

УДК 681.511.26

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ САУ НЕЙТРОННОЙ МОЩНОСТИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Цыганкова С.Д., Иванов Д.А

Научные руководители – д.т.н., профессор Кулаков Г.Т., к.э.н., доцент
Кравченко В.В.

Ядерный (атомный) реактор представляет собой установку, в которой осуществляется самоподдерживающаяся управляемая цепная ядерная реакция деления. Основной частью реактора является его активная зона, где происходит деление ядер и выделяется ядерная энергия [1].

Согласно [2] реактор, как объект управления, является неустойчивым элементом системы, в котором при нормальном режиме эксплуатации, так или иначе, происходят колебания мощности. При отсутствии соответствующего управления, амплитуда колебаний может нарастать, что приведёт к срабатыванию аварийной защиты и остановке всего энергоблока.

Целью настоящей работы является выбор структуры системы управления таким образом, чтобы регулируемая величина не превышала заданной скорости при отработке скачка задания, и при этом учитывалась максимальная величина регулирующего воздействия, а наиболее опасное внутреннее возмущение f_1^0 позволяло получить полную инвариантность y при любом изменении f_1^0 .

Структурная схема системы автоматического управления (САУ) нейтронной мощностью ядерного реактора АЭС приведена на рисунке 1 [3].

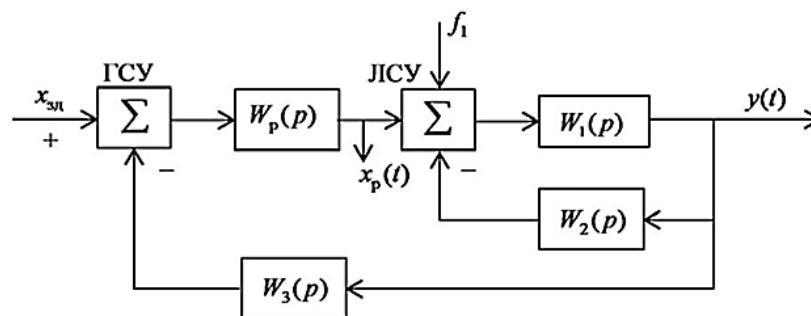


Рисунок 1. Структурная схема САУ нейтронной мощностью ядерного реактора АЭС:

$W_1(p)$ – передаточная функция кинетики нейронов; $W_2(p)$ – передаточная функция температурной обратной связи; $W_3(p)$ – передаточная функция запаздывания; $x_{зд}$ – задающее воздействие от задатчика мощности ядерного реактора; $y(t)$ – относительное отклонение нейтронной мощности; f_1 – возмущение по реактивности ядерного реактора; $x_p(t)$ – регулирующее воздействие; ГСУ – главное сравнивающее устройство; ЛСУ – локальное сравнивающее устройство

Объект регулирования с передаточной функцией $W_1(p)$, описывающий кинетику нейронов, соответствует типовому колебательному звену вида:

$$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1^2 p^2 + 2T_1 \xi p + 1} \quad (1)$$

где k_1 – коэффициент передачи звена;

T_1 – постоянная времени;

ξ – коэффициент демпфирования.

Местная температурная обратная связь с передаточной функцией $W_2(p)$ соответствует инерционному звену первого порядка:

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}, \quad (2)$$

где k_2 – коэффициент передачи звена;
 T_2 – постоянная времени.

ЛСУ обеспечивает отрицательную обратную связь, которая работает в режиме обычного вычитания. Запаздывание главной обратной связи системы управления соответствует звену чистого запаздывания:

$$W_3(p) = e^{-\tau_y p}, \quad (3)$$

где τ_y – время чистого запаздывания.

