УДК 621.365.42
DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-101-109

Исследование температурного режима элементов конструкции вакуумной электропечи сопротивления методом структурного математического моделирования

М.Я. Погребисский, В.П. Рубцов, Э.Ф. Сальманова

Показана актуальность задачи по созданию структурной математической модели высокотемпературной вакуумной электрической печи сопротивления (ЭПС) для исследования тепловых процессов с определением температуры каждого из элементов, прогнозирования срока службы нагревательных элементов, экранов и других элементов конструкции печи, выбора места установки датчика температуры и соответствующей настройки системы регулирования температуры.
Традиционно используемая модель с представлением печи инерционным звеном первого порядка не дает такой возможности, так как в этом случае рассчитывается усредненная температура печи. Следовательно, необходимо построение модели печи, основанной на уравнениях энергетического баланса для макроэлементов (нагреватель, каждый из экранов, загрузка и т. д.) с учетом теплообмена и излучения между макроэлементами.
Разработана и реализована в программном пакете Simulink математическая структурная модель вакуумной высокотемпературной электрической печи Таммана с нагревателем в виде угольной или графитовой трубы и теплоизоляцией в виде графитовых цилиндров-экранов. При моделировании тепловых процессов учитывалось тепловое сопротивление теплопроводности графитовых экранов, которым традиционно пренебрегают при расчете широко распространенных тонких металлических экранов.
Проанализирован температурный режим отдельных элементов конструкции (нагреватели, экраны и т.д.), как при постоянном напряжении питания нагревателей, так и при использовании замкнутой системы регулирования температуры. Показано влияние места установки датчика температуры на качество автоматического регулирования температуры. Обоснована целесообразность использования разработанной модели для настройки пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора с целью обеспечения требуемого качества регулирования.

Ключевые слова: вакуумная печь сопротивления, печь Таммана, температурный режим, нестационарные процессы, структурное моделирование, система регулирования, расположение датчика температуры.

Для цитирования: Погребисский М.Я., Рубцов В.П., Сальманова Э.Ф. Исследование температурного режима элементов конструкции вакуумной электропечи сопротивления методом структурного математического моделирования // Вестник МЭИ. 2019. № 4. С. 101—109. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-101-109.

Studying the Temperature Operating Conditions of Vacuum Electrical Resistance Furnace Structural Elements Using the Structural Mathematical Modeling Method

M.Ya. Pogrebisskiy, V.P. Rubtsov, E.F. Salmanova

The article demonstrates the importance of developing a structural mathematical model of a high-temperature vacuum electrical resistance furnace (ERF) for studying the thermal processes in it with determining the temperature of each furnace element, predicting the service life of heating elements, screens, and other furnace structural elements, selecting the temperature sensor installation place, and making relevant adjustment of the temperature control system.
The commonly used model, in which the furnace is represented by a first-order inertial section, does not provide such possibility, because the furnace average temperature is calculated in that case. Therefore, it is necessary to construct a model based on the energy balance equations for macro elements (heater, each of the screens, loading, etc.) taking into account radiant heat transfer between the macro elements.
A mathematical structural model of a Tamman vacuum high-temperature electric furnace equipped with a heater in the form of a coal or graphite pipe and thermal insulation in the form of graphite cylinders-screens has been developed and implemented in the Simulink software package. The

thermal resistance of graphite screens thermal conductivity, which is commonly neglected in design calculations of widely used thin metal screens, was taken into account in simulating the thermal processes.
The temperature operating conditions of individual structural elements (heaters, screens, etc.) are analyzed, both at constant power supply voltage of the heaters and in using a closed-loop temperature control system. The effect the temperature sensor installation place has on the automatic temperature control quality is shown. The advisability of using the developed model for adjusting the proportional-integral-differential controller to ensure the required control quality is substantiated.

Key words: vacuum resistance furnace, Tamman furnace, temperature operating conditions, unsteady processes, structural modeling, control system, temperature sensor location.

For citation: Pogrebisskiy M.Ya., Rubtsov V.P., Salmanova E.F. Studying the Temperature Operating Conditions of Vacuum Electrical Resistance Furnace Structural Elements Using the Structural Mathematical Modeling Method. Bulletin of MPEI. 2019;4:101—109. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-101-109.

Введение

Высокотемпературные вакуумные электрические печи сопротивления (ЭПС) используются в технологических процессах в металлургии (спекание порошков тугоплавких металлов), машиностроении (термообработка изделий из тугоплавких металлов и композитов), химической промышленности (получение карбидов, карботермическое и силикотермическое восстановления и др.) К высокотемпературным вакуумным печам относятся ЭПС с рабочей температурой свыше 1700 °С.

Для совершенствования конструктивных решений высокотемпературных вакуумных ЭПС, отработки технологических процессов, анализа энергетической эффективности, оценки надежности элементов конструкции необходимо проведение значительного объема исследований.

Экспериментальное изучение температурного режима высокотемпературной вакуумной ЭПС, требующее выполнения серий измерений температуры различных элементов конструкции и точек рабочего пространства печи, затруднено, а во многих случаях и неэффективно из-за значительной инерционности установок, энергоемкости опытов, трудности или невозможности прямого измерения ряда параметров. Многие электрические и тепловые задачи электротермии нелинейны, большинство электрических печей сопротивления представляют собой объекты с распределенными параметрами, а на протекание процессов в ЭПС влияет множество факторов, в том числе носящих вероятностный характер. Поэтому применение аналитических методов исследования электротермических установок (ЭТУ) также затруднено. Однако целесообразно исследование температурного режима печи методами математического моделирования. Они помогают изучать распределения температуры в нагреваемом изделии (загрузке), в том числе в динамических режимах, и переходные процессы изменения температуры элементов конструкции печи, что позволяет более точно прогнозировать срок службы отдельных элементов, осуществлять выбор места установки датчика системы регулирования температуры, настройку регулятора температуры [1 — 7].

