плотность – 7850 кг/м<sup>3</sup>, теплоемкость 475 Дж/(кг·К), электрическая проводимость – 4,032·10<sup>6</sup> см/м) рассматривался как осесимметричный нагрев (половина заготовки) после температуры точки Кюри (начальная температура заготовки 760 °С) в индукторе с девятью витками (диаметр витка 20 мм, расстояние между витками 22,5 мм). Расстояние между витками индуктора и заготовкой – 20 мм. Особенностью нагрева стальной заготовки после точки Кюри является то, что магнитная проницаемость снижается до единицы, в свою очередь, глубина проникновения тока в металл увеличивается в несколько раз, а в заготовке возникающая тепловая мощность от токов Фуко идет только на нагрев заготовки и не расходуется на потери на гистерезис (перемагничивание). Заготовка в процессе нагрева неподвижна. Время нагрева заготовки в процессе моделирования составило 100 с. В работе [6] приведен аналогичный способ выбора расчетной схемы «индуктор – загрузка» для моделирования тепловой работы индуктора.

На рисунке 1 приведена расчетная схема рассматриваемой модели.

Конечно-элементная сетка разбиения рассматриваемой модели представлена на рисунке 2.

На последующих рисунках представлены результаты моделирования тепловой и электрической работы расчетной схемы «индуктор – заготовка» при амплитуде силы тока 2600 А и частоте тока 500 Гц.

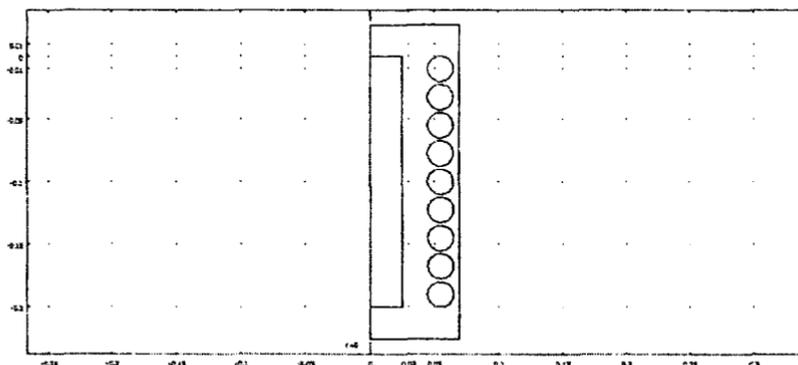


Рисунок 1 – Расчетная схема «индуктор – заготовка»

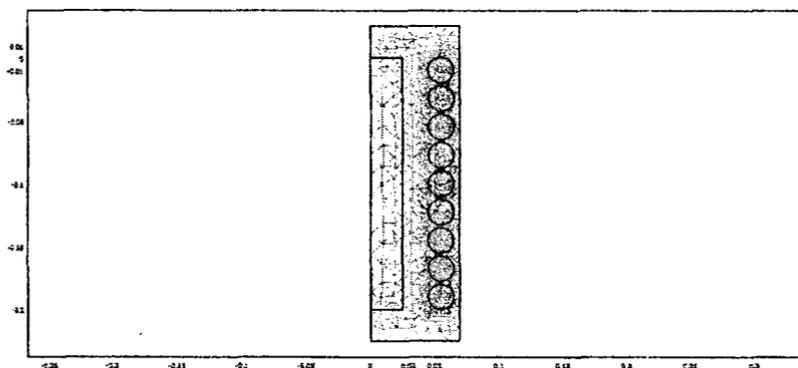


Рисунок 2 – Конечно-элементная сетка разбиения «индуктор – заготовка»

На рисунке 3 показано распределение теплового потока в расчетной области заготовки в течение расчетного времени 100 с (шаг по времени 1 с). Из рисунка видно, что вначале нагреваются концы заготовки, а затем происходит выравнивание температуры по всей заготовке.

На рисунке 4 представлено распределение индуцированных тепловых объемных источников в расчетной области заготовки в течение расчетного времени 100 с (шаг по времени 25 с), из которого очевидно, что глубина проникновения тока практически не изменяется, а ее размер при таком режиме нагрева составляет 11,2 мм.

