

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

## **ТЕПЛОВАЯ РАБОТА КУЗНЕЧНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ. СООБЩЕНИЕ 2. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА УДЕЛЬНУЮ ТЕПЛОВУЮ МОЩНОСТЬ**

Для выбора конструкции кузнечных индукционных нагревателей (КИН) и номенклатуры нагреваемых в нем заготовок, прежде всего, знать технологическое назначение рассматриваемой индукционной установки.

В работе [1] отмечено, что индукционные установки делятся по частоте на три группы. Установки промышленной частоты (50 Гц) используются для нагрева крупногабаритных изделий под пластическую деформацию и термообработку, для низкотемпературного нагрева изделий и обогрева технологического оборудования. Установки средней частоты (150–10 000 Гц) составляют основной объем индукционного оборудования. Они применяются для нагрева под пластическую деформацию, поверхностную и объемную термообработку изделий, пайку, сварку и т.д. Установки ТВЧ (свыше 10 000 Гц) применяются для закалки изделий небольших размеров, пайки, сварки, создания индукционной плазмы и пр.

Так, авторами работы [2] отмечено, что существуют оптимальные конструкции индукторов для каждой технологической операции индукционного нагрева. На рисунке 1 представлены области применения установок индукционного нагрева в зависимости от частоты и требуемой мощности, что предопределяет выбор источников питания в зависимости от принципов их функционирования.

Авторы работы [1] также отмечают, что геометрическая форма всей индукционной системы определяется геометрией нагреваемых тел, индуктирующих обмоток и их взаимным расположением. Индукционному нагреву подвергаются тела самой различной формы с различной степенью электрического контакта между телами (при

нагреве нескольких тел). Основными конфигурациями можно считать плоские и цилиндрические тела, прямоугольные призмы и шары, а тела более сложной конфигурации с той или иной точностью можно заменить комбинацией этих форм. Следует отметить, что при одной и той же конфигурации индукционной системы возможны различные варианты исполнения обмотки индуктора. Она может быть одно- и многovitковой, а иногда и многослойной из проводов различного сечения. Исполнение обмотки может существенно влиять на выбор или разработку методики расчета, на качество нагрева и технико-экономические показатели устройства.

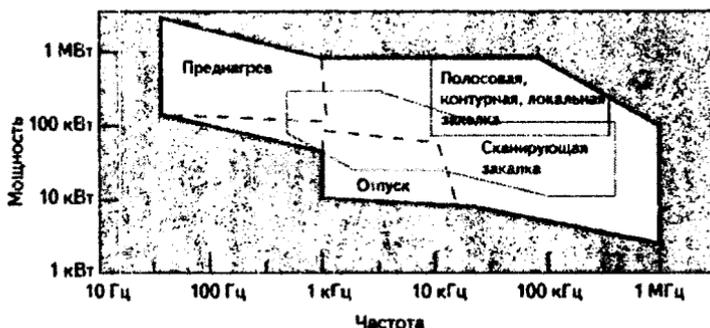


Рисунок 1 – Область применения индукционного нагрева в зависимости от частоты и требуемой мощности

Необходимо учесть и тот фактор, что электрофизические свойства материалов могут зависеть от интенсивности поля (для ферромагнетиков) и от времени, вследствие нагрева или перемещения тел. В свою очередь, внешние воздействия (токи и напряжения), прикладываемые к обмоткам (входам ЭМС), часто зависят от параметров самой системы. Если система линейна, то возможен расчет при поочередной подаче произвольных (например, единичных) воздействий на входы системы с последующим определением параметров эквивалентного ей многополюсника и решением цепной задачи. Для нелинейной ЭМС необходимо совместное решение уравнений ЭМ-поля и уравнений схемы питания, включая источник. Компактное описание и расчет ЭМ-процессов в общем виде не представляется возможным, поэтому требуется ряд допущений, корректность которых зависит от конкретной электромагнитной

системы. В частности, поле принимается квазистационарным (допущение позволяет пренебречь токами смещения по сравнению с токами в проводниках), электромагнитные процессы изменяются по гармоническому закону, зависимость магнитной проницаемости является однозначной и действительной величиной, вихревые токи в магнитопроводе не оказывают заметного влияния на ЭМ-поле вне его.