Объект исследований

Одна из распространенных конструкций высокотемпературных ЭПС — так называемая печь Таммана, в которой нагреватель выполнен в виде угольной или графитовой трубы, а внутренность трубы является рабочим пространством печи, куда закладываются нагреваемые изделия. Достоинства печи Таммана заключаются в возможности работы при температурах свыше 2000 °С и высокой равномерности температурного поля. Для обеспечения защиты нагреваемых изделий от окисления или иного химического воздействия среды рабочее пространство печи вакуумируется или заполняется инертным газом.

Для прогнозирования срока службы теплоизоляционных экранов, нагревательных элементов и других элементов конструкции необходимо моделирование тепловых процессов с определением температуры каждого из элементов. Определение температур всех элементов конструкции также нужно для выбора места установки датчика температуры и соответствующей настройки системы регулирования температуры [8, 9].

Традиционно используемая модель с представлением печи инерционным звеном 1-го порядка не дает такой возможности, так как в этом случае рассчитывается усредненная температура печи. Следовательно, необходимо построение модели, основанной на уравнениях энергетического баланса для макроэлементов конструкции (нагревателя, каждого из экранов, загрузки и т. д.) с учетом теплообмена излучением между макроэлементами [10, 11]. Она позволит изучить установившиеся и переходные тепловые режимы ЭПС.

Созданная математическая модель динамических процессов теплопередачи в печи Таммана основана на принципе энергетического баланса для макроэлементов печи. В ней вакуумная высокотемпературная печь Таммана представлена системой взаимосвязанных элементов (рис. 1).

При моделировании тепловых процессов в ЭПС сделаны следующие допущения:

- каждый макроэлемент однороден в тепловом отношении, значения теплофизических параметров (теплопроводности, теплоемкости, плотности и т. д.) неизменны во всем объеме макроэлемента;
- температура поверхности макроэлемента в любой момент времени одинакова по всей поверхности (под температурой макроэлемента понимается температура поверхности, за исключением тигля и загрузки, для которых выделяются температуры на внутренней и наружной поверхностях тигля, а также на поверхно-

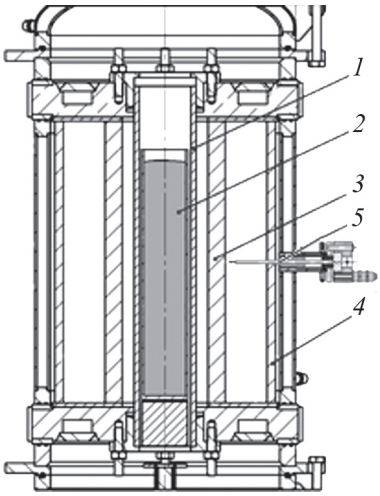


Рис. 1. Высокотемпературная вакуумная печь Таммана:
1 — нагреватель; *2* — тигель с загрузкой; *3* — первый экран; *4* — второй экран с корпусом; *5* — датчик температуры

сти и в центре загрузки; температура на поверхности загрузки равна температуре внутренней поверхности тигля);

● значения теплофизических параметров не зависят от температуры;

● теплообмен между макроэлементами ЭПС осуществляется только излучением, за исключением теплопередачи тигель – загрузка, выполняемой теплопроводностью;

● теплоемкостью металлоконструкций и защитной газовой среды в печи (если печь используется с защитным газом) можно пренебречь.

Уравнение энергетического баланса для *i*-го макроэлемента (мгновенных значений мощностей) запишем в виде:

$$P_{н_i} = \Sigma P_{приходi} \neg \Sigma P_{расходi},$$

где $P_{н_i}$ — мощность, идущая на изменение температуры макроэлемента (мощность нагрева); $\Sigma P_{приходi}$ — суммарная мощность, приходящая к *i*-у макроэлементу; $\Sigma P_{расходi}$ — суммарная мощность, передаваемая от *i*-го макроэлемента другим макроэлементам (для второго экрана с кожухом учитывается также мощность тепловых потерь, т. е. мощность, отдаваемая в окружающую среду).

Данные по энергетическому балансу сведены в таблицу.

Мощность P_{ij} определяется как:

$$P_{ij} = C_{ij}(\theta_i - \theta_j)F_{ij},$$

где C_{ij} — приведенный коэффициент излучения; θ_i, θ_j — температурные факторы для поверхностей соответствующих макроэлементов; F_{ij} — расчетная поверхность.

Температурный фактор выглядит следующим образом:

$$\theta = (T/100)^4,$$

где T — абсолютная температура, К.

Преобразуем обе формулы и получим:

$$P_{ij} = g_{ij}[T_i^4 - T_j^4],$$

где $g_{ij} = C_{ij}F_{ij} \cdot 10^{-8}$.

Полученная на основе использованных выражений структурная схема вакуумной печи Таммана представлена на рис. 2, *а*, а связь между макроэлементами (температурой поверхности макроэлемента и мощностью, передаваемой другому макроэлементу) — на рис. 2, *б*.

Математическое описание макроэлементов, входящих в схему рис. 2, строится на основе законов теплопередачи при граничных условиях второго рода (нагрев постоянным тепловым потоком).

