

УДК 621.365.5

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-76-87

## Адаптивный регулятор мощности индукционной тигельной печи с проводящим ферромагнитным тиглем

М.А. Федин, А.Б. Кувалдин, А.О. Кулешов, С.В. Ахметьянов, С.С. Кондрашов

На основании проведенных авторами исследований построена структурная модель индукционной тигельной печи повышенной частоты с проводящим ферромагнитным тиглем в среде Simulink/Matlab.

При расчете тока индуктора использованы зависимости активного сопротивления и индуктивности от трех аргументов: температуры, частоты и тока индуктора.

На основе созданной модели спроектирована структурная модель системы регулирования мощности индукционной тигельной печи. В качестве способа регулирования мощности взята частотно-импульсная модуляция выходного напряжения.

Разработан адаптивный регулятор мощности индукционной тигельной печи с проводящим ферромагнитным тиглем с двумя каналами регулирования — частотой тока и напряжением источника питания.

Установлено, что плавка с наименьшими энергозатратами получается в случае применения регулятора мощности с двумя различными структурами адаптивного регулирования. Регулятор работает по принципу частотного регулирования и использует структуры в зависимости от текущего значения температуры.

Работа адаптивного регулятора мощности с двумя каналами регулирования позволяет существенно уменьшить удельный расход электроэнергии по сравнению с автоподстройкой частоты, например, для промышленной печи ИГТ-1,6М в 1,45 раза.

*Ключевые слова:* индукционная тигельная печь, ферромагнитный проводящий тигель, адаптивный регулятор мощности, структурная модель, система управления, частотно-импульсная модуляция, канал регулирования.

*Для цитирования:* Федин М.А., Кувалдин А.Б., Кулешов А.О., Ахметьянов С.В., Кондрашов С.С. Адаптивный регулятор мощности индукционной тигельной печи с проводящим ферромагнитным тиглем // Вестник МЭИ. 2021. № 2. С. 76—87. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-76-87.

## An Adaptive Power Controller of the Induction Crucible Furnace with a Conducting Ferromagnetic Crucible

M.A. Fedin, A.B. Kuvaldin, A.O. Kuleshov, S.V. Akhmetyanov, S.S. Kondrashov

A structural model of a high-frequency induction crucible furnace with a conducting ferromagnetic crucible is developed in the Simulink/Matlab environment based on investigations carried out by the authors.

The inductor current was calculated using the inductor's resistance and inductance dependences on temperature, frequency, and current.

An induction crucible furnace power control system structural model is designed based on the developed model. The output voltage pulse-frequency modulation is used as a furnace power control method.

An adaptive power controller for the induction crucible furnace with a conducting ferromagnetic crucible is developed, which includes two channels for control of the power supply source frequency and voltage.

It has been determined that the melting with the lowest energy expenditures is obtained in the case of using a power controller with two different adaptive control structures. The controller operates based on the frequency control principle and uses structures depending on the current temperature value.

The use of the adaptive power controller with two control channels can significantly reduce the specific electric energy consumption in comparison with automatic frequency adjustment, in particular, by a factor of 1.45 for the IGT-1.6M industrial furnace.

*Key words:* induction crucible furnace, ferromagnetic conducting crucible, adaptive power controller, structural model, control system, pulse-frequency modulation, control channel.

*For citation:* Fedin M.A., Kuvaldin A.B., Kuleshov A.O., Akhmetyanov S.V., Kondrashov S.S. An Adaptive Power Controller of the Induction Crucible Furnace with a Conducting Ferromagnetic Crucible. Bulletin of MPEI. 2021;2:76—87. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-76-87.

## Введение

В настоящее время в электротехнологии актуальны вопросы электропотребления и автоматизации, поскольку их решение гарантирует уменьшение затрат на производство и повышение качества продукции [1]. Основными проблемами в области автоматизации процессов для индукционных тигельных печей (ИТП) с ферромагнитным проводящим тиглем (ПТ), применяющихся для выплавки качественных магниевых сплавов, являются: контроль температуры расплава металла в печи, поддержание заданной мощности печи во время плавки, ограничение выходного тока источника питания, автоматическое согласование параметров индуктора и преобразователя частоты с высоким быстродействием и точностью без применения обмоточных элементов и усложнения конструкции индуктора [2 — 4]. Для решения указанных задач необходим комплексный подход, подразумевающий совместный анализ процессов, протекающих в ИТП, источнике электропитания и системе управления и контроля, а также применение современных методов проектирования систем управления ИТП, которые, в свою очередь, требуют разработки соответствующих связанных электро-тепловых моделей ИТП [5].

Особенности использования индукционной плавильной печи в каждом конкретном случае определяют рабочую частоту, мощность и прочие параметры, такие как напряжение, ток, коэффициент мощности или добротность, а также выбор способа согласования источника питания с нагрузкой и способа регулирования выходной мощности источника питания ИТП.

Оценивая существующие подходы к построению систем электропитания и управления ИТП с ПТ средней и большой емкости, следует отметить следующие факторы: высокие стоимости и большие габариты регулируемого силового трансформатора с РПН и симметрирующего устройства, ограниченные возможности повышения точности управления электрическим режимом (ступенчатое выходное напряжение, фиксирован-

ную частоту). Применение подобных систем питания и управления ведет к тому, что возникают повышенный расход электроэнергии, сложность контроля температуры, увеличивается время плавки.

Решением в области управления считается использование регуляторов с более сложной структурой, например, адаптивных, коэффициенты настройки которых выбираются автоматически в зависимости от изменяющихся условий технологического процесса, обеспечивающих сокращение времени плавки, повышение надежности работы и энергоэффективности ИТП, уменьшение массогабаритных размеров источника питания и его установленной мощности за счет улучшения качества регулирования. При адаптивном управлении должно обеспечиваться регулирование параметров настроек регулятора при непрерывно меняющихся свойствах объекта управления [6].

## Обзор и выбор способа регулирования выходной мощности современных транзисторных инверторов для ИТП, работающих на средних и высоких частотах

В индукционных установках средних и высоких частот в качестве источников питания используют транзисторные преобразователи частоты (ТПЧ). Нагрузкой данного преобразователя могут быть параллельный или последовательный колебательный контур, организованный индуктором и компенсирующей емкостью, либо согласующий трансформатор. Температурная зависимость электрических параметров охваченного индуктором изделия вынуждает применять глубокое регулирование выходного параметра (мощности) [7].

