

УДК 621.365

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ
ДВУХСЕКЦИОННОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ
МЕТОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ*****А.И. Данилушкин, А.П. Мостовой***Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассматриваются вопросы повышения эффективности управления нестационарными режимами работы двухсекционных индукционных нагревателей методического действия. Задача управления переходными режимами многосекционного индукционного нагревателя сформулирована как задача поиска таких параметров управления объектом, которые в процессе выхода на установившийся режим в условиях технологических и энергетических ограничений обеспечивают эффективный в определенном смысле выход на установившийся режим нагрева с требуемым конечным температурным распределением заготовки на выходе из нагревателя. Поставленная задача решается на базе нелинейной математической модели процесса с учетом технологических и энергетических ограничений, накладываемых требованиями технологического процесса и параметрами источников питания. В процессе выхода нагревателя на установившийся режим управление осуществляется по трем каналам: путем подачи напряжения к каждой из двух секций нагревателя и к механизму перемещения заготовок. Рассмотрены варианты алгоритмов управления режимами пуска с учетом нелинейного характера ферромагнитной загрузки, приведены результаты анализа эффективности алгоритмов управления, даны рекомендации по выбору энергоэффективных алгоритмов.

Ключевые слова: *индукционный нагрев, математическая модель, источники тепла, температурное распределение, управление, эффективность.*

Задачи поиска эффективных пусковых режимов многосекционных индукционных нагревателей методического действия являются сложными в силу ряда причин. Во-первых, наличие существенных нелинейностей не позволяет использовать аналитические методы решения. В случае использования численных методов моделирования электромагнитных и тепловых процессов возникают проблемы, обусловленные неоднородностью физических свойств нагреваемых заготовок по длине нагревателя в процессе пуска [1]. Наличие нескольких автономных секций значительно усложняет поиск алгоритма управления мощностью секций в переходных режимах работы, в частности при пуске нагревателя. Задача управления переходными режимами в общей постановке состоит в поиске такого алгоритма управления нагревателем, который обеспечивал бы перевод нагревателя на установившийся режим нагрева с минимальными экономическими издержками [2]. Эти издержки обусловлены непроизводительными затратами электроэнергии на нагрев некондиционных заготовок, простоем деформирующего оборудования, связанным с принципиальной невозможностью выдачи загото-

Александр Иванович Данилушкин (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электро-снабжение промышленных предприятий».

Алексей Павлович Мостовой, аспирант.

вок с требуемым по технологии теплосодержанием сразу после включения нагревателя, установкой дополнительного оборудования, необходимого для согласования параметров индукционной системы с источниками питания в переходных режимах, и т. д. Учитывая сказанное, выбор алгоритма управления переходными режимами многосекционного нагревателя необходимо осуществлять исходя из конкретных требований к показателям переходных режимов.

Задача управления переходными режимами многосекционного индукционного нагревателя может быть сформулирована как задача поиска таких параметров управления объектом, которые в процессе выхода на установившийся режим в условиях технологических и энергетических ограничений могут обеспечить эффективный в определенном смысле выход на установившийся режим нагрева с требуемым конечным температурным распределением заготовки на выходе из нагревателя [3]. Такая формулировка задачи управления приводит к необходимости многократного решения поисковых задач расчета управляющих воздействий, обеспечивающих требуемые показатели эффективности процесса управления в переходных режимах.

Рассматриваемые в настоящей работе нагревательные индукционные двухсекционные установки методического действия для нагрева ферромагнитных заготовок относятся к наиболее сложным объектам. Процесс нагрева описывается системой нелинейных уравнений электромагнетизма и теплопроводности [4]. Нелинейность обусловлена сложным характером зависимости коэффициентов теплопроводности, теплоемкости, удельного сопротивления, магнитной проницаемости от температурного распределения. В нагревателе одновременно находятся несколько заготовок, причем количество заготовок в каждой секции нагревателя может не совпадать. Это обусловлено различными причинами, прежде всего наличием разных по уровню предельных значений удельной мощности нагрева для секций, работающих на различных частотах. Задача поиска энергоэффективного алгоритма управления переходными режимами двухсекционного методического индукционного нагревателя решается на базе нелинейной математической модели процесса с учетом технологических и энергетических ограничений, накладываемых требованиями технологического процесса и параметрами источников питания. В качестве технологических ограничений рассматриваются максимальная температура нагрева, перепад температур по объему изделия, скорость нагрева, в качестве энергетических – удельная мощность нагрева, ток источника питания, коэффициент мощности и др.

