



Редакция выражает благодарность за помощь в подготовке обсуждения темы "Методы моделирования ТП в современных системах автоматизации" д-ру техн. наук, проф. Виктору Михайловичу Дозорцеву.

**ВВЕДЕНИЕ**

Тема моделирования в задачах автоматизации чрезвычайно широка и никак не исчерпывается одним тематическим выпуском. Слишком разнообразны решаемые задачи, существо которых определяет характер и свойства применяемых моделей.

Для того, чтобы облегчить читателю ориентирование в публикациях первого выпуска, ниже приводится сводная таблица, классифицирующая работы по следующим признакам:

Авторы	Решаемая задача	Характер использования	Тип модели	Динамика/статика
Афлятунов и др.	РЕГ	ИИ	ФМ	ДИН
Макианов, Мусаев	СППР	ИМ	ФМДМ	СТАТ
Борзов и др.	РЕГ ИНЖ СУ	ИМ	ДМ	ДИН
Слободчиков	ИНЖ СУ СППР	ИМ	ДМ	ДИН
Тимофеев	РЕГ СППР	ИМ	ДМ	ДИН
Никищенок	ИНЖ ТП СППР	ИМ	ДМ	ДИН
Никульчев (1)	РЕГ	ИМ	ДМ	ДИН
Никульчев (2)	РЕГ ИНЖ СУ	ИМ	ФМ	ДИН
Мандель	СППР	ИМ	ДМ	ДИН

- решаемая задача: построение регулятора (РЕГ)/ инжиниринг ТП (ИНЖ ТП)/инжиниринг СУ (ИНЖ СУ)/построение системы поддержки принятия решений (СППР);

- характер использования модели: модель как формальный источник информации об объекте (ИИ)/ имитационная модель (ИМ)<sup>1</sup>;

- тип модели: феноменологическая модель (ФМ), она же – модель, построенная по реальным данным, она же – модель "черного ящика"/дедуктивная модель (ДМ), она же – фундаментальная модель;

- динамика/статика: динамическая модель (ДИН)/статическая модель (СТАТ).

Содержание таблицы подтверждает, что "мэйнстрим" моделирования в современных системах промышленной автоматизации пролегает через дедуктивные динамические модели, используемые в режиме имитационного моделирования в задачах построения СППР и инжиниринга. Именно в таких работах редакция заинтересована для будущих тематических подборок. Особо приветствуется описание имеющегося или предполагаемого практического внедрения результатов.

**РОБАСТНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА РАБОТЫ**

**ТРУБЧАТЫХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**Р.М. Афлятунов (ЗАО "ТРЕСТ" "Севзапмонтажавтоматика"),  
А.Л. Фокин, В.Г. Харазов (СПГИ)**

*Представлен алгоритм робастной стабилизации теплового режима трубчатых нагревателей печей. Приведена схема АСУТП каталитического риформинга бензиновых фракций для установки П-35-11/300, где были применены изложенные алгоритмы.*

Трубчатые нагревательные печи широко используются в ТП нефте- и газопереработки, таких как процессы первичной переработки нефти АВТ, АТ, процессы вторичной переработки, риформинга, каталитического крекинга и др. Эти производства относятся к энергоемким производствам. Для предприятий нефтепереработки энергозатраты в зависимости от доли вторичных процессов составляют 25...40% от общих затрат на производство нефтепродуктов. Поэтому эффективность работы печей во многом определяет эффективность всего производства. Основные затраты здесь складываются из затрат на энергоносители: газ, мазут, пар и электроэнергию. Таким обра-

зом, повышение КПД печи является важной народно-хозяйственной задачей.

Кроме этого обычно выдвигается целый ряд требований, связанных с экологией, так как неполное сжигание топлива приводит к появлению в атмосфере сернистых и азотных соединений; также могут быть нарушены ограничения на содержание окиси углерода СО.

