



УДК 622.323: 621.313

DOI: 10.17673/Vestnik.2021.03.21

А. И. ДАНИЛУШКИН
В. А. ДАНИЛУШКИН

ОПТИМИЗАЦИЯ СТАЦИОНАРНЫХ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛА

**OPTIMIZATION OF STATIONARY AND TRANSITIONAL OPERATING MODES
OF THE ELECTRICAL COMPLEX IN METAL PROCESSING LINE**

В электротехническом комплексе «индукционный нагреватель – деформирующее оборудование» ограничивающим производителем производительности комплекса звеном является индукционная нагревательная установка. В связи с этим важной задачей повышения эффективности обрабатываемого комплекса является оптимизация как конструктивных, так и режимных параметров индукционной нагревательной установки. Показано, что основным конструктивным параметром, влияющим на энергетические характеристики комплекса, является длина нагревательной системы. При оптимизации общей длины нагревателя используется итерационная модель процесса индукционного нагрева ферромагнитных заготовок. Алгоритм распределения мощности по длине двухсекционного нагревателя представляет собой кусочно-непрерывную функцию. Оптимизация длины нагревателя по предложенной методике позволила сократить длину нагревателя с 2,8 до 2,1 м, т. е. на 25 %. Для поиска эффективных алгоритмов управления нестационарными режимами в работе предлагается уточненная электротепловая модель. Она учитывает нелинейную зависимость распределения мощности источников внутреннего тепловыделения от температурного распределения в металле заготовок по радиальной и аксиальной координатам. Сформулирована и решена задача поиска оптимального управления переходными

In the electrical complex “induction heater - deforming equipment”, the limiting performance of the complex is the induction heating unit. In this regard, an important task of increasing the efficiency of the processing complex is to optimize both the design and operating parameters of the induction heating unit. It is shown that the main design parameter influencing the energy characteristics of the complex is the length of the heating system. When optimizing the total length of the heater, an iterative model of the process of induction heating of ferromagnetic billets is used. The power distribution algorithm along the length of a two-section heater is a piecewise continuous function. Optimization of the heater length according to the proposed method made it possible to reduce the heater length from 2.8 m to 2.1 m, i.e. by 25%. To search for effective control algorithms for non-stationary modes, a refined electrothermal model is proposed in the work. It takes into account the nonlinear dependence of the distribution of the power of the sources of internal heat release on the temperature distribution in the metal of the workpieces along the radial and axial coordinates. The problem of finding the optimal control of transient modes of a two-section induction heater of methodical action is formulated and solved. The results obtained provide a minimum of energy consumption for heating billets in transient modes under conditions of technological and energy constraints. Variants of starting the heater at various initial temperature states of the load

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00212 А

режимами двухсекционного индукционного нагревателя методического действия. Полученные результаты обеспечивают минимум энергозатрат на нагрев заготовок в переходных режимах в условиях технологических и энергетических ограничений. Рассмотрены варианты пуска нагревателя при различных исходных температурных состояниях загрузки. Приведены результаты сравнительного анализа эффективности полученных алгоритмов управления. Предложена структура системы электроснабжения и управления индукционным нагревательным комплексом.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, индукционный нагрев, математическая модель, температурное распределение, энергоэффективность, алгоритмы управления

На машиностроительных и металлургических предприятиях для производства изделий методом горячего прессования используются многосекционные индукционные комплексы, состоящие из нагревательных модулей с автономными источниками питания и системы управления, контроля и регулирования [1, 2]. Суммарная мощность комплекса достигает 1000 кВт, что составляет значительную часть установленной мощности цеховой подстанции. В современных условиях развития производства большое значение приобретает задача повышения технико-экономических показателей энергопотребителей. Задача усложняется необходимостью обеспечивать оперативное управление потребляемой мощностью комплекса в нестационарных режимах работы, таких как смена номенклатуры изделий, пуск нагревателя при различных начальных состояниях загрузки [2–5]. Необходимую гибкость технологического процесса, позволяющего эффективно управлять режимом работы, можно обеспечить лишь при решении задачи поиска оптимальных конструктивных и режимных параметров комплекса.

Задачу оптимального проектирования конструктивных и режимных параметров электротехнического комплекса, состоящего из секционированных индукторов с автономными источниками питания, можно сформулировать следующим образом: необходимо найти такие значения основных конструктивных характеристик индукционного комплекса, которые при его последующем функционировании обеспечивают достижение наилучших значений выходных критериев эффективности в условиях заданных ограничений и требований к конечному температурному состоянию объекта нагрева [6, 7].

Таким образом, достижение эффективного решения обеспечивается применением

are considered. The results of a comparative analysis of the effectiveness of the obtained control algorithms are presented. The structure of the power supply and control system of the induction heating complex is proposed.