Процесс индукционного нагрева ферромагнитной загрузки описывается системой уравнений вида [5]

$$\frac{\partial(\mu_a(H(r, x, t), T)H(r, x, t))}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{1}{\sigma(T)} \frac{\partial H(r, x, t)}{\partial r} \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\sigma(T)} \frac{\partial H(r, x, t)}{\partial x} \right] = 0; \quad (1)$$

$$\alpha \frac{\partial H(0, x, \tau)}{\partial r} = 0;$$

$$H(R, L, t) = u(\tau) f(H, t);$$

$$c(T)\gamma \frac{\partial T(r, x, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(T)r \frac{\partial T(r, x, t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T(r, x, t)}{\partial x} \right] + \frac{1}{c(T)\gamma} W(r, x, t, \xi(T)); \quad (2)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T(r, x, t)}{\partial t} \Big|_{x=0} = \alpha [T(r, 0, t) - T_1(r, 0, t)] + \varepsilon \left[\left(\frac{T(r, 0, \tau)}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1(r, 0, \tau)}{100} \right)^4 \right]; \quad (3)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(r, L, t)}{\partial t} \Big|_{x=L} = \alpha [T(r, L, t) - T_2(r, L, t)] + \varepsilon \left[\left(\frac{T(r, L, \tau)}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1(r, L, \tau)}{100} \right)^4 \right]; \quad (4)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(r, x, t)}{\partial t} \Big|_{x=R} = \alpha_1(T) [T(R, x, t) - T_1(R_1, x, t)] + \varepsilon_1 \left[\left(\frac{T(R, x, t)}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1(R, x, t)}{100} \right)^4 \right]; \quad (5)$$

$$\frac{\partial T(0, x, t)}{\partial r} = 0; \quad (6)$$

$$T(r, x, 0) = T_0(r, x); \quad (7)$$

$$r \in [0, R]; \quad x \in [0, L].$$

Здесь H – вектор напряженности магнитного поля;

$\sigma(T)$ – электропроводимость;

μ_a – магнитная проницаемость;

T – температура;

t – время;

$\lambda(r, x, T)$ – удельная теплопроводность;

$c(r, x, T)$ – удельная теплоемкость;

γ – плотность нагреваемого металла;

α – коэффициент теплообмена;

ε – коэффициент лучеиспускания;

R – радиус цилиндра;

L – длина заготовки;

$W_n(r, x, \xi(T), t)$ – функция распределения внутренних источников тепла;

$\xi(T)$ – глубина проникновения тока.

Всего в нагревателе одновременно находится n заготовок.

Численный расчет электромагнитных и тепловых полей в системе «индуктор – металл» производится совместно в программном комплексе Comsol 3.5, который позволяет задавать в магнитной задаче зависимость всех параметров от температуры [6]. Расчет внутренних источников тепла осуществляется на основе уравнений для векторного магнитного потенциала A и скалярного электрического потенциала U :

$$\begin{aligned} \operatorname{rot}(\mu^{-1} \cdot \operatorname{rot} A) &= J + \operatorname{rot} H; \\ J &= g \cdot \operatorname{grad} U - g \cdot \partial A / \partial t, \end{aligned} \quad (8)$$

где μ^{-1} – тензор, обратный тензору магнитной проницаемости;

g – электропроводимость;

J – полный ток.

В соответствии с уравнением (8) полный ток в проводнике может рассматриваться как сумма стороннего тока, вызванного приложенным извне напряжением, и вихревого тока, индуцированного переменным магнитным полем:

$$J = J_{стор.} + J_{вихр.}, \quad (9)$$

где $J_{стор.} = -g \cdot \text{grad } U$;

$J_{вихр.} = -g \cdot \partial A / \partial t$.

