

Моделирование индукционных нагревателей с учетом особенностей работы тиристорного преобразователя частоты с параллельным инвертором

ДЕМИДОВИЧ В.Б., ГРИГОРЬЕВ Е.А., ЧМИЛЕНКО Ф.В.,
М'ЛИКИ МОХАМЕД АМИН, ЮЛЕГИН А.Н.

Рассматриваются вопросы моделирования работы индукционного нагревателя периодического действия при питании его от параллельного инвертора. Для исследования была разработана в программной среде Universal2D модель такого нагревателя с учетом характеристик тиристорного преобразователя частоты. Проанализированы примеры нагрева титановой и стальной заготовок с учетом и без учета изменения частоты в процессе нагрева. Также исследован характер зависимости частоты питающего напряжения от геометрических размеров заготовки при определенной емкости контура. Даны разъяснения и рекомендации по выбору оптимальной емкости контура для получения номинальных значений мощности и частоты источника питания.

Ключевые слова: индукционный нагрев, тиристорный преобразователь частоты, индукционный нагреватель, моделирование

Источники питания являются одними из главных определяющих звеньев технологической цепи для нагрева металлов индукционными токами. Они влияют на технико-экономические характеристики процесса индукционного нагрева, поэтому правильный выбор типа источника и подбор рабочей частоты определяют конечный результат, так как именно частота тока определяет глубину его проникновения в заготовку и, как следствие, КПД нагрева. Для сквозного нагрева под пластическую деформацию заготовки используют в основном средние частоты. На сегодня известно несколько типов источников питания, которые подходят для этих целей [1]. Для использования частот от 1000 до 10000 Гц могут применяться машинные генераторы. Они преобразуют энергию переменного тока промышленной частоты в электрическую энергию повышенной частоты. Частота тока машинного генератора зависит от частоты вращения ротора генератора и определяется конструкцией машины, поэтому в процессе эксплуатации установки частота тока не может быть изменена и единственным каналом управления процессом нагрева, как и в случае с использованием трансформатора, является выходное напряжение. Кроме того, значительным недостатком является низкий КПД устройства и

Matters concerned with simulating the operation of a periodic-duty induction heater powered from a parallel inverter are addressed. A model of such heater, constructed with due regard of the characteristics of a thyristor frequency converter, was developed in the Universal2D software environment for carrying out the study. Examples of heating titanium and steel billets performed with and without taking into account frequency variation during the heating process are proposed. The dependence of power supply voltage frequency on the billet geometrical sizes at certain capacitance of the loop is also studied. Explanations and recommendations on selecting the optimal loop capacitance for obtaining the nominal values of power source capacity and frequency are given.

Key words: induction heating, thyristor frequency converter, simulation of an induction heater

невозможность частых пусков, что является определяющим аспектом при периодическом нагреве заготовок [1].

Наиболее эффективными источниками питания устройств индукционного нагрева перед пластической деформацией заготовки на данный момент являются статические тиристорные и транзисторные преобразователи частоты. Основными достоинствами их использования являются высокий электрический КПД при любых нагрузках, отсутствие потерь х.х., высокие эксплуатационные и эргономические характеристики. Кроме того, система управления статическими преобразователями частоты позволяет обеспечивать управление нагревом в процессе работы установки, при этом чередование интервалов нагрева при максимальной и минимальной мощности, а также кратковременные отключения источника не регламентированы. Помимо управления мощностью индуктора путем изменения напряжения на нем в достаточно широких пределах в современных модернизированных источниках питания такого типа (используются контроллеры) существует канал управления частотой питающего напряжения. Таким образом, области использования данных преобразователей в качестве источников питания индукционных устройств не

ограничиваются конкретными технологическими задачами, а постоянно расширяются. При этом с разработкой новых технологий возможно совершенствовать их встраиваемость в технологический процесс, автоматизацию, мобильность и универсальность работы.

Выходная частота статического преобразователя частоты с параллельным инвертором определяется параметрами колебательного контура [4]. При включении генератор настраивается на резонансную частоту контура, вследствие чего при использовании такого источника питания следует говорить не только о номинальной частоте выходного напряжения, но и о некотором интервале рабочих частот, на которых данный преобразователь устойчиво и надежно работает. В процессе нагрева изменяются зависящие от температуры свойства заготовки, что, в свою очередь, приводит к изменению общей индуктивности индуктора с загруженной заготовкой. Это явление при использовании в качестве источника питания тиристорного преобразователя частоты с параллельным инвертором обуславливает изменение частоты колебательного контура и в конечном итоге влияет на распределение температурного поля как по длине, так и по сечению заготовки. Изменение частоты происходит как в случае изменений свойств материала заготовки в процессе нагрева, так и в случае нагрева в одном индукторе заготовок различной длины и диаметра. Для получения же металла нужного качества учет ошибки в несколько градусов может оказаться определяющим. Поэтому для более точного моделирования процесса нагрева заготовок в индукционном нагревателе периодического действия необходимо использовать модель «индукционный нагреватель – тиристорный преобразователь частоты». Использование такой модели позволяет оценить изменение энергетических характеристик нагревательного контура и качества нагрева заготовок в зависимости от вариаций частоты источника питания.