Keywords: electrical complex, induction heating, mathematical model, temperature distribution, energy efficiency, control algorithms

совместного проектирования конструктивных и режимных параметров комплекса.

Основными технико-экономическими показателями работы, отражающими качество и эффективность нагрева, являются такие параметры, как максимальное приближение температурного поля к технологической инструкции и энергетические показатели в виде коэффициента полезного действия и коэффициента мощности.

На распределение температуры по объему заготовок влияют различные факторы – как конструктивные, так и режимные. Для исследуемого объекта методического нагрева основной технологической задачей является формирование требуемого температурного распределения по объему нагреваемого изделия на выходе из нагревателя. Кроме технологических требований к температурному распределению, необходимо обеспечить энергоэффективность процесса и согласование изменяющихся в процессе нагрева параметров комплекса с системой электроснабжения [8, 9].

Таким образом, задача разработки энергоэффективного индукционного комплекса заключается в нахождении таких конструктивных и режимных параметров, которые обеспечивают заданное температурное распределение и высокую эффективность с учетом неизбежных в реальных условиях эксплуатации ограничений. К ним относятся функциональные ограничения, накладываемые источниками питания, условиями электромагнитной совместности, технологией и безопасностью.

Перечисленные выше требования качества и эффективности не всегда возможно обеспечить путем решения совместной задачи проектирования и управления. Значительно упрощает решение поставленной задачи возможность деления её на две самостоятельные

задачи. Вначале решается задача оптимизации конструктивных параметров, обеспечивающих минимум массогабаритных показателей комплекса, коэффициента полезного действия, коэффициента мощности и др. На втором этапе решается задача оптимизации режимных параметров – минимум энергозатрат на нагрев в переходных режимах функционирования, минимум времени перехода с одного режима

на другой и оптимальные динамические показатели переходного процесса.

В качестве конструктивного параметра, влияющего на технико-экономические показатели комплекса, рассматривается длина нагревательной системы [9,10].

Задача на минимум длины двухчастотного нагревателя формулируется следующим образом [5, 6].

Для объекта, описываемого уравнениями вида

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

требуется определить минимальную общую длину двухсекционного нагревателя при выполнении основного технологического требования – обеспечения заданного конечного температурного состояния металла на выходе из нагревателя

$$T(r,x,t) = T_{зад}(r,x).$$

При этом необходимо учитывать следующие ограничения:

- на удельную поверхностную мощность первой секции индуктора $0 \leq p_1 \leq p_{1max}$ кВт/м²;
- на удельную поверхностную мощность второй секции индуктора $0 \leq p_2 \leq p_{2max}$ кВт/м²;
- на максимальный перепад температур по сечению загрузки в период нагрева в области упругих деформаций (на первой стадии нагрева) $-(T_{нов} - T_{ц})_I \leq \Delta T_{I'}$ °С;

- на максимальную температуру по сечению загрузки $T(r,x,\tau_{кон}) \leq \Delta T_{max'}$ °С;

- на перепад температур между наиболее нагретой точкой и центром загрузки на выходе из нагревателя $-(T_{max} - T_{ц})_I = \Delta T_{дон}$.

Темп перемещения заготовок через нагреватель, а следовательно, и время нагрева определяются темпом работы деформирующего оборудования.

Максимальный перепад температур по сечению загрузки в период нагрева в области упругих деформаций (на первой стадии нагрева) и предельное значение температуры поверхности загрузки на выходе из нагревателя определяются технологическими требованиями.

В качестве начального условия рассматривается температурное распределение загрузки на входе в первую секцию нагревателя

$$T(r,x,t) = T(r,x,0) = T_0(r,x).$$

Фазовое ограничение на температурное распределение загрузки в конце нагрева записывается в виде

$$T_{\max}(r, x, t) = \max T(r, x, t) \leq \Delta T_{\text{дон.}}$$

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

$$0 \leq t \leq t_k$$

Точность приближения результирующего температурного распределения к требуемому оценивается по величине максимального отклонения температуры по объему заготовки в конце нагрева.

В качестве переменных величин рассматриваются удельная поверхностная мощность первой секции нагревателя, удельная поверхностная мощность второй секции нагревателя, частота питающего напряжения.

Базовая постановка задачи оптимизации длины нагревателя и её решение рассмотрены на примере конкретной задачи минимизации общей длины двухсекционного индукционного нагревателя методического действия для нагрева мерных стальных ферромагнитных заготовок до температур пластической деформации (Рис. 1).

Параметры загрузки приведены в табл. 1.