На рисунке 1 представлены типовые способы подключения нагрузки к ТПЧ. Принцип работы схемы основан на поочередном переключении пар транзисторов, в результате чего через нагрузку проходит переменный ток заданной частоты. Современные IGBT- и MOSFET-транзисторы позволяют получить на выходе преобразователя частоты в диапазоне от

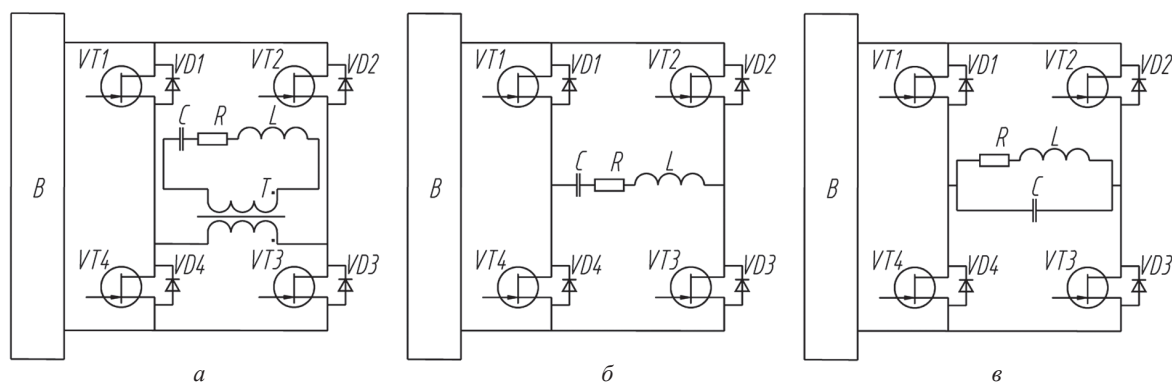


Рис. 1. Нагрузка транзисторного преобразователя частоты (ТПЧ):

*a* — последовательный колебательный контур с согласующим трансформатором; *б, в* — последовательный и параллельный колебательные контуры

1 кГц до 1 МГц [2]. Возможно большое число вариантов регулирования мощности на выходе инвертора, к самым распространенным из них относятся: широтно-импульсная (ШИМ), частотно-импульсная (ЧИМ), частотно-широкоимпульсная (ЧШИМ), кодово-импульсная (КИМ) модуляции выходного напряжения.

Принцип регулирования при ШИМ базируется на том, что моменты включения и выключения транзисторов сдвигаются относительно момента перехода тока через ноль. При этом включение происходит с запаздыванием, а отключение — с опережением. Характерная черта режима заключается в том, что выключение опережающих транзисторов протекает при большом значении тока, а включение отстающих транзисторов сопровождается появлением сквозных токов из-за проводящих в этот момент обратных диодов соседних (закрытых) транзисторов.

Известно, что последовательный резонансный контур потребляет из источника максимум мощности при частотах, близких к его резонансной частоте. Принцип регулирования при ЧИМ строится на том, что при уходе в сторону от резонансной частоты растет импеданс контура, вследствие чего он потребляет меньшую мощность. Для тиристорных преобразователей частоты работает регулирование в области частот ниже резонансной, ведь они и так функционируют на предельных частотах, в то время как для транзисторных преобразователей допустимо регулирование в области частот выше резонансной. Регулировочные характеристики описанного способа сильно зависят от добротности резонансного контура, глубокое регулирование требует значительного изменения частоты [8, 9].

ЧШИМ выходного напряжения — гибридный тип модуляции, сочетающий в себе свойства ЧИМ и ШИМ.

При КИМ выходного напряжения формирование управляющего воздействия происходит в виде наборов импульсов. По сравнению с ЧИМ, ШИМ и ЧШИМ модуляция в данном способе не приводит к сдвигу между выходными током и напряжением, что благотворно сказывается на коэффициенте мощности и динамических потерях при переключении транзисторов, однако применение КИМ существенно усложняет систему управления преобразователем частоты.

При АИМ модулируется последовательность импульсов одинаковой формы, обычно прямоугольной, при которой управление средним значением выходного параметра идет путем изменения амплитуды импульсов. Недостатком АИМ является низкая эффективность использования мощности при высоких частотах.

Обзор и анализ применяемых способов регулирования выходной мощности транзисторных инверторов показывают, что для установок среднечастотных ИТП емкостью 0,1...6 т, нагрузочный контур которых представляет собой последовательный колебательный контур, наиболее целесообразным способом модуляции выходного напряжения считается ЧИМ [10].

### Математическое описание и идентификация индукционных тигельных печей с ферромагнитным проводящим тиглем как объектов управления

Для разработки структурной модели ИТП с ферромагнитным ПТ с учетом характеристик, изменяющихся в ходе процесса расплавления, проведена идентификация ИТП с ПТ как объектов управления. Энергетический баланс ИТП с проводящим ферромагнитным тиглем равен:

$$P_{\text{инв.вх}} = \Delta P_{\text{инв}} + P_1 + c_t m_t \frac{dt}{d\tau} + c_m m_m \frac{dt}{d\tau} + P_{\text{пот}\Sigma},$$

где  $P_{\text{инв.вх}}$  — мощность инвертора на входе;  $\Delta P_{\text{инв}}$  — потери активной мощности в инверторе;  $P_1$  — электрические потери в индукторе;  $c_t$ ,  $m_t$  — удельная теплоемкость и масса тигля;  $c_m$ ,  $m_m$  — удельная теплоемкость и масса магния;  $P_{\text{пот}\Sigma}$  — суммарные тепловые потери через футеровку печи.

ИТП с ферромагнитным ПТ в совокупности с конденсаторной батареей в электрическом отношении представляет собой последовательный колебательный контур, подключенный к источнику питания через согласующий трансформатор. Из-за того, что мощность печи относительно небольшая, применяют продольную компенсацию реактивной мощности, т. е. последовательный колебательный контур (рис. 2).

Уравнения АЧХ и ФЧХ последовательного колебательного контура выглядят как:

$$\text{АЧХ} = \frac{|Z_{\text{вых}}|}{|Z_{\text{вх}}|} = \frac{|\omega L| |\omega C|}{\sqrt{(R\omega C)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2}};$$

$$\text{ФЧХ} = \varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega CR};$$

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Модель ИТП с ПТ представляет собой совместное решение системы уравнений:

$$I_n = U_n / Z_{n-3}; \quad (1)$$

$$U_n = U_a k_n \frac{w}{w'} \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}};$$

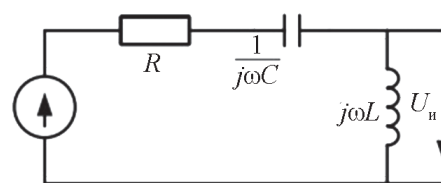


Рис. 2. Электрическая схема последовательного колебательного контура

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) / R; \quad (2)$$

$$Z_{\text{и-3}} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}; \quad (3)$$

$$R_{\text{и-3}} = I_{\text{и}}^2 R;$$

$$P_{\text{пот}\Sigma} = P_{\text{бок.пов}} + P_{\text{под}} + P_{\text{кр}}; \quad (4)$$

$$P_1 = I_1^2 R_1;$$

$$P(\tau)_{\text{пол}} = c_{\text{т}} m_{\text{т}} \frac{dt}{d\tau} + c_{\text{м}} m_{\text{м}} \frac{dt}{d\tau}; \quad (5)$$

$$Q_{\text{пл}} = q_{\text{м}} m_{\text{м}}; \quad (6)$$

$$P_{\text{и-3}} = P_{\text{пол}} + P_1 + P_{\text{пот}\Sigma}.$$

Тепловые потери через боковую поверхность футеровки печи найдем по формуле:

$$P_{\text{бок.пов}} = \frac{2\pi(t_2 - t_1)}{\frac{1}{\lambda} n (R_1/R_2)} h_1.$$

Тепловые потери через подину и крышку:

$$P_{\text{кр}} = \frac{t_2 - t_1}{\frac{l_{\text{кр}}}{\lambda_{\text{кр}} F_{\text{кр}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{к}} F_{\text{кр}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{и}} F_{\text{кр}}}}.$$

Ток индуктора представляет собой отношение напряжения индуктора  $U_{\text{и}}$  к импедансу системы «индуктор–загрузка»  $Z_{\text{и-3}}$  (1). Импеданс рассчитаем по (3), в которой активное сопротивление  $R$  и индуктивность  $L$ , в общем случае, представляют собой зависимости:

$$R = \xi(t, f, I); \quad L = \xi(t, f, I);$$

Полученные в [5] зависимости  $R$  и  $L$  для частот от 10 до 100 кГц и токов от 10 до 300 А нужны для построения структурной модели индукционной установки повышенной частоты.

