

УДК 621.365.511

СПОСОБ ВЫРАВНИВАНИЯ ГРАФИКА НАГРУЗКИ МОЩНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК

А.А. Базаров, А.И. Данилушкин *

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru, aidanilushkin@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы выравнивания нагрузки в цеховой системе электроснабжения, содержащей мощные электротермические установки. При эксплуатации индукционных многосекционных установок методического действия происходит циклическое изменение параметров нагрузки со значительными вариациями тока и коэффициента мощности. Наибольшие отклонения указанных параметров имеют место в переходных режимах, при пуске нагревателя или при смене номенклатуры заготовок. Показано, что при изменении нагрузки в пусковых режимах приращение мощности и снижение коэффициента мощности могут привести к недопустимым перегрузкам источника питания по току. Корректировка в процессе пуска значений токов секций и коэффициента мощности позволяет уменьшить колебания тока, обеспечить более гладкую диаграмму мощности и исключить перегрузку источника питания. Реализовать коррекцию тока и коэффициента мощности возможно при использовании полупроводниковых преобразователей частоты в каждой секции. Такой подход позволяет предотвратить снижение показателей качества напряжения и уменьшить возможные отклонения в распределении температуры по объему заготовок. В работе по результатам расчета параметров секций нагревателя в переходных режимах определены диапазоны изменения мощности, напряжения, тока и частоты, соответствующие возможностям используемых в данных установках полупроводниковых преобразователей частоты. Предложенный алгоритм пуска обеспечивает наименьшие из всех возможных вариантов колебания мощности.

Ключевые слова: индукционный нагрев, температурное распределение, нестационарные режимы, моделирование, алгоритмы управления, регулирование мощности.

Мощные индукционные установки создают значительные возмущения для системы электроснабжения в нестационарных режимах. Особенно ярко это проявляется при периодическом режиме нагрева. Однако и для более спокойного методического нагрева характерны переходные режимы при очередной выгрузке

* Базаров Александр Александрович, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий, доктор технических наук, доцент.

Данилушкин Александр Иванович, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий, доктор технических наук, профессор.

разогретых заготовок с одновременной загрузкой холодных. Такие операции сопровождаются скачкообразным уменьшением удельного электрического сопротивления по всей длине загрузки.

Вопросы режима работы потребителей электроэнергии постоянно находят отражение в трудах специалистов, так как это влияет на эффективность функционирования и производительность производственных объектов [1–6]. Здесь одинаково важны прогнозирование и оптимизация энергопотребления [1–3], а также оценка технических и экономических затрат на решение вопросов, связанных с повышением качества напряжения [4–9]. Широкое распространение преобразовательной техники создает проблемы с генерацией высших гармоник в сети [11–14].

Появление новых возможностей у систем управления качеством электроэнергии позволяет эффективнее решать вопросы мониторинга и регулирования [15, 16].

Электротехнологические процессы и установки всегда представляли сложную нагрузку для системы электроснабжения.

Особенностями таких потребителей являются наличие высших гармоник в диаграмме тока (дуговые печи, сварка, электролизное производство), резкопеременный характер работы (дуговые печи), низкий коэффициент мощности (индукционный нагрев). Использование полупроводниковой преобразовательной техники частично сглаживает некоторые проблемы, но наличие высших гармоник не устраняется [17–21].

При разработке технологического процесса индукционного нагрева используются современные средства, позволяющие определить параметры установки и алгоритм управления [22–26].

Для управления системой индукционного нагрева возможно применение замкнутых систем регулирования или программного управления. В работе рассматриваются возможности системы программного управления в процессе выхода на установившийся режим и поддержания заданных параметров. Процессы индукционного нагрева могут быть исследованы на базе мультифизических моделей, но некоторые вопросы рассматриваются отдельно, например определение параметров индуктора и настройка колебательных контуров.

Расчет параметров секций индукторов и определение частоты напряжения при настройке контура на резонанс токов

Процесс нагрева в системе «методический нагреватель – загрузка» осуществляется при дискретном во времени перемещении заготовок. Рассматриваемая индукционная система состоит из шести секций длиной 1100 мм. С учетом межсекционной изоляции общая длина нагревателя составляет 6740 мм. В индукторе одновременно находятся семь заготовок длиной 700 мм диаметром 1075 мм. Суммарная мощность нагревателя 2400 кВт. Требуемая по технологии прессования температура заготовок на выходе из нагревателя составляет 500 °С при допустимом отклонении ± 30 °С.

При дискретном перемещении происходит циклическое изменение параметров системы. Из-за низкого естественного коэффициента мощности индуктора отклонения параметров индуктора в процессе перемещения заготовок с одной позиции на другую приводят к значительному увеличению тока, потребляемого контуром, что может привести к перегрузке источников питания. Чтобы не завышать мощность источников питания, необходимо производить настройку час-

тоты для выполнения равенства емкостного тока конденсаторной батареи и реактивной составляющей тока индуктора. Вариант с регулированием емкости конденсаторной батареи уступает по качеству регулирования, так как требуется большое число коммутирующих элементов, а шаг дискретизации ограничен минимальным значением емкости подстроечного конденсатора.

Использование в качестве автономных источников питания транзисторных преобразователей частоты наряду с автоматической настройкой контура в резонанс дополнительно позволяет решить проблему симметрирования нагрузки между фазами, так как каждый преобразователь подключен к трехфазной сети.

Увеличение температуры в каждой заготовке в процессе нагрева приводит к росту удельного сопротивления, что сказывается на глубине проникновения тока и отражается на величине индуктивности заготовки. Таким образом, одновременно происходит изменение мощности тепловыделения в заготовке и импеданса секции индуктора.