Для проведения исследований на разработанной модели использован один из прикладных программных пакетов структурного моделирования систем, позволяющих представлять модель исследуемой системы в виде структурной схемы. Matlab/Simulink — проблемно-ориентированный язык, позволяющий моделировать динамические системы, включая нелинейные, импульсные и цифровые.

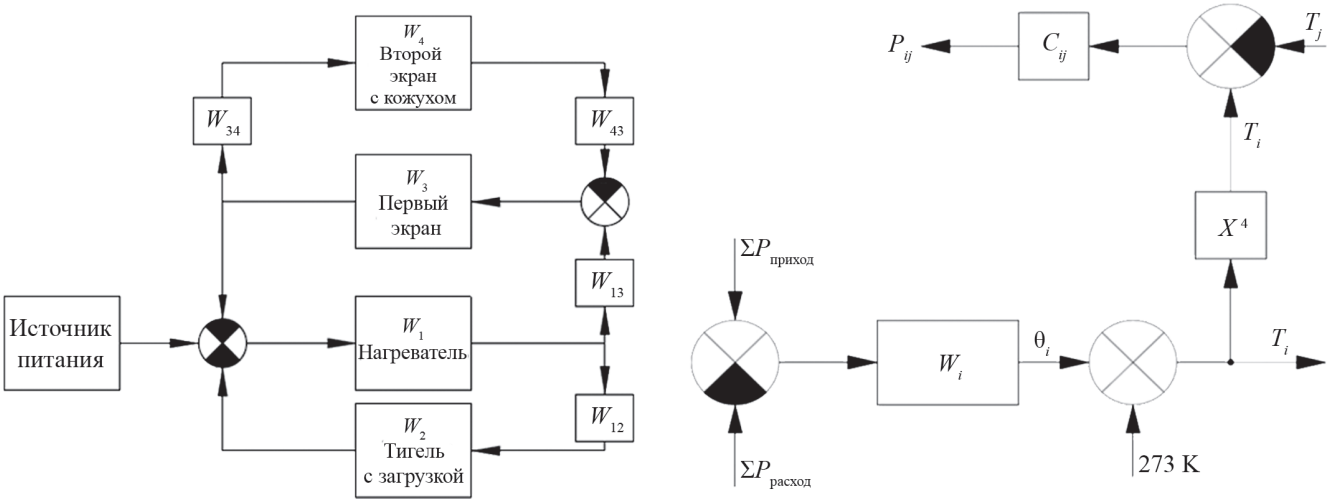
Схема модели печи в среде Simulink, разработанная на основе структурной схемы с учетом связей, показанных на рис. 2, и передаточных функций, изображена на рис. 3.

Для определения температур элементов конструкции ЭПС в установившемся режиме, а также идентификации печи как объекта управления, исследования на модели проводят в режиме постоянства мощности, потребляемой печью (т. е. для разомкнутого по темпе-

Энергетический баланс

Макроэлемент	Энергия		Уравнения энергетического баланса
	приход	расход	
Нагреватель	$P_с$	$P_{12} + P_{13}$	$P_{н1} = P_с - P_{12} - P_{13}$
Тигель с загрузкой	P_{12}	0	$P_{н2} = P_{12}$
Первый экран	P_{13}	P_{34}	$P_{н3} = P_{13} - P_{34}$
Второй экран с корпусом	P_{34}	P_{43}	$P_{н4} = P_{34} - P_{43}$

Пр и м е ч а н и е. $P_с$ — мощность, потребляемая нагревателем из сети; $P_{ij}(i, j = 1…4)$ — мощность, передаваемая от *i*-го макроэлемента *j*-му



а *б*

Рис. 2. Структурная схема вакуумной электропечи Таммана (*а*) и связь между макроэлементами в вакуумной ЭПС (*б*):
W_1 — W_4 — передаточные функции соответствующих макроэлементов, обеспечивающие связь между входным воздействием (мощностью нагрева макроэлемента) и выходной величиной (температурой поверхности); W_{ij} $(i, j = 1\ldots 4)$ — передаточные функции связей между макроэлементами

