

## О СРАВНИТЕЛЬНОМ АНАЛИЗЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО НАТУРНО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.Б. Трофимов (Новокузнецк)

В работе рассмотрено применение натурно-модельного подхода к задаче моделирования и сравнительного анализа алгоритмов автоматического регулирования, детализирована схема моделирования. Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-4068.2015.8.

Наиболее перспективным инструментарием для моделирования с целью осуществления сравнительного анализа алгоритмов автоматического регулирования является натурно-модельный подход, методические основы которого изложены в работах [1, 2]. Задача моделирования и сравнительного анализа алгоритмов регулирования представлена следующим образом.

Исходные данные и условия задачи.

1. Пересчетная модель объекта управления, в качестве которого был выбран воздухонагреватель (ВН) Калугина, имеет следующий вид:

$$Y_{HM}^N = Y_H + \frac{k_1 e^{-s\tau_1}}{T_1 s + 1} (U_{1M}^N - U_{1H}) + \frac{k_2 e^{-s\tau_2}}{T_2 s + 1} (U_{2M}^N - U_{2H}), \quad (1)$$

где  $Y_H$  – натурное выходное воздействие (температура подкупольного пространства ВН);  $Y_{HM}^N$  – натурно-модельные возможные варианты выходного воздействия;  $U_{1H}$ ,  $U_{1M}^N$  – натурное и модельные управляющие воздействия (расход газа);  $U_{2H}$ ,  $U_{2M}^N$  – расход воздуха;  $k_1$ ,  $k_2$  – коэффициенты передачи;  $T_1$ ,  $T_2$  – постоянные времени;  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  – время запаздывания;  $s$  – комплексная переменная;  $N = I, \dots, V$ .

Эта модель «работает» в приращениях к натурным данным и позволяет ответить на вопрос о том, что было бы на выходе реального объекта управления, если бы вместо натурных входных воздействий действовали бы другие модельные значения входных воздействий.

2. Множество алгоритмов регулирования (промышленных регуляторов): алгоритм нейродвушкального регулятора ( $N = I$ ), алгоритм восстановительно-прогнозирующего (ВП) регулятора ( $N = II$ ), алгоритм регулятора Ресвика ( $N = III$ ), алгоритм регулятора Смита ( $N = IV$ ), алгоритм ПИ-регулятора ( $N = V$ ).

3. Натурные данные эксплуатации действующей автоматизированной системы управления ВН Калугина (ВН доменной печи) ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», включающие температуру подкупольного пространства, расход газа, расход воздуха.

4. Критерий эффективности алгоритмов автоматического регулирования имеет следующий вид:

$$R_N(t) = \frac{\sigma_0(t) - \sigma_N(t)}{\sigma_0(t)} 100\% \rightarrow \max, \quad (2)$$

$$\sigma_0(t) = \sqrt{\frac{1}{T_{cp}} \int_{t-T_{cp}}^t (\delta E^0(m))^2 dm}, \quad \sigma_N(t) = \sqrt{\frac{1}{T_{cp}} \int_{t-T_{cp}}^t (\delta E^N(m))^2 dm} \rightarrow \min,$$

где  $\sigma_0(t)$  – среднеквадратическая ошибка при отсутствии регулирования;  $\sigma_N(t)$  – среднеквадратическая ошибка при использовании  $N$  варианта алгоритма

регулирования;  $T_{cp}$  – скользящий интервал усреднения;  $\delta E^N(t)$  – ошибка регулирования.