### Разработка структурной модели индукционной тигельной печи с ферромагнитным проводящим тиглем в среде Matlab

На рисунке 3 изображена модель ИТП с проводящим ферромагнитным тиглем, построенная в среде Simulink/Matlab и имитирующая физическую модель лабораторной печи для плавки магния мощностью 2,5 кВт со следующими размерами: диаметр тигля  $d_2 = 64$  мм, высота тигля  $h_2 = 90$  мм, толщина стенки тигля  $\delta_{\text{т}} = 3$  мм, высота индуктора  $h_1 = 78$  мм. Емкость тигля составляет 0,5 кг, материал — ферромагнитная сталь 20. Проведем расчет и построение отдельных блоков [11 — 13].

На рисунке 4 дана структурная схема расчета тока индуктора, выполненная в Simulink/Matlab (область 1, рис. 3). Для вычисления тока индуктора взят блок алгебраического контура Algebraic Constraint, выполняющий поиск корней алгебраических уравнений, т. к. без его использования возникает проблема с образованием «алгебраических петель».

В подсистеме FCHN (область 2, рис. 3) реализован расчет фазового сдвига между током и напряжением индуктора согласно (2).

Напряжение индуктора рассчитано по (6). На рисунке 3 схема свернута в подсистему  $U$  (область 3).

Расчет тепловых потерь свернут в подсистему Subsystem 1 (область 4, рис. 3) и выполнен с использованием аналитических формул. Тепловые потери печи поделены на потери через боковую теплоизоляционную вставку, крышку и подину (4).

Полезная мощность, выделяющаяся в тигле и загрузке, рассчитывается как интегрирование суммы произведений удельной теплоемкости на массу тигля и загрузки (5). На рисунке 3 указанная схема обведена штриховой областью 5. Для расчета электрической энергии, потребляемой печью, в модели ИТП предусмотрен счетчик электрической энергии (область 6, рис. 3).

Особенность модели состоит в том, что при расчете тока индуктора  $I_{\text{и}}$  использованы зависимости активного сопротивления  $R$  и индуктивности  $L$  в виде поверхностей, полученных благодаря работе блока Lookup Table n-D, задающего функцию  $n$  переменных в табличной форме. В нашем случае функции  $R$  и  $L$  зависят от трех аргументов: температуры  $t$ , частоты  $f$ , тока  $I$ . Таким образом, поверхности имеют трехмерный вид, где  $f$  варьируется от 10 до 100 кГц, а  $I$  — от 50 до 300 А [14, 15].

Полученная структурная модель печи служит для построения адаптивной системы регулирования мощности ИТП.

### Разработка, исследование, сравнение регуляторов мощности индукционной тигельной печи и выбор конкретной структуры регулятора мощности

На рисунке 5 представлена обобщенная структурная схема системы электропитания и управления ИТП, позволяющая регулировать мощность ИТП либо с использованием только ЧИМ, либо только АИМ, либо же с использованием сразу двух каналов регулирования — по частоте  $f$  и напряжению на индукторе  $U$ . Необходимо построение структурной модели системы регулирования мощности ИТП для выбора оптимального способа регулирования, обеспечивающего максимальную энергоэффективность установки ИТП [16].

С помощью разработанной структурной модели лабораторной ИТП с проводящим ферромагнитным тиглем для плавки магния в пакете Simulink/Matlab получим структурную модель системы регулирования мощности ИТП.