Устройства индукционного нагрева являются сложными техническими объектами, в которых протекают физические процессы различной природы. В общем случае математическое описание таких объектов представляет собой систему детерминированных нелинейных дифференциальных и интегральных уравнений, записанных для многомерных и многосвязных областей. В настоящее время наибольшее распространение получили методы численного моделирования, в ином случае в постановку задачи приходится вводить существенные упрощения, что не может не повлиять на качество получаемых результатов. Создано достаточно большое число программных пакетов, в основу модели-

рования которых положены методы численного моделирования, но темпы развития и уровень современных технологий, которые так или иначе имеют отношение к процессам индукционного нагрева, предъявляют все более жесткие требования к качеству продукции, производительности и энергоэффективности устройств. Получение качественных изделий, производство которых связано с различными процессами термообработки, невозможно без применения точных и надежных моделей, дающих полный объем достоверных данных как о требуемом характере распределения температурного поля внутри заготовки, так и о энергетических характеристиках процесса нагрева.

Для моделирования процессов индукционного нагрева может использоваться программная среда Universal 2D. Пакет программ Universal [2] позволяет получать данные об энергетических характеристиках процесса и распределении температурных полей по длине и сечению заготовки в режиме реального времени. Пакет позволяет исследовать процесс индукционного нагрева на основе моделей периодических, методических и дискретных индукционных нагревателей двух- и трехмерных электротепловых моделей (ЭТМ) заготовок. С его помощью существует возможность не только исследовать отдельные аспекты и закономерности проявления электромагнитных, тепловых и других эффектов в устройствах индукционного нагрева, но и создавать комплексные модели, учитывающие неразрывную связь электромагнитных и тепловых процессов в нелинейных и многомерных областях загрузки индукционных электротермических устройств. В программной среде Universal2D разработана двухмерная ЭТМ периодического индукционного нагревателя, в которой учитываются характеристики и особенности системы управления тиристорным преобразователем частоты с параллельным инвертором [4]. В модели используется комбинированный метод расчета: для решения внешней электрической задачи (среда – воздух и область индуктора) используется метод интегральных уравнений (МИУ), для решения внутренней электротепловой задачи (среда – область заготовки) – метод конечных разностей (МКР). Эти задачи связаны импедансными граничными условиями. В результате электрического расчета при заданных напряжении питания, токе или мощности цепи определяются полные активная и реактивная мощности, активная мощность, выделяющаяся в нагрузке, мощность потерь в индукторах, токи в индукторах, электрический КПД нагревателя, распределение напряженности магнитного поля на поверхности загрузки. При электротепловом расчете находится распределение температуры по длине и в попереч-

ном сечении выходной заготовки при определенных граничных условиях на поверхности загрузки, которые задаются или из условия свободного теплообмена с окружающей средой, или с учетом футеровки. Одновременно рассчитываются общие тепловые потери и распределение температуры внутренней поверхности футеровки по длине нагревателя.

Алгоритм, реализующий модель индукционного нагревателя с учетом нелинейных свойств материалов и особенностей системы управления тиристорным преобразователем частоты с параллельным инвертором, представлен на рис. 1.

Модель позволяет учитывать настройку преобразователя на резонансную частоту параллельного колебательного контура, который состоит из индукционного нагревателя с загруженной заготовкой и емкости для компенсации реактивной мощности (рис. 2). С ее помощью можно увидеть, как изменится частота источника питания, если изменяются свойства заготовки при постоянной емкости. В модели учитываются изменение частоты и ограничение тока преобразователя в двух зонах регулиро-