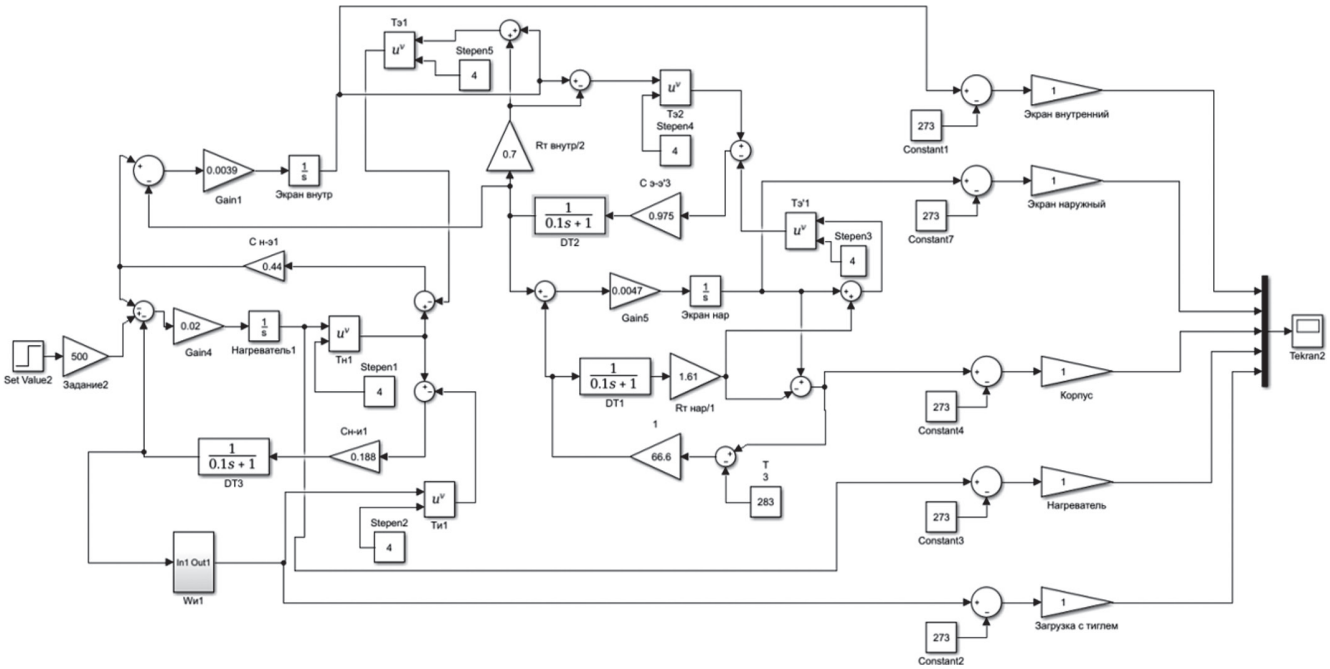


Рис. 3. Схема модели печи Таммана в среде Simulink

ратуре режима системы автоматического регулирования (см. рис. 3)).

На модели рис. 3 получены временные зависимости температур элементов конструкции печи Таммана при постоянной потребляемой мощности (рис. 4). Из-за особенностей конструкции печи температура тигля с загрузкой в первом приближении равна температуре нагревателя, в то время как разница между средней температурой первого экрана и нагревателя составляет порядка 300 °C. Данные о температурном режиме можно использовать для прогнозирования срока службы элементов печи. Износ нагревателей, теплоизоляции и других элементов конструкции вакуумных печей определяется, во-первых, испарением материала в вакууме (защитной газовой среде), а во-вторых, окислением остаточным кислородом с последующим испарением окислов. Интенсивность износа зависит от температуры, давления в рабочей камере и состава среды [12].

Адекватность разработанной математической модели подтверждается результатами измерений температуры, выполненных на действующих печах-прототипах.

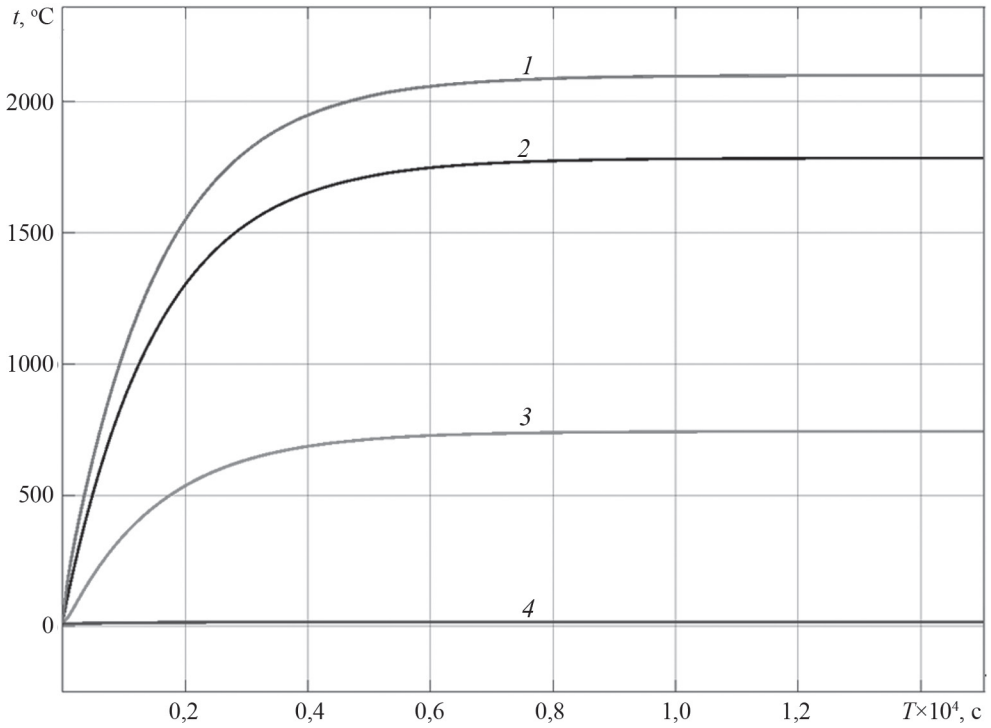


Рис. 4. Кривые температуры элементов конструкции печи Таммана при постоянной потребляемой мощности: *1* — нагреватель и тигель с загрузкой; *2* — первый экран; *3* — второй экран; *4* — корпус

В соответствии с методикой, описанной в [1], определяются необходимые для настройки регулятора температуры значения постоянной времени печи *T* (графически по кривой нагрева) и коэффициенты усиления печи.

Выбор места установки датчика температуры и настройка регулятора температуры

Процесс регулирования температуры в ЭПС осложняется тем обстоятельством, что непосредственно измерять ее, а, следовательно, и регулировать невозможно. Измеряется и регулируется температура печи, а точнее температура рабочего конца термопары, которая является функцией температур нагревателей, футеровки и изделий и поэтому зависит от расположения термопары в печном пространстве [12 — 17].