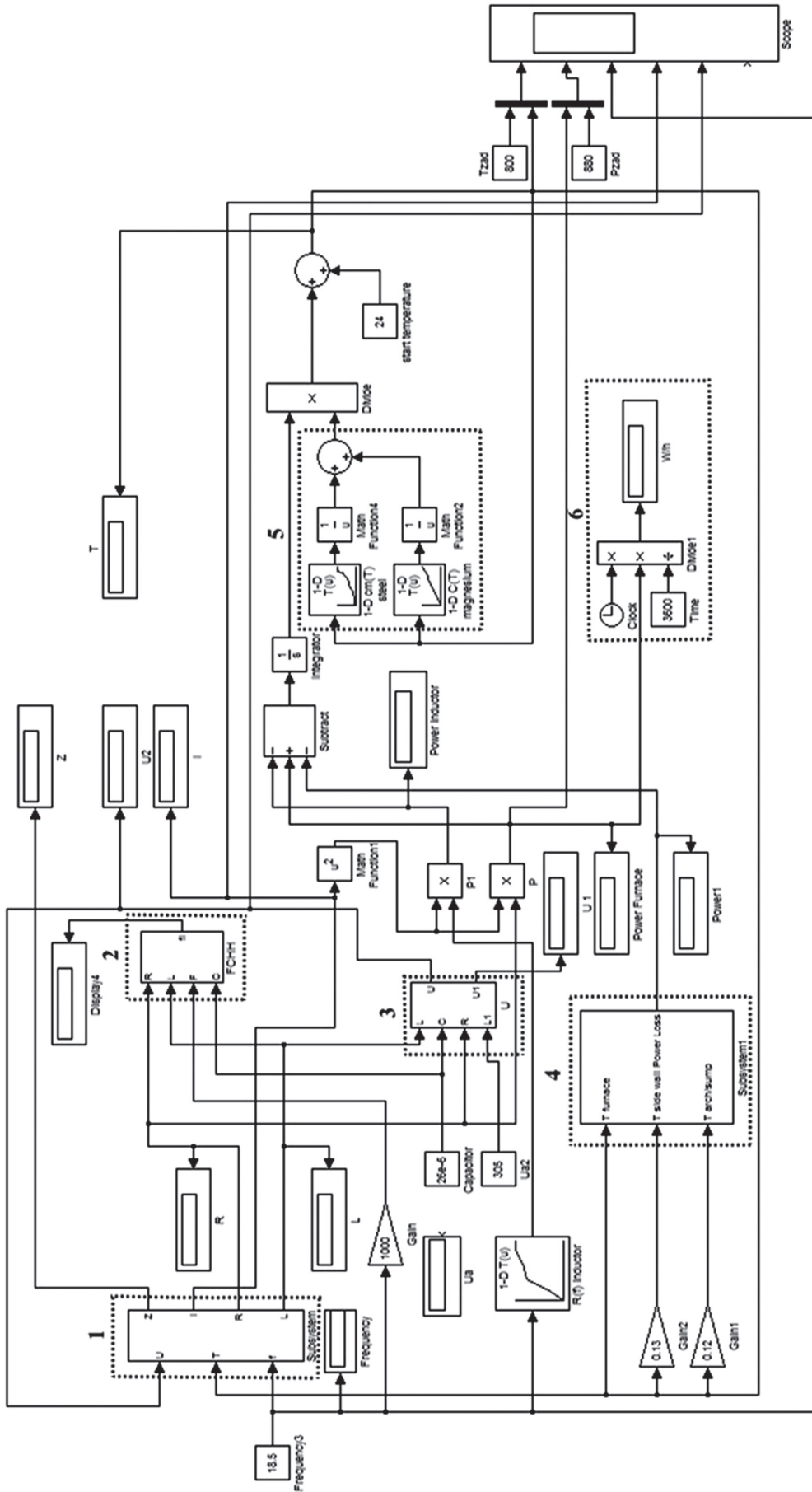


Рис. 3. Модель ИТП с проводящим ферромагнитным тиглем в среде Simulink/Matlab

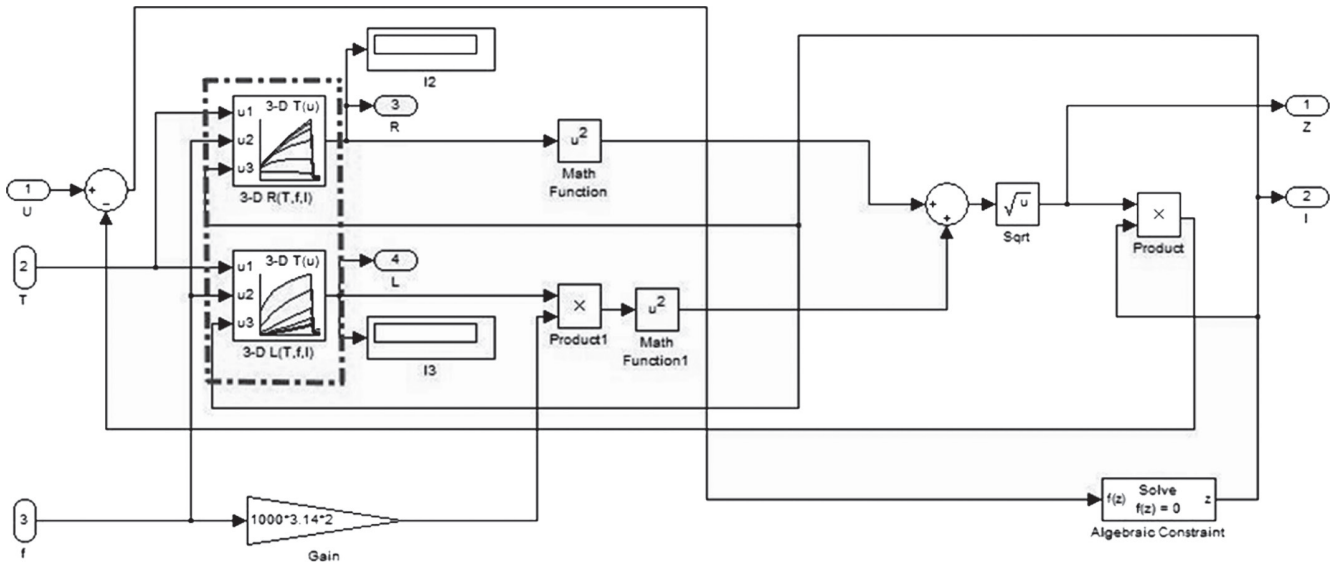


Рис. 4. Расчет тока индуктора в Simulink/Matlab

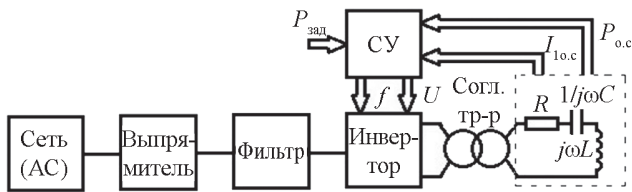


Рис. 5. Обобщенная структурная схема системы электропитания и управления ИТП

Рассмотрим вариант построения системы регулирования мощности ИТП только с использованием ЧИМ. Последовательный резонансный контур потребляет из источника максимум мощности при частотах, близких к его резонансной частоте. Принцип регулирования построен на том, что при уходе в сторону от резонансной частоты растет импеданс контура, вследствие чего он потребляет меньшую мощность.

В качестве регулятора мощности используем ПИ-регулятор (блок СУ, рис. 5). На его вход поступает сигнал рассогласования, в качестве которого выступает разность между заданием мощности печи  $P_3$  и сигналом отрицательной обратной связи — текущей мощностью  $P_{о.с} = P_п$ , вводимой в печь.

На рисунке 6 изображена модель системы регулирования мощности ИТП с проводящим ферромагнитным тиглем с одним каналом регулирования — частотой тока  $f$ . Она содержит два регулятора: один — понижающий частоту тока  $f$  до достижения печью температуры  $T_n = 700$  °С, второй — повышающий частоту тока  $f$  после преодоления указанной температуры.

Из рисунка 6 следует, что при нагревании до 700 °С работает структура адаптивного регулятора, понижающая частоту тока  $f$ , а при нагревании загрузки выше 700 °С повышающая частоту тока  $f$ . Таким образом, регулятор меняет свою структуру в зависимости от температуры тигля.

Приведем уравнения системы регулирования мощности, необходимые для программирования ПЛК.

Для  $0 \leq t \leq 700$  °С:

$$f = 21,33 - \Delta P \left( k_n + \frac{k_n}{p} \right) k',$$

где  $k_n = 1$ ;  $k_n = 0,05$ ;  $k' = 1$ .

Для  $700 \leq t \leq 800$  °С:

$$f = 14,10 + \Delta P \left( k_n + \frac{k_n}{p} \right) k'',$$

где  $k_n = 1$ ;  $k_n = 0,05$ ;  $k'' = 1$ .

В результате моделирования процесса плавки магния время плавки составило  $\tau = 6,2$  м, температура розлива магния  $T_{р.м} = 802$  °С, удельный расход составил 0,18 кВт·ч/кг. В пересчете на тонну расплава для промышленной печи удельный расход электроэнергии — 180 кВт·ч/т. После достижения печью температуры  $T_n = 700$  °С регулятор повышает частоту  $f$  до 45 кГц, что негативно сказывается на коммутации ключей, поскольку в них растут динамические потери. По этим причинам в источнике питания лабораторного стенда частота ограничена значением 25 кГц. Введем ограничение частоты  $f$  и в структурную модель регулятора мощности.

Для ограничения тока транзисторов необходимо воздействовать не только на канал частоты  $f$ , но и на канал напряжения источника питания  $U$  — следует снизить напряжение питания. Таким образом, система регулирования приобретает дополнительную надстройку.

По итогам моделирования процесса плавки магния время плавки  $\tau = 9,3$  м, температура разлива магния  $T_{р.м} = 802$  °С, удельный расход — 0,22 кВт·ч/кг (220 кВт·ч/т). При этом в ПИ-регуляторе коэффициент пропорциональности — 1, а интегральный коэффициент равен 0.

Уравнения системы регулирования мощности, используемые для программирования ПЛК.