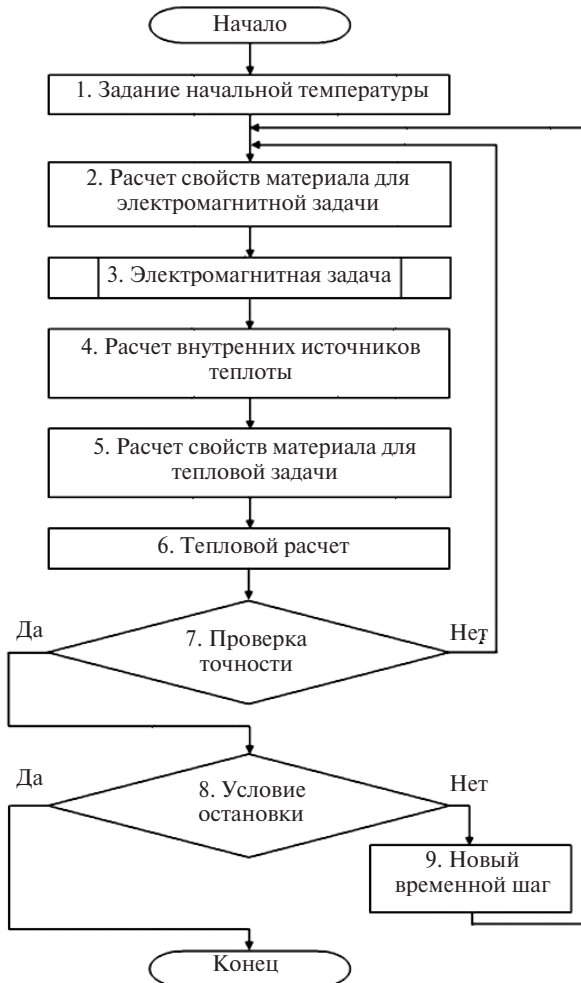


Рис. 1. Алгоритм решения электротепловой задачи

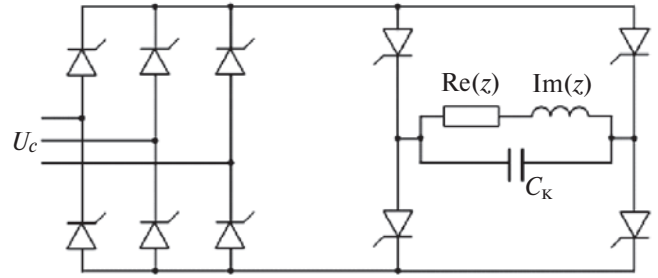


Рис. 2. Схема колебательного контура при питании от параллельного инвертора: $Re(z)$ и $Im(z)$ – реальная и мнимая составляющие полного сопротивления индуктора; C_k – емкость контура

вания с зарегулированным и открытым выпрямителем.

Алгоритм расчета электромагнитной задачи модели более подробно представлен на рис. 3.

Рассмотренная на рис. 2 схема колебательного контура является упрощенной схемой замещения индуктора. Согласно полной схеме замещения индуктора (см. рис. 4,а) полное электрическое сопротивление индуктора

$$z_{и} = r_1 + r_2 + j(x_1 + x_2) = r_{и} + jx_{и} = Re(z_{и}) + jIm(z_{и}) \quad (1)$$

где r_1 и x_1 – активное и внутреннее реактивное сопротивление индуктора; r_2 и x_2 – активное и реактивное сопротивление заготовки, приведенное к току индуктора [2]:

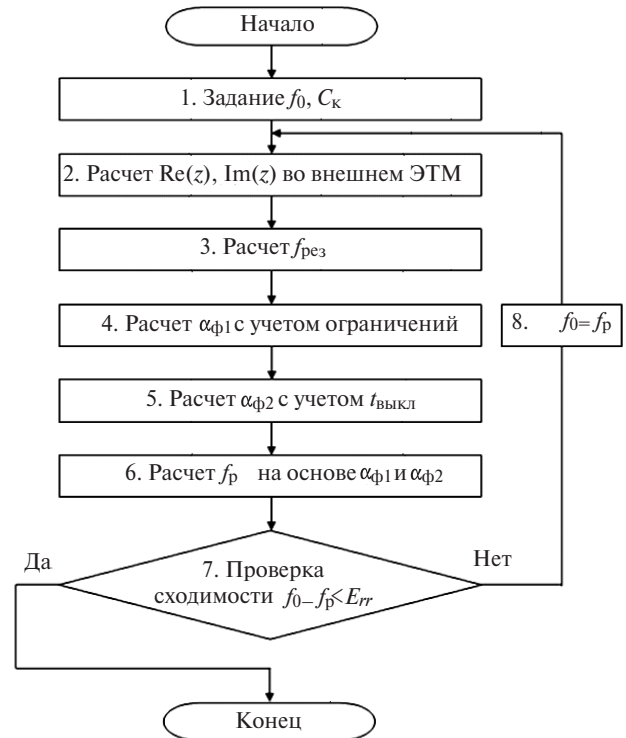


Рис. 3. Алгоритм расчета электромагнитной задачи

$$r_2 = cr_2; \tag{2}$$

$$x_2 = \frac{\dot{e}}{\dot{e}} x_{s2} + x_{2M} + \frac{(x_s + x_{2M})^2 + r_2^2}{x_0} \frac{\dot{u}}{\dot{u}} \tag{3}$$

Здесь c – коэффициент приведения активного сопротивления:

$$c = \frac{1}{\frac{r_2^2}{x_2} + 1 + \frac{x_s + x_{2M}}{x_0}}; \tag{4}$$

r_2 и x_{2M} – соответственно активное и внутреннее реактивное сопротивление заготовки; x_s – реактивное сопротивление рассеяния, определяемое магнитным потоком в воздушном зазоре; x_0 – реактивное сопротивление участка пути магнитного потока вне индуктора и загрузки, которое определяет составляющую МДС, необходимую для преодоления магнитным потоком пространства вне индуктора.

Составляющие полного сопротивления индуктора с загруженной в него заготовкой на каждой последующей итерации алгоритма в используемой модели рассчитываются с учетом данных, полученных из решения электромагнитной задачи на предыдущей итерации:

$$r_{и} = \frac{UI_R}{(I_R^2 + I_X^2)}; \tag{5}$$

$$x_{и} = \frac{UI_X}{(I_R^2 + I_X^2)}, \tag{6}$$

где U – напряжение на зажимах индуктора; I_R и I_X – активная и реактивная составляющие тока индуктора соответственно.