При непрерывном регулировании температуры ЭПС в качестве исполнительного устройства используется тиристорный регулятор напряжения с фазоимпульсным или низкочастотным широтно-импульсным управлением. Благодаря значительной инерционности объекта управления в большинстве случаев импульсным характером подачи мощности на нагреватели можно пренебречь.

Схема модели системы непрерывного регулирования температуры в Simulink представлена на рис. 5. В ней датчик температуры (термопара или термопреобразователь сопротивления) представлен инерционным звеном первого порядка с постоянной времени ТДТ.

Предложенную модель удобно использовать для настройки регулятора с пропорционально-интегрально-дифференциальным законом регулирования (ПИД-регулятора), т. е. для подбора значений коэффициентов при пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих закона регулирования, обеспечивающих требуемое качество регулирования (перерегулирование, время переходного процесса, колебательность и т. д.) [18, 19].

Определение настроек регулятора температуры (коэффициентов пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих закона регулирования КП, КИ, КД, соответственно) выполняли в соответствии с методикой [1] на основе значений коэффициента усиления печи *K* и постоянной времени *T*, определяемых путем модельного эксперимента.

Точность регулирования температуры загрузки и качество переходного процесса регулирования температуры (прежде всего колебательность и перерегулирование) зависят не только от динамических свойств печи и датчика температуры, но и от расположения датчика в печи [20].

Анализ временных характеристик при установке термопары между графитовыми экранами (рис. 6) показал наличие значительного перерегулирования, при этом температура на нагревателе достигала порядка 2500 °C (при характерной для печи Таммана заданной конечной температуре нагрева загрузки 2000...2200 °C), что сокращает срок службы как самого нагревателя, так и других элементов конструкции печи.

При установке датчика вблизи поверхности нагревателя или загрузки (рис. 7) перерегулирование прак-

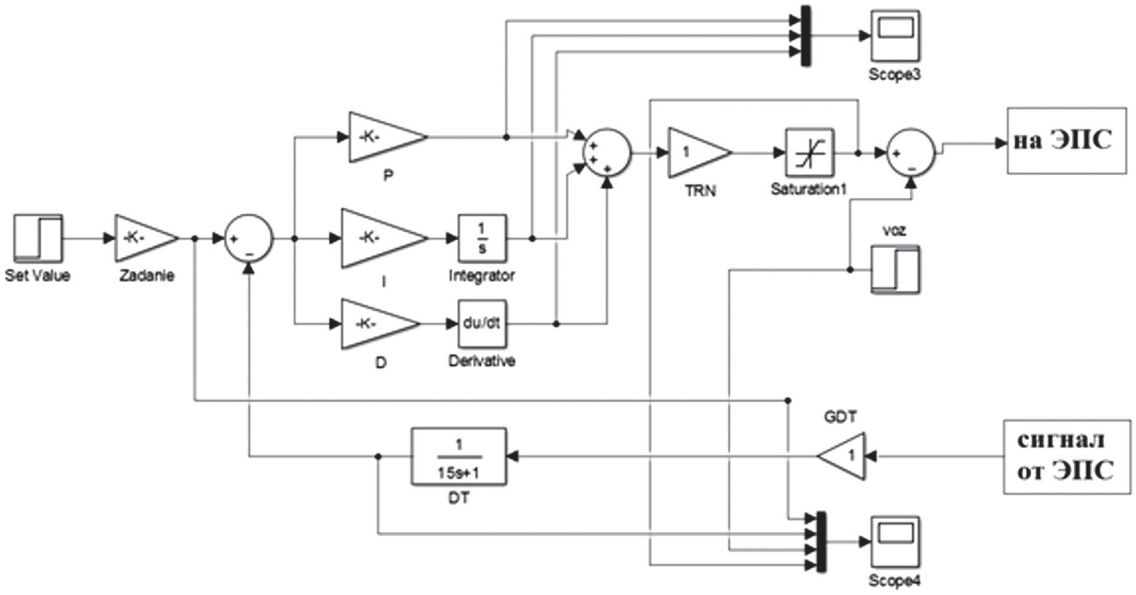


Рис. 5. Схема модели системы непрерывного регулирования температуры ЭПС с ПИД-законом регулирования в Simulink