Одним из путей экономии энергоресурсов является качественная стабилизация переменных процесса нагрева. Удельные текущие затраты на нагрев  $S(t)$  зависят от регулируемой технологической переменной, в качестве которой выступает температура продукта на выходе печи  $\theta(t)$ . Так как эта зависимость есть

<sup>1</sup> Вариант так называемой "внутренней модели" (использование модели в контуре управления, как правило, с целью компенсации динамики объекта) в настоящей подборке не встречается.

*Не дело создано для мысли, а мысль создана для дела.*

Вольтер

гладкая функция  $S(t) = F(\theta(t))$ , то путем разложения ее в ряд Тейлора в окрестности среднего значения  $\bar{\theta}$  и последующего усреднения для нормально распределенной величины  $q(t)$  можно по аналогии с [1] показать, что среднее значение затрат  $\bar{S}$  зависит не только от среднего значения  $\bar{\theta}$ , но и существенно зависит от дисперсии случайной функции времени  $\theta(t)$ .

Поэтому повышение КПД печи связано с уменьшением величины дисперсии и, следовательно, с качественной стабилизацией выходной переменной  $\theta(t)$  при одновременном обеспечении оптимального значения избытка воздуха и уменьшении недожога топлива [2]. При стабилизации температуры на выходе  $\theta(t)$  возникает целый ряд трудностей из-за неопределенности ТП нагрева таких, как изменяющийся состав жидкого и газообразного топлива, изменение содержания кислорода в воздухе в зависимости от температуры, состава нагреваемого продукта, теплопроводности змеевиков печи, тяги печи, связанное как с конструктивными дефектами печи, так и с внешними условиями эксплуатации печи.

Существуют определенные трудности, возникающие в связи с аналитическим описанием процесса горения. Для получения полной математической модели следует описать такие явления, как движение газовой среды, движение частиц топлива, диффузионные явления, кинетику процесса горения, лучистый и конвективный теплообмен, материальный баланс рабочих веществ, энергетический баланс печи [2, 3]. Для точного описания всех этих явлений необходимо рассмотреть систему фундаментальных уравнений: неразрывности, движения (Навье-Стокса), распространения тепла (Фурье), состояния газа, диффузии, лучистого теплообмена.

Понятно, что в этих уравнениях будет также присутствовать структурная, функциональная и параметрическая неопределенность. Но для решения задач управления такая форма представления модели в виде уравнений математической физики не является удобной. Поэтому следующим этапом будет переход от этих уравнений к модели, которая адекватно представляет ТП, но уже как объект управления. При этом желательно найти такую модель, которая малочувствительна к неопределенностям в исходном аналитическом описании.

Практически в качестве такой модели используют описание в виде инерционного звена с запаздыванием. Эта модель содержит только параметрическую неопределенность, возникающую при задании параметров динамики и величины запаздывания. Такого типа модели могут быть использованы для решения следующих задач робастной стабилизации по регулированию: соотношения топливо-воздух, соотношения расхода пара и жидкого топлива, тяги (разряжение в печи), давлений и расходов топлива и воздуха, температур в радиационной и конвекционной камерах и в дымовой трубе печи, температуры нефтепродукта на выходе, концентраций  $O_2$ ,  $CO$  и окислов азота.

Методика построения робастных алгоритмов стабилизации для перечисленных задач должна быть одна и та же для упрощения процесса проектирования автоматических систем. В данном случае могут быть использованы методы синтеза робастных линейных систем, основанные на расширении математической модели объекта управления [4, 5], которые позволяют обеспечить заданное качество регулирования в широком диапазоне варьирования параметров модели. Для примера рассмотрим систему стабилизации концентрации кислорода  $O_2$  в отходящих газах при помощи изменения расхода воздуха, которая используется в современных проектах автоматизации нагревательных печей.

