

(тепло фазовых превращений). Уравнение (11) дополняется начальными условиями

$$\theta_k(x, y, z, \tau = 0) = \theta_k^0(x, y, z) \quad (12)$$

а для движущихся тел, кроме этого, задается поле температур при входе их в рабочее пространство.

Совершенствование методов нормирования расходов топлива в технологических процессах, сопровождающихся тепловой обработкой металла в металлургических печах, является важнейшей задачей повышения эффективности использования топливно- энергетических ресурсов.

Внедрение математического моделирования в качестве основного элемента в методике планирования норм потребления топлива позволяет в корне изменить сложившийся в практике заводов подход, базирующийся на статистических данных о достигнутых результатах топливоиспользования в цехах и на отдельных агрегатах.

УДК 681.5.013

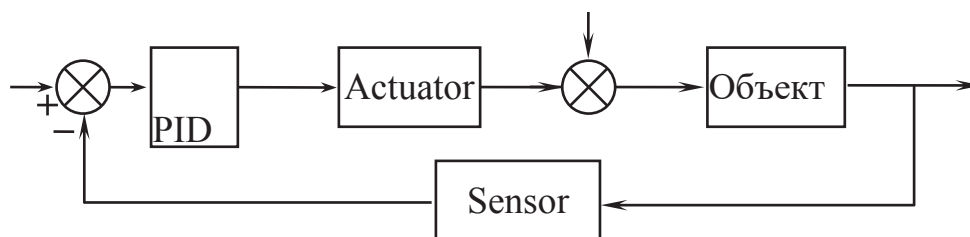
Д. А. Гринюк, доц., канд. техн. наук;  
И. Г. Сухорукова, ст. преп.;  
М. В. Чепурко, студ.;  
Н.И. Подтероб, студ.  
(БГТУ, г. Минск)

### **НАСТРОЙКА СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕНИЯ НА ПЕРЕРЕГУЛИРОВАНИЕ**

Динамика объектов регулирования варьируется в широком диапазоне. На практике встречаются как статические объекты, так и астатические. Своеобразная динамика наблюдается у объектов с распределенными параметрами. Пространственная распределенность приводит к проявлению аperiodического запаздывания, что может приводить к возникновению значительных перерегулирований. Возьмем в качестве примера объект управления теплообменник с параметрами динамики из [1].

$$W_o = \frac{1 - 0,71 \exp(-8s)}{(27,3s + 1)(0,82s + 1)}. \quad (1)$$

С учетом динамики датчика и исполнительного механизма система с обратной связью примет вид как на рис. 1.



$SP$  – сигнал задания;  $x$  – выход;  $u$  – выход с регулятора на исполнительный механизм;  $s$  – расход пара;  $x'$  – значение с измерительного преобразователя

**Рисунок 1 – Структура системы с обратной связью**

Параметры передаточных функций были приняты следующие

$$W_{act} = \frac{1}{6s + 1}; \quad (2)$$

$$W_{sens} = \frac{1}{18s + 1}. \quad (3)$$

Использование метода Циглера-Никольса для замкнутой системы позволило определить для П-регулятора период резонанса  $T_{180} = 33$  с при коэффициенте усиления 27. С использованием рекомендаций из [2] были получены следующие коэффициенты для настроек ПИД регулятора

$$k0_P = 5,4; k0_I = 0,0606; k0_D = 4,125; T0_f = 0,01. \quad (4)$$

Для этой замкнутой системы также была произведена настройка с использованием встроенной функции автоподстройки, которая присутствует непосредственно в Matlab. Первый вариант настроек для параметров робастности и быстродействия использовались по умолчанию, второй – менее «агрессивные» методы настройки.

$$k1_P = 6,672; k1_I = 0,3161; k1_D = 24,8; T1_f = 0,1195; \quad (5)$$

$$k2_P = 4,575; k2_I = 0,19; k2_D = 13,78; T2_f = 0,0517. \quad (5a)$$

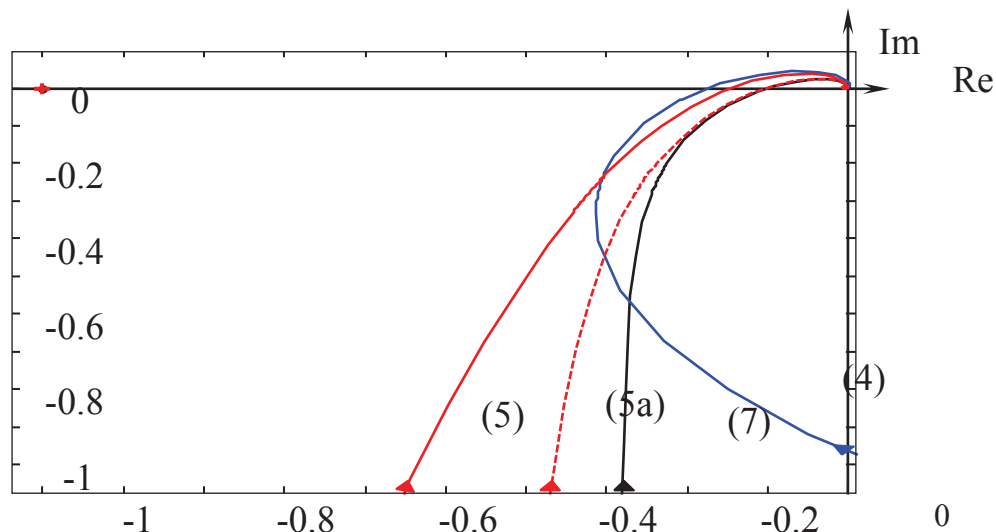
Третьим методом был использован интегральный критерий [3]