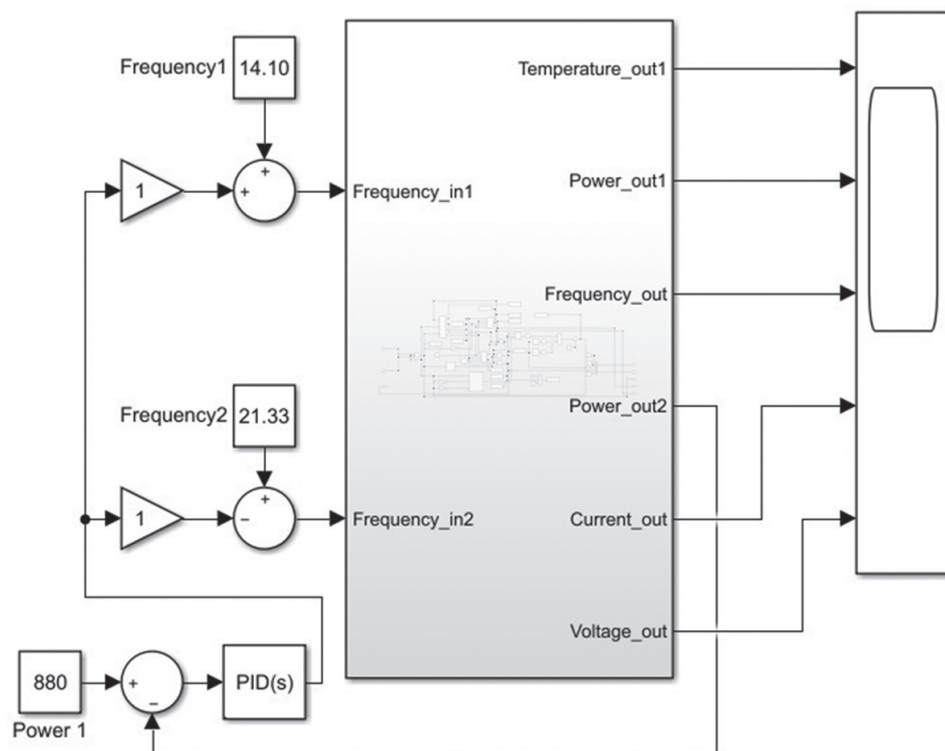


Рис. 6. Модель адаптивного регулятора мощности ИТП с ферромагнитным ПТ с одним каналом регулирования в среде Simulink/Matlab

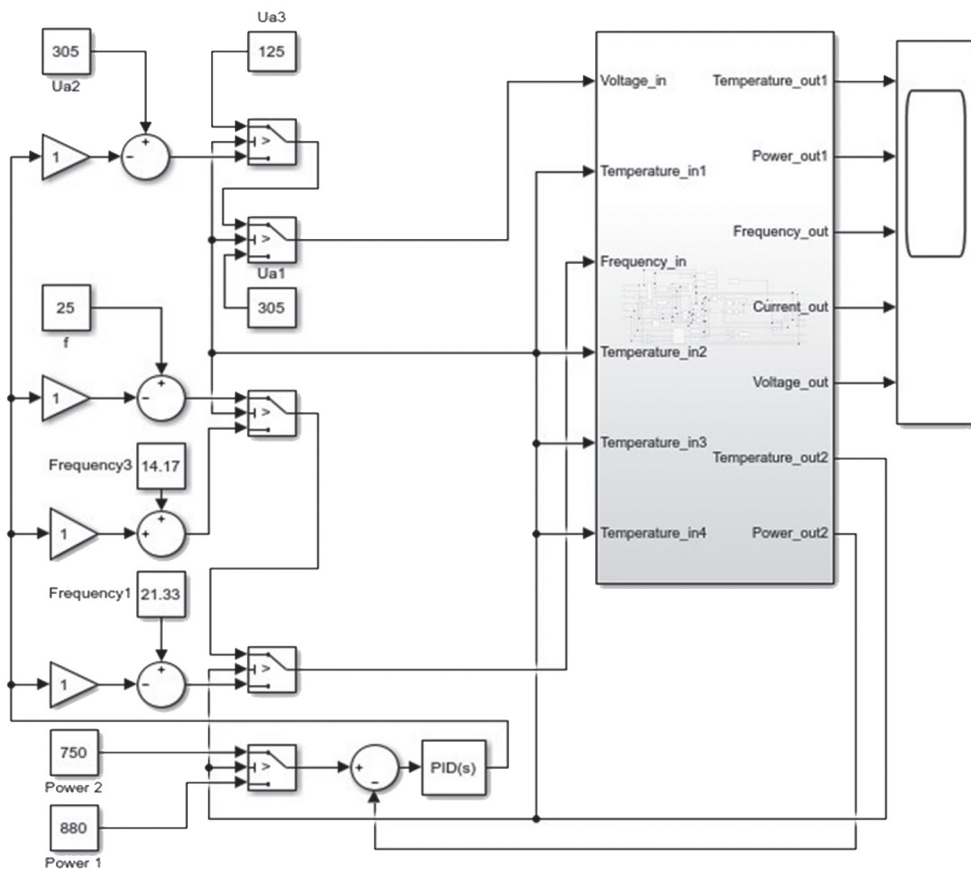


Рис. 7. Модель адаптивного регулятора мощности ИТП с ферромагнитным ПТ с двумя каналами регулирования в среде Simulink/Matlab

Для  $0 \leq t \leq 700 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$f = 21,33 - \Delta P \left( k_n + \frac{k_n}{P} \right) k',$$

где  $k_n = 1; k_n = 0; k' = 1$ .

Для  $700 \leq t \leq 800 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$f = 14,10 + \Delta P \left( k_n + \frac{k_n}{P} \right) k';$$

$$U = 305 - \Delta P \left( k_n + \frac{k_n}{P} \right) k''',$$

где  $k_n = 1; k_n = 0; k'' = 1; k''' = 1$ .

С целью сокращения времени плавки следует поддерживать максимально возможную мощность в диапазоне температур от 730 до 800 °С с соблюдением условия ограничения по току (рис. 7). Для ограничения тока в систему регулирования мощности ИТП введен блок задания мощности печи  $P_{\text{зад}} = 750 \text{ Вт}$ , что ниже начального определения мощности, и для поддержания указанного значения снижена частота тока.

Результаты моделирования продемонстрированы на рис. 8. Время плавки сокращено до  $\tau = 8,1 \text{ м}$ . Удельный расход — 0,2 кВт·ч/кг (200 кВт·ч/т).

Уравнения системы регулирования мощности, необходимые для программирования ПЛК:

Для  $0 \leq t \leq 700 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$f = 21,33 - \Delta P \left( k_n + \frac{k_n}{P} \right) k',$$

где  $k_n = 1; k_n = 0; k' = 1$ .

Для  $700 \leq t \leq 730 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$f = 14,17 + \Delta P \left( k_n + \frac{k_n}{P} \right) k'';$$

$$U = 305 - \Delta P \left( k_n + \frac{k_n}{P} \right) k''',$$

где  $k_n = 1; k_n = 0; k'' = 1; k''' = 1$ .