Состав дымовых газов после камеры конвекции печи измеряется при помощи анализатора содержания кислорода и окиси углерода. Изменение расхода воздуха достигается перемещением заслонки при помощи управляемого частотного привода. Модель объекта управления вместе с датчиком можно представить в виде инерционного звена первого порядка с запаздыванием. Параметры модели зависят от газодинамического режима работы печи. Поэтому неизменная часть системы с учетом исполнительного механизма имеет передаточную функцию вида

$$W_0(p) = \frac{\Delta y(p)}{\Delta u(p)} = \frac{k_0 \cdot e^{-p\tau}}{p \cdot (T_0 p + 1)}, \quad (1)$$

где параметры  $k_0$ ,  $T_0$ ,  $\tau$  могут существенно варьироваться относительно своих номинальных значений  $k_0^0$ ,  $T_0^0$ ,  $\tau_0$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta u$  – отклонения регулируемой величины (концентрация  $O_2$ ) и управления (расход воздуха) от стационарных значений.

Требуется построить робастный регулятор, позволяющий сохранить качество системы регулирования в заданных пределах при максимально возможных отклонениях параметров. Для синтеза регулятора можно перейти [6] от передаточной функции с запаздыванием (1) к передаточной функции, не содержащей запаздывания, но большего порядка вида

$$W_0(p) = \frac{\varpi_c}{p^2(T_0 p + 1)}, \quad (2)$$

где  $\varpi_c = 0,343/\tau_0$ .

Вектор состояния  $[x_1 \ x_2 \ x_3]^T$  для (2) состоит из выходной величины  $x_1 = \Delta y$  и двух производных  $x_{i+1} = \dot{x}_i$ ,  $i = 1, 2$ . В соответствии с [4] происходит расширение модели объекта управления за счет дополнительной фильтрации вектора состояния

$$T_\Phi \dot{x}_{i+1} + x_{i+1} = \dot{x}_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3)$$

где  $x_{i+1}(t)$  – опорное движение,  $T_\Phi$  – постоянная времени фильтра.

Движение объекта в пространстве состояний разделяется искусственно на две составляющие:  $x_1(t) = [x_{11}(t) \ x_{12}(t) \ x_{13}(t)]^T$  и сигнал рассогласования  $\Delta x_1(t) = [\Delta x_{11}(t) \ \Delta x_{12}(t) \ \Delta x_{13}(t)]^T$  вида

$$\Delta x_i(t) = x_i(t) - x_{i1}(t), \quad i = 1, 2, 3. \quad (4)$$

Для обеспечения робастности системы регулятор выбирается таким образом, чтобы во время переходного процесса происходила по координатной частичной взаимная компенсация векторов  $x_i(t)$  и  $\Delta x_i(t)$ . Так как влияние неопределенности сказывается как на компонентах  $x_{i1}(t)$ ,  $i = 1, 2, 3$ , так и на компонентах  $\Delta x_{i1}(t)$ , то благодаря их частичной компенсации и тому, что в сумме они всегда равны вектору состояния (4), влияние неопределенности на вектор состояния уменьшается. В работе [5] показано, что для синтеза такого регулятора достаточно изменить цель управления. Вместо задачи стабилизации относительно начала координат нужно рассмотреть стабилизацию относительно пересечения трех гиперплоскостей в расширенном пространстве состояний вида

$$\bar{x}_i(t) = d_1 \Delta x_{i1}(t) + d_2 x_{i1}(t) = 0, \quad i = 1, 2, 3, \quad (5)$$

где  $d_1, d_2, > 0, d_1 \neq d_2$ . При этом автоматически решается и основная задача стабилизации относительно начала координат.

От значений параметров  $d_1, d_2, T_\Phi$  в (3), (5) зависит полнота взаимной компенсации после разделения движения. Будем искать решение в классе регуляторов, работающих по сигналу ошибки системы  $\epsilon(t) = -\Delta y(t) = -x_1(t)$ . В одноконтурной системе вместо трех гиперплоскостей (5) будем рассматривать одну в виде суммы

$$\bar{x}(t) = \sum_{i=1}^3 \bar{x}_i(t) = \sum_{i=1}^3 [d_1 x_i(t) + (d_2 - d_1) x_{i1}(t)] = 0. \quad (6)$$

Условие (6) эквивалентно (5), если частотные спектры составляющих не пересекаются. Но практически этого не происходит и поэтому оптимальное решение в указанном выше смысле в такой системе недостижимо. На основании (6) и (3) нетрудно получить передаточную функцию элемента расширения модели (2), которая моделирует движение относительно гиперплоскости (6):

$$W_v(p) = \frac{\bar{x}(p)}{\Delta y(p)} = d_2 \frac{v \cdot T_\Phi p + 1}{T_\Phi p + 1} \cdot (p^2 + p + 1), \quad (7)$$

где  $v = d_1/d_2$ .