Технологические требования к режиму нагрева:

- на выходе из индуктора средняя температура заготовки должна быть $T = 1180 \pm 50$ °С;
- удельная поверхностная мощность первой секции индуктора $0 \leq p_{1\max} \leq 400$ кВт/м²;
- удельная поверхностная мощность второй секции индуктора $0 \leq p_{2\max} \leq 2500$ кВт/м²;

– максимальный перепад температур по сечению заготовки в период нагрева в области упругих деформаций (на первой стадии нагрева) – $(T_{\text{нос}} - T_{\text{ц}}) \leq 600$ °С.

– максимальная температура наиболее нагретой точки по сечению заготовки $T_{\max}(r, x, \tau_{\text{кон}}) \leq 1300$ °С;

Для реализации методики оптимального проектирования индукционного нагревателя используется алгоритм последовательного решения задачи оптимизации с улучшением требуемых показателей на каждой итерации [11, 12].

При оптимизации общей длины нагревателя используется итерационная модель процесса двухчастотного индукционного нагрева ферромагнитных заготовок. В процессе поиска оптимума на каждой итерации происходит пересчет электромагнитной задачи с учетом изменяющегося распределения температуры по объему загрузки. Процесс заканчивается, если полученное температурное распределение и оптимизируемый параметр – длина нагревателя – оказываются близкими к их значениям на предыдущем этапе.

После проверки полученных результатов на соответствие накладываемым ограничениям решение считается завершенным. Далее производится расчет интегральных параметров системы: расчет и выбор числа витков и сечения проводов катушки обоих индукторов в соответствии с выбранной частотой и напряжением источника питания и расчет системы охлаждения.

Результаты расчета электромагнитной задачи в виде внутренних источников тепла используются далее при решении тепловой задачи расчета температурного распределения по радиальной и аксиальной координатам загруз-

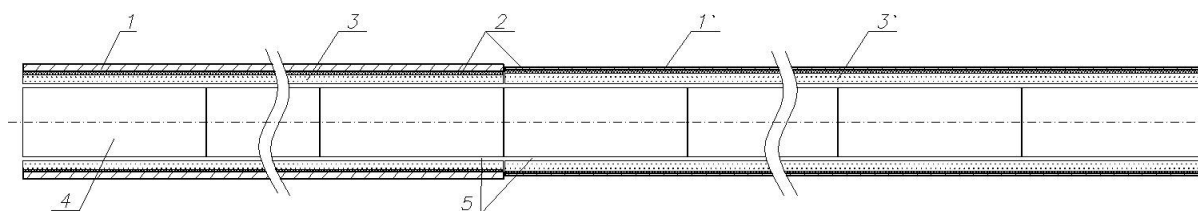


Рис.1. Эскиз двухсекционного индукционного нагревателя:

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

Таблица 1

Параметры нагреваемой загрузки

Наименование детали	Материал детали	Диаметр D, мм	Длина L, мм	Масса m, кг	Производительность П, кг/ч
Цилиндрическая загрузка	Ст19ХГНМА Ст17НЗМА Ст15НЗМА Ст14ХНЗМА	120–180	200–430	30–85	3000

ки на каждой позиции. Решение тепловой задачи проводится итерационно – с пересчетом распределения объемных источников тепловыделения в электромагнитной задаче и задании 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.

Результаты приведены на рис. 2, 3.

Как видно из приведенных результатов, оптимальная по минимуму длины индукционная система реализует режим ускоренного изотермического нагрева. Температурный перепад по радиусу на выходе из системы составляет 120 °С, что соответствует требованиям технологии горячей деформации (см. рис. 3).

Алгоритм распределения мощности по длине двухсекционного нагревателя представляет собой кусочно-непрерывную функцию. Снижение уровня мощности в каждой секции

(см. рис. 2) обусловлено необходимостью ограничить температуру загрузки предельно допустимым значением. Это сводится к определению уровня мощности на соответствующих позициях в пределах длительности интервала дискретности, т. е. сводится к выполнению условия

$$T_{\max}(r_{\max}, x_{\max}, t) \leq T_{\text{дон}}$$

где r_{\max}, x_{\max} – координаты точки с максимальной температурой.

Приведенные в качестве примера результаты получены для технологии, по которой допустимая точность нагрева составляет 150 °С.

В табл. 2 приведены сравнительные характеристики нагревателей для нагрева на частоте 1000 Гц, двухчастотного нагревателя для обычного режима нагрева и двухчастотного нагревателя минимальной длины.

Оптимизация длины нагревателя по предложенной методике позволила сократить длину нагревателя с 2,8 до 2,1 м, т. е. на 25 %.