Для  $730 \leq t \leq 800 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$f = 25 - \Delta P \left( k_n + \frac{k_n}{P} \right) k'''';$$

$$U = 125 = \text{const},$$

где  $k_n = 1; k_n = 0; k'' = 1; k'''' = 1$ .

Наименее энергозатратна плавка с адаптивным регулятором мощности, в котором используется два канала регулирования — частотой тока  $f$  и напряжением источника питания  $U$ . До температуры печи ниже 700 °С частота тока снижается, в диапазоне 700...730 °С — повышается до 25 кГц (отсечка по частоте) и используется второй канал регулирования — напряжение  $U$ , понижаемое для поддержания ограничения по току. В диапазоне температур 730...800°С напряжение поддерживается постоянным, но снижается частота тока  $f$ . Для выполнения условия по ограничению тока на последнем этапе плавки меняется задание мощности вводимой в печь, она падает до  $P_{\text{зад}} = 750 \text{ Вт}$ .

**Пример применения адаптивного регулятора мощности со сложной структурой для промышленной печи ИГТ-1,6М**

Разработанные структурные модели адаптивного регулятора мощности с двумя каналами регулирования

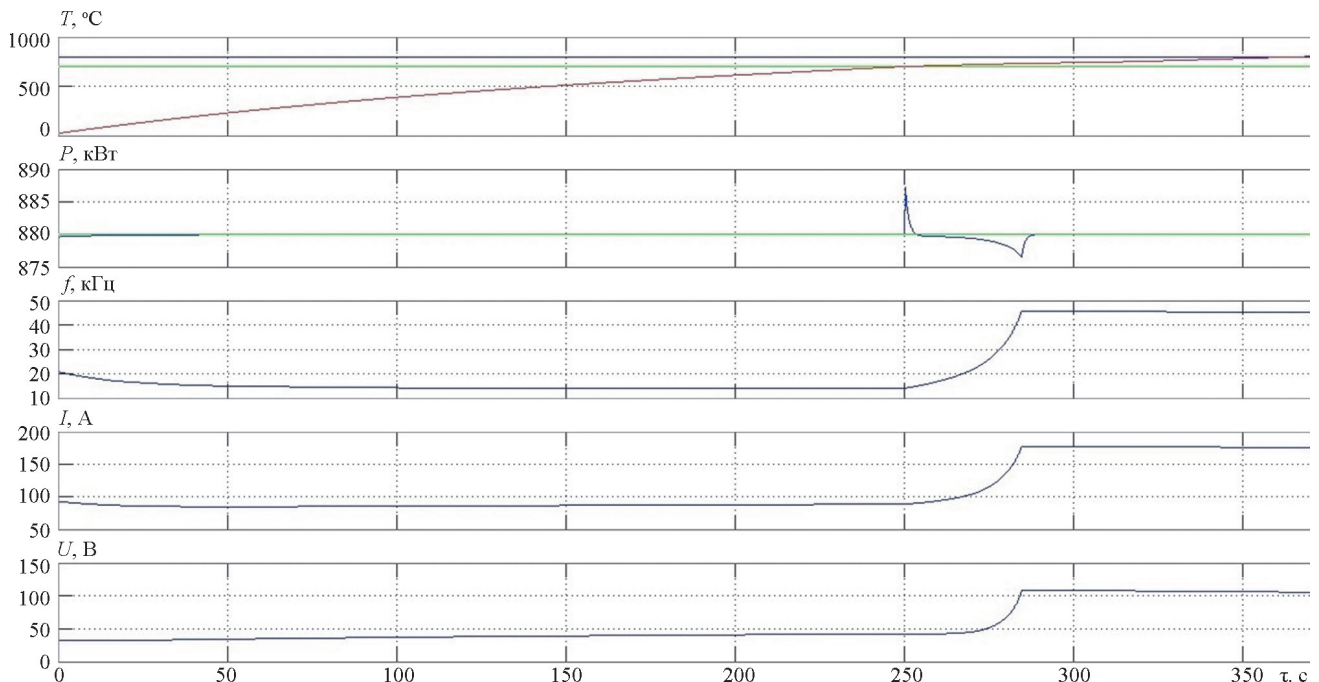


Рис. 8. Результаты моделирования процесса плавки магния в ИТП с проводящим тиглем в среде Simulink/Matlab с использованием системы регулирования мощности по двум каналам (частоте тока  $f$  и напряжению  $U$ ) и уменьшением задания мощности до  $P_{\text{зад}} = 750 \text{ Вт}$  после достижения температуры печи  $T_n = 730 \text{ }^\circ\text{C}$



(по частоте и напряжению индуктора) позволили получить набор числовых коэффициентов для промышленных ИТП с ПТ для плавки магния емкостью 0,1...6 т (диапазон мощностей — 50...5000 кВт).

Например, для промышленной печи ИГТ-1,6М, работающей на АО «ВИЛС», определены следующие законы регулирования для частоты и напряжения:

$$f = 200 - \Delta P \left( k_n + \frac{k_u}{p} \right) k^V;$$

$$U = 500 + \Delta P \left( k_n + \frac{k_u}{p} \right) k^{VI},$$

где  $k_n = 20$ ;  $k_u = 30$ ;  $k^V = 1$ ;  $k^{VI} = 1$ .

На основе полученных в работе результатов выполнена модернизация магниевого плавильного участка АО «ВИЛС», заключающаяся в замене электропечного регулируемого трансформатора печи на нерегулируемый силовой трансформатор и тиристорный преобразователь частоты с установленной мощностью 1200 кВт. На рисунке 9 показана модель адаптивного регулятора мощности для промышленной печи ИГТ-1,6М с проводящим ферромагнитным тиглем с двумя каналами регулирования — по частоте тока  $f$  и напряжению на индукторе  $U$ .

В таблице продемонстрированы результаты модернизации ИТП с ПТ для плавки магния емкостью 1,6 т

на основе компьютерного моделирования ИГТ-1,6М с применением адаптивного регулятора мощности с двумя каналами регулирования.

### Заключение

Разработана структурная модель ИТП с проводящим ферромагнитным тиглем в пакете Simulink/Matlab. Создана структурная модель адаптивного регулятора мощности ИТП с проводящим ферромагнитным тиглем с двумя каналами регулирования — частотой тока  $f$  и напряжением  $U$  источника питания.

По достижению точки Кюри резко снижается активное сопротивление тигля, вследствие чего наблюдается быстрый рост тока индуктора, происходит бросок мощности. Для снижения тока индуктора в указанном температурном режиме необходимо увеличение частоты. После прохождения точки Кюри мощность быстро снижается, что ведет к просадке температуры металла.