Передаточная функция (7) физически не реализуема и требует регуляризации путем введения дополнительных постоянных времени. Полином  $p^2 + p + 1$  появляется из-за замены необходимого условия (5) на приближенное условие (6). Поскольку задача все равно решается приближенно, то вместо него можно рассмотреть полином общего вида  $a_0 p^2 + a_1 p + 1$ . При синтезе робастной системы передаточная функция элемента расширения (7) должна быть отнесена к регулятору. Поэтому, если известна какая-то передаточная функция регулятора  $W'_p(p)$  для объекта (1) с номинальными значениями параметров, то от нее можно перейти к передаточной функции робастного регулятора

$$W_p(p) = W_v(p) \cdot W'_p(p) \approx d_2 \cdot \frac{v \cdot T_\Phi p + 1}{T_\Phi p + 1} \cdot \frac{a_0 p^2 + a_1 p + 1}{(T_{\Delta 1} p + 1) \cdot (T_{\Delta 2} p + 1)} \cdot W'_p(p), \quad (8)$$

где  $T_{\Delta 1}, T_{\Delta 2}$  – дополнительные постоянные времени для регуляризации передаточной функции (7).

Грубость системы зависит также и от передаточной функции  $W'_p(p)$ . Поэтому в качестве  $W'_p(p)$  может быть, например, использована передаточная функция регулятора, близкая к оптимальной по критерию апериодической устойчивости [6], полученная методом динамической компенсации, после замены (1) с номинальными значениями параметров ее строго устойчивой аппроксимацией

$$\tilde{W}_0(p) = \frac{\gamma}{\gamma \cdot p + 1} \cdot \frac{k_0^0 e^{-p\tau_0}}{T_0^0 p + 1}, \quad \gamma \gg 1, \quad (9)$$

которая стремится к (1) при  $\gamma \rightarrow \infty$ . Тогда получим ПИД регулятор

$$W'_p(p) = \frac{\varpi_c}{\gamma \cdot k_0^0} \cdot \frac{(\gamma \cdot p + 1) \cdot (T_0^0 p + 1)}{p \cdot (T_\epsilon p + 1)}, \quad (10)$$

где  $T_\epsilon$  – малая постоянная времени. При этом желаемое движение замкнутой номинальной системы описывается передаточной функцией