В работе [1] описан способ расчета ЭМ-системы на основе замены ее системой индуктивно связанных контуров. При определенных параметрах такая схема замещения обеспечивает правильность расчета напряженностей поля, токов и мощностей. Однако в более общем случае ее применение требует дополнительных условий или вообще невозможно. Если, например цилиндрическая система содержит массивное немагнитное тело, то ток в нем распределен неравномерно и замена его одним контуром неприемлема. В этом случае можно использовать разбиение (дискретизацию) такого тела по радиусу и длине на кольцевые элементы, являющиеся трубками тока, в пределах которых плотность тока примерно постоянна. На таком приеме основан интегральный метод расчета цилиндрических и плоских систем с немагнитными телами.

Оптимизация конструктивных параметров кузнечных индукционных нагревателей имеет целью обеспечить высокие энергетические показатели и максимальную производительность с единицы длины установки. Температурный перепад по длине стальных заготовок обычно не превышает требуемого температурного перепада по радиусу заготовки (100–150 °С) даже при различной степени заглупления заготовки в индукторе. Это обусловлено тем, что при работе на частотах, рекомендуемых по условию обеспечения достаточно высоко электрического КПД и малого времени нагрева, красной эффект индуктора и загрузки сравнительно малочувствителен к заглуплению загрузки в индукторе. Поэтому для широкого диапазона диаметров стальных заготовок могут определяться оптимальные толщины футеровки, обеспечивающие максимальный полный КПД индукционного нагревателя при работе на различных частотах, и соответственно значения КПД и производительность, приходящаяся на 1 м установки.

Для построения вышеуказанных зависимостей принимали следующие исходные данные: среднеинтегральная температура нагре-

ва заготовок – 1200 °С; температурный перепад по радиусу – 100 °С; футеровка – жаропрочный бетон со средней теплопроводностью 1,1 Вт/(м·К); зазор между загрузкой и внутренней поверхностью футеровки составил 1 см на каждую сторону.

Из вышеприведенного рисунка видно, что нагрев заготовок небольшого диаметра для обеспечения максимального КПД целесообразно осуществлять в индукторах с минимальной толщиной жаропрочной футеровки, обеспечивающей только защиту электрической изоляции индуктора. А при нагреве заготовок диаметром 6–8 см и выше в зависимости от частоты можно рекомендовать толщины футеровок, приведенные на рисунке 2. Предельный полный КПД нагревателя в зависимости от диаметра заготовки имеет максимум, который тем сильнее выражен, чем выше частота. Для каждой частоты существует диаметр заготовки, при котором обеспечивается максимальная производительность. Влияние конечного температурного перепада по радиусу на оптимальную толщину футеровки, предельный полный КПД, производительность единицы длины установки при нагреве на частоте 1000 Гц показаны на рисунке 3.

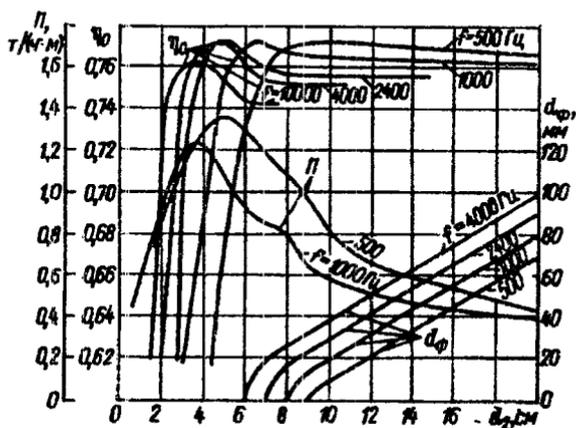


Рисунок 2 – Зависимость предельного полного КПД индукционного нагревателя  $\eta_0$ , соответствующей ему производительности, приходящейся на 1 м установки  $\Pi$ , оптимальной толщины футеровки  $d_4$  от диаметра стальных заготовок  $d_2$