Наименее энергозатратной плавка получается в случае использования двух различных структур адаптивного регулирования, образующих адаптивный регулятор и работающих по принципу частотного регулирования, используемых в зависимости от текущего значения температуры. Однако при этом не соблюдается ограничение по выходному току инвертора, а режим работы транзисторных ключей становится не-

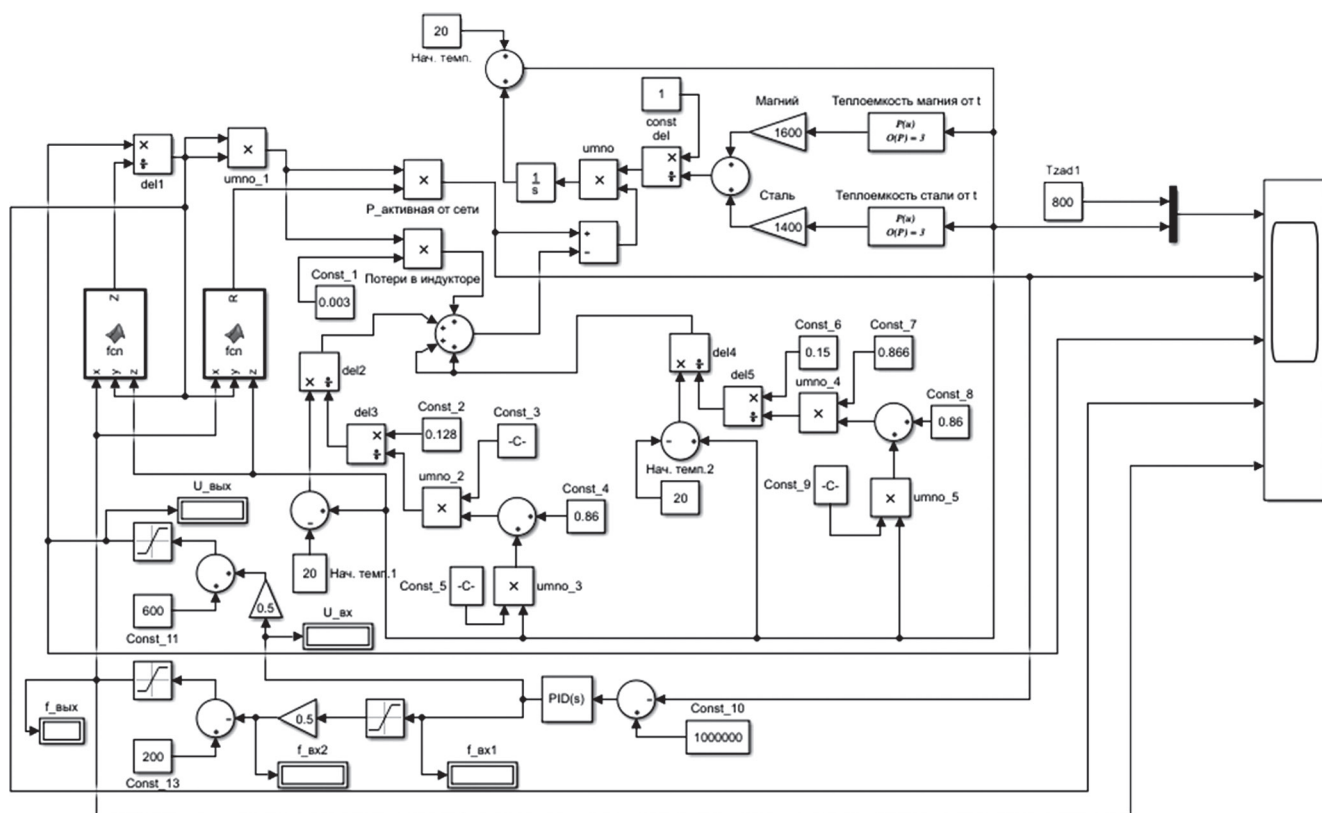


Рис. 9. Модель адаптивного регулятора мощности для промышленной печи ИГТ-1,6М с проводящим ферромагнитным тиглем с двумя каналами регулирования — по частоте тока  $f$  и напряжению на индукторе  $U$

## Технические характеристики печи ИГТ-1,6М до и после модернизации

Техническая характеристика	До модернизации	После модернизации
Мощность установленная, кВА	1600	1300
Мощность номинальная, кВт	915	1000
Число фаз	3	1
Частота тока, Гц	50	200...350
Номинальное напряжение, В: питающей сети контурной цепи (на индукторе) цепей управления	6000 285,5...1143 220	0,98
Коэффициент мощности после компенсации	1,0	0,98
Рабочая температура, °С	780...800	780...820
Производительность, т/ч	1,4	2,0
Время производственного цикла, ч	6,0	4,2
Коэффициент использования	0,6	0,85
Мощность конденсаторной батареи, кВАр	3356	3623
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т	550	500

благоприятным, существенно возрастают динамические потери в источнике питания. При таком режиме использования ключей источник питания работать не может.

Решением проблемы ограничения выходного тока инвертора является использование адаптивного регулятора мощности с двумя каналами регулирования мощности. Это позволяет существенно снизить потери в ИП при сохранении хорошей производительности и небольшом увеличении удельного расхода электроэнергии за время плавки.

## Литература

1. **Yilmaz I., Ermiş M., Çadirci I.** Medium Frequency Induction Melting Furnace as a Load on the Power System // Proc. 46<sup>th</sup> IEEE Industry Appl. Soc. Annual Meeting. 2011. V. 48(4). Pp. 1—12.
2. **Ivanov A.N., Bukanin V.A., Zenkov A.E.** Investigation of Induction Melting in Graphite Crucibles // Proc. IEEE Conf. Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Eng. 2020. Pp. 1234—1237.
3. **Lopukh D.B., Vavilov A.V., Martynov A.P., Skri-gan I.N.** Measurement System of Electric Parameters of the Induction Coil for Induction Melting in a Cold Crucible // Ibid. Pp. 734—737.
4. **Ivanov A.N., Bukanin V.A., Zenkov A.E.** Simulation of Induction Heating Processes in ICF eltA // Proc. IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Eng. 2019. Pp. 981—984.
5. **Федин М.А., Кувалдин А.Б., Кулешов А.О., Ахметьянов С.В., Кондрашов С.С.** Электротепловая модель и режимы работы индукционной тигельной печи с проводящим тиглем // Вестник МЭИ. 2019. № 5. С. 91—100.

Предложенный адаптивный регулятор со сложными структурами уменьшает удельный расход электроэнергии, увеличивает производительность печи по сравнению с регулятором на базе автоподстройки частоты и обеспечивает ограничение выходного тока полупроводникового инвертора.

Так, для промышленной печи ИГТ-1,6М использование разработанного адаптивного регулятора привело к снижению удельного расхода электроэнергии в 1,45 раза, увеличению производительности и уменьшению времени производственного цикла в 1,43 раза.

## References

1. **Yilmaz I., Ermiş M., Çadirci I.** Medium Frequency Induction Melting Furnace as a Load on the Power System. Proc. 46<sup>th</sup> IEEE Industry Appl. Soc. Annual Meeting. 2011;48(4):1—12.
2. **Ivanov A.N., Bukanin V.A., Zenkov A.E.** Investigation of Induction Melting in Graphite Crucibles. Proc. IEEE Conf. Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Eng. 2020:1234—1237.
3. **Lopukh D.B., Vavilov A.V., Martynov A.P., Skri-gan I.N.** Measurement System of Electric Parameters of the Induction Coil for Induction Melting in a Cold Crucible. Ibid:734—737.
4. **Ivanov A.N., Bukanin V.A., Zenkov A.E.** Simulation of Induction Heating Processes in ICF eltA. Proc. IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Eng. 2019:981—984.
5. **Fedin M.A., Kuvaldin A.B., Kuleshov A.O., Akhmet'yanov S.V., Kondrashov S.S.** Elektroteplovaya Model' i Rezhimy Raboty Induktсионnoy Tigel'noy Pechi s Provodyashchim Tiglem. Vestnik MEI. 2019;5:91—100. (in Russian).

