

О СРАВНИТЕЛЬНОМ АНАЛИЗЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО НАТУРНО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.Б. Трофимов (Москва)

Наиболее перспективным подходом для компьютерного моделирования в режиме реального времени с целью осуществления сравнительного анализа автоматических регуляторов является натурно-модельный подход, основы которого представлены в работах [1, 2]. Для исследования был выбран сложный объект управления – процесс увлажнения агломерационной шихты, натурные данные были получены в агломерационном цехе АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК»).

Постановка задачи

Исходные данные и условия задачи.

1. Пересчетная модель объекта управления:

$$Y_{HM}^N = Y_H + \frac{k_o e^{-s\tau_o}}{T_o s + 1} (U_M^N - U_H),$$

где Y_H – натурное выходное воздействие объекта управления (влажность шихты, рис. 1); Y_{HM}^N – натурно-модельные возможные варианты выходного воздействия ($N = I, \dots, V$); U_H – натурное управляющее воздействие (расход воды, рис. 1), U_M^N – модельные возможные варианты управляющего воздействия; k_o – коэффициент передачи объекта управления; T_o – постоянная времени; τ_o – запаздывание; s – комплексная переменная.

2. Множество алгоритмов регулирования (автоматических регуляторов): восстановительно-прогнозирующий регулятор (ВП-регулятор, $N=II$), регулятор Ресвика ($N=III$), регулятор Смита ($N=IV$), которые используют модель объекта управления с исключенным запаздыванием для прогноза [1– 8], а также типовой ПИ-регулятор ($N=V$).

3. Натурные данные о влажности шихты и расходе воды (i – дискретное время, шаг дискретизации $\Delta t = 20$ с., рис. 1).

4. Критерий эффективности автоматических регуляторов:

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

$$\sigma_I(t) = \sqrt{\frac{1}{T_{cp}} \int_{t-T_{cp}}^t (\delta E^I(\theta))^2 d\theta}, \quad \sigma_N(t) = \sqrt{\frac{1}{T_{cp}} \int_{t-T_{cp}}^t (\delta E^N(\theta))^2 d\theta} \rightarrow \min,$$

где $\sigma_I(t)$ – среднеквадратическая ошибка при отсутствии регулирования ($N=I$); $\sigma_N(t)$ – среднеквадратическая ошибка при использовании N -ого варианта алгоритма регулирования; T_{cp} – скользящий интервал усреднения; $\delta E^N(\theta)$ – ошибка регулирования; $N=I$ – соответствует варианту отсутствия автоматического регулирования.

5. Ограничение первого рода: математическая модель канала регулирования – инерционное звено первого порядка с запаздыванием.

Требуется выполнить имитационно-натурно-математическое моделирование, осуществить сравнительный анализ автоматических регуляторов влажности шихты.

Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

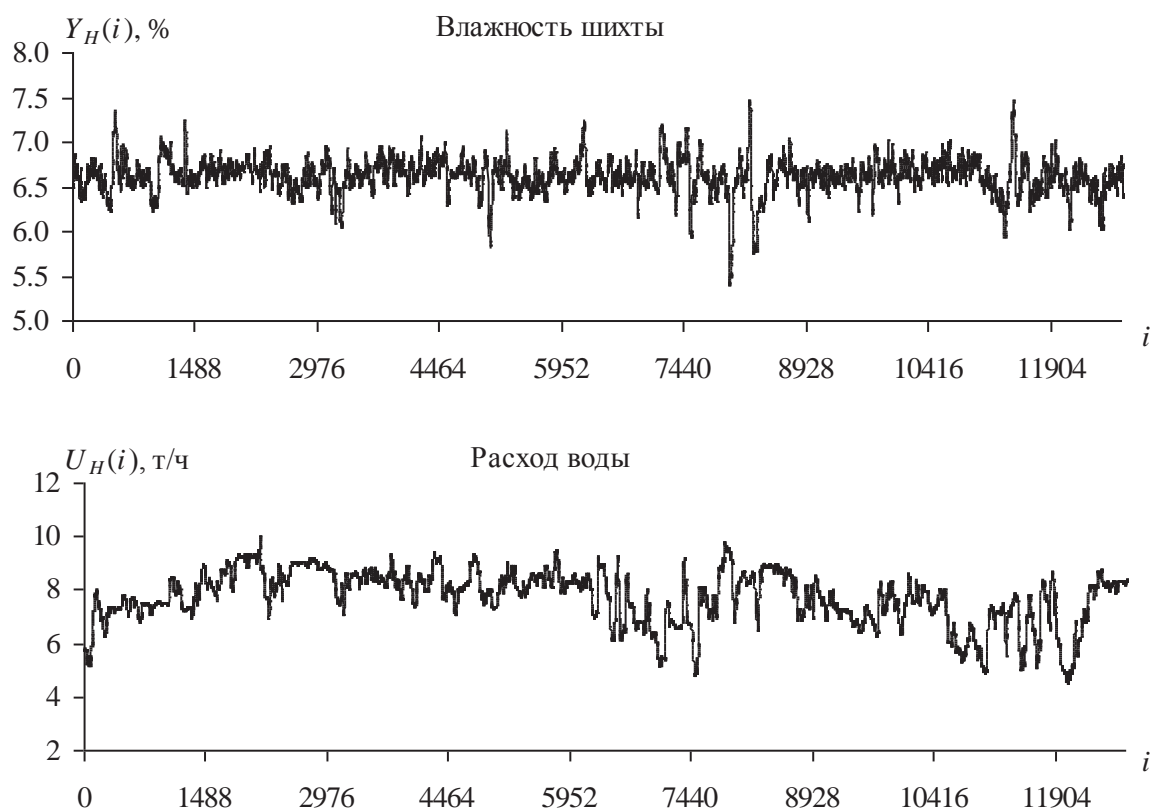


Рис. 1. Натурные данные

Метод решения поставленной задачи

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

Для решения поставленной задачи предлагается детализированная схема моделирования (рис. 2), состоящая из действующей производственной автоматизированной системы управления АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с параллельно подключенными к ней математическими моделями специального класса, называемыми пересчетными моделями. Эти модели «работают» в приращениях к натурным данным и позволяют ответить на вопрос: «Что было бы на выходе объекта управления, если бы вместо натуральных входных воздействий действовали бы другие модельные значения входных управляющих воздействий?».

Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

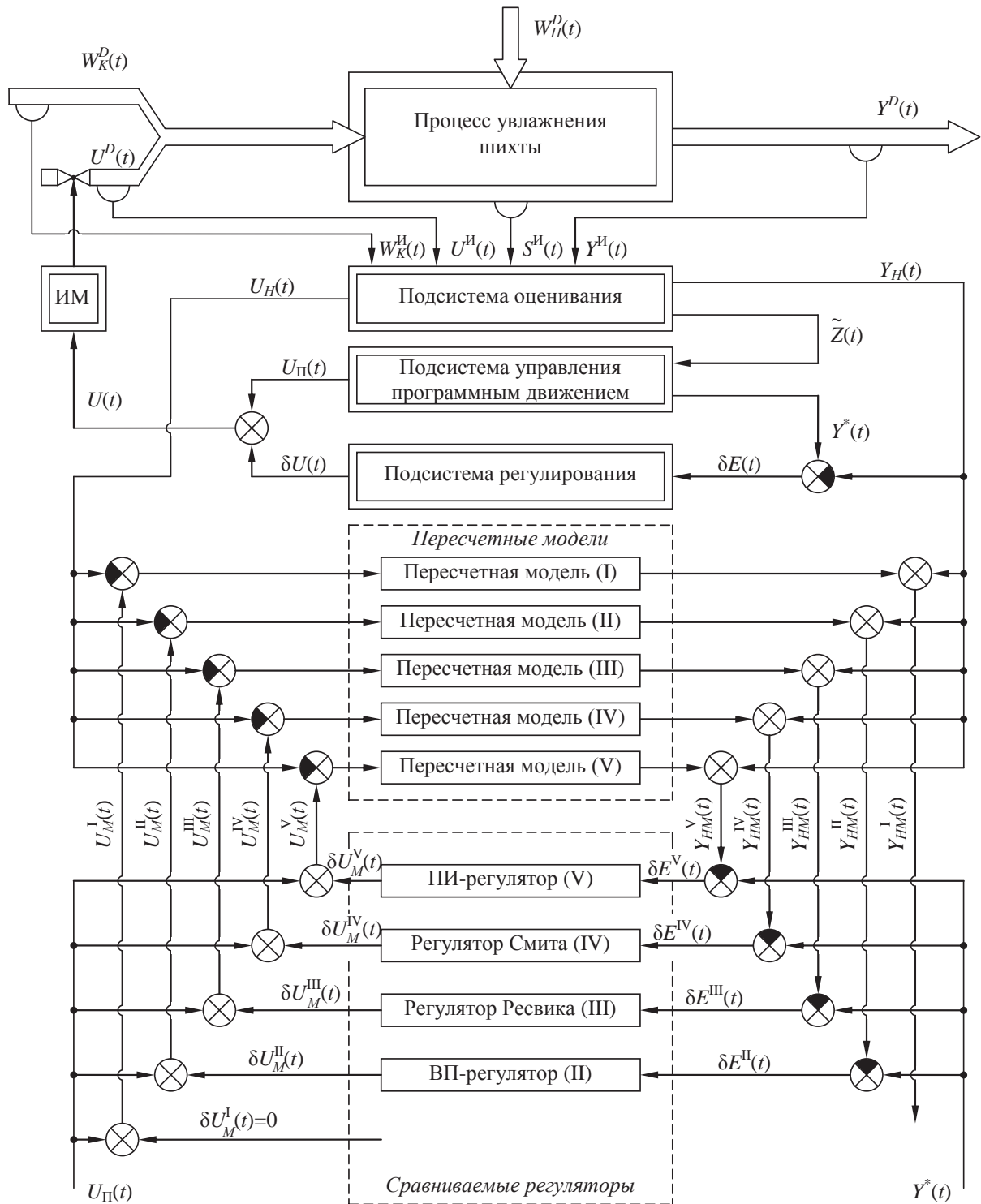


Рис. 2. Схема имитационного натурно-математического моделирования

На рисунке 2 приняты следующие обозначения: $W_K^D(t)$, $W_H^D(t)$, $U^D(t)$, $Y^D(t)$ – действительные (D) значения контролируемых (K) и неконтролируемых (H) внешних воздействий, управляющих и выходных воздействий объекта управления в момент времени t ; $W_K^I(t)$, $U^I(t)$, $Y^I(t)$, $S^I(t)$ – измеренные (И) значения воздействий объекта; $\tilde{z}(t)$ – вектор оценок соответствующих переменных объекта управления; ИМ – исполнительный механизм; $U_{\Pi}(t)$ –

Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

программное управляющее воздействие; $Y^*(t)$ – задающее воздействие; $\delta U_M^I(t), \dots, \delta U_M^V(t)$ – модельные (M) возможные варианты регулирующего воздействия; $\delta E^I(t), \dots, \delta E^V(t)$ – ошибки регулирования, которые были бы, если бы вместо натурального управляющего воздействия $U_H(t)$ были бы реализованы модельные $U_M^I(t), \dots, U_M^V(t)$ соответственно. Действующая производственная система управления построена на основе концепции возмущенно-невозмущенного (программного) движения (концепции А.М. Ляпунова). Программное управляющее воздействие, поступая на объект управления совместно с возмущениями, вызывает изменение выходного воздействия объекта, координаты которого в общем случае отличаются от координат невозмущенного движения на значение координат возмущенного движения, которые затем поступают в подсистему регулирования.

Представлены диаграммы пересчетного имитационного натурно-математического моделирования. Выделены четыре типопредставительные ситуации (ТПС), в каждой из которых были найдены наилучшие алгоритмы регулирования по критерию эффективности $R_N(t)$. В ТПС № 1 и № 2 наибольшую эффективность показал ВП-регулятор (рис. 3 и рис. 4), в ТПС № 3 – регулятор Ресвика (рис. 5), в ТПС № 4 – ПИ-регулятор (рис. 6).