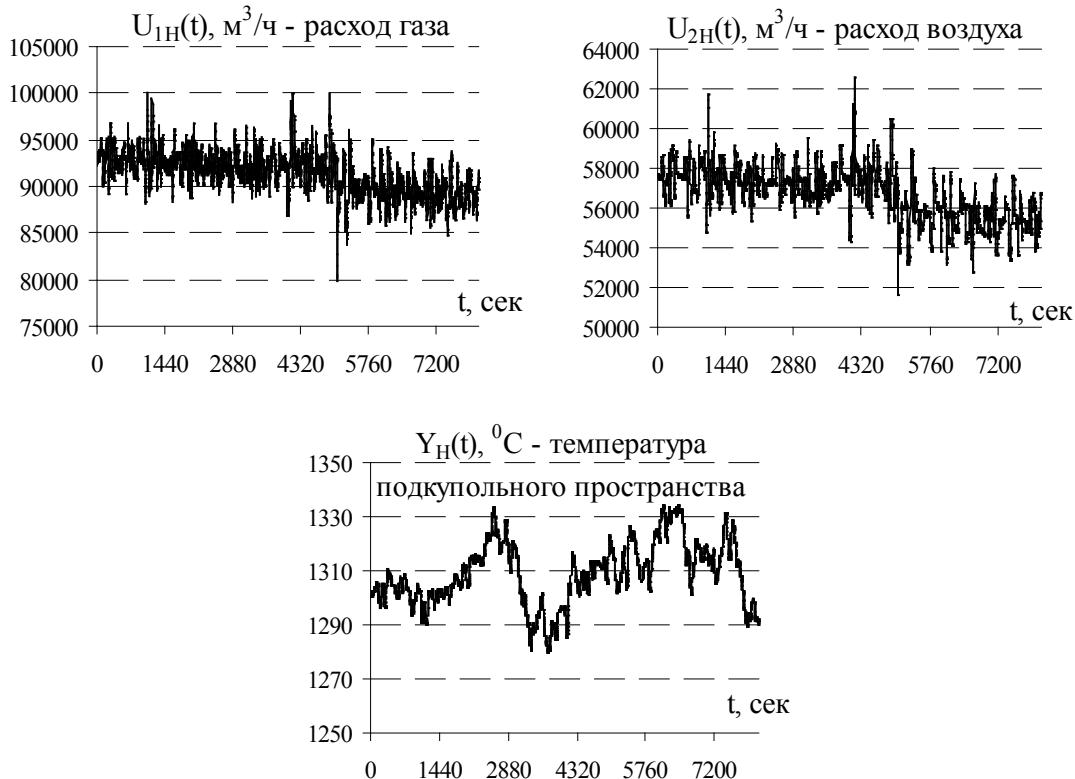


Рис.1. Натурные данные

5. Ограничение первого рода: математическая модель каналов регулирования – инерционное звено *первого* порядка с запаздыванием. Ограничения второго рода: на расход газа  $0 \leq U_{1M}(t) \leq 10^5 \text{ м}^3/\text{ч}$ , на расход воздуха  $0 \leq U_{2M}(t) \leq 8 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{ч}$ , на температуру  $900 < Y(t) < 1450 \text{ }^0\text{C}$ .

Требуется выполнить имитационное моделирование, сравнительный анализ эффективности алгоритмов автоматического регулирования температуры подкупольного пространства воздухонагревателя Калугина.

Для решения поставленной задачи предлагается детализированная схема моделирования (рис. 2), состоящая из действующей производственной автоматизированной системы управления с параллельно подключенными к ней математическими моделями специального класса, называемыми пересчетными моделями [1, 2].

На рисунке 2 приняты следующие обозначения:  $U_P(t)$  – программное управляющее воздействие;  $Y^*(t)$  – задающее воздействие;  $\delta U_M^I(t)$ , ...,  $\delta U_M^V(t)$  – модельные ( $M$ ) варианты регулирующего воздействия;  $\delta E^I(t)$ , ...,  $\delta E^V(t)$  – ошибки регулирования, которые были бы, если бы вместо натурного управляющего воздействия  $U_H(t)$  были бы реализованы модельные  $U_M^I(t)$ , ...,  $U_M^V(t)$  соответственно;  $Y_{HM}^I(t)$ , ...,  $Y_{HM}^V(t)$  – натурно-модельные (HM) варианты выходного воздействия.