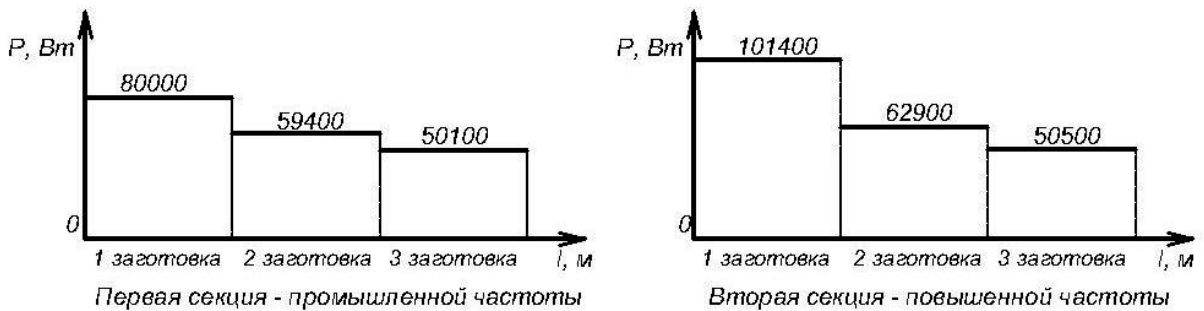


Рис. 2. Оптимальное распределение мощности по длине нагревателя

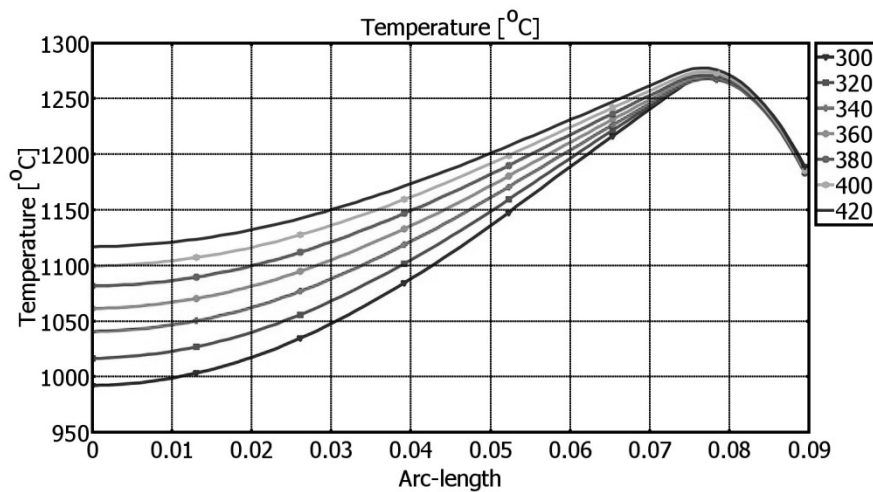


Рис. 3. Результирующее радиальное температурное распределение в загрузке на выходе из нагревателя

Таблица 2

Сравнительные характеристики нагревателей

Показатель	Одно-частотный индуктор	Двухчастотный индуктор		Двухчастотный индуктор минимальной длины	
		Индуктор промышленной частоты	Индуктор повышенной частоты	Индуктор промышленной частоты	Индуктор повышенной частоты
Частота, Гц	1000	50	1000	50	1000
Длина секции нагревателя, м	3,5	1,05	1,75	1,05	1,05
Общая длина, м	3,5	2,8		2,1	
Диаметр, м	0,23	0,22	0,23	0,22	0,23
Напряжение питания индуктора, В	800	380	800	380	800
Мощность индуктора, кВт	533	219,4	289,5	219,4	270,7
КПД электрический	0,838	0,86	0,77	0,86	0,8
КПД тепловой	0,803	0,85	0,84	0,85	0,9
Общий КПД	0,67	0,73	0,65	0,73	0,72
Коэффициент мощности	0,107	0,26	0,083	0,26	0,085

В нестационарных режимах работы нагревательной системы методического действия для нагрева ферромагнитных заготовок (пуск системы, смена производительности, смена номенклатуры) неизбежно возникает неконтролируемое отклонение температуры металла от предельно допустимых значений, что приводит к браку продукции [13–17]. Кроме того, происходит изменение электрических параметров индукционной системы в широких пределах, что при ограниченной мощности источников питания приводит к их перегрузке по току.

Существующая практика выхода на установившийся режим работы заключается в одновременной подаче напряжения на обе секции нагревателя и включения привода перемещения заготовок через нагреватель («холодный» пуск). Как показывают расчеты, при постоянстве напряжения на индукторе в процессе пуска мощность, подводимая к каждой секции индуктора, увеличивается по сравнению с установившимся режимом на 35–40 %. Это сопровождается увеличением полной мощности и тока источника питания выше его максимально допустимых значений. Отмечено, что вся нагрузка, находящаяся в нагревателе в момент пуска, выходит с низким теплосодержанием, не соответствующим требованиям технологии обработки на деформирующем оборудовании. Это приводит к простоя деформирующего обо-

рудования и значительным потерям энергии на нагрев некондиционных заготовок. Общие затраты электроэнергии в пусковом режиме для нагревателя с указанными в статье параметрами – 124,2 кВт·ч, потери энергии на нагрев некондиционных заготовок – 37,8 кВт·ч. Время выхода на режим – 1120 с. Максимальная масса некондиционных заготовок – 560 кг.