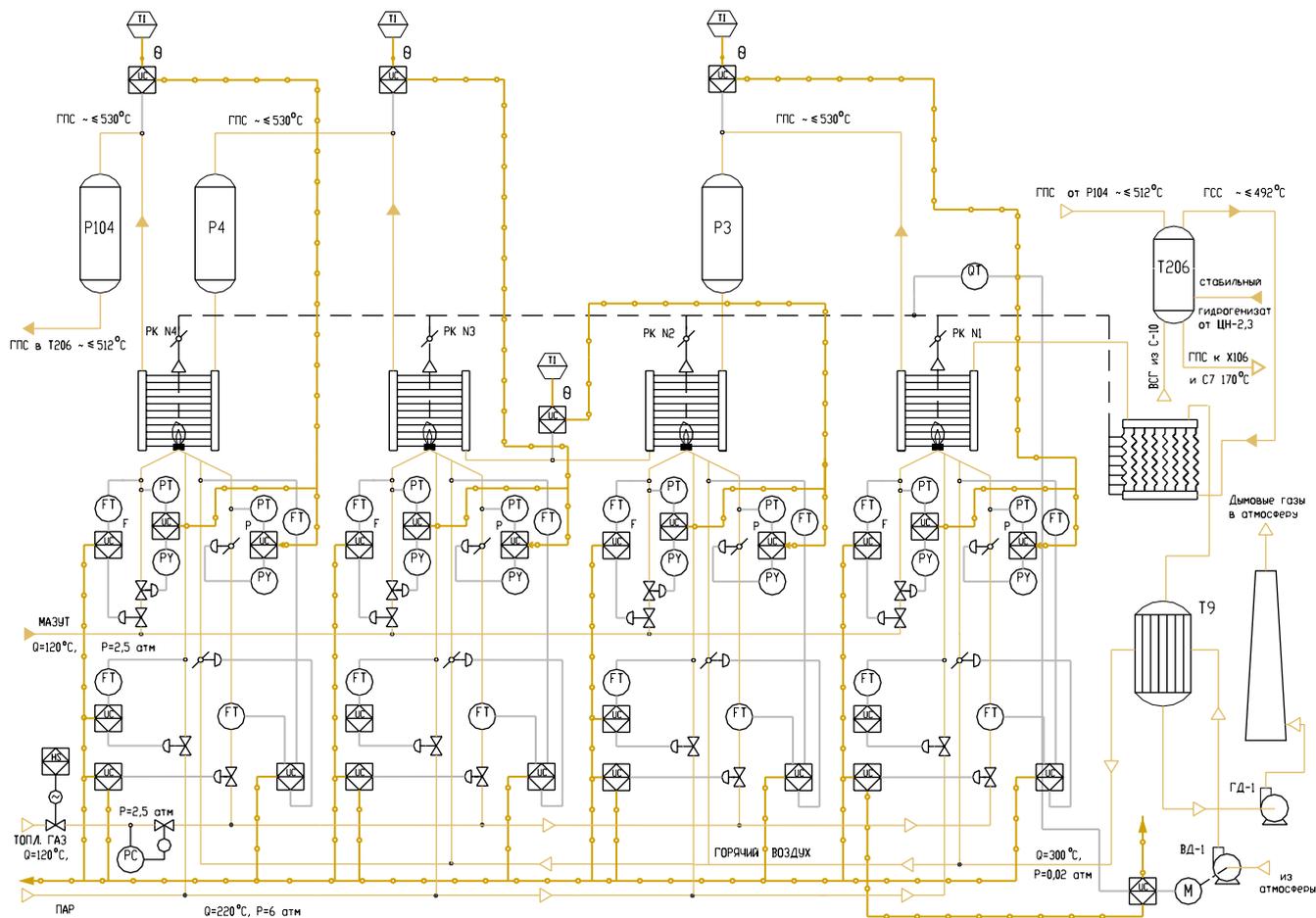
$$\Phi(p) = \frac{\varpi_c e^{-p\tau_0}}{p \cdot (T_\epsilon p + 1) + \varpi_c e^{-p\tau_0}}. \quad (11)$$

Параметры в (8) подбираются так, чтобы происходило увеличение запаса устойчивости системы по амплитуде при некотором увеличении запаса устойчивости по фазе по сравнению с системой (1), (10). Это увеличивает робастность системы, что можно показать, используя робастный критерий устойчивости Найквиста [7]. Это достигается, если в (8)  $a_0 p^2 + a_1 p + 1 = (T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1)$ ,  $d_2 < 1$ ,  $v \approx 19$ ,  $v \cdot T_\Phi = 1/\varpi_c$ ,  $T_i = 1/\omega_i$ ,  $i = 1, 2$ ,  $\omega_2 > \omega_1 > \varpi_c$ ,  $T_{\Delta 1}, T_{\Delta 2}$  подбираются эмпирически так, чтобы произошло увеличение запасов по амплитуде и по фазе.

Например, при  $T_0^0 = 20$  с,  $\tau_0 = 5$  с в системе (1), (10) запас по амплитуде  $h_1 = 12,6$  дБ, а запас по фазе  $\varphi_1 = 63,8^\circ$  при  $\gamma = 200$ . Система допускает одновременное увеличение  $k_0$  и  $\tau$  и уменьшение  $T_0$  в (1) на 35%. При этом перерегулирование составляет 34%.