Передаточная функция внутреннего контура системы управления с учетом передаточных функций (1), (2) и (3) примет следующий вид:

$$W_{\text{экв}}(p) = \frac{b_0 \cdot (T_2 \cdot p + 1) e^{-\tau_y \cdot p}}{a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + 1}, \quad (4)$$

где

$$b_0 = \frac{k_1}{1 + k_1 k_2}, \quad (5)$$

$$b_1 = T_2, \quad (6)$$

$$a_1 = \frac{2T_1 \xi + T_2}{T + k_1 k_2}, \quad (7)$$

$$a_2 = \frac{T_1^2 + 2T_1 T_2 \xi}{1 + k_1 k_2}, \quad (8)$$

$$a_3 = \frac{T_1^2 T_2}{1 + k_1 k_2}. \quad (9)$$

Передаточная функция И-регулятора $W_p(p)$:

$$W_p(p) = \frac{k_p}{p}. \quad (10)$$

С помощью программы VisSim v6.0A произведем моделирование переходных процессов типовой САУ с И-регулятором. При моделировании будем использовать значения, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1

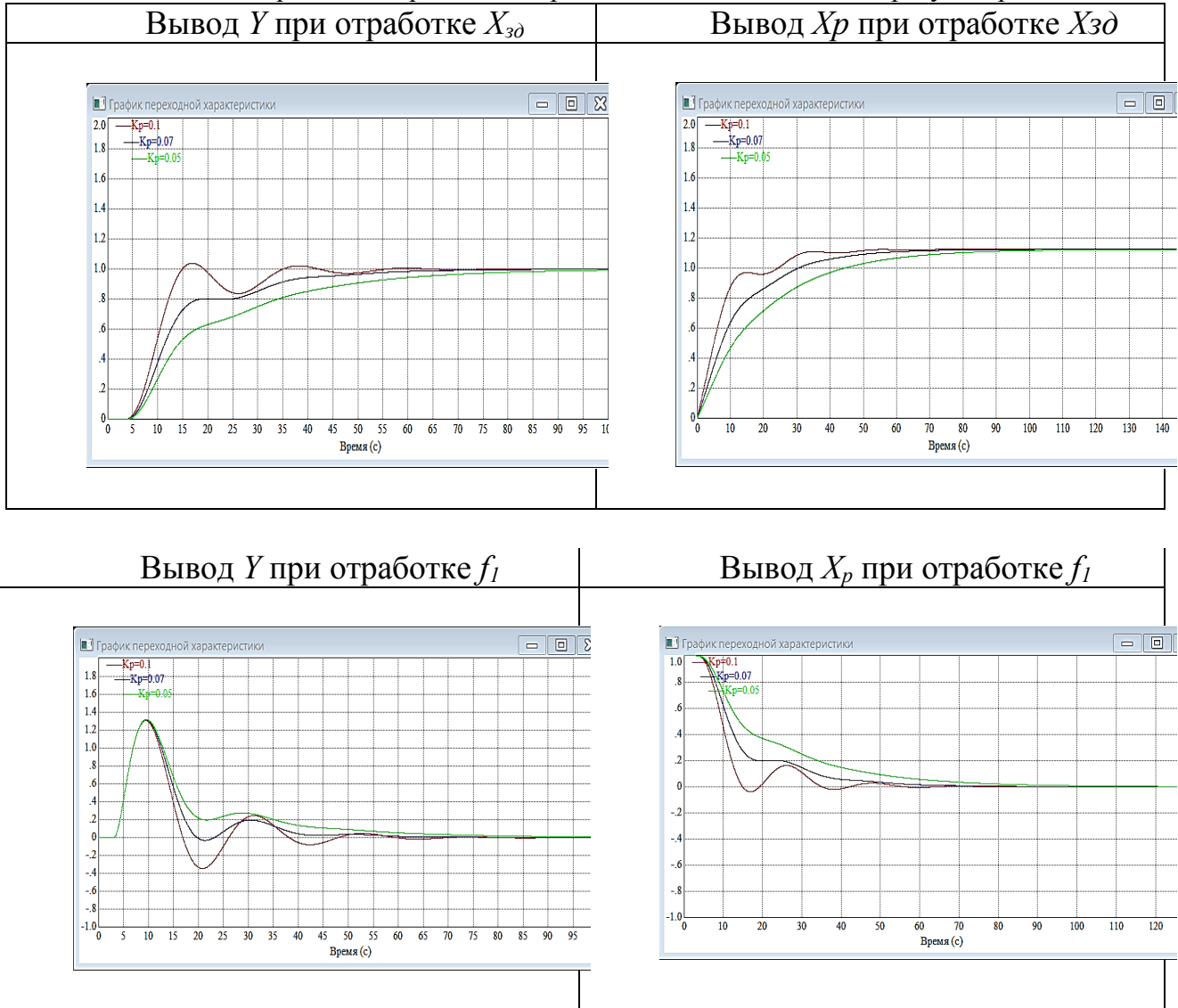
Исходные данные

k_1	$T_1, \text{с}$	ξ	$k_2, \text{с}$	$T_2, \text{с}$	$\tau_{\text{ос}}$
1,6	2,1	0,75	0,5	5,1	3,1

Результаты моделирования переходных процессов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Моделирование переходных процессов типовой САУ с И-регулятором