$$I = \int_0^{\infty} |x|t^2 dt. \quad (6)$$

Результатом его настройки были следующие значения

$$k3_P = 2,9; k3_I = 0,1191; k3_D = 3,425; T3_f = 0,01. \quad (7)$$

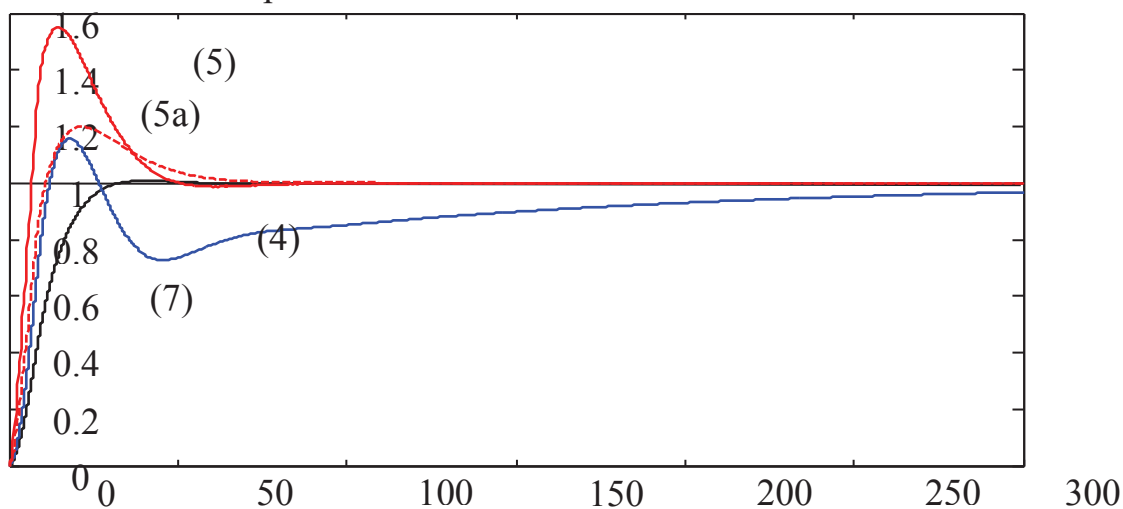
Для оценки запаса по устойчивости была построена диаграмма Найквиста рис. 2.



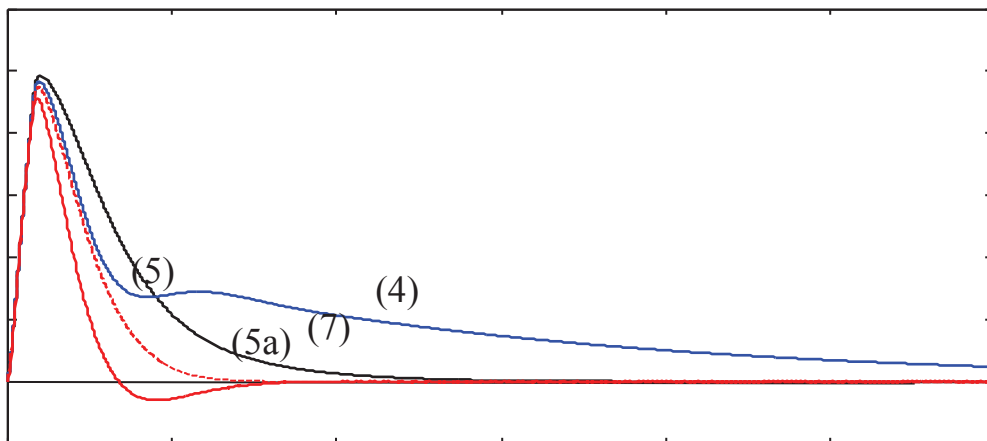
**Рисунок 2 – Диаграмма Найквиста при разных параметрах ПИД-регулятора**

Исходя из диаграммы на рис. 2 следует, что вариант с первичными настройками от Matlab обладает меньшим запасом по устойчивости (5). Чуть лучше запас по устойчивости у настроек от метода Циглера-Никольса. Самый высокий запас по устойчивости у настроек, которые были получены методом минимизации интегрального критерия.

С использованием полученных разными методами настроек было произведено моделирование контуров по сигналу задания (рис. 3.) и сигналу возмущения (рис. 4.). Согласно первому графику, выигрышными являются настройки (7), которые получены по интегральному критерию. Тогда как при отработке возмущения настройки от Matlab лучше. Это не удивительно, так как интегральный критерий использован для варианта изменения задания.



**Рисунок 3 – Переходной процесс по сигналу задания**



**Рисунок 4 – Переходной процесс по возмущению**

Следует отметить, что существует проблема обеспечения необходимых параметров переходного процесса с помощью автоподстройки Matlab, так как его алгоритмы построены на обеспечении необходимого качества  $x'$ , а не  $x$ . И, при сравнимой динамике объекта и датчика, результат настройки может быть неудовлетворителен для практического применения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматическое управление в химической промышленности. Под ред. Е.Г. Дудникова – М.: Химия, 1987. – 368 с.
2. Денисенко, В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В. В. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 610 с.
3. Гринюк Д. А., Оробей И. О., Сухорукова И. Г. Модификация интегральных критериев для повышения запаса по устойчивости // Труды БГТУ. 2012. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 118–121.

УДК 681.5

А.Н. Шумский, канд. техн. наук;  
 Д. С. Карпович, канд. техн. наук; Е.В. Каптюг (БГТУ, г. Минск)  
 И.А. Хаусов, проф., д-р техн. наук (ВГУИТ, г. Воронеж, РФ)

### **НЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ**

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) являются неотъемлемой частью военной сферы, но также нашли свое широкое применение в народнохозяйственной сфере деятельности человека (мониторинг среды, использование в качестве метеомодуля и т. д.).