Резонансная частота упрощенной схемы замещения определяется как

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{и}C} - \frac{r_{и}^2}{L_{и}}}, \tag{7}$$

где $L_{и} = x_{и} / 2\pi f$ – индуктивность индуктора с помещенной в него загрузкой.

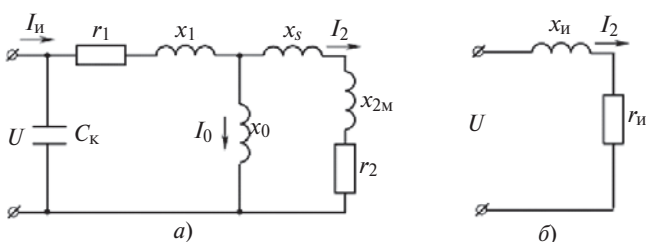


Рис. 4. Схемы замещения индуктора: а – полная; б – упрощенная

Активное сопротивление r_1 , а для весьма длинного индуктора и реактивное сопротивление рассеяния x_s практически не зависят от физических свойств нагреваемой заготовки, изменяющихся в процессе нагрева. Однако сопротивления r_2 и x_{2M} нагреваемой заготовки существенно зависят от его удельного сопротивления γ_2 и относительной магнитной проницаемости μ_2 , которые могут значительно изменяться в процессе нагрева. Таким образом, постоянное изменение свойств заготовки при изменении ее температуры при нагреве влияет на частоту питающего индуктор напряжения.

Рассмотрим процесс нагрева титановой заготовки длиной 750 и диаметром 275 мм в периодическом индукционном нагревателе с учетом и без учета изменения частоты контура. Индукционный нагреватель имеет двухслойную катушку из медной трубки, каждый слой имеет 54 витка, длина каждого слоя 1050 мм. Диаметр внутреннего слоя 360 мм, диаметр наружного слоя 410 мм. Нагрев проводился в течение 600 с в том и другом случаях. Частота колебательного контура при использовании конденсаторной батареи емкостью 2650 мкФ составляет 100 Гц. Изменение частоты контура (рис. 5) в процессе нагрева влияет на все без исключения энергетические характеристики контура (рис. 6). Следствием учета указанных изменений является изменившийся характер распределения температурного поля заготовки (рис 7), на котором изображены температурные кривые для четырех точек заготовки. По истечении 600 с нагрева температура точек была следующая: $T_A^1 = 933$ °С; $T_A^2 = 931$ °С; $T_B^1 = 867$ °С; $T_B^2 = 856$ °С; $T_G^1 = 487$ °С; $T_G^2 = 476$ °С; $T_F^1 = 524$ °С; $T_F^2 = 515$ °С. Учет особенностей индукционного нагревателя при питании от параллельного инвертора позволяет более точно прогнозировать распределение температурного поля по объему

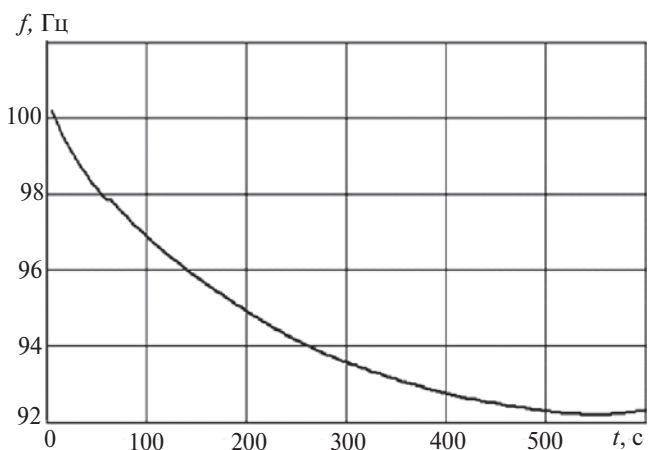


Рис. 5. Изменение частоты источника питания при нагреве титановой заготовки диаметром 275 мм и длиной 750 мм