Результаты расчета электромагнитной задачи в виде внутренних источников тепла используются далее при решении тепловой задачи расчета температурного распределения по радиальной и аксиальной координатам заготовки на каждой позиции. Решение тепловой задачи для заготовок, находящихся в нагревателе, проводится итерационно – с пересчетом распределения объемных источников тепловыделения в электромагнитной задаче и заданием полученной картины в качестве источников для тепловой задачи. Таким способом осуществляется последовательный расчет электромагнитных и тепловых полей с обменом информацией в виде аппроксимирующих выражений для распределений температуры и внутренних источников тепловыделения.

В нестационарных режимах работы нагревателей методического действия для нагрева ферромагнитных заготовок (пуск нагревателя, смена производительности, смена номенклатуры) происходит непрерывное изменение температурного распределения в металле, а следовательно, и электрических параметров системы «индуктор – металл». Изменение электрических параметров происходит в широких пределах и при ограниченной мощности источников питания приводит к их перегрузке по току [7].

В работе исследуется процесс выхода на установившийся режим нагрева цилиндрических ферромагнитных заготовок в методическом индукционном нагревателе, состоящем из двух автономных секций с независимыми источниками питания (рис. 1).

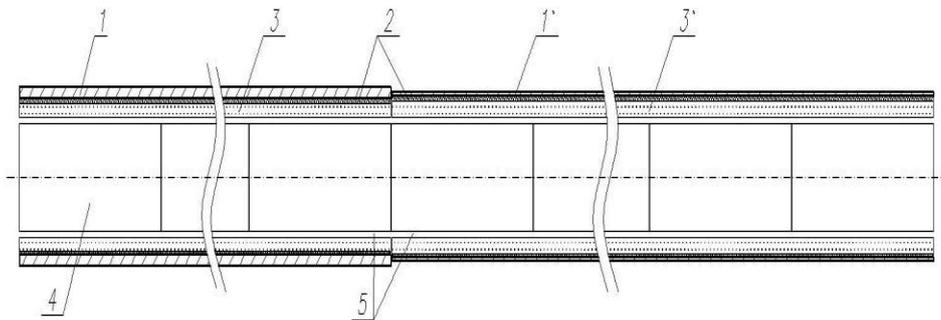


Рис. 1. Эскиз индукционного нагревателя:

1 – катушки индукторов первой и второй секций; 2 – электрическая изоляция;
3, 3' – футеровка; 4 – заготовки; 5 – направляющие

Параметры индукционного нагревателя:

– мощность первой секции – 219 кВт;

– мощность второй секции – 286 кВт;

- частота первой секции – 50 Гц;
- частота второй секции – 1000 Гц;
- производительность установки – 1800 кг/час;
- температура заготовки на выходе – 1180+100 °С;
- диаметр заготовки – 180 мм;
- длина заготовки – 350 мм.

Обычная практика выхода на установившийся режим нагрева заключается в одновременной подаче напряжения на обе секции нагревателя и включении привода перемещения заготовок через нагреватель («холодный» пуск). Пуск осуществляется при постоянном напряжении. Это приводит к перегрузке по току источника питания в процессе выхода на установившийся режим и потерям энергии на нагрев некондиционных заготовок.

Задача выбора пускового режима, обеспечивающего наилучшие энергетические характеристики в процессе выхода на установившийся режим, формулируется следующим образом.

Для объекта, описываемого системой уравнений (1) – (7) с заданными граничными и начальными условиями, требуется найти такой алгоритм управления процессом пуска, который обеспечил бы минимальные энергозатраты в процессе выхода на установившийся режим нагрева с заданным температурным распределением заготовки на выходе из нагревателя при наличии энергетических и технологических ограничений:

- максимальный перепад температур по сечению заготовки в период нагрева в области упругих деформаций (на первой стадии нагрева) – $(T_{нов} - T_{ц})_I \leq 600^{\circ}C$;

- максимальная температура наиболее нагретой точки по сечению заготовки $T_{max}(r, x, \tau_{кон}) \leq 1300^{\circ}C$;

- перепад температур между наиболее нагретой точкой и центром заготовки на выходе $(T_{max} - T_{ц}) = 150^{\circ}C$;

- максимальная активная мощность $P_{max.инд.1}(t)$, подводимая к секциям нагревателя, не должна превышать предельно допустимую мощность источника питания, $P_{max.инд.}(t) \leq P_{доп.п.}$;

- максимальный ток $I_{max.нагр.}(t)$, подводимый к секциям нагревателя, не должен превышать предельно допустимый ток источника питания, $I_{max.нагр.}(t) \leq I_{доп.п.}$.