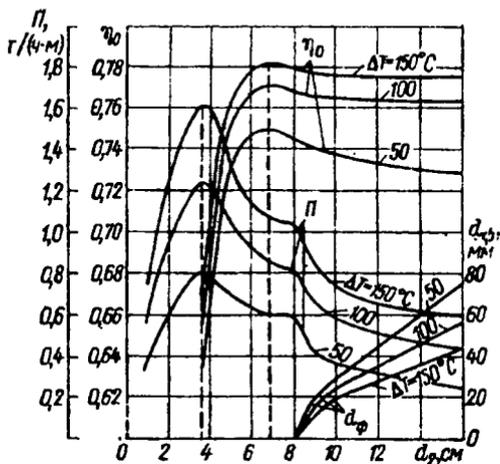


Рисунок 3 – Влияние конечного температурного перепада  $\Delta T$  на оптимальную толщину футеровки  $d_{\phi}$ , предельный полный КПД  $\eta_0$  и производительность метра установки  $\Pi$

Положение максимума полного КПД и производительность не зависят от температурного перепада. Естественно, что производительность и предельный полный КПД тем выше, чем больше допустимый конечный температурный перепад. Оптимальная толщина футеровки, обеспечивающая максимальный полный КПД, с увеличением температурного перепада уменьшается.

В работе [3] рассмотрены основы инженерных тепловых расчетов при индукционном нагреве. Отмечено, что индукционный нагрев может иметь разнообразные зависимости температуры (на поверхности) и теплового потока от времени. При этом в рассматриваемой работе авторы приводят зависимости возникающей тепловой мощности в нагреваемой детали от времени для некоторых характерных режимов, которые не встречаются в чистом виде, но в той или иной степени приближаются к режимам, имеющим место в промышленной практике. Поэтому при выводе расчетных формул были сделаны определенные упрощения. В частности, формально считается, что наводимый электромагнитным полем ток в

заготовке проходит лишь в слое  $\Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0\mu}}$  (м) с равномерной

плотностью, равной  $\frac{J_{me}}{\sqrt{2}}$  (А/м<sup>2</sup>), а за его пределами отсутствует.

При этом (в случае рассмотрения заготовки в форме параллелепипеда) активное сопротивление вычисляется так же, как сопротивление пластины толщиной  $\Delta$  при постоянном токе, распределенном по всему сечению равномерно. Для тепловых расчетов существенно, что в пределах глубины проникновения тока выделяется основная часть энергии.

Мощность в элементарном слое  $dx$  для плоской заготовки шириной  $a$  и длиной  $l$  на глубине  $x$

$$dP = \frac{1}{2} al \rho J_{me}^2 e^{-2x/\Delta} dx.$$

Полная активная мощность, проходящая сквозь поверхность проводящей среды

$$P = al \frac{\rho J_{me}^2}{2} \int_0^{\infty} e^{-2x/\Delta} dx = al \frac{J_{me}^2 \rho \Delta}{4} = al p_0,$$

где  $p_0$  – удельная тепловая мощность на поверхности заготовки, Вт/м<sup>2</sup>.

Мощность в слое толщиной  $\Delta$

$$P_{0-\Delta} = al \frac{\rho J_{me}^2 \Delta}{2} \int_0^{\Delta} e^{-2x/\Delta} dx = al p_0 (1 - e^{-2}) = al (p_0 - p_{\Delta}) \approx 0,865 p_0,$$

где  $p_{\Delta}$  – удельная тепловая мощность на глубине  $\Delta$ , Вт/м<sup>2</sup>.