Из анализа графиков переходных процессов следует, что из трёх функций, оптимальной считаем график с $K_n = 0,05$. Для улучшения прямых показателей качества: время регулирования, снятия перерегулирования, уменьшения колебательности переходного процесса – мы предлагаем использовать САУ на базе передаточной функции оптимального регулятора, структурная схема которой приведена на рисунке 2.

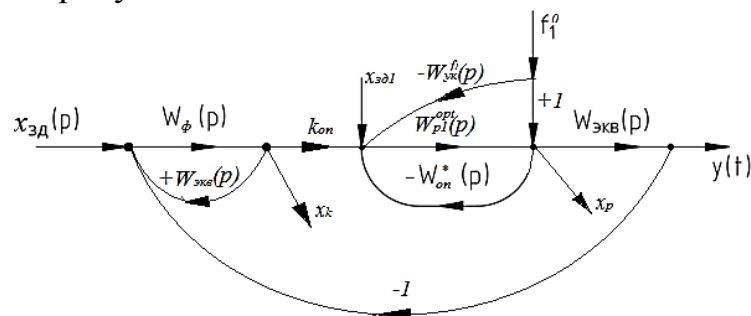


Рисунок 2. Структурная схема САУ нейтронной мощности ядерного реактора АЭС:

$y(t)$ – текущее значение нейтронной мощности ядерного реактора; $x_{зд}$ – заданное значение регулируемого параметра; f_1^0 – наиболее опасное внутреннее возмущение по реактивности ядерного реактора; $x_p(t)$ – регулирующее воздействие; x_k – корректирующее воздействие, равное $x_p(t)$; $W_\phi(p)$ – передаточная функция фильтра; $W_{p1}^{opt}(p)$ – передаточная функция оптимального стабилизирующего регулятора; $W_{on}^*(p)$ – передаточная функция опережающего участка; $W_{ук}^{f_1^0}(p)$ – передаточная функция устройства компенсации наиболее опасного внутреннего возмущения

В данном методе передаточные функции будут определены по следующим формулам:

$$W_{on}^*(p) = \frac{k_{on}}{T_{on}^* p + 1}, \quad (11)$$

$$W_{p1}^{opt}(p) = \frac{T_{on}^* p + 1}{k_{on} T_{on}^* p}, \quad (12)$$

$$W_{ук}^{f_1^0}(p) = \frac{k_{on} T_{on}^* p}{T_{on}^* p + 1}. \quad (13)$$

Передаточную функцию внутреннего контура системы управления определяем по формуле (4).