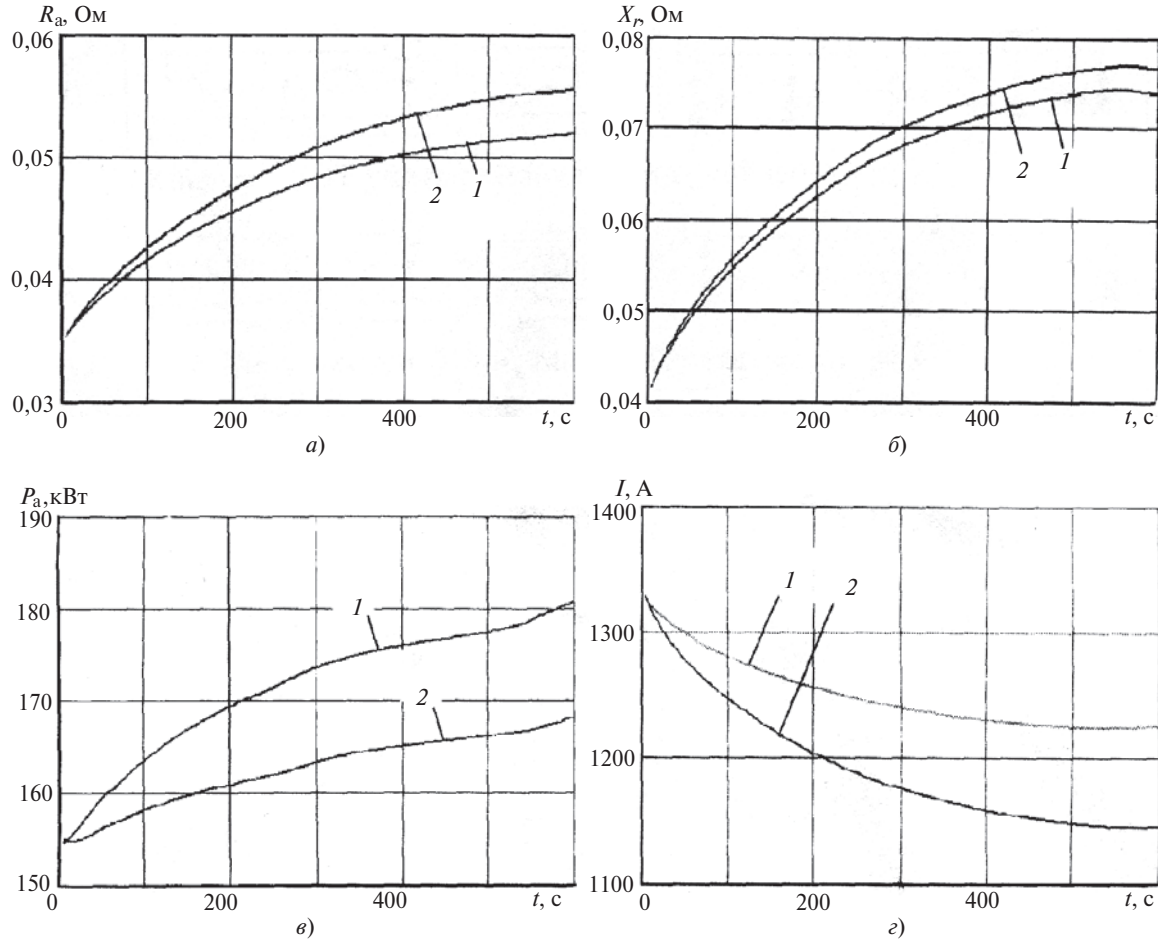


Рис. 6. Изменение активного (а), реактивного сопротивления (б), активной мощности (е) и тока цепи (з) нагрева титановой заготовки во времени: 1 – с учетом изменения частоты источника питания; 2 – без учета

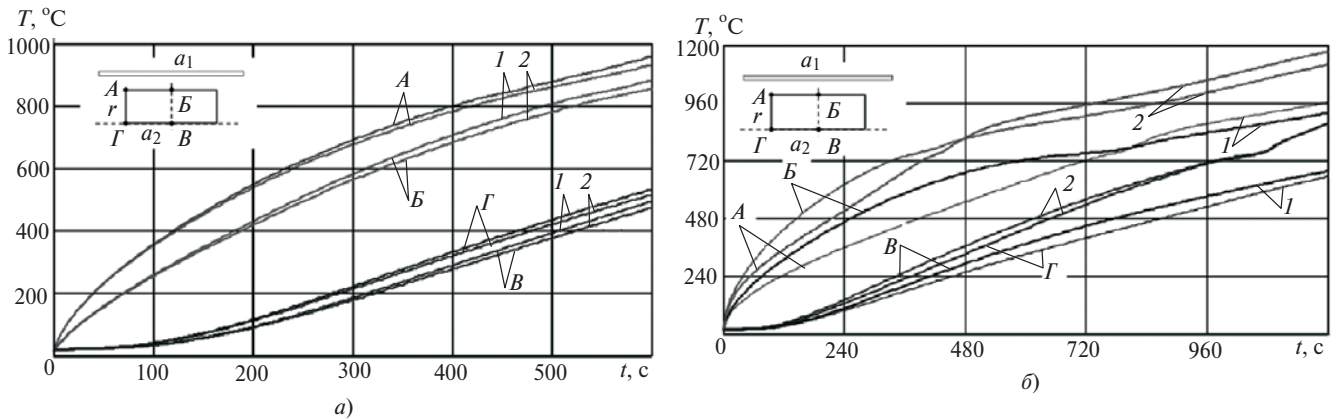


Рис. 7. Температурные кривые нагрева титановой (а) и стальной (б) заготовок для точек: А – на торце (на поверхности заготовки); В – на средней линии (на поверхности заготовки); В – на средней линии (на оси заготовки); Г – на торце (на оси заготовки); 1 – с учетом изменения частоты источника питания; 2 – без учета

заготовки, так как учет даже нескольких градусов имеет значение при прецизионном нагреве для получения качественных изделий.