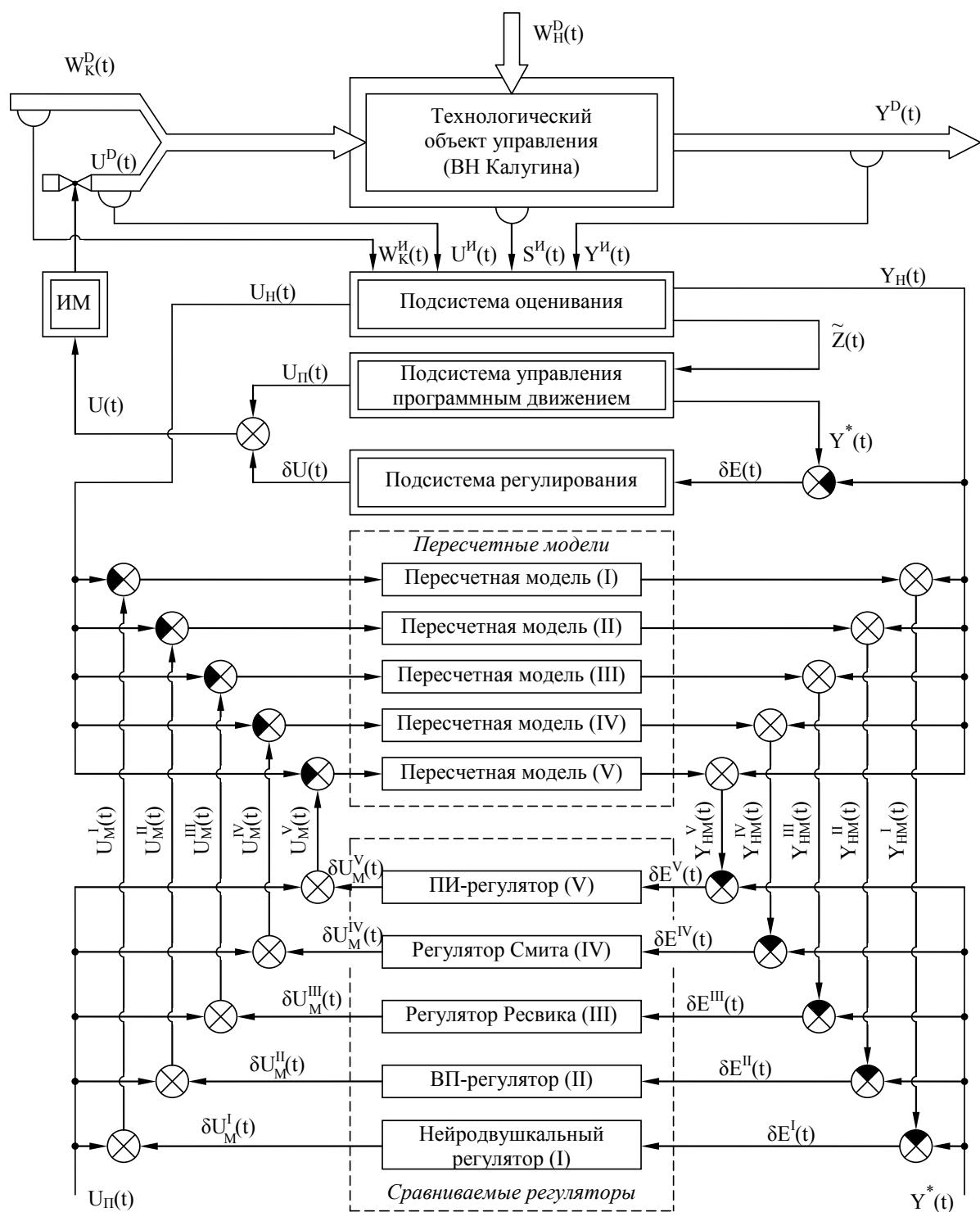


Рис. 2. Схема имитационного натурно-математического моделирования

На рисунках 3, 4 представлены диаграммы моделирования.