В процессе выхода нагревателя на установившийся режим управление осуществляется по трем каналам: напряжением, подводимым к каждой секции нагревателя, и напряжением, подаваемым на механизм перемещения заготовок, причем темп подачи заготовок в нагреватель остается неизменным, управление механизмом подачи осуществляется путем выбора момента его включения в зависимости от реализуемого алгоритма.

Как показывают расчеты, при постоянстве напряжения на индукторе в процессе пуска мощность, подводимая к индуктору, увеличивается по сравнению с установившимся режимом на 35÷40 %. Это сопровождается увеличением полной мощности и тока источника питания выше его максимально допустимых значений. При этом все заготовки, находящиеся в нагревателе в момент пуска, выходят с низким теплосодержанием, не соответствующим требованиям технологии обработки на деформирующем оборудовании. Это приводит к простоям дефор-

мирующего оборудования и значительным потерям энергии на нагрев некондиционных заготовок. Общие затраты электроэнергии в пусковом режиме для нагревателя с указанными в статье параметрами – 124,2 кВт*час, потери энергии на нагрев некондиционных заготовок – 37,8 кВт*час. Время выхода на режим – 1120 сек, количество некондиционных заготовок – 7. В связи с этим встает вопрос выбора такого режима пуска, который обеспечит минимальные энергозатраты в процессе пуска при выполнении всех ограничений, накладываемых на энергетические и технологические параметры системы «источники питания – нагреватель».

Рассмотрим результаты исследований различных вариантов пуска двухсекционного нагревателя методического действия:

1. Пуск нагревателя с одновременным включением механизма подачи заготовок.
2. Пуск нагревателя с ограничением по мощности источника питания.
3. Пуск нагревателя из режима термостатирования второй секции.
4. Пуск нагревателя с выходом из режима термостатирования обеих секций.
5. Пуск нагревателя с балластными заготовками во второй секции.
6. Пуск нагревателя с балластными заготовками во второй секции и одной балластной заготовкой в первой секции.

В таблице приведены сравнительные характеристики пусковых режимов. На практике при нагреве крупногабаритных заготовок в методическом нагревателе иногда используют в качестве первой загрузки так называемые «балластные» заготовки, имеющие те же размеры, что и реальные заготовки, но другие свойства. Они должны быть немагнитными и иметь удельное сопротивление, близкое к удельному сопротивлению реальных заготовок в горячем режиме. В этом случае пуск нагревателя аналогичен пуску из режима термостатирования с той лишь разницей, что здесь не требуется время на нагрев заготовок во второй секции до температуры, соответствующей требуемой по технологии, т. е. после загрузки во вторую секцию «балластных» заготовок можно одновременно подавать напряжение на обе секции и включать механизм подачи.

Сравнительные характеристики пусковых режимов

Вариант пуска	Затраты эл. энергии в пусковом режиме, Вт*час	Потери эл. энергии на нагрев некондиционных заготовок, кВт*час	Время выхода на установившийся режим, сек	Кол-во некондиционных заготовок, шт.	Регулируемая емкость
1	124,2	37,8	1120	7	Требуется
2	108,2	33,8	1120	7	Требуется
3	151,6	25,7	2200	3	Требуется
4	162,6	18,3	2060	2	Требуется
5	116,7	28,3	1120	6	Не требуется
6	113,1	26,7	1120	6	Не требуется

Такая первоначальная загрузка создает имитацию установившегося режима нагрева. Электрические параметры системы «индуктор – металл» в этом случае незначительно отличаются от установившегося режима. Графики изменения ос-

новых электрических величин для первой и второй секций приведены на рис. 2 и 3.