Выражение для удельной тепловой мощности на поверхности заготовки можно представить следующим образом

$$p_0 = \frac{J_{me}^2 \rho \Delta}{4} \approx 0,993 \cdot 10^{-3} H_{me}^2 \sqrt{\rho \mu f},$$

где  $H_{me}$  – амплитуда напряженности магнитного поля на поверхности заготовки, А/м.

Анализ работ [4–6] показывает, что авторами для определения удельной тепловой мощности на поверхности заготовки используются в вышеприведенном выражении различные коэффициенты. Так, автором работы [4] используется коэффициент 1,2 вместо 0,993, в работе [5] для упрощения внешнего вида формулы автор использует коэффициент 1 (вместо 0,993), в работе [6] – коэффициент  $1/3,67 \approx 0,273$ , что значительно отличается от значений, приведенных выше, и вызывает определенное сомнение.

В свою очередь, автор работы [7] для указанной расчетной формулы вводит поправочные функции, показывающие, во сколько раз отличаются значения мощностей для проводящих тел конечных размеров от мощностей полубесконечных тел. При этом нижеприведенные графики (рисунок 4) применимы при амплитуде напряженности магнитного поля на поверхности нагреваемых заготовок на уровне 20–350 кА/м с точностью 5 %. Рассматриваемые поправочные функции используются в известных инженерных методиках расчета индукторов для нагрева ферромагнитных изделий.

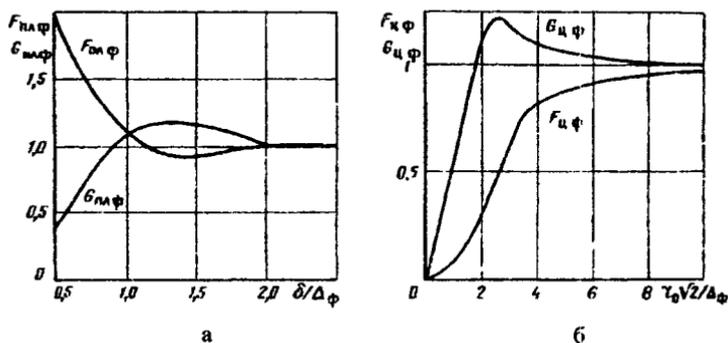


Рисунок 4 – Поправочные функции для расчета активной и реактивной мощностей в стальных ферромагнитных плите (а) и цилиндре (б) с учетом зависимости  $\mu(H)$  от относительных геометрических параметров

Авторы [3] отмечают, что полученный результат дает основание при приближенных расчетах допускать, что в слое  $\Delta$  выделяется вся тепловая энергия. Однако для реальных условий и более точных

расчетов необходимо учитывать конкретные размеры заготовки и распределение наводимого тока по сечению заготовки. Авторы рассматриваемой работы также отмечают, что большинство одномерных моделей позволяет хорошо изучить поверхностный эффект в телах простой конфигурации и их нагрев в одномерном поле. В свою очередь, вычисление параметров коротких индукторов по методу магнитных схем замещения, основанное на одномерных моделях, дает приемлемые результаты для приближенного инженерного расчета наиболее распространенных индукционных систем. Более точно сосредоточенные и распределенные параметры можно рассчитать с помощью двухмерных плоскопараллельных или осесимметричных моделей, учитывающих конечную длину индуктора и загрузки. Большинство двухмерных задач относится к тем типам задач, которые требуют совместного решения уравнений для проводящих и непроводящих областей. Решение двухмерных моделей может быть основано на аналитических и численных методах.