6. **Levshin G.E.** Ways to Improve Induction Crucible Furnaces // *Izvestiya Ferrous Metallurgy*. 2019. V. 62(2). Pp. 97—102.
7. **Бондаренко Д.П., Дзлиев С.В., Патанов Д.А.** Коммутационные процессы в транзисторных инверторах для индукционного нагрева // *Известия ТЭТУ*. 1996. Вып. 497. С. 98—110.
8. **Лебедев А.В.** Выбор источников питания для индукционного нагрева. Саранск: Изд. дом МГУ им. Н.П. Огарева, 2015.
9. **Лавлесс Д.Л., Кук Р.Л., Руднев В.И.** Характеристики и параметры источников питания для эффективного индукционного нагрева // *Силовая электроника*. 2007. № 1. С. 94—98.
10. **Федин М.А.** Выбор принципа регулирования и разработка систем управления индукционных тигельных печей с проводящим тиглем // *Индукционный нагрев*. 2014. № 1(27). С. 24—28.
11. **Alekseeva M.M., Artyukhov I.I., Alekseev V.S.** Engineering Calculation of Induction Crucible Furnace with MATLAB/Simulink // *Proc. V Intern. Conf. Information Technologies in Engineering Education [Электрон. ресурс]* [www.inforino.mpei.ru/online/Pages/default.aspx](http://www.inforino.mpei.ru/online/Pages/default.aspx) (дата обращения 24.06.2020).
12. **Hrbek J., Ebel W.** Mathematical Model to Design Experiment Arrangement of Induction Furnace with Cold Crucible // *Proc. X Intern. Sci. Symp. Electrical Power Eng.* 2019. Pp. 499—503.
13. **Shcherba M.A.** Three-dimensional Modeling of Electromagnetic and Temperature Fields in the Inductor of Channel-type Furnace for Copper Heating // *IEEE I Ukraine Conf. Electrical and Computer Eng.* 2017. Pp. 427—431.
14. **Zolotarev V.M., Shcherba M.A., Zolotarev V.V., Belyanin R.V.** Three-dimensional Modeling of Electromagnetic and Thermal Processes of Induction Melting of Copper Template with Accounting of Installation Elements Design // *Techn. Electrodynamics*. 2017. V. 3. Pp. 13—21.
15. **Lavers J.D.** State of the Art of Numerical Modeling for Induction Processes // *Intern. J. Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Eng.* 2018. V. 27(2). Pp. 335—349.
16. **Федин М.А. и др.** Разработка регулятора мощности индукционной тигельной печи промышленной частоты для плавки магния // *Труды Междунар. конф. молодых специалистов по микро- и нанотехнологиям и электронным устройствам*. Новосибирск, 2018. С. 302—304.
6. **Levshin G.E.** Ways to Improve Induction Crucible Furnaces. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*. 2019;62(2): 97—102.
7. **Bondarenko D.P., Dzliev S.V., Patanov D.A.** Kommutatsionnye Protsessy v Tranzistornykh Invertorakh dlya Induksionnogo Nagreva // *Izvestiya TETU*. 1996;497: 98—110. (in Russian).
8. **Lebedev A.V.** Vybor Istochnikov Pitaniya dlya Induksionnogo Nagreva. Saransk: Izd. Dom MGU im. N.P. Ogareva, 2015. (in Russian).
9. **Lavless D.L., Kuk R.L., Rudnev V.I.** Kharakteristiki i Parametry Istochnikov Pitaniya dlya Effektivnogo Induksionnogo Nagreva. *Silovaya Elektronika*. 2007;1: 94—98. (in Russian).
10. **Fedin M.A.** Vybor Printsipa Regulirovaniya i Razrabotka Sistem Upravleniya Induksionnykh Tigel'nykh Pechey s Provodyashchim Tiglem. *Induksionnyy Nagrev*. 2014;1(27):24—28. (in Russian).
11. **Alekseeva M.M., Artyukhov I.I., Alekseev V.S.** Engineering Calculation of Induction Crucible Furnace with MATLAB/Simulink. *Proc. V Intern. Conf. Information Technologies in Engineering Education [Elektron. Resurs]* [www.inforino.mpei.ru/online/Pages/default.aspx](http://www.inforino.mpei.ru/online/Pages/default.aspx) (Data Ob-rashcheniya 24.06.2020).
12. **Hrbek J., Ebel W.** Mathematical Model to Design Experiment Arrangement of Induction Furnace with Cold Crucible. *Proc. X Intern. Sci. Symp. Electrical Power Eng.* 2019:499—503.
13. **Shcherba M.A.** Three-dimensional Modeling of Electromagnetic and Temperature Fields in the Inductor of Channel-type Furnace for Copper Heating. *IEEE I Ukraine Conf. Electrical and Computer Eng.* 2017:427—431.
14. **Zolotarev V.M., Shcherba M.A., Zolotarev V.V., Belyanin R.V.** Three-dimensional Modeling of Electromagnetic and Thermal Processes of Induction Melting of Copper Template with Accounting of Installation Elements Design. *Techn. Electrodynamics*. 2017;3:13—21.
15. **Lavers J.D.** State of the Art of Numerical Modeling for Induction Processes. *Intern. J. Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Eng.* 2018;27(2): 335—349.
16. **Fedin M.A. i dr.** Razrabotka Regulyatora Moshchnosti Induksionnoy Tigel'noy Pechi Promyshlennoy Chastoty dlya Plavki Magniya. *Trudy Mezhdunar. Konf. Molodykh Spetsialistov po Mikro- i Nanotekhnologiyam i Elektronnyim Ustroystvam*. Novosibirsk, 2018: 302—304. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Федин Максим Андреевич** — доктор технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: FedinMA@mail.ru

**Кувалдин Александр Борисович** — доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: KuvaldinAB@mpei.ru

**Кулешов Алексей Олегович** — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: AOKuleschov@yandex.ru

**Ахметьянов Святослав Владимирович** — аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: ahmetyanov91@yandex.ru

**Кондрашов Сергей Семенович** — ведущий инженер кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: sskondrashov@yandex.ru

**Information about authors:**

**Fedin Maksim A.** — Dr.Sci. (Techn.), Assistant Professor of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: FedinMA@mail.ru

**Kuvaldin Aleksandr B.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: KuvaldinAB@mpei.ru

**Kuleshov Aleksey O.** — Ph.D. (Techn.), Senior Lecturer of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: AOKuleschov@yandex.ru

**Akhmetyanov Svyatoslav V.** — Ph.D.-student of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: ahmetyanov91@yandex.ru

**Kondrashov Sergey S.** — Leading Engineer of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: sskondrashov@yandex.ru

**Работа выполнена при поддержке:** Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (инициативный научный проект № 8.9608.2017/БЧ)

**The work is executed at support:** Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Initiative Research Project No. 8.9608.2017/БЧ)

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 24.07.2020

**The article received to the editor:** 24.07.2020