Еще больше изменяются свойства стальной заготовки в процессе нагрева. Для наглядности необходимости учета особенностей индукционного нагревателя при питании от параллельного инвертора рассмотрен случай нагрева стальной заготовки с

теми же геометрическими размерами, как и в случае нагрева титановой заготовки. Использован тот же самый индукционный нагреватель. Для определения искомой частоты контура 100 Гц необходимо уменьшить емкость конденсаторной батареи до 1800 мкФ.

На рис. 7 изображены температурные кривые для исследуемых точек заготовки; на рис. 8 приве-

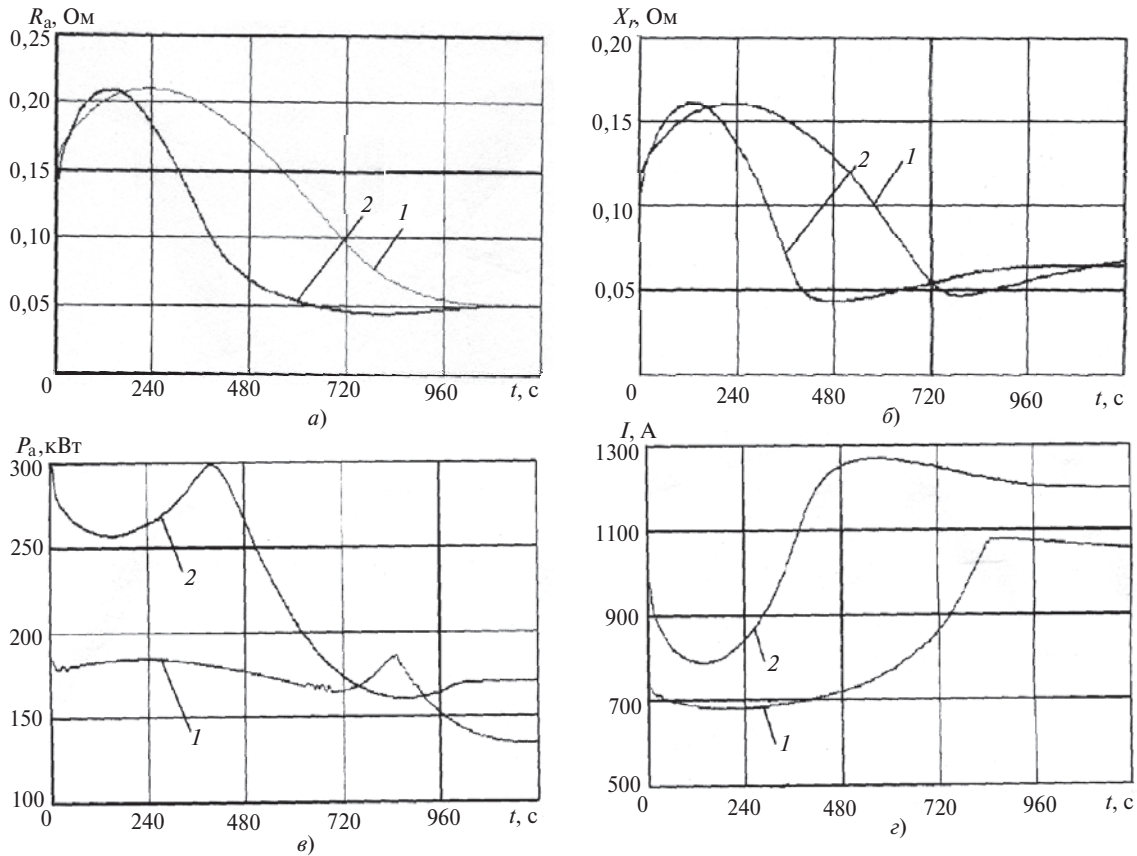


Рис. 8. Изменение активного (а), реактивного (б) сопротивления, активной мощности (в) и полного тока цепи (г) нагрева стальной заготовки во времени: 1 – с учетом изменения частоты источника питания; 2 – без учета

дено изменение энергетических характеристик для стальной заготовки.

Рис. 9 отражает изменение частоты и напряжения источника питания в течение процесса. Стальная заготовка обладает магнитными свойствами при температуре ниже точки Кюри, ее магнитная проницаемость выше единицы, поэтому глубина проникновения тока в сталь на одной и той же частоте заготовки ниже, чем у титана, а активное сопротивление току больше. Таким образом, обладая большим сопротивлением, стальная магнитная заготовка потребляет большую мощность и при тех же размерах нагружает контур сильнее, что приво-

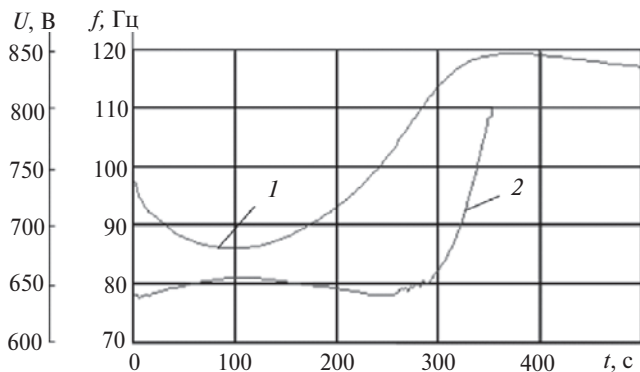


Рис. 9. Изменение частоты (1) и напряжения (2) источника питания при нагреве стальной заготовки

дит к срабатыванию ограничения по току выпрямителя, входящего в состав тиристорного преобразователя частоты. Выходное напряжение параллельного инвертора снижается, становясь несколько меньше номинального. Этим объясняется низкий уровень напряжения (рис. 9), что в свою очередь обуславливает меньшую активную мощность в заготовке по сравнению с выделяемой мощностью в том случае, когда особенности работы параллельного итнвертора тиристорного преобразователя частоты не учитываются.