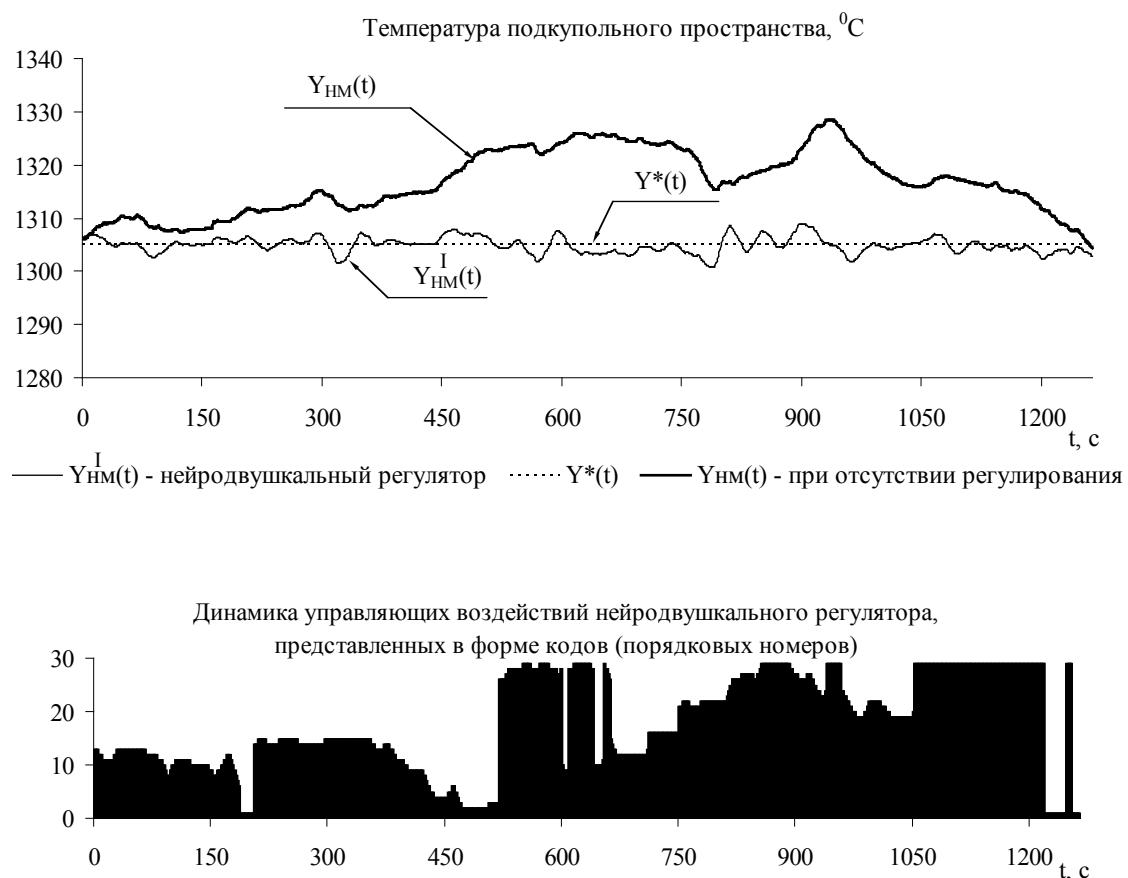


Рис. 3. Диаграммы пересчетного моделирования

Моделирование показало (рис. 4), что нейродвушкальный регулятор [3, 4] эффективнее типовых (ВП-регулятора, регулятора Смита, регулятора Ресвика, ПИ-регулятора) в среднем на 10 ÷ 20% по критерию (2) за счет использования в нем имитационной нелинейной ситуационно поднастраиваемой нейроэкспертной модели объекта управления, ускоренного поиска оптимального варианта управления, учитывающего прогноз контролируемых внешних воздействий и приведенного возмущения.

Обобщенная структура нейроэкспертной модели воздухонагревателя Калугина включает продукционную (экспертную) ситуационную модель соответствия программных управляющих воздействий и базовых уровняй контролируемых внешних воздействий программной составляющей выходного воздействия объекта и нейросетевую модель, описывающую возмущенное движение, а также оценку приведенного возмущения [3, 4].