Схема расположения цилиндрических заготовок в многосекционном индукционном нагревателе методического нагрева представлена на рис. 1. Нагреватель состоит из шести секций. Заготовки, находящиеся в нагревателе, перемещаются дискретно. Между индуктором и заготовкой предусмотрена тепловая изоляция.



Рис. 1. Расположение заготовок и секций индуктора

Температурный режим заготовок для каждой секции нагревателя в зависимости от марки сплава приведен в табл. 1. Нумерация секций нагревателя принята от выхода ко входу.

Таблица 1

Температурный режим заготовок, град.

Температура нагрева заготовок	Индуктор 1	Индуктор 2	Индуктор 3	Индуктор 4	Индуктор 5	Индуктор 6
460–510	500	465	460	350	250	150
410–460	450	420	410	320	230	130
360–410	400	375	360	270	190	100

Мультифизическая нелинейная модель

Модели электромагнитной и тепловой задач формулируются в виде дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\nabla^2 \{\bar{A}\} - j\omega\sigma(T)\{\bar{A}\} - \{\bar{J}\} = 0; \quad (1)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (-k \nabla T) - \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = Q. \quad (2)$$

Здесь: \bar{A} – векторный магнитный потенциал; σ – удельная электропроводность материала; \bar{J} – вектор плотности тока; ρ – плотность материала; C_p – удельная теплоемкость; k – коэффициент теплопроводности; \mathbf{u} – вектор скорости перемещения заготовок; Q – плотность мощности тепловыделения.

Уравнения (1), (2) дополняются граничными условиями.

Для электромагнитной задачи (1) в качестве граничных условий принимается равенство нулю векторного магнитного потенциала на границе расчетной области:

$$A_\varphi = A_{0\varphi}. \quad (3)$$

На линии осевой симметрии граничное условие задается в виде равенства нулю производной функции магнитного потенциала.

Для тепловой задачи в соответствии с геометрической моделью, изображенной на рис. 1, рассматриваются два варианта теплообмена: для торцевой поверхности заготовки плотность теплового потока определяется соотношением

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = \varepsilon \sigma_0 (T_3^4 - T_{oc}^4) + h (T_3 - T_{oc}). \quad (4)$$

Влияние потоков с поверхности футеровки практически отсутствует, так как заглубление заготовки в индуктор мало.

Теплообмен боковой поверхности заготовок с поверхностью футеровки осуществляется в основном за счет потоков излучения:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = \varepsilon \sigma_0 (T_3^4 - T_{\phi 1}^4). \quad (5)$$

В уравнениях (1), (2) правая часть содержит источники тепла. Связь между процессами обеспечивается через электропроводность в уравнении (1), зависящую от температуры, и через источники тепла в уравнении (2). После преобразований исходные уравнения (1) – (5) приводятся к конечному виду систем алгебраических уравнений, которые для совместной задачи объединяются:

$$\begin{cases} [\tilde{K}_I] \{T\} = \{Q_I\}; \\ [\tilde{K}_T] \{T\} = \{Q_T\}. \end{cases} \quad (6)$$

Система алгебраических уравнений (6) для нестационарной нелинейной задачи требует многократного решения на каждом шаге по времени.

При задании свойств областей в электромагнитной задаче для заготовок используется аппроксимирующее выражение для расчета электропроводности с подобранными параметрами, соответствующими свойствам сплава Д16:

$$g = 2 \cdot 10^7 (1 - (T - 273) \cdot 0,001) \text{ См}. \quad (7)$$

При нагреве автоматически производится пересчет электропроводности в зависимости от температуры T , определяемой в тепловой задаче.

По результатам расчета параметров индуктора в диапазоне заданных для каждой секции температур в заготовках, находящихся в индукторе, определены значения мощности, напряжения, тока, позволяющие оценить параметры индуктора.

Согласно заданному по длине индуктора распределению температуры в заготовках выполнен расчет параметров секций индуктора для значений тока (на-

пряжения) и частоты, соответствующих возможностям преобразователя частоты мощностью 400 кВт. Для сравнения расчеты сделаны для начального и конечного значений температуры заготовки в каждой секции.

В работе рассматривается процесс пуска нагревателя при нагреве заготовок из сплава Д16. Температурный режим для каждой секции приведен в табл. 1. Размеры заготовки: диаметр 1075 мм, длина 900 мм. Размеры секции нагревателя: диаметр 1175 мм, длина 1100 мм.

Конечная температура заготовки на выходе из индуктора принята равной 500 градусам, что соответствует первому варианту в табл. 1. Число заготовок в индукторе согласно рис. 1 равно семи, так как их длина меньше длины секции. Изначально все секции пустые, и напряжение на них не подано. Заготовки загружаются по очереди, начиная с седьмой. После включения шестой секции и нагрева седьмой заготовки до заданной температуры, равной 150 градусам, происходит перемещение заготовки на одну позицию, а ее место занимает очередная загружаемая в индуктор. Одновременно происходит включение пятой секции. Время нагрева заготовки в неподвижном состоянии на каждой позиции в индукторе обозначено как время интервала. Эта величина не изменяется в процессе пуска и при переходе к установившемуся режиму. Корректировка происходит только в случае изменения типа заготовок.

Требуемое распределение температуры в заготовке на выходе из индуктора может быть достигнуто при различной длительности интервала нагрева. Это отражается на общем времени нагрева одной заготовки, но может быть обосновано при необходимости смены типа заготовок. В рассматриваемой работе величина интервала нагрева для большей части расчетов принята равной 1000 с.