Рис. 3. Диаграммы пересчетного моделирования для ТПС №1



Рис. 4. Диаграммы пересчетного моделирования для ТПС №2

Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования



Рис. 5. Диаграммы пересчетного моделирования для ТПС №3



Рис. 6. Диаграммы пересчетного моделирования для ТПС №4

Прогнозирующие регуляторы позволяют устранить «вредное» влияние запаздывания, обеспечить минимальное время регулирования и высокую динамическую точность, упростить расчет оптимальных настроек регулирующих блоков (например, блока в виде ПИ-регулятора), уменьшить затраты времени на наладку системы автоматизации.

Если объект управления таков, что невозможно измерить какую-нибудь выходную переменную без запаздывания, то в этом случае обычно используются прогнозирующие регуляторы с моделью объекта управления, структуры которых представлены на рисунках 7 – 9. В этих регуляторах искусственно создается вспомогательная величина, не содержащая запаздывания. Для этого необходимо точно знать модель объекта управления, модель той ее части, которая не содержит запаздывание, а также необходимо знать достаточно точно величину запаздывания (звено запаздывания). Знание реакции объекта без запаздывания позволяет регулятору прогнозировать будущее его поведение.

Прогнозирующие регуляторы целесообразно использовать в том случае, когда $\frac{\tau_o}{\tau_o + T_o} > 0,2 \div 0,5$ или $0 < \frac{T_o}{\tau_o} < 1$, а также, если задающее воздействие часто изменяется.

ВП-регулятор, представленный на рисунке 7, является улучшенной версией регулятора Смита и отличается добавлением экстраполятора.

Результаты применения автоматических регуляторов также показывают, что в некоторых случаях, особенно когда требуется уменьшить влияние возмущений, с прогнозирующими регуляторами может конкурировать ПИ-регулятор. Это в наибольшей степени относится к тем объектам управления, у которых $1 < \frac{T_o}{\tau_o}$.

Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

Регулятор Ресвика сложно реализовать, так как в нем применяется обратная модель объекта без учета запаздывания. Элемент прогнозирования регулятора Ресвика основан на системе с внутренней вспомогательной положительной обратной связью, причем в цепи обратной связи находится элемент с запаздыванием и коэффициент $\beta \leq 1$, необходимый для обеспечения устойчивости системы автоматического управления. Если обратная (инверсная) модель объекта без запаздывания физически не реализуема, то к ней обычно добавляют интегрирующее звено и получают ПИ-регулятор, который используется вместо обратной модели.