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».

Задача оптимизации 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 обеспечит бы минимальное время выхода на установившийся режим при минимальных энергозатратах.

В табл. 3 приводятся результаты исследований различных вариантов пуска двухсекционного индукционного нагревателя мощностью 500 кВт.

1. Пуск нагревателя с одновременным включением механизма подачи.

Таблица 3

Сравнительные характеристики пусковых режимов

Вариант пуска	Затраты эл. энергии в пусковом режиме, кВт·ч	Потери эл. энергии на нагрев некондиционных заготовок, кВт·ч	Время выхода на установившийся режим, с	Количество 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

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.

На рис. 4, 5 приведены графики основных электрических величин для первой и второй секций в процессе выхода на установившийся режим по оптимальному циклу.

Этот режим оказывается наиболее эффективным и с точки зрения согласования пара-

метров нагревателя в пусковом режиме с параметрами источника питания, так как имеет минимальные колебания напряжения, электрических параметров нагревателя и коэффициента мощности. Общие затраты электроэнергии в пусковом режиме – 113,1 кВт·ч, потери энергии на нагрев некондиционных заготовок – 26,7 кВт·ч. Время выхода на режим – 840 с.

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

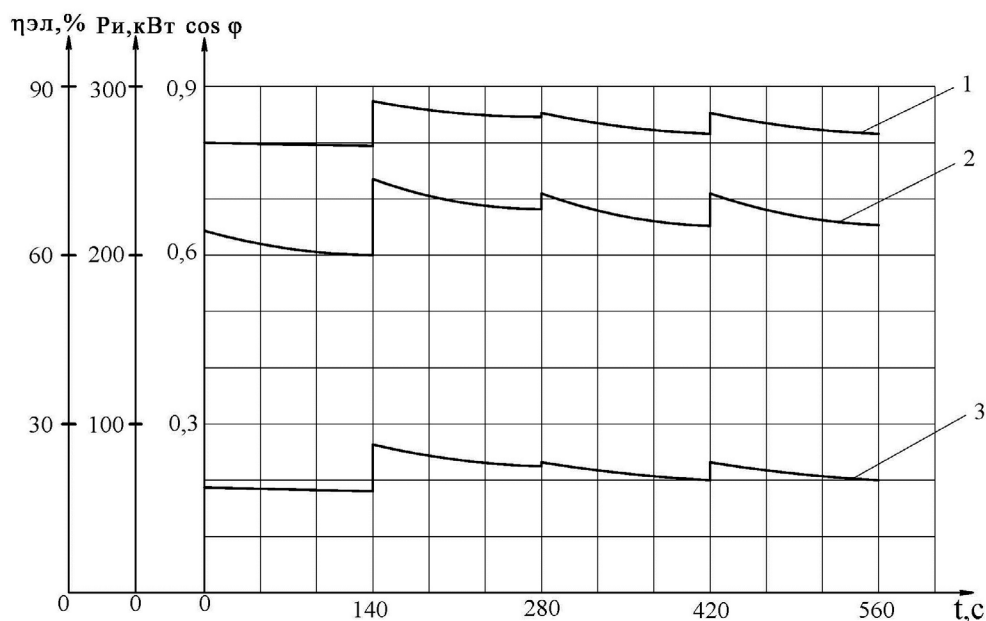


Рис. 4. Энергетические характеристики первой секции в процессе пуска:

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

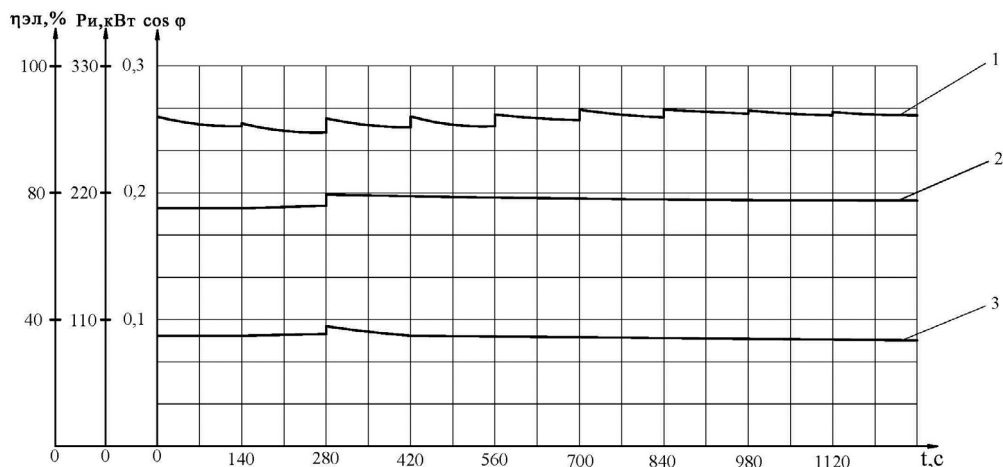


Рис. 5. Энергетические характеристики второй секции в процессе пуска:
 1 – активная мощность, подведенная к индуктору $P_{и}$, кВт;
 2 – электрический КПД индуктора $\eta_{эл}$, %; 3 – $\cos \varphi$ индуктора

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 негативно-

го 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 ёмкости с коммутирующей аппаратурой.

Принципиальная схема технологической линии нагрева металла перед обработкой на деформирующем оборудовании представлена на рис. 6. Система электроснабжения нагревательного комплекса включает в себя трансформаторную

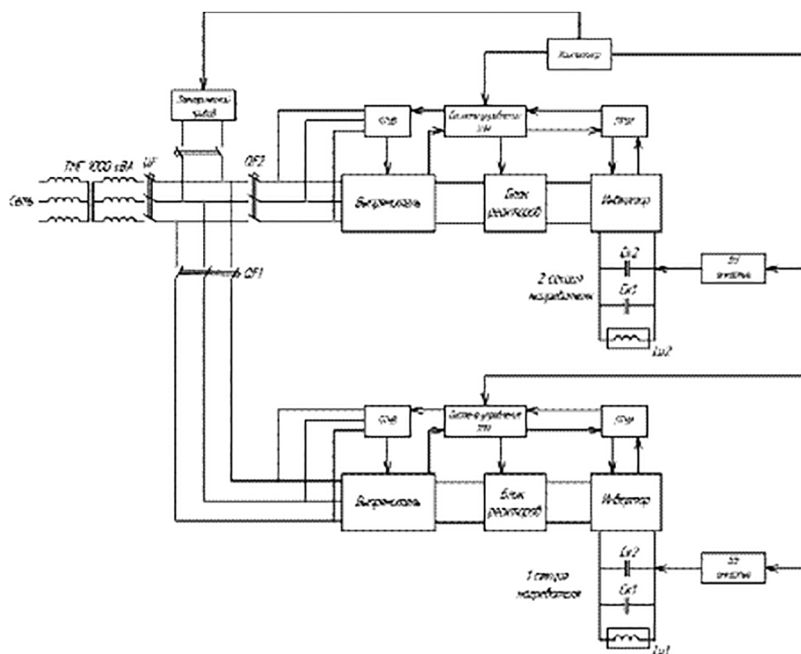


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема двухсекционной индукционной установки методического действия

подстанцию с трансформатором ТМГ мощностью 1000 кВА, коммутирующую аппаратуру, преобразователи частоты для питания секций нагревателя, блоки конденсаторных батарей, систему управления, регулирования и контроля, реализованную на микропроцессорном контроллере.

Выводы. Обзор промышленных электро-технологий нагрева металла показал, что имеются неиспользованные резервы для повышения эффективности функционирования установок индукционного нагрева в технологических процессах обработки металла давлением. Пути повышения эффективности нагревательного комплекса заключаются в улучшении массогабаритных показателей электронагревательного комплекса и оптимизации нестационарных режимов пуска или смены номенклатуры.

Методика оптимального проектирования индукционного нагревателя, минимизирующая общую длину индукционного нагревателя методического действия при наличии технологических и энергетических ограничений, реализована в виде алгоритма расчета энергетических и конструктивных параметров [11,12]. Для конкретных параметров нагревательной системы получены алгоритмы распределения мощности при минимальной длине индукционного нагревателя, обеспечивающие максимальный коэффициент полезного действия