Для оценки адекватности построенной модели объекта использовали системный подход [5], согласно которому, если после замены действующего объекта его моделью свойства системы, ее поведение, характеристики существенным образом не изменяются, то модель может быть признана как адекватная. При этом в качестве критерия можно рассматривать среднемодульную или среднеквадратичную ошибку.

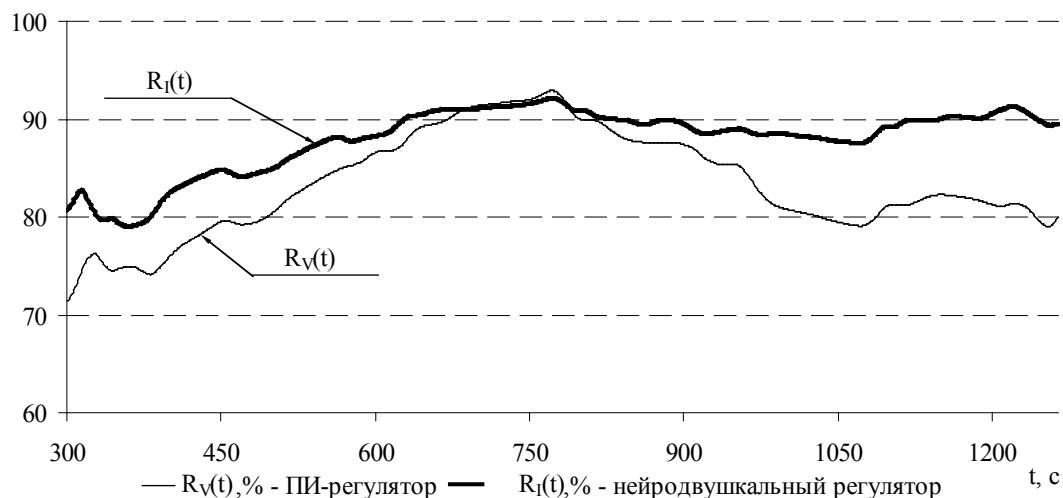


Рис. 4. Значения критерия эффективности регуляторов (2)

Чтобы заменять реальный объект моделью (для проверки адекватности) был разработан натурно-модельный комплекс, который представляет собой системное объединение натурных данных о рабочих режимах функционирования реального объекта и пересчетных моделей, которые позволяют осуществить пересчет возможных вариаций входных воздействий в возможные вариации выходных воздействий. Этот натурно-модельный комплекс и выступает в качестве объекта управления, что позволяет не нарушать нормальный режим эксплуатации действующей системы управления.

Натурно-математическое моделирование целесообразно представлять как системное объединение обычного функционирования натурных (реальных, исходных) объектов в условиях нормальной эксплуатации, ограниченного натурного или полунатурного допустимого активного эксперимента на них и имитационного моделирования пересчетного типа по отношению к вариациям определяющих условий и внутренних характеристик объектов.

### Литература

- Системы автоматизации на основе натурно-модельного подхода: монография в 3-х т. Т.2: Системы автоматизации производственного назначения / Под ред. Л.П. Мышляева - Новосибирск: Наука, 2006. - 483 с.
- Авдеев В.П., Зельцер С.Р., Карташов В.Я., Киселев С.Ф. Натурно-математическое моделирование в системах управления. - Кемерово: КемГУ, 1987.-85 с.
- Кулаков С.М., Трофимов В.Б. Интеллектуальные системы управления технологическими объектами: теория и практика: монография - Новокузнецк: СибГИУ, 2009. – 223 с.
- Кулаков С.М., Бондарь Н.Ф., Трофимов В.Б. Принцип управления с прогнозированием: подходы к реализации и структуры систем: препринт - Новокузнецк: СибГИУ, 2005. – 63 с.
- Ротач В.Я. Теория автоматического управления - М.: МЭИ, 2007. - 399 с.