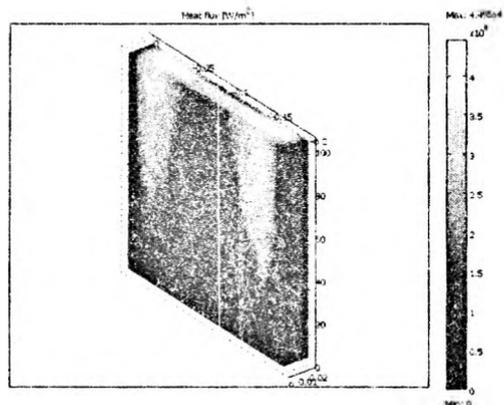


Рисунок 3 – Распределение теплового потока в расчетной области заготовки

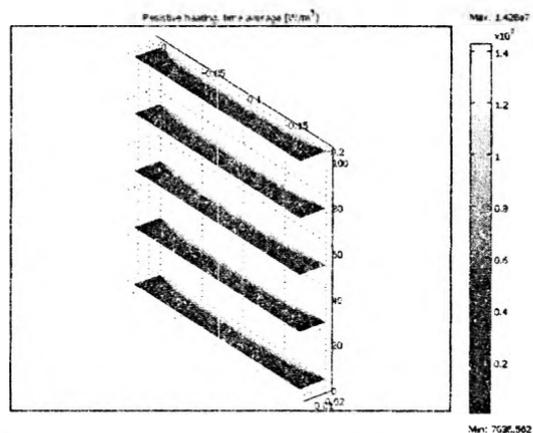


Рисунок 4 – Распределение индуцированных тепловых объемных источников в расчетной области заготовки

На рисунке 5 представлено распределение модуля магнитного потенциала в расчетной области в течение расчетного времени 100 с (шаг 25 с). Зная распределение вектора магнитного потенциала в расчетной области, можно вычислить распределение векторов электрической и магнитной напряженности.

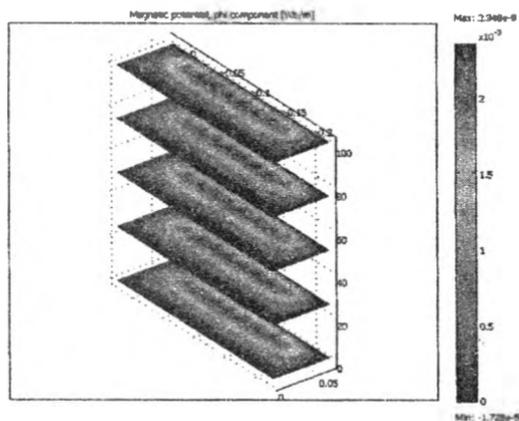


Рисунок 5 – Распределение модуля магнитного потенциала в расчетной области «индуктор – заготовка»

Температурное поле расчетной области заготовки и распределение амплитуды магнитной напряженности на поверхности заготовки показано на рисунке 6. Расчетные данные распределения амплитуды магнитной напряженности на поверхности заготовки при определенном режиме работы индукционного нагревателя позволяют произвести тепловой расчет нагрева заготовки по формуле для удельной тепловой мощности на поверхности заготовки, приведенной в работе [7].

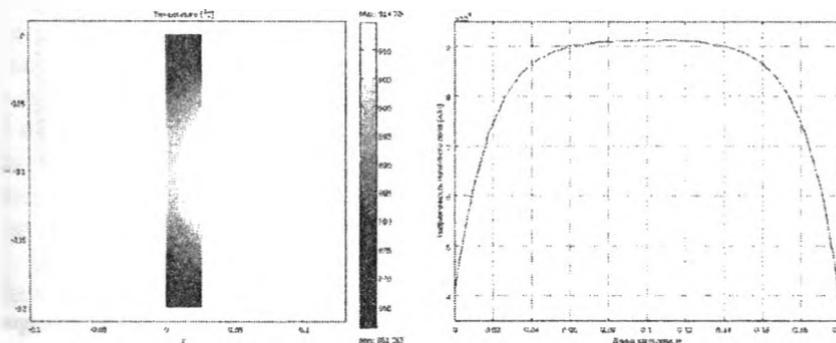


Рисунок 6 – Температурное поле расчетной области заготовки и распределение модуля магнитной напряженности на поверхности заготовки

Из рисунка 6 видно, почему существует некая вариативность расчетных коэффициентов (описанная в сообщении 2) в вышеупомянутой формуле – амплитуда напряженности магнитного поля по длине заготовки непостоянна, исходя из этого, каждый автор по-своему выполнял усреднение. Следует отметить, что при выполнении классического двухмерного расчета одностороннего нагрева цилиндра с постоянной мощностью будет существовать различие в распределении температурного поля в заготовке в сравнении с аналогичным численным расчетом. Для этого необходимо введение поправочных коэффициентов.