Анализ работ, выполненных в области управления процессами методического индукционного нагрева перед обработкой на деформирующем оборудовании, показал, что существует ряд нерешенных задач в области управления нестационарными режимами многосекционных индукционных нагревателей с ферромагнитной загрузкой, снижающих эффективность индукционного нагревательного комплекса. Выполнены расчеты и проведен анализ алгоритмов управления переходными режимами двухсекционного индукционного нагревателя методического действия для наиболее часто встречающихся на практике условий пуска нагревателя с холодной загрузкой. Показано, что полученный алгоритм позволяет снизить затраты электроэнергии на пуск из холодного состояния на 18 % по сравнению с обычным способом пуска при постоянном напряжении и уменьшает время выхода на установившийся режим на 26 %. Как следует из сравнительного анализа различных способов выхода на установившийся режим, оптимальные варианты пусковых режимов зависят от конкретных условий технологического процесса, начального состояния загрузки, требований к качественным показателям процесса и определяются для каждой конкретной ситуации по предложенной методике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. М.: Металлургия, 1993. 279 с.
2. Демидович В.Б., Никитин Б.М., Иванов В.Н., Червинский В.И., Баранкова И.И. Актуальные энергосберегающие технологии индукционного нагрева в металлургии // Индукционный нагрев. 2008. № 4. С. 20–26.
3. Рапопорт Э.Я., Пleshивцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева металла. М.: Наука, 2012. М.: Наука, 2012. 219 с.
4. Кожемякин А.В. Оптимизация конструкции двухчастотного индукционного нагревателя методического действия // Вести высших учебных заведений Черноземья. Липецк: ЛГТУ, 2011. С. 46–51.
5. Данилушкин А.И., Пleshивцева Ю.Э. Оптимизация переходных режимов работы объектов технологической теплофизики с дискретно-распределенными управляющими воздействиями // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды пятой международной конференции / под ред. В.П. Мясникова, Н.А. Кузнецова, В.А. Виттиха. Самара: Самарский научный центр РАН, 2003. С. 155–162.
6. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2009. 677 с.
7. Yu.E.Pleshivtseva and E.Ya. Rapoport. The Successive Parametrization Method of Control Actions in Boundary Value Optimal Control Problems for Distributed Parameter Systems // Journal of Computer and Systems Sciences International, 2009, Vol. 48, No 3, PP. 351-362. Импактфакторжурнала Web of Science 0,191.
8. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В., Ситько П.А. Моделирование и оптимизация индукционных нагревателей мерных заготовок в кузнечном производстве // Индукционный нагрев. 2013. Вып. № 2(24). С. 15–17.
9. Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Васильев И.В. Оптимизация стационарного режима двухсекционного индукционного нагревателя // Вопросы электротехнологии. Саратов, 2017. № 1(14). С. 20–26.
10. 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. Вып. № 3. (72). С.111–117.
11. Базаров А.А. Моделирование процесса теплопроводности для задач синтеза систем управления в среде MATLAB // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2005. Вып. 33. С. 7–11.
12. Данилушкин А.И., Князев С.В., Мостовой А.П. Моделирование стационарного распределения температуры металла в проходном индукционном нагревателе // Вестник Иркутского государственного

технического университета. Иркутск, 2012. № 9(68). С. 41–46.

13. Данилушкин А.И., Мостовой А.П. Анализ эффективности пусковых режимов двухсекционного индукционного нагревателя методического действия // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. 2014. № 4 (44). С. 113–120.

14. Рапопорт Э.Я., Осипова Ю.А. Оптимизация режимов смены производительности и номенклатуры индукционной нагревательной установки методического действия по критерию суммарной потери темпа выдачи // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. 2007. № 42. С. 166–170.

15. Афиногентов А.А., Деревянов М.Ю. Эффективные стратегии функционирования производственного комплекса «нагрев – обработка металла давлением» // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2015. № 3. С. 162–167.

16. Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Кривошеев В.Е., Максимова М.А. Электротехнический модульный комплекс для нагрева вязких жидкостей в объектах трубопроводного транспорта // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10, № 2. С. 160–167. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.02.21.

17. Данилушкин А.И., Данилушкин И.А., Данилушкин В.А. Повышение эффективности электротехнического комплекса установки охлаждения газа на основе модернизации системы управления // Градостроительство и архитектура. 2019. Т.9, № 3. С. 167–174. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.03.21.

REFERENCES

1. Rapoport E. Ya. *Optimizacija processov indukcionnogo nagreva metalla* [Optimization of inductive heating of the metal processes]. Moscow, Metallurgija, 1993. 279 p.

2. Demidovich V.B., Nikitin B.M., Ivanov V.N., Chervinskiy V.I., Barankova I.I. Actual energy-saving technologies of induction heating in metallurgy. *Induktsionnyy nagrev* [Induction heating], 2008, no. 4, pp. 20–26. (in Russian)

3. Rapoport E. Ya., Pleshivtseva Yu. E. *Optimal'noye upravleniye temperaturnymi rezhimami indukcionnogo nagreva metalla* [Optimal control of temperature conditions for induction heating of metal. M., Nauka, 2012. 219 p.