Передаточная функция фильтра $W_\phi(p)$:

$$W_\phi(p) = \frac{a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + 1}{b_0 \cdot (T_2 \cdot p + 1)(T_{зд} \cdot p + 1)^2}, \quad (14)$$

где

$$T_{зд} = \gamma \tau_{oc}. \quad (15)$$

Стоит отметить, что алгоритм формирования САУ начинаем с выбора структуры стабилизирующего регулятора с $W_{p1}^{opt}(p)$ по передаточной функции опережающего участка оптимального регулятора разомкнутой системы. Дополнительный датчик будет измерять наиболее опасное внутреннее возмущение по реактивности ядерного реактора f_1^0 и подаём на устройство компенсации. Между корректирующим и стабилизирующим регулятором помещаем усилитель $K_{оп}$, который превращает динамику контура в $+1$. Выход $W_\phi(p)$ подключаем ко входу $W_k^{ГOC}(p)$, который с плюсом компенсирует динамику ГОС при отработке скачка задания и превращает замкнутую систему в разомкнутую [4].

Структурную схему моделирования САУ на базе передаточной функции оптимального регулятора представим на рисунке 3.

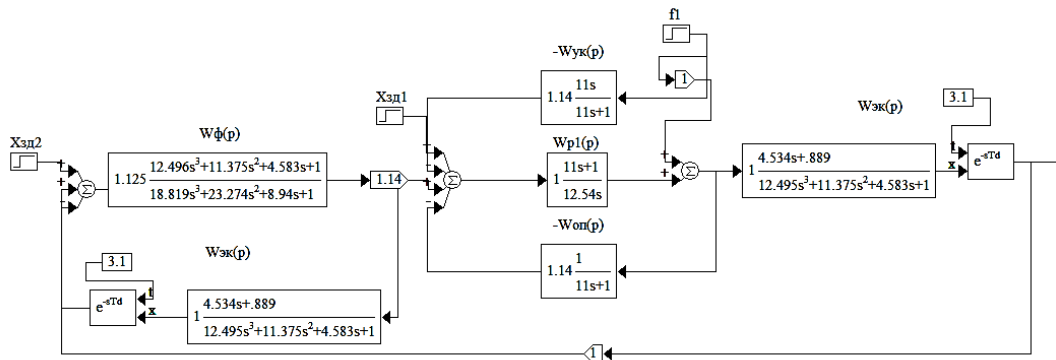
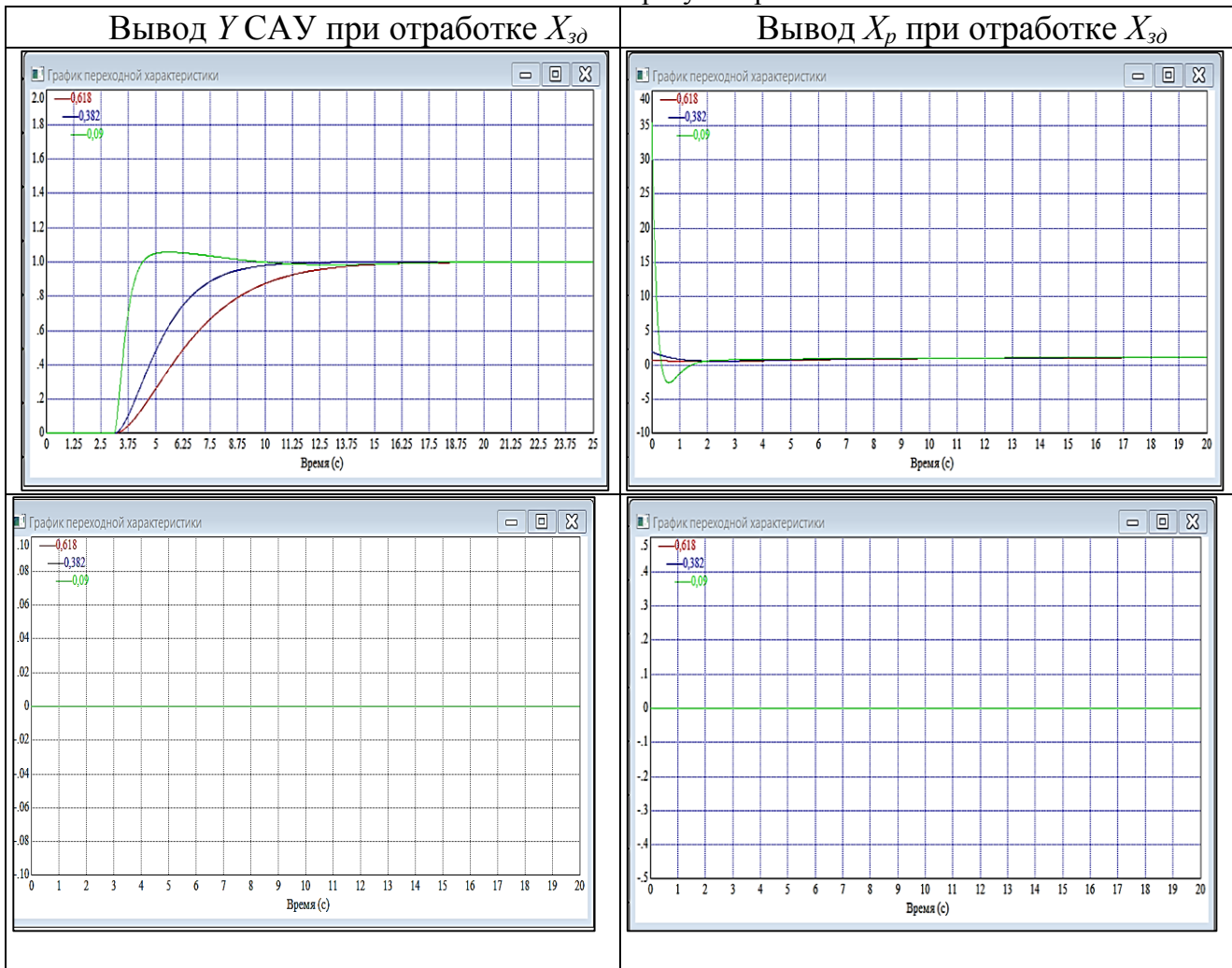


