

нажера – НИЯУ МИФИ, ведущими сотрудниками Южно-украинской АЭС, 3-й энергоблок которой является референтным для настоящего тренажера, а также Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ), при активном содействии которого была осуществлена как поставка тренажера в БНТУ, так и его дальнейшее развитие как путем усовершенствования программного обеспечения, так и путем оказания поддержки в разработке учебно-методических материалов.

УДК 681.51. (075.8)

## КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ ВОДЫ В БАРАБАНЕ ПАРОГЕНЕРАТОРА ЭНЕРГОБЛОКА АЭС

Г.Т. Кулаков <sup>1)</sup>, А.Т. Кулаков <sup>1)</sup>, А.Н. Кухоренко <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Белорусский национальный технический университет

<sup>2)</sup> Научно-исследовательский институт пожарной безопасности  
и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Беларусь

Для повышения качества поддержания уровня воды в барабане парогенератора ПГВ-1000 энергоблока АЭС с ВВЭР предложен оптимальный ПИ-регулятор с наблюдателем состояния, который позволяет уменьшить максимальную динамическую ошибку регулирования при 10% возмущении расходом пара на 9%, а также сократить время регулирования на 18,8% по сравнению с типовой трехимпульсной системой автоматического управления (САУ) [1].

Поставлена задача существенного улучшения качества регулирования уровня воды в барабане парогенератора ПГВ-1000. Для решения этой задачи разработана комбинированная САУ, структурная схема моделирования которой представлена на рис. 1.

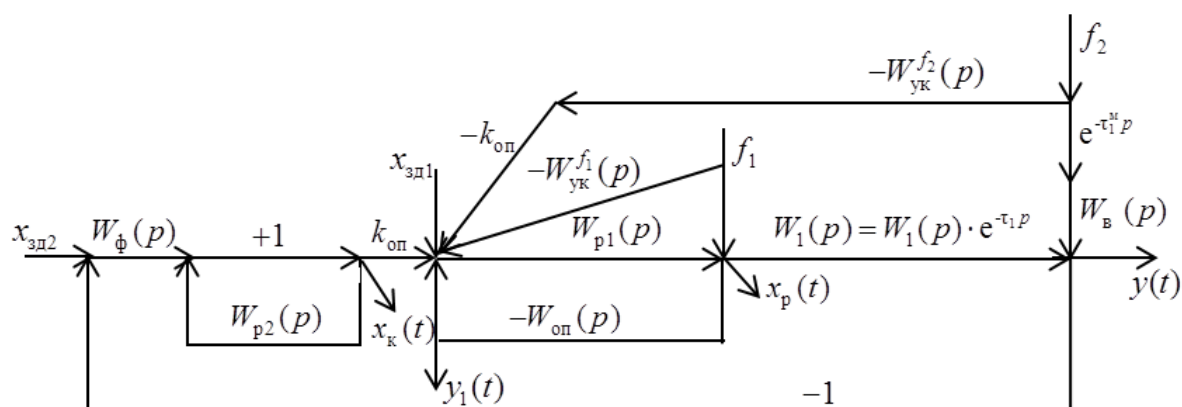


Рисунок 1 – Структурная схема комбинированной САУ уровнем воды в барабане ПГВ-1000 с оптимальным корректирующим регулятором

В данной САУ передаточная функция оптимального корректирующего регулятора определена по формуле [2]:

$$W_{p2} = W_{\phi}(p) \frac{1}{1 - W_{зл2}(p)}, \quad (1)$$

где передаточная функция фильтра равна:

$$W_{\phi}(p) = \frac{W_{зл2}(p)}{W_1(p)}. \quad (2)$$

Здесь заданная передаточная функция системы имеет следующий вид:

$$W_{зл2}(p) = W_{y, x_{зл2}}(p) = \frac{e^{-\tau_1 p}}{T_{зл2} p + 1}, \quad (3)$$

где  $T_{зл2} = 0,056\tau_1 = 11,742$  с.

При этом численное значение параметра оптимальной динамической настройки  $T_{зл3}$  в устройстве компенсации внешнего возмущения принята  $T_{зл3} = 0,09\tau_1 = 1,71$  с. (рис. 2).