Результаты расчетов представлены в табл. 2. В процессе нагрева изменяются параметры секций, в том числе и коэффициент мощности. Собственная частота контура нагрузки становится отличной от частоты источника питания. Самые большие отклонения частоты от исходного значения, равного 50 Гц, не превышают 0,7 Гц для пятой и шестой секций индуктора. В связи с небольшим диапазоном температур токи секций индуктора и коэффициенты мощности при подборе частоты изменяются мало. Однако в абсолютном выражении приращение токов достигает 850А для шестой секции, что для преобразователя частоты является недопустимой перегрузкой.

При моделировании электротепловой задачи предусмотрена процедура дискретного перемещения заготовок. Так как используемое программное обеспечение не позволяет осуществить полноценное движение, то выполнена имитация движения с переносом физических свойств и значений температуры от одних подобластей к другим. Кроме того, используется дискретное изменение теплопроводности контактных слоев, а также «включение» или «отключение» источников тепловыделения в заготовке с помощью встроенных функций, являющихся аппроксимацией ступенчатой функции (функции Хевисайда).

При моделировании пуска нагревателя предусмотрено несколько этапов. Во время пуска установившееся распределение температуры и распределение значений теплофизических свойств заготовок достигается только после прохождения заготовкой всех секций, то есть через семь интервалов. До этого момента времени наблюдаются отклонения параметров индуктора, которые нужно компенсировать. Для этого в определенные моменты времени производится коррекция токов в секциях индуктора. По мере заполнения секций индуктора новыми заготовками происходит перераспределение плотности тока и удельной мощно-

сти тепловыделения по длине. Кроме того, тепловой контакт соседних заготовок в условиях изменяющихся распределений температуры в каждой заготовке приводит к локальным изменениям температуры. Для получения требуемых распределений температуры нужно изменять мощности секций.

Таблица 2

Параметры секций индуктора при определении резонансных частот

№	$T, ^\circ\text{C}$	$I_{\text{н}}, \text{kA}$	$P_{\text{н}}, \text{kBT}$	$U_{\text{н}}, \text{B}$	S, kBA	$Q_{\text{н}}, \text{kBAr}$	$F, \text{Гц}$	C, Φ	$\cos \varphi$
1	20	14,51	341,6	350	5079	5067	50	0,132	0,073
	100	14,48	354,3	350	5068	5056	49,75	0,132	0,07
2	20	15	374,2	350	5250	5237	50	0,138	0,071
	200	14,93	383,5	350	5208	5194	49,9	0,138	0,074
3	20	14,5	343,7	337,5	4894	4882	50	0,138	0,07
	300	14,9	397,7	350	5215	5200	49,6	0,138	0,076
4	20	14,61	349	340	4967	4955	50	0,138	0,07
	400	14,82	408,6	350	5187	5171	49,5	0,138	0,079
5	20	14,61	348,9	340	4967	4955	50	0,138	0,07
	450	14,36	395,7	340	4882	4866	49,3	0,138	0,081
6	20	13,75	312,8	340	4675	4665	50	0,13	0,067
	500	13,51	357,8	340	4593	4579	49,3	0,13	0,078

Ниже приведены диаграммы температуры на поверхности и осевой линии загрузки для момента времени 7000 с (рис. 2), а также временные диаграммы удельной мощности в заготовках (рис. 3), найденные в результате моделирования с изменяемыми значениями токов секций индуктора.



Рис. 2. Диаграммы температуры на поверхности (1) и оси (2) загрузки в момент времени 7000 с

В результате коррекции для четвертой секции индуктора плотность тока снижается на 5 % в момент времени 4000 с:

$$J = (1 - 0.05 \cdot H(t - 4000)) \cdot 21 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2;$$

в пятой секции плотность тока снижается на 5 % в момент времени 4000 с, на 25 % снижается в момент времени 5000 с:

$$J = (1 - 0.05 \cdot H(t - 4000) - 0.25 \cdot H(t - 5000)) \cdot 20 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2;$$

в шестой секции плотность тока снижается на 5 % в момент времени 4000 с, на 25 % снижается в момент времени 5000 с, на 10 % снижается в момент времени 6000 с:

$$J = (1 - 0.05 \cdot H(t - 4000) - 0.25 \cdot H(t - 5000) - 0.1 \cdot H(t - 6000)) \cdot 19 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2.$$

Здесь: H – ступенчатая функция (функция Хевисайда).

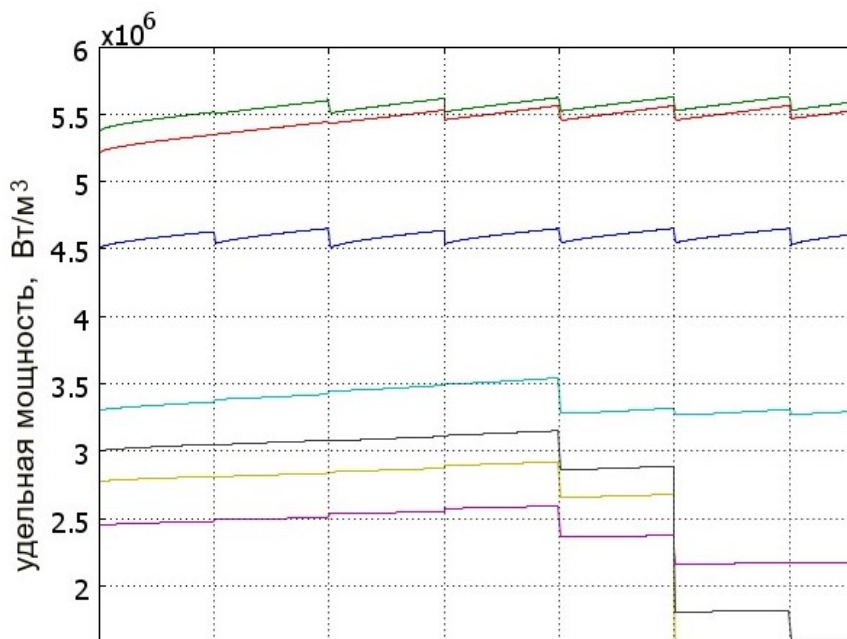


Рис. 3. Временные диаграммы удельной мощности:
1 – первая заготовка; 2 – вторая заготовка; 3 – третья заготовка; 4 – четвертая заготовка; 5 – пятая заготовка; 6 – шестая заготовка; 7 – седьмая заготовка