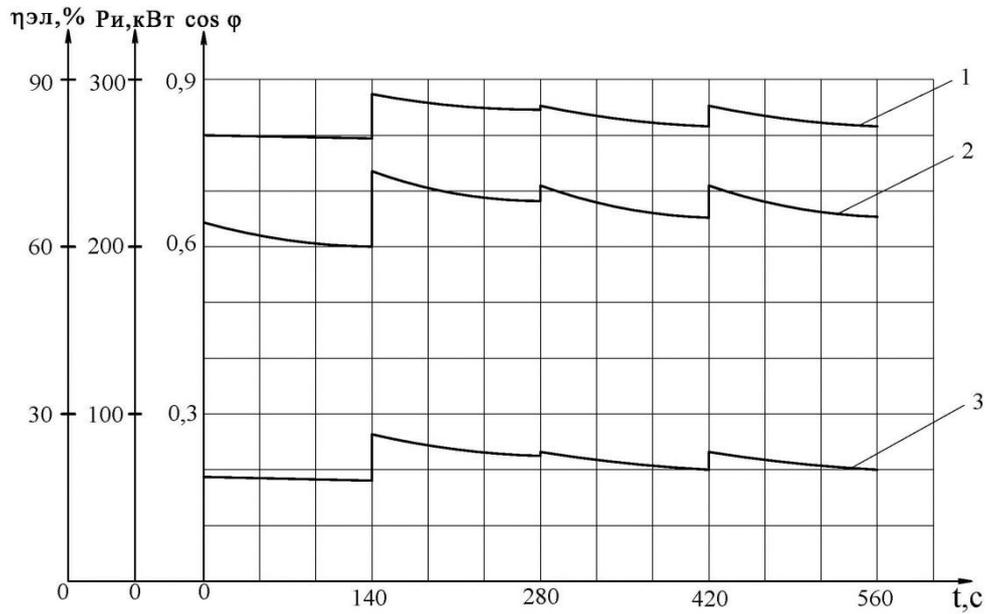


Рис. 2. Энергетические характеристики первой секции в процессе пуска:

- 1 – активная мощность, подведенная к индуктору $P_{и}$, кВт;
- 2 – электрический КПД индуктора $\eta_{эл}$, %;
- 3 – $\cos \phi$ индуктора

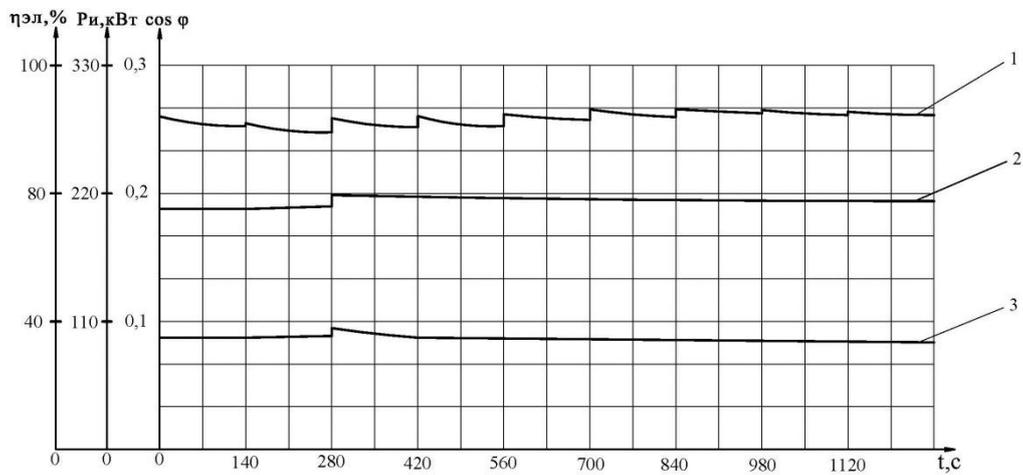


Рис. 3. Энергетические характеристики второй секции в процессе пуска:

- 1 – активная мощность, подведенная к индуктору $P_{и}$, кВт;
- 2 – электрический КПД индуктора $\eta_{эл}$, %;
- 3 – $\cos \phi$ индуктора

Этот режим оказывается наиболее эффективным и с точки зрения согласования параметров нагревателя в пусковом режиме с параметрами источника питания, т. к. имеет минимальные колебания напряжения, электрических параметров нагревателя и коэффициента мощности. Общие затраты электроэнергии в этом

пусковом режиме – 113,1 кВт*час, потери энергии на нагрев некондиционных заготовок – 26,7 кВт*час. Время выхода на режим – 1120 сек, количество некондиционных заготовок – 6.