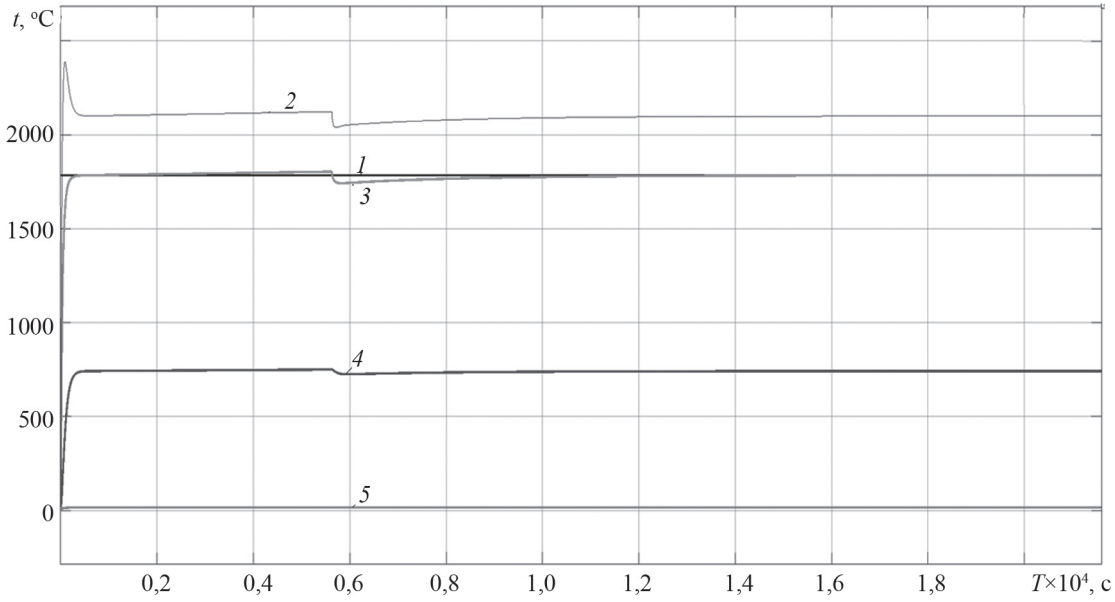


Рис. 6. Временные характеристики (кривые нагрева элементов конструкции) печи Таммана с ПИД-регулятором при установке датчика температуры между экранами:

1 — задание; *2* — нагреватель, тигель с загрузкой; *3* — первый экран; *4* — второй экран; *5* —корпус

тически отсутствует, кроме того, расположение датчика вблизи загрузки позволяет точнее поддерживать температуру. Следовательно, оптимальным с точки зрения качества регулирования является расположение датчика температуры вблизи поверхности нагревателя.

Однако на практике расположить датчик температуры таким образом часто не удается, поскольку размещение датчика вблизи поверхности нагревателя или загрузки затрудняют конструктивное исполнение печи Таммана и высокая температура в области нагревателя (учитывая, что приемлемый срок службы термопар достигается только при температурах не выше 1800 °C). В этих случаях термопара располагается между графитовыми экранами (см. рис. 1), поэтому при определении задания температуры (уставки системы регулирования) необходимо делать поправку относительно конечной температуры нагрева загрузки. Величина поправки может быть определена по результатам исследований на модели.

Для уменьшения величины перерегулирования, возникающего при установке датчика температуры между экранами, следует скорректировать настройки ПИД-регулятора.

На рис. 8 изображены временные характеристики печи Таммана при скорректированных настройках ПИД-регулятора.

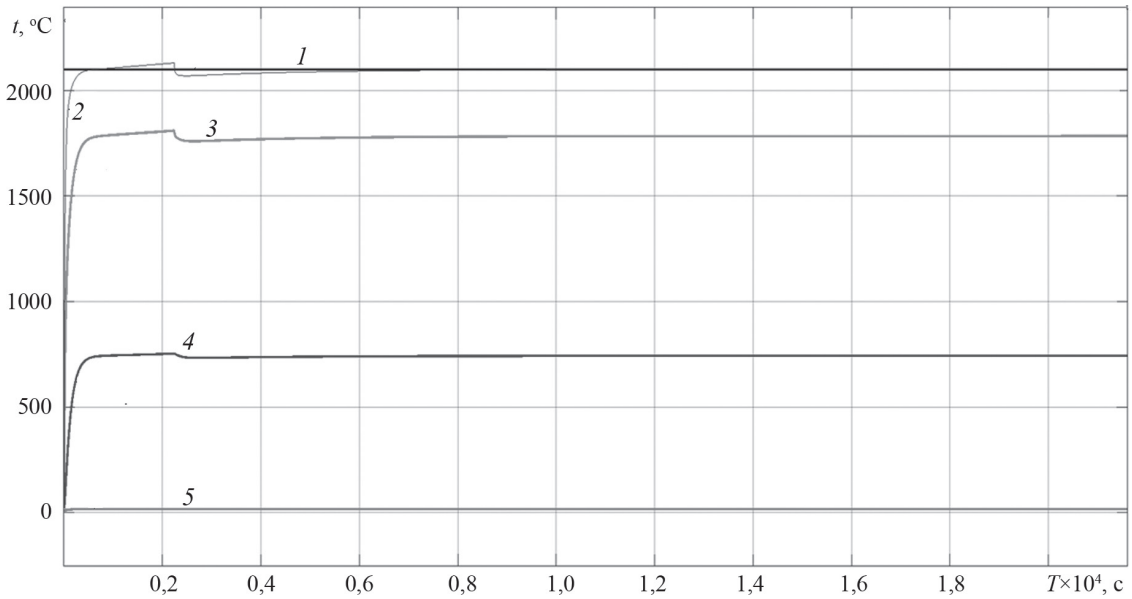


Рис. 7. Временные характеристики (кривые нагрева элементов конструкции) печи Таммана с ПИД-регулятором при установке датчика температуры вблизи загрузки:

1 — 5 — те же, что на рис. 6

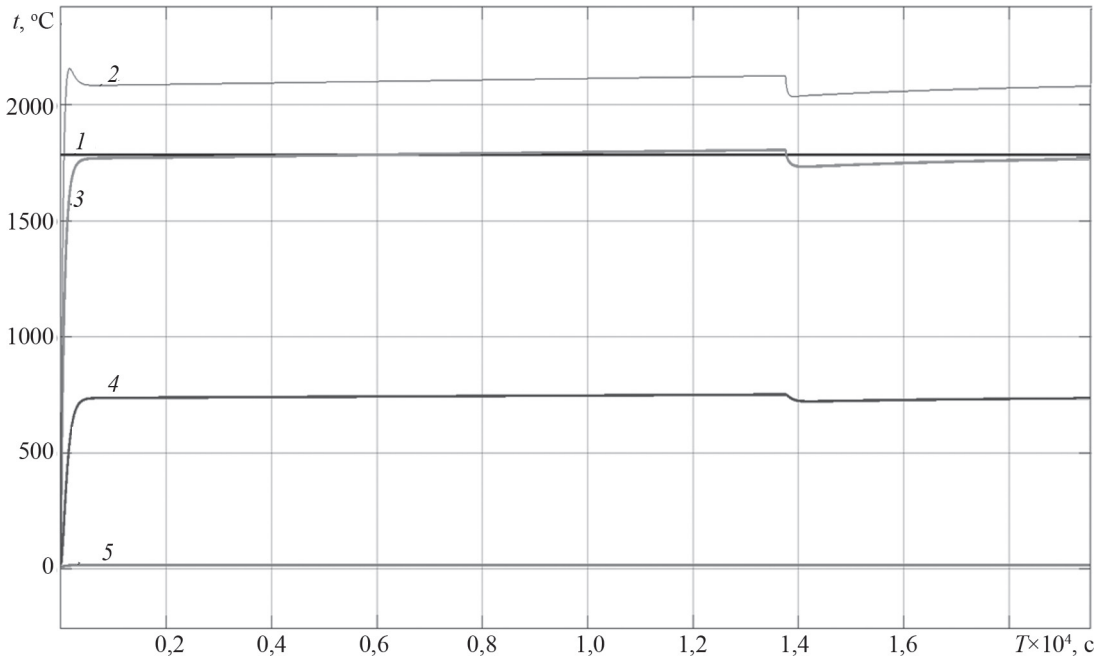


Рис. 8. Временные характеристики (кривые нагрева элементов конструкции) печи Таммана с ПИД-регулятором при установке датчика температуры между экранами при скорректированных коэффициентах ПИД-регулятора:

1 — 5 — те же, что на рис. 6

Максимальная температура нагревателя в переходном режиме уменьшилась до 2150 °C, но время регулирования при отработке возмущения существенно увеличилось.

Применение модели

Разработанная усовершенствованная математическая модель высокотемпературной печи позволяет получать не усредненную температуру печи, а временные зависимости температуры элементов конструкции печи (нагревателей, экранов, тигеля) и загрузки как при постоянной потребляемой мощности, так и при работе замкнутой системы регулирования температуры в различных местах установки датчика температуры. С помощью реализованной модели можно выбрать место расположения датчика температуры, обеспечивающее необходимую точность и качество регулирования, и вычислить требуемую поправку при определении за-

дания температуры (уставки системы регулирования) относительно конечной температуры нагрева загрузки.

Модель удобно использовать для настройки ПИД-регулятора т. е. для подбора значений коэффициентов при пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих закона регулирования, обеспечивающих желаемое качество регулирования (перерегулирование, время переходного процесса, колебательность и т. д.).

При дальнейшей работе по усовершенствованию математической структурной модели печи Таммана предполагается учет процессов износа нагревателей и других элементов конструкции (за счет испарения материала и химических процессов) в зависимости от температурного режима для прогнозирования срока их службы.

Заключение

Показана целесообразность применения структурного математического моделирования для прогнозирования срока службы нагревательных элементов, экранов и других элементов конструкции печи.

Разработана и реализована математическая структурная модель вакуумной высокотемпературной электрической печи Таммана для исследования тепловых процессов с определением температуры каждого из элементов конструкции.

На основе данных, полученных на разработанной модели проанализирован температурный режим нагревательных элементов, экранов и других элементов конструкции печи, исходя из которого возможно прогнозирование их срока службы.

Определено влияние места установки датчика температуры на качество автоматического регулирования температуры в печи Таммана;

Проведена настройка пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора с целью обеспечения требуемого качества регулирования.

Литература

1. **Минеев А.Р., Коробов А.И., Погребисский М.Я.** Моделирование электротехнологических процессов и установок. М.: Спутник+, 2004.

2. **Герман-Галкин С.Г.** Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Корона-Век, 2008.

3. **Slock S., Shivpuri R.** A Time-compressed Numerical Approach for Thermal Analysis of Preheating Process in Powder Metallurgy // Thermal Proc. 2015. April. Pp. 36—45.

4. **Chernack S.** Ensuring Effective Furnace Lining Efficiency // Thermal Proc. 2017. May. Pp. 38—39.

5. **Ferguson B.L.** Quality Counts: Thermal Process Modeling // Thermal Processing, September, 2016. Pp. 16—17.

6. **Fradette R.J.** Methods of Improving Vacuum Furnace Insulation Efficiencies // Industrial Heating. 2013. September. Pp. 45—49.

7. **Korecki M., Dybowski K.** Mathematical Modelling of the Vacuum Carburizing Process // Thermal Proc. 2014. September. Pp. 34—38.

8. **Митяков Ф.Е.** Повышение энергетической эффективности высокотемпературных вакуумных печей сопротивления с экранной теплоизоляцией: автореф. дис. … канд. техн. наук. М.: МЭИ, 2014.

9. **Oakes J.** Quality Counts: Pyrometry, Industry Standards, & Temperature Uniformity Surveys // Thermal Proc. 2017. January. Pp. 12—13

10. **Чередниченко В.С., Бородачев А.С., Артемьев В.Д.** Электрические печи сопротивления. Теплопередача и расчеты электропечей сопротивления. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006.

11. **Рубцов В.П., Горячих Е.В., Митяков Ф.Е**. Разработка уточненной модели электрической печи со-

References

1. **Mineev A.R., Korobov A.I., Pogrebisskiy M.Ya.** Modelirovanie Elektrotekhnologicheskikh Protsessov i Ustanovok. M.: Sputnik+, 2004. (in Russian).