Параметры элемента расширения в передаточной функции (8) были выбраны следующими:  $\omega_2 = 0,1$  с<sup>-1</sup>,  $\omega_1 = 0,08$  с<sup>-1</sup>,  $\varpi_c = 0,0686$  с<sup>-1</sup>,  $T_\Phi = 0,767$  с,  $T_2 = 10$  с,  $T_1 = 12,5$  с,  $d_2 = 0,7$ . Тогда при  $T_{\Delta 1} = 12$  с,  $T_{\Delta 2} = 6$  с в робастной системе (1), (8) запас по амплитуде  $h_2 = 14,5$  дБ  $> h_1$  и запас по фазе  $\varphi_2 = 64,4^\circ > \varphi_1$ . Система допускает одновременное увеличение  $k_0$  и  $\tau$  и уменьшение  $T_0$  в (1) на 100% при том же значении перерегулирования.

Таким образом, использование робастного управления (8) позволяет достаточно сильно увеличить интервалы допустимых изменений параметров в (1) и решить задачу стабилизации переменных для нагревательной печи. Достоинствами такого подхода являются: его универсальность, так как он применим для проектирования практически всех систем стабилизации переменных нагревательной печи; возможность использования методов классической теории регулирования и его простота. Использование робастных алгоритмов при уп-



равлении трубчатых печами уменьшает дисперсию отклонения переменных, что способствует экономии энергоресурсов.

С учетом вышеизложенного была спроектирована АСУТП каталитического риформинга бензиновых фракций применительно к установке каталитического риформинга Л-35-11/300. Установка предназначена для производства высокооктанового компонента бензина путем каталитического риформинга бензиновых фракций на полиметаллическом катализаторе. Установка состоит из блоков гидроочистки сырья, каталитического риформинга и стабилизации катализатора. Основными технологическими параметрами процесса риформинга являются температура на входе в реакторы, давление, объемная скорость подачи сырья и кратность циркуляции водородосодержащего газа (ВСГ), определяющая работу катализатора. Печь риформинга и гидроочистки П1- трубчатая, вертикальная, радиантно-конвекционная служит для нагрева газосырьевой смеси (ГСС) и циркуляционного газа в период регенерации печи. Печь П1 работает на комбинированном топливе – топливный газ и мазут. Предусмотрены каскадные системы регулирования температуры ГСС с регуляторами давле-

ния соответственно газа и мазута к форсункам печи. Подача воздуха к форсункам печи осуществляется воздуходувкой ВД1, снабженной электроприводом с частотным преобразователем. Упрощенная схема автоматизации приведена на рисунке.

#### Список литературы

1. Гельфанд Я.Е. Управление цементным производством с использованием вычислительной техники. Л.: Стройиздат, 1973.
2. Кнорре Г.Ф., Арефьев К.М. и др. Теория топочных процессов. М-Л.: Энергия, 1966.
3. Эфрос М.М. Нагревательные и термические печи на газовом топливе. М.: Metallurgy, 1965.
4. Джараган М.А., Фокин А.Л., Харазов В.Г. Построение робастных алгоритмов стабилизации по расширенной модели объекта управления // Автоматизация в промышленности. 2003. №12.
5. Фокин А.Л. Метод разделения движений и синтез робастной системы регулирования // Изв. вузов. Приборостроение. 2002. №4.
6. Фокин А.Л., Харазов В.Г. Управление линейным объектом с запаздыванием // Автоматизация и современные технологии. 2002. №5.
7. Цыпкин Я.З., Поляк Б.Т. Робастный критерий Найквиста // Автоматика и телемеханика. 1992. №7.

**Фокин Александр Леонидович** – д-р техн. наук, проф.,

*Харазов Виктор Григорьевич* – д-р техн. наук, проф. кафедры "Автоматизация процессов химической промышленности" Санкт-Петербургского государственного технологического института (Технического университета),  
*Афлятунов Рим Минигазимович* – главный специалист по автоматизации ЗАО "ТРЕСТ" "Севзапмонтажавтоматика".

Контактные телефоны: (812) 259-47-53, 431-99-26.  
E-mail: kharazov@vh8465.spb.edu, arm@szma.org