Таким образом, для заготовки требуется большее время до достижения температуры точки Кюри. Эта задержка определяет характер изменения энергетических характеристик контура: максимумы кривых активной мощности и полного тока смещаются вправо по оси времени, а значения активного и реактивного сопротивления «растягиваются» во времени. Указанные соотношения четко указывают на то, что пренебрежение такими особенностями работы параллельного инвертора как изменение частоты контура в зависимости от свойств заготовки и известные ограничения, обусловленные настройкой системы управления преобразователем частоты, приводит к ошибочному представлению о процессе нагрева, что, в свою очередь, может привести к негативным последст-

виям при моделировании устройств индукционного нагрева.

В случае нагрева в одном индукторе заготовок различных длины и диаметра изменение частоты контура обуславливается изменением геометрических параметров заготовки [5]. На рис. 10 представлены зависимости частоты питающего индуктора напряжения от длины L и диаметра D нагреваемой в нем титановой заготовки. Данные приведены для момента окончания нагрева. При этом емкость конденсаторов контура была рассчитана для резонансной частоты 100 Гц в начале нагрева, когда температура заготовки составляла 20 °С. При $f, \text{Гц}$

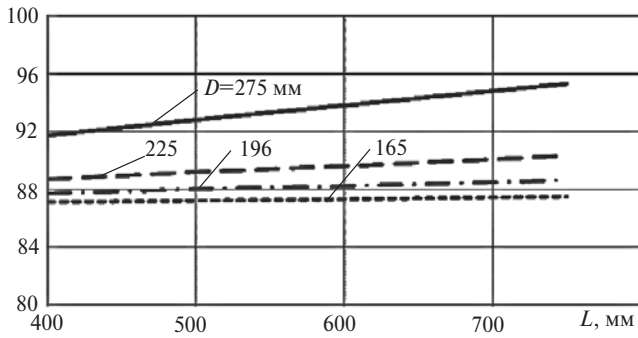


Рис. 10. Зависимость частоты контура от геометрических размеров титановой заготовки

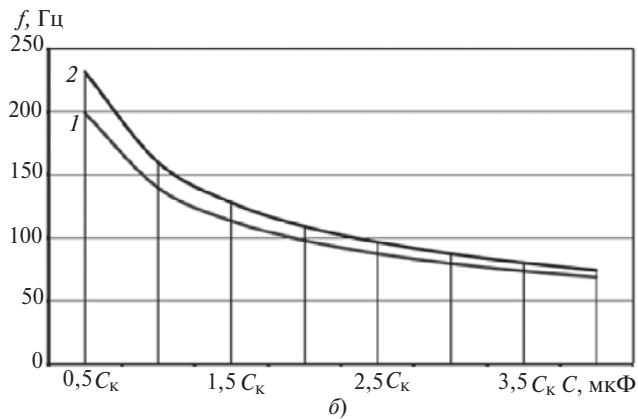
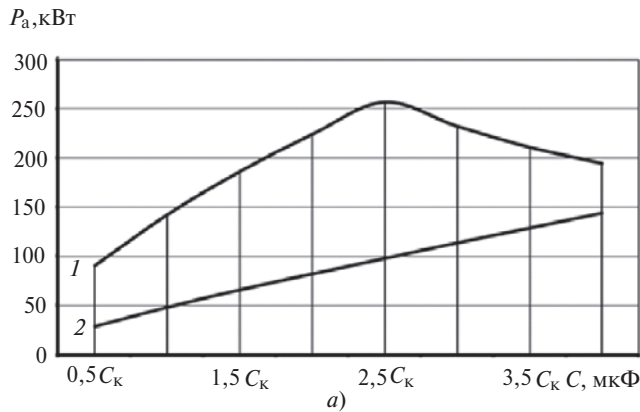


Рис. 11. Зависимость мощности (а) и частоты (б) источника питания от емкости контура при размерах заготовки: 1 – $D = 275 \text{ мм}$, $L = 750 \text{ мм}$; 2 – $D = 165 \text{ мм}$, $L = 400 \text{ мм}$

уменьшении длины либо диаметра заготовки индуктивность контура возрастает, а частота источника питания контура при неизменной емкости соответственно уменьшается.

Влияние изменения частоты на качество нагрева заготовок различной длины и диаметра в одном индукционном нагревателе оказывается более выраженным, чем влияние свойств конкретной заготовки.