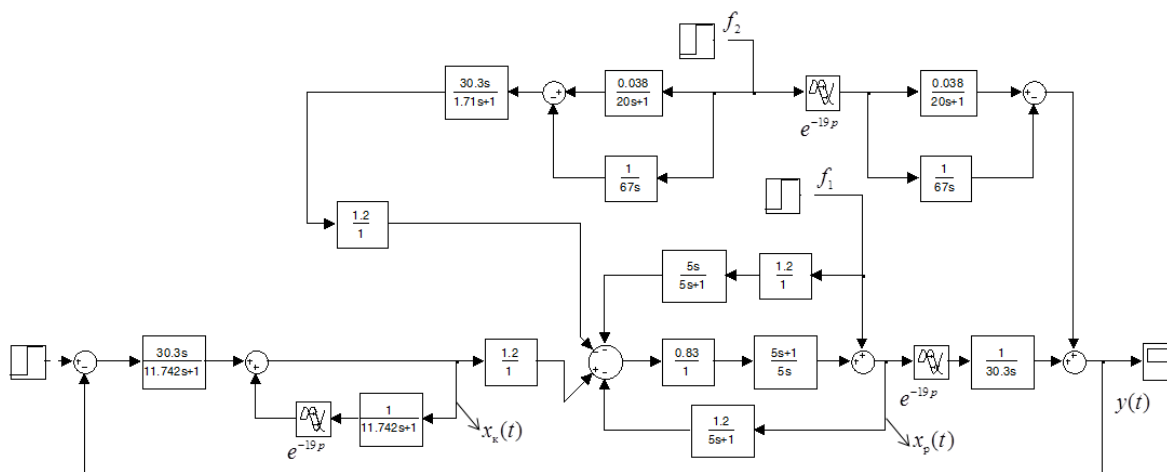


Рисунок 2 – Схема моделирования комбинированной САУ уровнем воды в барабане ПГВ-1000 с оптимальным корректирующим регулятором

Графики переходных процессов комбинированной САУ уровнем воды в барабане ПГВ-1000 с оптимальным корректирующим регулятором при основных возмущениях приведены на рис. 3.

Из анализа прямых показателей качества переходных процессов САУ (рис. 3) следует, что обработка задания происходит без перерегулирования с временем регулирования 75 с. Наиболее опасное внутреннее возмущение практически не отклоняет уровень воды в барабане парогенератора, а внешнее возмущение изменением расхода пара обрабатывается с максимальной динамической ошибкой в 61,5 мм водяного столба. Прямые показатели качества переходных процессов изменения уровня воды при возмущении расходом пара сравниваемых САУ приведены в таблице 1.