Аналогичные расчеты по определению температурного поля в расчетной области индуктора и распределения амплитуды магнитной напряженности на поверхности заготовки проведены при варьировании частоты тока в индукторе и амплитуды силы тока в индукторе. Результаты зависимости температурного перепада и соответствующего среднего температурного прироста (от точки Кюри 760 °С) по расчетной области заготовки за время нагрева 100 с от частоты и амплитуды силы тока в обмотке рассматриваемого индуктора представлены на рисунке 7.

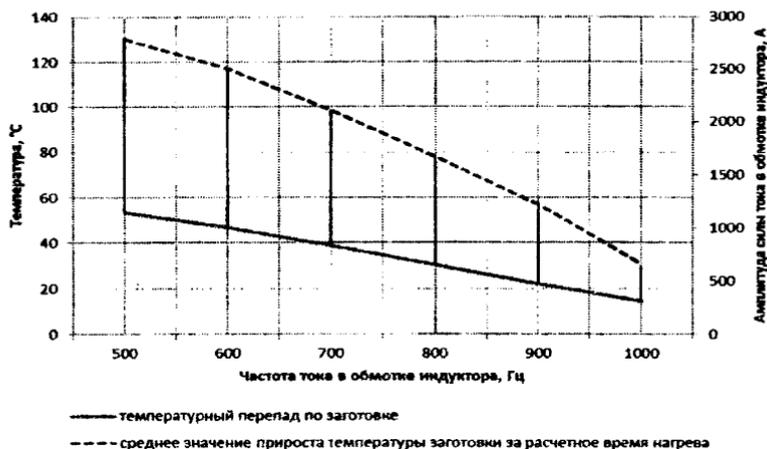


Рисунок 7 – Зависимости температурного перепада и соответствующего среднего температурного прироста (от точки Кюри 760 °С) по расчетной области заготовки за время нагрева 100 с от частоты и амплитуды силы тока

На завершающей стадии моделирования необходимо выполнение параметрической идентификации модели. Для этого необходимо проведение натурального эксперимента, результаты которого будут описаны в последующих работах. Авторы работы [2] отмечают, что физическое моделирование позволяет получить наиболее достоверную информацию о натурном объекте. Для соответствия процессов в модели и оригинале и определения масштабов величин должен соблюдаться ряд условий, определяемых теорией подобия. В зависимости от целей исследования может предусматриваться комплексное моделирование работы устройства, некоторых процессов (например, только тепловых или электромагнитных) или процессов в части устройства. Для каждого из процессов существует своя система безразмерных показателей (критериев подобия), составленных из величин одинаковой природы (симплексов) или различной природы (комплекссов).

Тепловые процессы в твердом теле подобны, если соблюдаются следующие условия:

1. Модель подобна оригиналу как по размерам, так и по относительному распределению теплофизических свойств.

2. Сохраняется относительное распределение источников теплоты по объему или поверхности тела.

3. Сохраняются неизменными критерии Кирпичева ( $K_i$ ), Био ( $Bi$ ) и Фурье ( $Fo$ ) в соответствующих точках модели и оригинала.

Абсолютные значения остальных физических величин у модели и оригинала могут быть различны. Критерий Кирпичева представляет собой безразмерную мощность, а критерий Био – безразмерный коэффициент теплоотдачи. При равенстве указанных критериев в определенные моменты времени, поля относительных температур у модели и оригинала будут одинаковы. Температурное поле внутри тела связано с внешней тепловой задачей через критерий  $Bi$ , а с электромагнитным полем – через критерий  $K_i$ , характеризующий внутренние источники теплоты.

Для подобия электромагнитных полей необходимо соблюдение геометрического подобия, одинакового распределения свойств магнитной проницаемости и удельного сопротивления тел и источников поля (токов обмоток или приложенных к ним напряжений), а также относительных размеров тел, определяемых их отношением к глубине проникновения тока.

Для линейных систем, у которых свойства тел и коэффициент теплоотдачи не зависят от напряженности поля и температуры, возможно комплексное моделирование электротепловых процессов с изменением линейных размеров, свойств, уровней напряженностей и температур. В реальных устройствах всегда имеются нелинейности, ограничивающие возможности комплексного моделирования. Наиболее существенными нелинейностями являются зависимость тепловых потерь излучением от температуры, а для ферромагнитных тел – еще и зависимости магнитной проницаемости от напряженности поля и температуры, а также теплоемкости от температуры в области точки Кюри.