Для более точного моделирования устройств индукционного нагрева необходим расчет взаимосвязанных тепловых и электромагнитных полей. Электромагнитное поле определяет источники тепла, создающие температурное поле. В свою очередь, с изменением температуры меняется удельное сопротивление, а для ферромагнитных тел и магнитная проницаемость, падающая до единицы в точке Кюри. С учетом того, как меняются электромагнитные и теплофизические свойства рассматриваемой системы, моделирование может быть сведено к следующему: электромагнитная задача решается отдельно от тепловой в каждом из интервалов постоянства свойств. Также важно отметить, что при расчете необходимо учитывать зависимость магнитной проницаемости от магнитной напряженности поля.

В работе [7] приведена зависимость расчетной относительной магнитной проницаемости и глубины проникновения от удельной поверхности мощности на поверхности ферромагнитного стального полубесконечного тела.

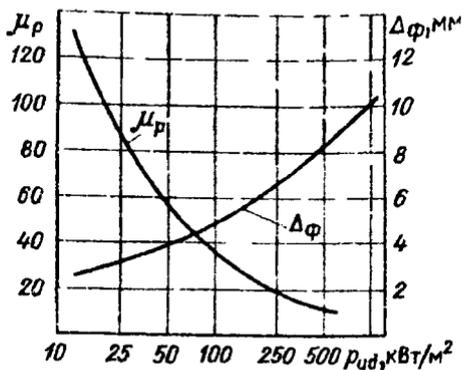


Рисунок 5 – Зависимость расчетной относительной магнитной проницаемости и глубины проникновения от удельной поверхности мощности на поверхности ферромагнитного стального полубесконечного тела

Автор вышеуказанной работы приводит также приближенную аппроксимирующую формулу для  $\mu(H)$ , которая применима при значениях магнитной напряженности поля свыше 4000 А/м

$$\mu = 5 \cdot 10^5 H^{-0,894}.$$

Также в рассматриваемой работе приведена приближенная формула для расчета потерь на гистерезис (Вт/м<sup>3</sup>) для среднеуглеродистых сталей

$$p_r \approx 2 \cdot 10^{-2} fB^{1,6}.$$

При моделировании нагревателя периодического действия авторы работы [3] рекомендуют весь процесс нагрева делить на временные интервалы. В пределах каждого интервала распределение источников тепла и физические свойства металла считаются постоянными. По окончании расчета в логическом блоке программы анализируется полученное температурное поле. Если конечные перепады температуры по радиусу или длине загрузки превышают заданные, то изменяют число витков индуктора и его длину, после чего расчет повторяется, пока заданные перепады температуры не будут достигнуты.

При моделировании тепловой работы полунепрерывных нагревателей вышеуказанные авторы предусматривают расчет как установившихся, так и расчет переходных режимов. Из решения электрической задачи определяются источники тепла. Затем производится тепловой расчет одного из слитков по мере продвижения его в индукторе, учитывающий условия стационарной теплоотдачи с боковых сторон и теплообмена между торцевыми плоскостями слитков. Источники тепла определяются по данным электрического расчета в соответствии с положением слитка для данного интервала времени. По окончании теплового расчета проверяется соответствие распределения температуры по радиусу выходящего слитка требуемому распределению (по технологическим условиям). В случае несоответствия предусмотрено изменение мощности индуктора или темпа проталкивания слитков. После достижения заданного распределения по радиусу проверяется перепад температуры по длине выходящего слитка. При необходимости изменяется длина индуктора или положение слитков в нем и расчет повторяется. Когда требуемая равномерность нагрева слитка на выходе достигнута, проверяется соответствие распределения температуры по длине столба слитков.

Дальнейшее развитие комбинированных моделей направлено на моделирование более сложных систем, в том числе содержащих ферромагнитные тела, и на учет в модели систем управления, источников питания, построение многокомпонентных моделей для таких процессов, как термообработка, сварка и т.д.

### Литература

1. Немков, В.С. Теория и расчет индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
2. 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.
3. Установки индукционного нагрева: учебное пособие для вузов / А.Е. Слухоцкий [и др.]; под ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.

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-