В тепловой задаче для регулирования температуры результат расчета мощности тепловыделения, импортированный из электромагнитной задачи, используется в соответствии с алгоритмом изменения мощности, обусловленным перемещением заготовок через индуктор. Для n -й заготовки:

$$Q_n = Q_{n0} \left(H(t - t_n) - H(t - t_f) \right).$$

Здесь: Q_{n0} – объемная плотность мощности тепловыделения в n -й заготовке; t_n – момент включения источника в n -й заготовке; t_f – момент отключения источника в n -й заготовке.

Диаграммы температуры на поверхности и осевой линии (см. рис. 2), характеризующие распределение температуры в загрузке в момент времени 7000 с,

показывают, что значение перепада температуры между поверхностью и осевой линией не превышает 30 градусов для шестой заготовки.

Достижение полученных перепадов температуры оказалось возможным после коррекции тока в отдельных секциях, начиная с момента времени $t = 4000$ с. Временные диаграммы удельной мощности, приведенные на рис. 3, показывают вызванное этой коррекцией соответствующее ступенчатое снижение мощности тепловыделения в заготовках 4–7.

Усложнение алгоритма задания токов секций сокращает время выхода на заданный режим нагрева.

При выбранном варианте параметров индуктора определены значения тепловых потерь в катушках секций нагревателя и мощности тепловыделения в заготовках (табл. 3).

Таблица 3

Мощности секций индуктора и заготовок

№ инд	1	2	3	4	5	6		Сумма
$\Delta P_{\text{инд}}$, кВт	155	146	143	141	139	141		865
№ заг	1	2	3	4	5	6	7	
$P_{\text{заг}}$, кВт	179	160	166	175	184	195	217	1278

Распределение температуры в загрузке после нагрева в течение 7000 с представлено на рис. 4. Из рисунка видно, что градиент температуры по сечению заготовок ярко проявляется в первых заготовках, а затем снижается.

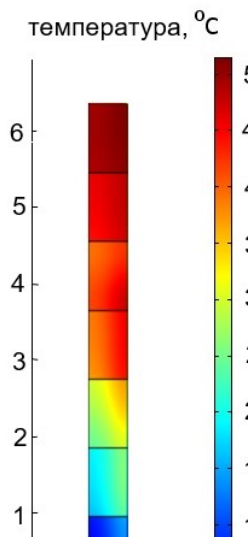


Рис. 4. Распределение температуры в загрузке в момент времени 7000 с

Более полная информация о температуре в загрузке представлена на рис. 5. На временных диаграммах отражено изменение температуры поверхности в средней части по длине заготовок. Номером 7 обозначена заготовка на входе в индуктор. Температура заготовки увеличивается к моменту перехода на другую позицию в пределах от 20 до 150 градусов. Температура в заготовке под номе-

ром 1 достигает заданной величины только в момент, когда она дошла до последней позиции. Такой алгоритм разогрева предусматривает последовательную загрузку заготовок в пустой индуктор. Это исключает недогрев, но усложняет процедуру включения секций, так как необходимо заранее рассчитать позицию каждой вновь загружаемой заготовки с учетом перемещения уже находящихся в индукторе.

Выполненные расчеты обеспечили подбор значений токов секций индуктора, при которых диаграммы температуры в заготовках имеют требуемые значения.

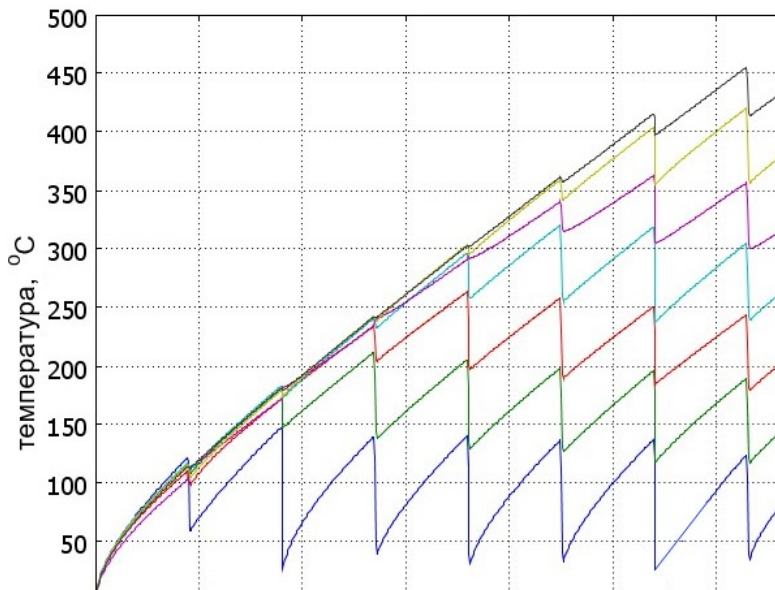


Рис. 5. Временные диаграммы температуры на поверхности заготовок: 1 – седьмая заготовка; 2 – шестая заготовка; 3 – пятая заготовка; 4 – четвертая заготовка; 5 – третья заготовка; 6 – вторая заготовка; 7 – первая заготовка

Диаграммы температуры имеют пилообразную форму. Особенностью является то, что максимальное значение температуры в заготовке на выходе из индуктора подвержено небольшим колебаниям. Это связано с тем, что параметры заготовок, находящихся одновременно в разных секциях, подвергаются воздействию электромагнитных полей разной мощности. Как ранее отмечалось, токи секций определялись исходя из условия достижения заданного распределения температуры по длине. Использование более точной настройки параметров секций обеспечивает достижение заданного распределения температуры в заготовке на выходе из индуктора при темпе выдачи одна заготовка за 1000 секунд (интервал нагрева 1000 с).