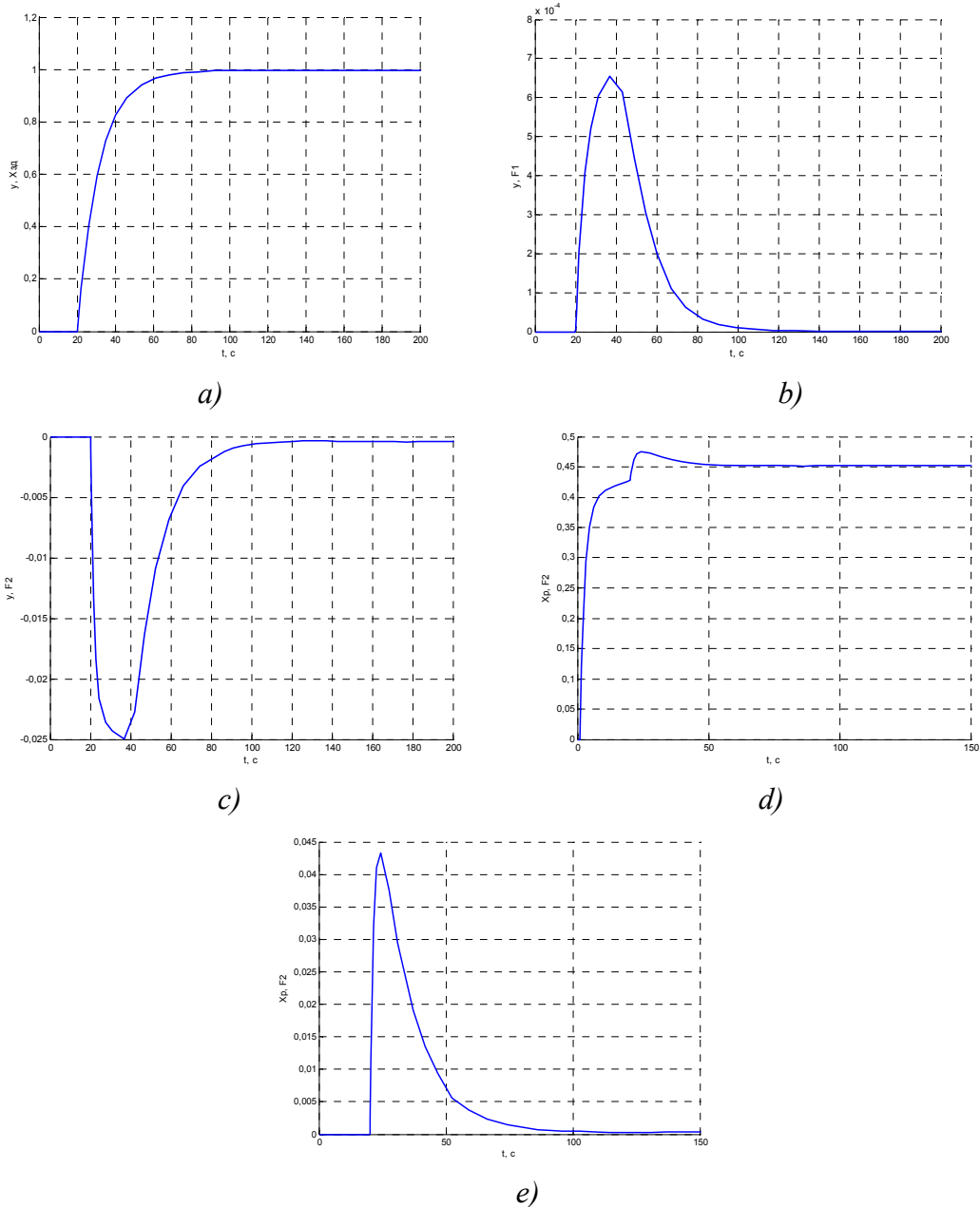


Рис. 3. Графики переходных процессов комбинированной САУ уровнем воды в барабане ПГВ-1000 с оптимальным корректирующим регулятором при основных воздействиях:  
*a* – отработка скачка задающего воздействия  $x_{зд}$  ;  
*b* – отработка внутреннего возмущения  $f_1$ ; *c* – отработка внешнего возмущения расходом пара  $f_2^*$ ; *d* – изменения регулирующего воздействия  $x_p(t)$  при отработке внешнего возмущения расходом пара; *e* – изменения корректирующего воздействия  $x_k(t)$  при отработке внешнего возмущения расходом пара;  $t$  – время.

Прямые показатели качества при отработке возмущением  
расходом пара САУ различных структур

Наименование САУ	Показатели качества			
	$\Delta y / y_n$	$\Delta H_0$ , мм вод. ст.	$t_p$ , с	$\Delta X_p$ , %УПРК
Типовая трехимпульсная САУ [1]	0,034	83,6	160	8,3
САУ с наблюдением состояния [1]	0,031	76,0	130	15,7
Комбинированная САУ на базе оптимальных регуляторов (рис. 3)	0,024	61,5	75	11,3

При этом в качестве базы для сравнения был выбран переходный процесс в системе при скачкообразном 10 % возмущающем воздействии по расходу пара (полное время регулирования типовой трехимпульсной САУ составило 160 с; максимальный динамический заброс по уровню воды 83,6 мм водяного столба, максимальное изменение положения регулирующего питательного клапана при возмущении расходом пара – 8,3%). Оптимальный цифровой ПИ-регулятор с наблюдателем состояния обеспечил на 9% меньше максимальный динамический заброс по уровню и меньшее время регулирования (на 30 с), при изменении регулирующего воздействия – 15,7% [1]. Предложенная комбинированная САУ уровнем воды в барабане ПГ при плановом изменении нагрузки с использованием оптимальных регуляторов обеспечивает лучшие прямые показатели качества: время отработки возмущения расходом перегретого пара уменьшилось на 53,1%, максимальное динамическое отклонение по уровню сократилось на 26,4%. При этом изменение положения регулирующего питательного клапана увеличилось всего на 36,1%.

#### Список использованных источников

1. Демченко, В.А. Оптимальный ПИ-регулятор уровня воды в парогенераторе энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 / В.А. Демченко [и др.] // Труды Одес. политехн. ун-та. – 2000. – Вып. 1. – С. 73–76.
2. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учеб. пособие / Г.Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г.Т. Кулакова. – Минск: Вышэйшая школа, 2017. – 238 с.: ил.