При рассмотрении более сложного случая моделирования нагрева ферромагнитных тел, из-за существенных нелинейностей само моделирование обычно проводится с сохранением уровня температур и марки материала такими же, как у реального объекта. Предположим, что модель в « $k$ » раз меньше оригинала. При тех же материалах тел, составляющих индукционную систему, ее масса уменьшится в « $k^3$ » раз. Для сохранения прежних относительных размеров тел частоту тока следует увеличить в « $k^2$ » раз. Заданная степень насыщения магнитных масс достигается сохранением напряженности магнитного поля прежней. Из первого уравнения Максвелла следует, что при этом напряженность электрического поля и плотность тока увеличатся в « $k$ » раз, а ЭДС и витковые напряжения останутся прежними. Удельные объемные мощности увеличатся в « $k^2$ » раз, поверхностные – в « $k$ » раз, а полные мощности уменьшатся в « $k$ » раз. Число витков при заданном напряжении сохранится постоянным. Сопротивление индуктора увеличится в « $k$ » раз, а КПД и  $\cos \varphi$  сохранятся неизменными. Электродинамические силы изменятся по следующему правилу: объемные – увеличатся в « $k$ » раз, удельные поверхностные – останутся прежними, полные – уменьшатся в « $k^2$ » раз. Наибольшие сложности возникают с обеспечением неизменности критерия Био. Действительно, при этом следует, что коэффициент конвективной теплоотдачи должен быть увеличен в « $k$ » раз. Однако потери конвекцией и излучением этому правилу не подчиняются. Если термический КПД высок и тепловые потери мало влияют на ход процесса, то изменением  $Bi$  можно пренебречь. При

комплексном моделировании можно получить также дополнительную информацию, например, о работе системы охлаждения, вибрациях, внутренних напряжениях. Так, расход воды на модели при том же перепаде температур должен быть в « $k$ » раз меньше, а скорость воды в ветвях – в « $k$ » раз больше. При этом критерий Рейнольдса, определяющий характер движения жидкости, останется неизменным. Давление воды в ветвях должно быть увеличено в « $k^2$ » раз, что не всегда удастся осуществить. Однако разработав модель с большим числом ветвей, легко пересчитать систему охлаждения на реальный объект. Рассмотренный метод комплексного моделирования широко используется на практике.

Рассмотренные принципы и подходы к методу моделирования будут положены в основу разработки прикладного программного комплекса, позволяющего осуществить выбор энергоэффективных режимов тепловой работы, технических и конструкционных параметров кузнечных индукционных нагревателей в зависимости от номенклатуры и технологии обрабатываемых изделий.

### Литература

1. Кувалдин, А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали / А.Б. Кувалдин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.
2. Немков, В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
3. Фомин, Н.И. Электрические печи и установки индукционного нагрева / Н.И. Фомин, Л.М. Затуловский. – М.: Металлургия, 1979. – 247 с.
4. 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. 9–14.
5. Pryor, R.W. Multiphysics modeling using COMSOL : a first principles approach. – Sudbury, MA : Jones and Bartlett publishers. – 2010. – 852 p.

6. **Активное сопротивление индуктора при индукционном нагреве внутренних цилиндрических поверхностей / С. Лупи [и др.] // Электротехника. – 2010. – № 5. – С. 43–46**

7. **Установки индукционного нагрева: учебное пособие для вузов / А.Е. Слухоцкий [и др.]; под ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.**

*УДК 621.128*

**В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук,  
С.М. КАБИШОВ, канд. техн. наук,  
И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,  
П.Э. РАТНИКОВ, канд. техн. наук,  
Д.В. МЕНДЕЛЕВ, канд. техн. наук (БНТУ)**

### **ПРИМЕНЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ УСТАНОВКАХ ДУТЬЯ, ОБОГАЩЕННОГО КИСЛОРОДОМ, С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ NO<sub>x</sub>**

Анализ условий образования NO<sub>x</sub> показывает, что протеканию этого процесса способствуют высокие температуры в рабочей камере, локальные высокотемпературные участки в зоне факела, избыток кислорода в зоне синтеза NO<sub>x</sub>, а также высокое тепловое напряжение топочного объема. В настоящее время разработаны и внедрены разнообразные технологические способы, позволяющие уменьшить объемы выбросов NO<sub>x</sub> [1].

Условная классификация и перечень основных способов снижения выбросов оксидов азота приведены на рисунке 1.

Перечисленные методы позволяют в определенной степени снизить концентрации азота в локальных высокотемпературных участках факела и при этом уменьшить температуру горения, что, в свою очередь, приводит к снижению объемов выбросов NO<sub>x</sub>. Но данные способы имеют ограничения, определяемые стабильностью процесса горения. Уменьшение количества воздуха в зоне горения приводит соответственно к снижению количества кислорода.