После выхода на установившийся режим мощности в двух заготовках на входе равны 170 кВт, в следующих мощность составляет 136 кВт, 108 кВт, 92 кВт и в двух последних 78 кВт.

Приведенные выше расчеты при определении мощностей и токов секций показали возможность получения заданного распределения температуры в заготовке на выходе из индуктора при интервале нагрева, равном 1000 с. В процессе

пуска выполнено несколько корректировок значений, что незначительно усложняет алгоритм.

Альтернативным вариантом пуска является работа всех секций при задании одинаковых токов во всех секциях. Более ограниченные возможности этого режима позволили получить заданное распределение температуры при значении интервала нагрева, равном 1400 секунд, что снижает производительность установки. При меньшем значении интервала нагрева в момент выхода заготовки из индуктора температуры на поверхности и на осевой линии отличаются на 75–105 градусов. Даже учитывая время транспортировки к прессу, такой перепад снизить до приемлемого значения сложно.

Для темпа выдачи 1400 с построены временные диаграммы удельной мощности в средней части каждой находящейся в нагревателе заготовки (рис. 6). Рассчитанные и корректируемые в процессе пуска значения токов секций обеспечивают более гладкий вид диаграммы мощности в заготовках при пуске и последующем установившемся режиме (квазиустановившемся, так как циклически изменяются температура и параметры). Форма диаграмм для каждой секции иллюстрирует изменение удельной мощности. Отличие от диаграммы температуры состоит в том, что выход на квазиустановившийся режим для каждой заготовки зависит от расстояния до выхода из индуктора. В заготовке с номером 1, находящейся на выходе, переходный процесс самый растянутый во времени. После выхода на квазиустановившийся режим колебания мощности составляют около 2 %. В то же время с момента включения до выхода на установившийся режим значения мощности в разных заготовках изменяются в пределах 7 %.

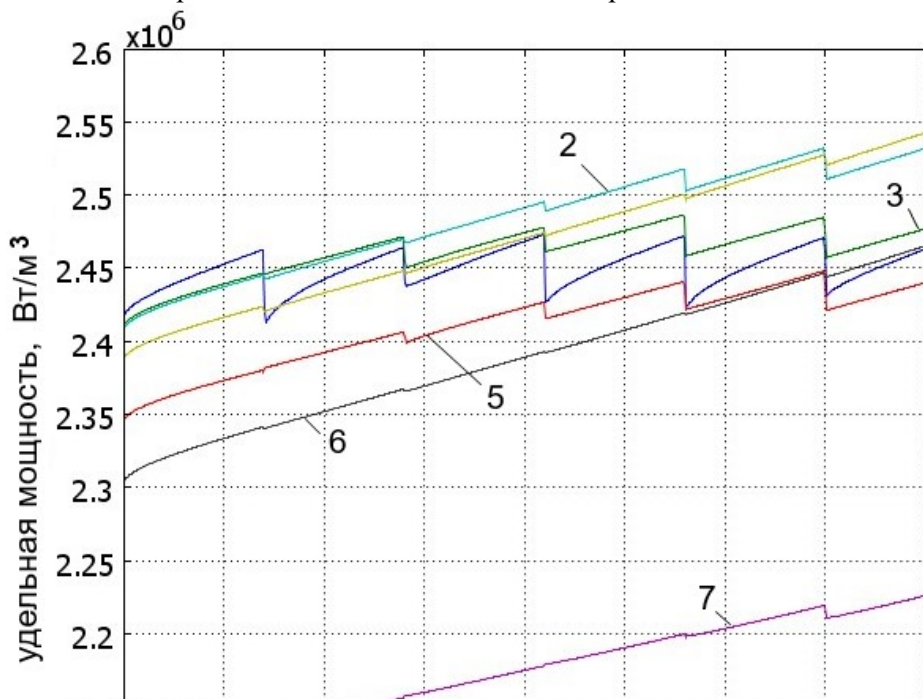


Рис. 6. Временные диаграммы удельной мощности в средней по длине заготовке координате с интервалом выдачи 1400 с

После выхода на установившийся режим мощности в заготовках на входе циклически изменяются в диапазоне 74–78 кВт, в заготовках 3–6 в диапазоне 73–76 кВт, в последней колеблются в пределах от 65 до 70 кВт.

Полученные диаграммы мощности характеризуют данную установку как спокойную нагрузку с практически постоянным графиком. При таком графике нагрузки в системе электроснабжения не возникает проблем с уровнем напряжения на шинах подстанции. Вопрос с поддержанием коэффициента мощности на заданном уровне решается в самой индукционной установке за счет подстройки частоты. Необходимо отметить, что возможности транзисторных преобразователей частоты позволяют решать более сложные задачи. Например, можно обеспечить плавный переход с одного типа заготовок на другой без вспомогательных операций и «ложных слитков». Однако при смене номенклатуры заготовок с применением системы регулирования мощности значительно возрастает разница между их максимальным и минимальным значениями, что приводит к существенно переменному графику нагрузки.