Модель позволяет также определить оптимальную емкость, при которой преобразователь будет работать на номинальной частоте при номинальной мощности. В качестве примера на рис. 11 приведены графики зависимости мощности и частоты источника питания при различных емкостях колебательного контура. Расчеты проводились для заготовок из титанового сплава ВТ6. Номинальная частота источника питания 100 Гц, номинальная мощность 250 кВт, номинальное напряжение 800 В. Конденсаторная батарея представляет собой набор банок, емкость каждой из которых составляет $C_k = 995 \text{ мкФ}$.

При увеличении емкости контура частота растет для всех заготовок из указанного диапазона, однако номинальная частота источника питания 100 Гц достигается при подключении емкости от $2C_k$ для наименьшей до $2,5C_k$ для наибольшей заготовки. Мощность источника питания при нагреве указанных заготовок повышается с увеличением емкости контура, однако график зависимости мощности для заготовки длиной 750 и диаметром 275 мм имеет максимум (отмечался при емкости контура $2,5C_k$), определенный номинальной мощностью источника питания. Этот максимум обусловлен уменьшением выходного напряжения преобразователя (рис. 12), связанным с ограничением его тока.

Таким образом, существует оптимальная емкость конденсаторной батареи, при которой источник питания с параллельным инвертором будет ра-

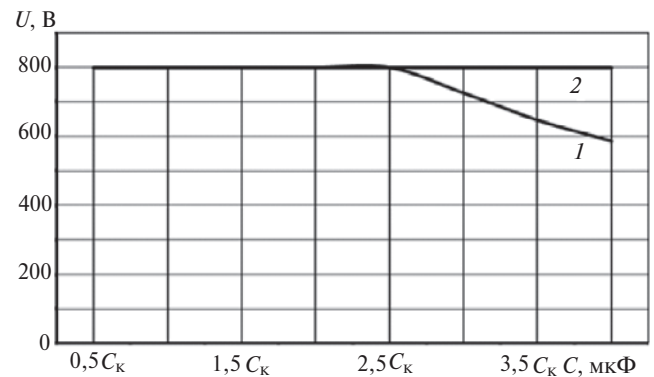


Рис. 12. Зависимость выходного напряжения источника питания от емкости контура при размерах титановой заготовки: 1 – $D = 275 \text{ мм}$, $L = 750 \text{ мм}$; 2 – $D = 165 \text{ мм}$, $L = 400 \text{ мм}$

ботать в оптимальном режиме. Например, для рассмотренной установки нагрева указанных выше заготовок оптимальная емкость составляет $2,5C_K$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шамов А.Н., Бодажков В.А. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок. — Л.: Машиностроение, 1974, 280 с.
2. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В. Численное моделирование устройств индукционного нагрева. — СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010, 158 с.
3. Слухоцкий А.Е. Установки индукционного нагрева. — Л.: Энергоиздат, 1981.
4. Демидович В.Б., Григорьев Е.А., Чмиленко Ф.В. и др. Моделирование работы индукционного нагревателя периодического действия при питании от параллельного инвертора. — Индукционный нагрев, 2012, № 3(21), с. 29–33.
5. Демидович В.Б., Григорьев Е.А., Масликов П.А. Влияние на качество нагрева в одном индукторе заготовок различной длины и диаметра. — Индукционный нагрев, 2011, № 16, с. 22–26.

[16.04.13]

Авторы: Демидович Виктор Болеславович окончил факультет электротехники и автоматики (ФЭА) Ленинградского электротехнического института (ныне СПбГЭТУ «ЛЭТИ») в 1973 г. В 2002 г. в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете защитил докторскую диссертацию по исследованию и разработке индукционных нагревателей для металлургической промышленно-

сти. Профессор кафедры электротехнологической и преобразовательной техники (ЭТПТ) СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Григорьев Евгений Александрович окончил ФЭА СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 2008 г. В 2011 г. в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» защитил кандидатскую диссертацию по исследованию и разработке энергосберегающих технологий прецизионного нагрева титановых сплавов. Младший научный сотрудник межотраслевой лаборатории современных электротехнологий (СЭТ) СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Чмиленко Федор Викторович окончил ФЭА СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 1995 г. В 1998 г. в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» защитил кандидатскую диссертацию по исследованию и разработке установок индукционного подогрева стальных слябов после непрерывной разливки. Доцент кафедры ЭТПТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Млики Мохамед Амин окончил ФЭА СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 1997 г. Аспирант межотраслевой лаборатории СЭТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Юлегин Александр Николаевич окончил факультет энергетики Таллиннского политехнического института в 1976 г. В 1988 г. защитил кандидатскую диссертацию «Принципы управления и схемотехническая реализация управляющего устройства серии тиристорных преобразователей частоты» в Московском энергетическом институте. Директор фирмы «Aleksander Julegin Elektroonika» FIE (Эстония).

* * *

ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи.

Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года и на сайте журнала.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении (стоимость по договоренности).

При повторении той же рекламы в следующем номере — скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах — скидка 20%. Стоимость оплаты рекламных статей — по договоренности. Последний срок представления рекламного материала — за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648

тел./факс: (495)362-7485

E-mail: l.s.kudinova@rambler.ru