Рисунок 3. Структурная схема моделирования переходных процессов САУ на базе передаточной функции оптимального регулятора

При моделировании будем использовать значения, которые представлены в таблице 1. Результаты представим в таблице 3.

Таблица 3

Моделирование переходных процессов САУ на базе передаточной функции оптимального регулятора



Из полученных графиков переходных процессов мы можем сделать вывод, что уменьшение значения $T_{зд}$ приводит к улучшению качества регулирования. При отработке наиболее опасного внутреннего возмущения максимальная

динамическая ошибка регулирования и величина регулирующего воздействия уменьшаются до 10 раз в сравнении с типовой САУ с И-регулятором (см. графики в таблице 2). При отработке скачка задающего воздействия уменьшается величина регулирующего воздействия.

Структурно-параметрическая оптимизация САР мощности ядерного реактора позволяет изменять нагрузки с заданной допустимой скоростью, а также получать максимально допустимую величину ошибки регулирования при отработке внутреннего возмущения.

Литература

1. Альтернативная энергия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://alternativenergy.ru/energiya/291-princip-raboty-yadernogo-reaktora.html>. – Дата доступа: 21.02.2019.
2. Карначук, В.И. Системы автоматического выравнивания нейтронного потока в ядерных реакторах: учебное пособие / В.И. Карначук; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 221с.
3. Кузьмицкий, И.Ф. Теория автоматического управления: учебник / И.Ф. Кузьмицкий, Г.Т. Кулаков. – Минск: БГТУ, 2010. – 574 с.
4. Кулаков, Г.Т. Теория автоматического управления: учебно-методическое пособие для студентов специальностей 1-53 01 04 «Автоматизация и управление теплоэнергетическими процессами», 1-43 01 04 «Тепловые электрические станции», 1-43 01 08 «Паротурбинные установки атомных электрических станций», 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и производств» / Г.Т. Кулаков [и др.]; под общ. ред. Г.Т. Кулакова. – Минск: БНТУ, 2017. – 133 с.