Выводы

В процессе эксплуатации мощных многосекционных индукционных установок методического действия наряду с квазиустановившимся режимом нагрева заготовок одного типогабарита имеют место нестационарные режимы, обусловленные первоначальным пуском нагревателя, сменой номенклатуры заготовок или сменой темпа нагрева. В нестационарных режимах основным требованием является переход на квазиустановившийся режим с минимальными потерями темпа и минимальными энергозатратами на нагрев некондиционных заготовок. Нестационарные режимы сопровождаются существенными колебаниями мощности на секциях индуктора, что может привести к значительным колебаниям напряжения в системе электроснабжения цеха. Кроме того, при питании секций от автономных регулируемых источников изменение параметров нагрузки в переходных режимах приводит к резким скачкам тока, которые могут превышать перегрузочную способность источника питания. Предложенная в работе методика позволяет рассчитать электрические параметры индукционной системы в процессе выхода на установившийся режим нагрева, которые удовлетворяют как технологическим требованиям по температурным кондициям, так и требованиям электромагнитной совместимости с системой электроснабжения с учетом предельных возможностей регулируемых источников питания. Методика позволяет рассчитать параметры управления как в режиме программного управления, так и с использованием замкнутой системы регулирования. Приведенные в статье расчеты параметров в процессе пуска нагревателя, состоящего из шести секций, показали, что при удовлетворении всех технологических требований с учетом ограничений на предельные возможности источников питания колебания мощности нагревателя находятся в пределах 2 % от установившегося режима, что положительно сказывается на режиме работы системы электроснабжения цеха.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шутов Е.А., Бабинович Д.Е., Турукина Т.Е.* Прогнозирование потребления электрической энергии на объектах водоснабжения // Энергетик. – 2016. – № 1. – С. 7–10.
2. *Фролова Я.А., Русина А.Г., Армеев Д.В.* Оптимизация режимов энергосистем с распределенной генерацией в режиме on-line // Новое в российской электроэнергетике. – 2017. – № 11. – С. 34–41.
3. *Кубарьков Ю.П., Кулаев И.С., Алехин Р.А.* Оптимизация уровня напряжения в активно-адаптивных сетях с распределенной генерацией // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2018. – № 3 (59). – С. 154–164.
4. *Сарваров А.С., Шевырёв Ю.В., Фёдоров О.В.* Оценка эффективности затрат на повышение энергетических показателей в сетях с полупроводниковыми преобразователями // Вестник

- Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2015. – Т. 15. – № 3. – С. 11–19. DOI: 10.14529/power150302.
5. *Веприцкий Д.В., Юдаев И.В.* Определение наивыгоднейшего режима нагрузки участка сети с преобразователями частоты // *Инновации в сельском хозяйстве*. – 2015. – № 4 (14). – С. 8–13.
 6. *Тяпин А.А., Головенко Е.А., Кинев Е.С., Ефимов С.Н.* Симметрирование однофазной индукционной установки в трехфазной сети // *Электрооборудование: Эксплуатация и ремонт*. – М.: Панорама, 2020. – № 6. – С. 36–49.
 7. *Шевырева Н.Ю., Шевырёв Ю.В., Пичуев А.В.* Актуальные аспекты обеспечения качества электроэнергии на открытых горных работах // *Пром-Инжиниринг: труды VI Всероссийской научно-технической конференции*. – Челябинск, 2020. – С. 246–251.
 8. *Шевырёв Ю.В., Шевырева Н.Ю.* Улучшение формы напряжения в системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса с активным выпрямителем // *Горный журнал*. – 2019. – № 1. – С. 66–69. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.14.
 9. *Жилин Е.В.* Повышение показателей качества электроэнергии и уменьшения дополнительных потерь энергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства // *Сборник тезисов участников форума «Наука будущего – наука молодым»*. – 2017. – С. 200–202.
 10. *Кудряшев Г.С., Третьяков А.Н.* Эффективность снижения уровня несинусоидальности напряжения на сельскохозяйственных предприятиях Иркутской области // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2021. – № 6 (200). – С. 121–128.
 11. *Зинин Ю., Мульменко М.* Современные тиристорные преобразователи частоты «Параллель» для установок индукционного нагрева металлов // *Силовая электроника*. – 2015. – Т. 3. – № 54. – С. 64–71.
 12. *Чупин Е.С., Григорьев М.А.* Высокоэффективные многоуровневые преобразователи частоты объектов металлургического производства // *Электротехника*. – 2019. – № 5. – С. 21–26.
 13. *Апет А.А., Крубцова А.А., Ложкин И.А., Енин С.С.* Исследование качества электрической энергии при работе диодных и транзисторных выпрямителей // *Энергетические и электротехнические системы: международный сборник научных трудов*. Под ред. С.И. Лукьянова, Н.В. Швидченко. – Магнитогорск, 2015. – С. 92–101.
 14. *Старцев А.П.* Влияние пульсации выходного напряжения высокочастотного преобразователя частоты с непосредственной связью на характеристики асинхронного электродвигателя // *Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике*. – 2015. – Т. 1. – С. 133–143.
 15. *Скорняков В.А., Федяев А.А., Сергеевичев А.В., Федяев А.А.* Рациональная компенсация реактивной мощности потребителей деревообрабатывающих производств // *Системы. Методы. Технологии*. – 2017. – № 1 (33). – С. 73–77. DOI: 10.18324/2077-5415-2017-1-73-77.
 16. *Большев В.Е., Виноградов А.В.* Моделирование электрической сети с системой мониторинга качества электроэнергии и надежности электроснабжения // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. – 2019. – № 2 (35). – С. 3–10.
 17. *Крюков О.В.* Параметры применения преобразователей частоты для регулирования производительности // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2016. – Т. 3. – № 2. – С. 43–49.
 18. *Шестаков А.В.* Моделирование и гармонический анализ импульсного напряжения при синусоидальной широтно-импульсной модуляции // *Общество. Наука. Инновации (НИК-2018): Сборник статей XVIII Всероссийской научно-практической конференции: в 3 т.* Вятский государственный университет. – 2018. – С. 1137–1144.
 19. *Пустоветов М.Ю.* Математическое моделирование тока, потребляемого преобразователем частоты при включении // *Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта*. – 2017. – № 1 (4). – С. 313–324.
 20. *Мещеряков В.Н., Конаев Ю.П., Ласточкин Д.В.* Анализ инверторов тока и напряжения с системами релейного управления // *Вести высших учебных заведений Черноземья*. – 2016. – № 2 (44). – С. 13–18.
 21. *Артохов И.И., Краснова Н.Д., Русяева М.Ю.* Система электроснабжения промышленного предприятия с промежуточным звеном постоянного тока // *Энергетические системы: Сборник трудов II Международной научно-технической конференции*. Отв. ред. П.А. Трубаев. – 2017. – С. 150–154.
 22. *Демидович В.Б., Растворова И.И.* Моделирование индукционного нагрева легких сплавов перед обработкой давлением. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. – 158 с.