Таким образом, как следует из сравнительного анализа рассмотренных вариантов, в зависимости от конкретных условий технологического процесса, требований к качественным показателям процесса можно рекомендовать следующие варианты пусковых режимов: при частых пусках из «холодного» состояния, например при мелкосерийном производстве, частой смене номенклатуры обрабатываемых изделий, смене производительности электрические параметры системы «индуктор – металл» (электрическое сопротивление, коэффициент мощности) изменяются в широких пределах, что приводит к перегрузке источников питания в процессе выхода на установившийся режим, дополнительным потерям электроэнергии и увеличению времени выхода на установившийся режим. В большей степени этот эффект сказывается на характеристиках второй секции нагревателя. Для уменьшения этого негативного эффекта необходимо обеспечить в процессе пуска постоянное значение коэффициента мощности нагрузки за счет введения в силовую цепь нагревателя дополнительного оборудования в виде регулируемой части компенсирующей емкости с коммутирующей аппаратурой. Однако более эффективным в этом случае представляется вариант с использованием «балластных» заготовок, с помощью которых можно исключить необходимость настройки колебательного контура нагрузки в резонанс путем введения регулируемой части емкости. Такой алгоритм управления обеспечивает минимальные затраты электроэнергии в пусковом режиме и минимум некондиционных заготовок.

При обработке крупных партий заготовок одной номенклатуры более частыми являются кратковременные остановки оборудования без отключения нагревателя. В этом случае экономически целесообразным является пуск нагревателя из режима термостатирования второй секции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данилушкин А.И., Кожемякин А.В., Князев С.В. Математическая модель процесса методического индукционного нагрева цилиндрических заготовок // Энергетика, информатика, инновации – 2011: Сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Т. 2. – Смоленск: РИО филиала ГОУВПО МЭИ (ТУ), 2011. – Стр. 41-44.
2. Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. – М.: Металлургия, 1993. – 279 с.
3. Данилушкин А.И., Плешивцева Ю.Э. Оптимизация переходных режимов работы объектов технологической теплофизики с дискретно-распределенными управляющими воздействиями // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. V Междунар. конф. / Под ред. В.П. Мясникова, Н.А. Кузнецова, В.А. Витиха. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2003. – С. 155-162.
4. Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Кожемякин А.В. Моделирование электротепловых процессов и оптимизация конструкции двухчастотной индукционной установки // Индукционный нагрев. – 2013. – № 1 (23). – С. 42-45.
5. Данилушкин А.И., Кожемякин А.В., Мостовой А.П. Исследование режима нагрева ферромагнитных заготовок в двухчастотном индукционном нагревателе дискретно-непрерывного действия // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – № 3 (72). – С. 111–117.
6. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Версия 5.7. – С-Пб.: Производственный кооператив TOP, 2009.
7. Данилушкин А.И., Князев С.В., Макаров А.П. Оптимизация пусковых режимов индукционных нагревателей дискретно-непрерывного действия // Современные инновации в науке и технике: Мат-лы III Междунар. науч.-практ. конф. – Курск, 2013. – С. 47-50.

Статья поступила в редакцию 5 сентября 2014 г.

ANALYSIS OF EFFECTIVENESS OF STARTING MODES OF TWO-SECTION METHODOLOGICAL ACTION INDUCTION HEATER

A.I. Danilushkin, A.P. Mostovoy

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

This paper deals with the ways to improve the efficiency of control of non-stationary operation modes of two-section methodical action induction heater. The problem of control of transient modes of multi-section induction heater is defined as searching for object control parameters which, during the transition to stationary mode in conditions of technological and power limitations, would provide effective (to some extent) transition to the stationary heating mode with required final temperature distribution of a workpiece leaving the heater. This problem is solved on the basis of non-linear mathematical model of the process considering technological and power limitations and parameters of power source. During the transition to the stationary mode, the heater is controlled through three channels: voltage applied to each section of the heater and voltage applied to the workpiece transfer mechanism. Different types of starting mode control algorithms considering the non-linear nature of ferromagnetic loading are analyzed, recommendations for choosing the power-efficient algorithms are given.

Keywords: *induction heating, mathematical model, a heat source, the temperature distribution, management, efficiency.*

*Alexander I. Danilushkin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Aleksey P. Mostovoy, Postgraduate Student.*