2. **German-Galkin S.G.** Matlab & Simulink. Proektirovanie Mekhatronnykh Sistem na PK. SPb.: Korona-Vek, 2008. (in Russian).

3. **Slock S., Shivpuri R.** A Time-compressed Numerical Approach for Thermal Analysis of Preheating Process in Powder Metallurgy. Thermal Proc. 2015. April:36—45.

4. **Chernack S.** Ensuring Effective Furnace Lining Efficiency. Thermal Proc. 2017. May:38—39.

5. **Ferguson B.L.** Quality Counts: Thermal Process Modeling. Thermal Processing, September, 2016:16—17.

6. **Fradette R.J.** Methods of Improving Vacuum Furnace Insulation Efficiencies. Industrial Heating. 2013. September: 45—49.

7. **Korecki M., Dybowski K.** Mathematical Modelling of the Vacuum Carburizing Process. Thermal Proc. 2014. September:34—38.

8. **Mityakov F.E.** Povyshenie Energeticheskoy Effektivnosti Vysokotemperaturnykh Vakuumnykh Pechey Soprotivleniya s Ekrannoy Teploizolyatsiey: Avtoref. Dis. … Kand. Tekhn. Nauk. M.: MEI, 2014.(in Russian).

9. **Oakes J.** Quality Counts: Pyrometry, Industry Standards, & Temperature Uniformity Surveys. Thermal Proc. 2017. January:12—13

10. **Cherednichenko V.S., Borodachev A.S., Artem'ev V.D.** Elektricheskie Pechi Soprotivleniya. Teploperedacha i Raschety Elektropechey Soprotivleniya. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2006. (in Russian).

11. **Rubtsov V.P., Goryachikh E.V., Mityakov F.E.** Razrabotka Utochnennoy Modeli Elektricheskoy Pechi

противления на основе экспериментальных исследований // Вестник МЭИ. 2015. № 3. С. 48—52.

12. **Мармер Э.Н.** Материалы для высокотемпературных вакуумных установок. М.: Физматлит, 2007.

13. **Кручинин А.М., Махмудов К.М., Миронов Ю.М., Рубцов В.П., Свенчанский А.Д.** Автоматическое управление электротермическими установками. М.: Энергоатомиздат, 1990.

14. **Горячих Е.В.** Разработка способов и алгоритмов управления электрическими печами сопротивления, обеспечивающих временную и пространственную равномерность нагрева: автореф. дис. … канд. техн. наук. М.: МЭИ, 2016.

15. **Oakes J.** Quality Counts: The State of Process Controls control // Thermal Proc. 2017. May. Pp. 14—15.

16. **Ipsen (USA).** Handling temperature variations // Thermal Proc. 2018. January. Pp. 24—25.

17. **Fradette R.J.** Vacuum Furnace Temperature Measurement // Industrial Heating. 2015. September. Pp. 52—59.

18. **Oakes J.** PID Algorithms Are Essential for Uniform Furnace Temperatures // Thermal Proc. 2017. July. Pp. 20—21.

19. **Christopher S.** Automated Control of Vacuum Heat-Treat Equipment. // Industrial Heating. 2016. October. Pp. 30—35.

20. **Oakes J.** Quality Counts: Atmosphere Furnace Control // Thermal Proc. 2018. May/June. Pp. 24—25.

Soprotivleniya na Osnove Eksperimental'nykh Issledovaniy. Vestnik MEI. 2015;3:48—52. (in Russian).

12. **Marmer E.N.** Materialy dlya Vysokotemperaturnykh Vakuumnykh Ustanovok. M.: Fizmatlit, 2007. (in Russian).

13. **Kruchinin A.M., Makhmudov K.M., Miro-nov Yu.M., Rubtsov V.P., Svenchanskiy A.D.** Avtomaticheskoe Upravlenie Elektrotermicheskimi Ustanovkami. M.: Energoatomizdat, 1990. (in Russian).

14. **Goryachikh E.V.** Razrabotka Sposobov i Algoritmov Upravleniya Elektricheskimi Pechami Soprotivleniya, Obespechivayushchikh Vremennuyu i Prostranstvennuyu Ravnomernost' Nagreva: Avtoref. Dis. … Kand. Tekhn. Nauk. M.: MEI, 2016. (in Russian).

15. **Oakes J.** Quality Counts: The State of Process Controls control. Thermal Proc. 2017. May:14—15.

16. **Ipsen (USA).** Handling temperature variations. Thermal Proc. 2018. January:24—25.

17. **Fradette R.J.** Vacuum Furnace Temperature Measurement. Industrial Heating. 2015. September:52—59.

18. **Oakes J.** PID Algorithms Are Essential for Uniform Furnace Temperatures. Thermal Proc. 2017. July: 20—21.

19. **Christopher S.** Automated Control of Vacuum Heat-Treat Equipment.. Industrial Heating. 2016. October: 30—35.

20. **Oakes J.** Quality Counts: Atmosphere Furnace Control. Thermal Proc. 2018. May/June:24—25.

Сведения об авторах:

Погребисский Михаил Яковлевич — кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: PogrebisskiyMY@mpei.ru
Рубцов Виктор Петрович — доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: RubtsovVP@mpei.ru
Сальманова Эльмира Фёдоровна — аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: efs2009@ya.ru

Information about authors:

Pogrebisskiy Mikhail Ya. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: PogrebisskiyMY@mpei.ru
Rubtsov Viktor P. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: RubtsovVP@mpei.ru
Salmanova Elmira F. — Ph.D.-student of f Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: efs2009@ya.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: *17.10.2018*
The article received to the editor: *17.10.2018*