23. Прахт В.А., Сарапулов Ф.Н., Дмитриевский В.А., Гоман В.В. Компьютерное моделирование установки индукционного нагрева цилиндрических заготовок // Дистанционное и виртуальное обучение. – 2009. – № 9. – С. 17–21.
24. Демидович В.Б., Растворова И.И. Методика оптимизации индукционных установок для градиентного нагрева заготовок перед прессованием // Индукционный нагрев. – 2013. – № 3. – С. 4–7.
25. Бондаренко Д.Н., Чмиленко Ф.В., Парменов В.Е. Алгоритм частотного регулирования транзисторного инвертора для индукционного нагрева // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2019. – № 4. – С. 85–93.
26. Базаров А.А., Данилушкин А.И., Животягин Д.А. Система методического индукционного нагрева цилиндрических заготовок из сплавов алюминия // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2020. – Вып. 28. № 2. – С. 97–110. doi: 10.14498/tech.2020.2.7

Статья поступила в редакцию 8 августа 2021 г.

METHOD FOR ALIGNING THE LOAD GRAPH POWERFUL INDUCTION PLANTS

*A.A. Bazarov, A.I. Danilushkin**

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

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru, aidanilushkin@mail.ru

Abstract. *The paper deals with the issues of load balancing in the shop power supply system containing powerful electrothermal installations. There is a cyclical change in load parameters with significant variations in current and power factor during operating multi-section induction installations of methodical action. The largest deviations of these parameters occur in transient modes at heater start or at changing the billets nomenclature. It is shown that when the load changes in starting modes, an increase in power and a decrease in the power factor can lead to unacceptable current overloads of the power supply. Correction during start-up of section currents and power factor allows us to reduce current fluctuations, to provide a smoother power diagram and eliminate power supply overload. It is possible to implement current and power factor correction using semiconductor frequency converters in each section. This approach prevents decreasing the voltage quality indicators and reduces possible deviations of the billets temperature distribution. The parameters of the heater sections in transient modes are calculated. The ranges of power, voltage, current and frequency variation are determined, corresponding to the capabilities of semiconductor frequency converters used in these installations. The proposed start-up algorithm provides the smallest of all possible power fluctuations.*

Keywords: *induction heating, temperature distribution, non-stationary modes, modeling, control algorithms, power regulation*

REFERENCES

1. *Shutov Ye.A., Babinovich D.Ye., Turukina T.Ye.* Prognozirovanie potrebleniya elektricheskoy energii na ob''ektakh vodosnabzheniya // *Energetik*. 2016. No. 1. S. 7–10.
2. *Frolova Ya.A., Rusina A.G., Armejev D.V.* Optimizatsiya rejimov energosisten s raspredelennoy generatsiyey v rejime on-line // *Novoye v rossiyskoy elektroenergetike*. 2017. No. 11. S. 34–41.
3. *Kubar'kov Yu.P., Kulayev I.S., Alekhin R.A.* Optimizatsiya urovney napryajeniya v aktivno-adaptivnykh setyakh s raspredelennoy generatsiyey // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Seriya: Tekhnicheskiye nauki. 2018. No. 3 (59). S. 154–164.
4. *Sarvarov A.S., Shevyrev Yu.V., Fedorov O.V.* Otsenka effektivnosti zatrat na povysheniye energeticheskikh pokazateley v setyakh s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami // *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*. Seriya: Energetika. 2015. T. 15. no. 3. S. 11–19.
5. *Vepritskiy D.V., Yudaev I.V.* Opredelenie naivyygodneyshego rejima nagruzki uchastka seti s preobrazovatelem chastoty // *Innovatsii v selskom khozyaystve*. 2015. No. 4 (14). S. 8–13.
6. *Tyapin A.A., Golovenko Ye.A., Kinev Ye.S., Yefimov S.N.* Simmetrirovaniye odnofaznoy induktsionnoy ustanovki v trekhfaznoy seti // *Elektrooborudovaniye: Eksploatatsiya I remont*. Izd. "Panorama" Moskva. No. 6, 2020. S. 36–49.
7. *Shevyreva N.Yu., Shevyrev Yu.V., Pichuyev A.V.* Aktualnyye aspekty obespecheniya kachestva elektroenergii na otkrytykh gornyykh pabotakh // *Prom-Inzhiniring*. Trudy VI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Chelyabinsk, 2020. S. 246–251.
8. *Shevyrev Yu.V., Shevyreva N.Yu.* Uluchsheniye formy napryajeniya v sistemakh elektrosnabzheniya predpriyatiy mineralno-syr'evogo kompleksa s aktivnym vypryamitelem // *Gornyy jurnal*. 2019. No. 1. S. 66–69. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.14.