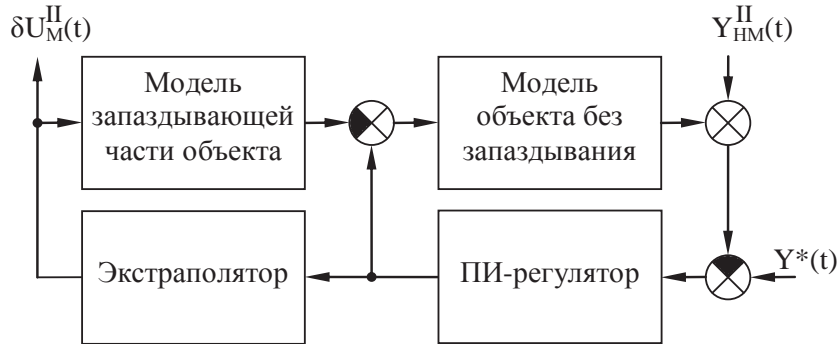


Рис. 7. Схема ВП-регулятора

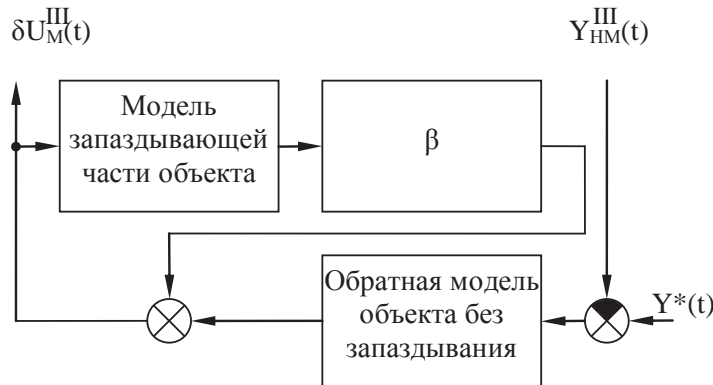


Рис. 8. Схемарегулятора Ресвика

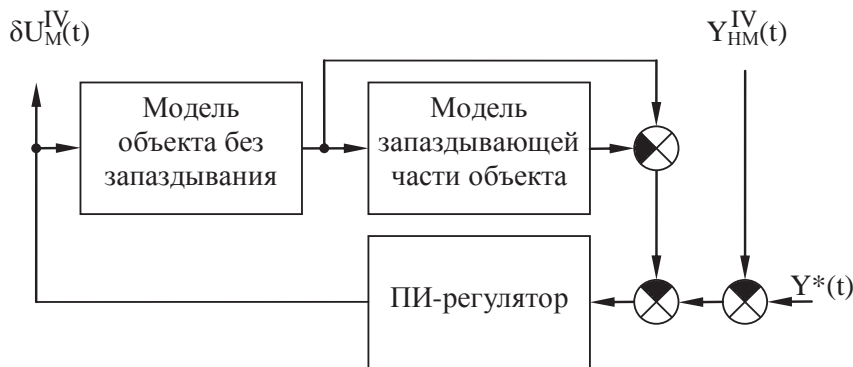


Рис. 9. Схема регулятора Смита

Регуляторы чувствительны к точности используемых в них модели объекта управления, поэтому предварительно необходимо построить максимально точную модель объекта управления и периодически ее обновлять, а также необходимо корректировать параметры регулирующего блока.

Если отсутствуют ресурсы для совместного использования нескольких автоматических регуляторов, то рекомендуется выбрать ВП-регулятор, так как ТПС № 1 и № 2 являются самыми сложными.

Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

Предлагаемый подход позволяет выработать рекомендации для синтеза автоматизированной системы управления, обеспечивающей достижение наибольшей эффективности по компенсации внешних возмущений.

Литература

1. 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.
2. Трофимов В.Б. Интеллектуальные автоматизированные системы управления технологическими объектами: учебно-практическое пособие / В.Б. Трофимов, С.М. Кулаков. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 232 с.
3. Кулаков С.М. Типология функциональных структур систем управления с прогнозированием / С.М. Кулаков, Н.Ф. Бондарь, В.Б. Трофимов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2005. – № 6. – С. 54 – 60.
4. Mirzal A. Delay Compensation using the Smith Predictor: A Brief Review with Numerical Examples / A. Mirzal // International Journal of Computer-aided Mechanical Design and Implementation – 2017. – № 1 (Vol. 3). – PP. 1 – 8.
5. Murugan G. Smith Predictor for Control of the Process with Long Dead Time / G. Murugan, A. Senthilkumar // RTIA Conference Proceedings. – Coimbatore, 2014. – PP. 81 – 85.
6. Vodencarevic A. Design of PLC-based Smith Predictor for Controlling Processes with Long Dead Time / A. Vodencarevic // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (IMECS 2010). – Hong Kong, 2010. – PP. 1 – 6.
7. Рыбалев А.Н. Реализация и компьютерное моделирование алгоритмов регулирования с транспортным запаздыванием для программируемых логических контроллеров / А.Н. Рыбалев // Информатика и системы управления – 2017. – №2 (52). – С. 12 – 24.
8. Тимчук Б.С. Методы синтеза регуляторов для систем с транспортным запаздыванием / Б.С. Тимчук // Молодая мысль: Наука. Технологии. Инновации: Материалы VIII (XIV) Всероссийской научно-технической конференции. –Братск: ФГБОУ ВО «БрГУ», 2016. – С. 265 – 268.