4. Kozhemyakin A.V. Optimization of the design of a two-frequency induction heater of methodical action. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya* [News of the higher educational institutions of the Chernozem region], 2011, p. 46–51. (in Russian)

5. Danilushkin A.I., Pleshivtseva Yu. E. Optimization of transient operating modes of technological thermophysics objects with discretely distributed control actions. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh: Trudy pyatoy mezhdunarodnoy konferentsii* [Control and Modeling Problems in Complex Systems: Proceedings of the Fifth International Conference]. Samara, Samarskiy nauchnyy tsentr RAN, 2003, pp. 155–162. (in Russian)

6. Rapoport E. Ya. *Optimal'noye upravleniye sistemami s raspredelennymi parametrami*. [Optimal control of systems with distributed parameters]. M., Vysshaya shkola, 2009. 677 p.

7. Pleshivtseva Yu. E., Rapoport E. Ya. The Successive Parametrization Method of Control Actions in Boundary Value Optimal Control Problems for Distributed Parameter Systems. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2009, vol. 48, no. 3, pp. 351–362.

8. Demidovich V.B., Chmilenko F.V., Sit'ko P.A. Modeling and optimization of induction heaters for dimensional billets in forging. *Induktsionnyy nagrev* [Induction heating], 2013, no. 2 (24), pp. 15–17. (in Russian)

9. Danilushkin A.I., Danilushkin V.A., Vasil'yev I.V. Optimization of the stationary mode of a two-section induction heater. *Nauchno-tekhnicheskii zhurnal «Voprosy elektrotekhnologii»* [Scientific and technical journal “Electrotechnology Issues”], 2017, no. 1 (14), pp. 20–26. (in Russian)

10. Danilushkin A.I., Kozhemyakin A.V., Mostovoy A.P. Investigation of the heating mode of ferromagnetic billets in a two-frequency induction heater of discrete-continuous operation. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2013, no. 3. (72), pp. 111–117. (in Russian)

11. Bazarov A.A. Modeling the heat conduction process for the problems of synthesis of control systems in the MATLAB environment. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»* [Bulletin of the Samara State Technical University. Series “Technical Sciences”], 2005, no. 33, pp. 7–11. (in Russian)

12. Danilushkin A.I., Knyazev S.V., Mostovoy A.P. Modeling of stationary distribution temperature of the metal in the induction heater through passage. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2012, no. 9(68), pp. 41–46. (in Russian)

13. Danilushkin A.I., Mostovoy A.P. Analysis of the effectiveness of starting modes of a two-section induction heater of methodical action. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»* [Bulletin of the Samara State Technical University. Series “Technical Sciences”], 2014, no. 4 (44), pp. 113–120. (in Russian)

14. Rapoport E. Ya., Osipova Yu. A. Optimization of modes of change of productivity and nomenclature of induction heating installation of methodical action according to the criterion of the total loss of the rate of delivery. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»* [Bulletin of the Samara State Technical University. Series “Technical Sciences”], 2007, no. 42, pp. 166 – 170. (in Russian)

15. A.A. Afinogentov, M.YU. Derevyanov Effective strategies for the functioning of the production complex “heating - metal pressure treatment. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya*

«*Tekhnicheskije nauki*» [Bulletin of the Samara State Technical University. Series “Technical Sciences”], 2015, no 3, pp. 162–167. (in Russian)

16. Danilushkin A.I., Danilushkin V.A., Krivosheev V.E., Maksimova M.A. Electrotechnical Modular Complex for Heating Viscous Liquids in Pipeline Transport Facilities. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2020, Vol. 10, no. 2, pp. 160–167. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2020.02.21.

17. Danilushkin A.I., Danilushkin I.A., Danilushkin V.A. Improving the Efficiency of Electrotechnical Complex of Gas Cooling on the Basis of Modernization of Management System. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2019. Vol. 9, no. 3. pp. 167–174. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2019.03.21.

Об авторах:

ДАНИЛУШКИН Александр Иванович

доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: aidanilushkin@mail.ru

DANILUSHKIN Aleksandr I.

Doctor of Engineering Science, Associate Professor of the Power Supply of Industrial Enterprises Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: aidanilushkin@mail.ru

ДАНИЛУШКИН Василий Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: vasilydan2013@yandex.ru

DANILUSHKIN Vasilij A.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Power Supply of Industrial Enterprises Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: vasilydan2013@yandex.ru

Для цитирования: Данилушкин А.И., Данилушкин В.А. Оптимизация стационарных и переходных режимов работы электротехнического комплекса в технологической линии обработки металла // Градостроительство и архитектура. 2021. Т.11, № 3. С. 157–167. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.03.21.

For citation: Danilushkin A.I., Danilushkin V.A. Optimization of Stationary and Transitional Operating Modes of the Electrical Complex in Metal Processing Line. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2021, vol. 11, no. 3, pp. 157–167. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2021.03.21.