* *Alexander A. Bazarov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor*
Alexander I. Danilushkin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor

9. *Jilin Ye.V.* Povysheniye pokazately kachestva elektroenergii v sistemakh elektrosnabjeniya individual'nogo jilishchnogo stroitel'stva // Sbornik tezisov uchastnikov foruma "Nauka budushchego – nauka molodykh". 2017. S. 200–202.
10. *Kudryashev G.S., Tret'yakov A.N.* Effektivnost snigeniya urovnya nesinusoidal'nosti napryajeniya na sel'skokhozyaystvennykh predpriyatiyakh Irkutskoy oblasti // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021. No. 6 (200). S. 121–128.
11. *Zinin Yu., Mul'menko M.* Sovremennyye tiristornyye preobrazovateli chastity "Parallel" dlya ustanovok induktsionnogo nagreva metalla // Silovaya elektronika. Tom: 3. No. 54. 2015 g. S. 64–71.
12. *Chupin Ye.S., Grigor'ev M.A.* Vysoeffektivnyye mnogourovnevnyye preobrazovateli chastity ob"ektov metallurgicheskogo proizvodstva // Elektrotehnika. 2019. No. 5. S. 21–26.
13. *Apet A.A., Krubtsova A.A., Lojkin I.A., Yenin S.S.* Issledovaniye kachestva elektricheskoy energii pri rabote diodnykh I tranzistornykh vypryamiteley // Energeticheskiye I elektrotekhnicheskiye sistemy. Mejdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov. Pod red. S.I. Luk'yanova, N.V. Shvidchenko. Magnitogorsk, 2015. S. 92–101.
14. *Startsev A.P.* Vliyaniye pul'satsii vykhodnogo napryajeniya vysokochastotnogo preobrazovatelya chastoty s neposredstvennoy svyaz'yu na kharakteristiki asinkhronnogo elektrodvigatelya // Energetika. Innovatsionnoye napravlenie v energetike. CALS-tehnologii v energetike. 2015. T. 1. S. 133–143.
15. *Skornyakov V.A., Fedyayev A.A., Sereyevichev A.V., Fedyayev Ar.A.* Ratsional'naya kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti potrebiteley derevoobrabatvyayushchikh proizvodstv // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2017. No. 1 (33). DOI: 10.18324/2077-5415-2017-1-73-77.
16. *Bol'shev V.Ye., Vinogradov A.V.* Modelirovaniye elektricheskoy seti s sistemoy monitoring kachestva elektroenergii I nadejnosti elektrosnabjeniya // Elektritekhnologiya I elektrooborudovaniye v APK. 2019. No. 2 (35). S. 3–10.
17. *Krukov O.V.* Parametry primeneniya preobrazovatelye chastity dlya regulirovaniya proizvoditel'nosti // Elektrotehnika: setvoy elektronnyy nauchnyy jurnal. 2016. T. 3. No. 2. S. 43–49.
18. *Shestakov A.V.* Modelirovanie I garmonicheskii analiz impulsnogo napryajeniya pri sinusoidal'noy shirotno-impul'snoy modulyatsii // Obshchestvo. Nauka. Innovatsii (NPK-2018). Sbornik ctatey XVIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: v 3 tomakh. Vyatskiy gosudarstvennyy universitet. 2018. S. 1137–1144.
19. *Pustovetov M.Yu.* Matematicheskoe modelirovanie toka, potrebyaemogo preobrazovatelem chastity pri vkluchenii // Sovremennyye innovatsionnyye tekhnologii podgotovki injenernykh kadrov dlya gornoy promyshlennosti I transporta. 2017. No. 1 (4). S. 313–324.
20. *Meshcheryakov V.N., Kopaev Yu.P.* Analiz invertorov toka I napryajeniya s sistemami reyleynogo upravleniya // Vesti vyshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya. 2016. No. 2 (44). S. 13–18.
21. *Artyukhov I.I., Krasnjva N.D., Rusyaeva M.Yu.* Sistema elektrosnabjeniya promyshlennogo predpriyatiya s promejutochnym zvenom postoyannogo toka // Energenicheskie sistemy. Sbornik trudov II Mejdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Otvetstvennyy redactor P.A. Trubaev. 2017. S. 150–154.
22. *Demidovich V.B., Rastvorova I.I.* Modelirovanie induktsionnogo nagreva legkikh splavov pered obrabotkoy davleniem. Spb. Izd-vo SPbGETU "LETI", 2015. 158 s.
23. *Prakht V.A., Sarapulov F.N., Dmitrievskiy V.A., Goman V.V.* Komp'uternoe modelirovanie ustanovki induktsionnogo nagreva tsilindricheskikh zagotovok // Distsionnoe I virtual'noe obuchenie, nj. 9, 2009. S. 17–21.
24. *Demidovich V.B., Rastvorova I.I.* Metodika optsimizatsii induktsionnykh ustanovok dlya gradientnogo nagreva zagotovok pered pressovaniem // Induktsionnyy nagrev. 2003. No. 3. S. 4–7.
25. *Bondarenko D.N., Chmilenko F.V., Parmenov V.E.* Algoritm chastotnogo regulirovaniya tranzistornogo invertora dlya induktsionnogo nagreva // Izvesiya SPbGETU "LETI". 2019. Nu. 4. S. 85–93.
26. *Bazarov A.A., Danilushkin A.I., Jivotyagin D.A.* Sistema metodicheskogo induktsionnogo nagreva tsilindricheskikh zagotovok ix splavov aluminiya // Vestnik SamGTU. "Tekhnicheskie nauki". Vyp. 28. No. 2. 2020. S. 97–110. doi: 10.14498/tech.2020.2.7