

УДК621.3

ОПТИМИЗАЦИЯ САР ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Банцевич В.Г.

Научный руководитель – к.э.н., доцент Кравченко В.В.

Улучшения качества регулирования САР процесса горения можно добиться за счет применения различных методов оптимизации. Покажем, что ощутимый результат дает применение методов структурно-параметрической оптимизации и инвариантности.

Для этого за основу возьмем каскадную САР с ПИ-законом регулирования:

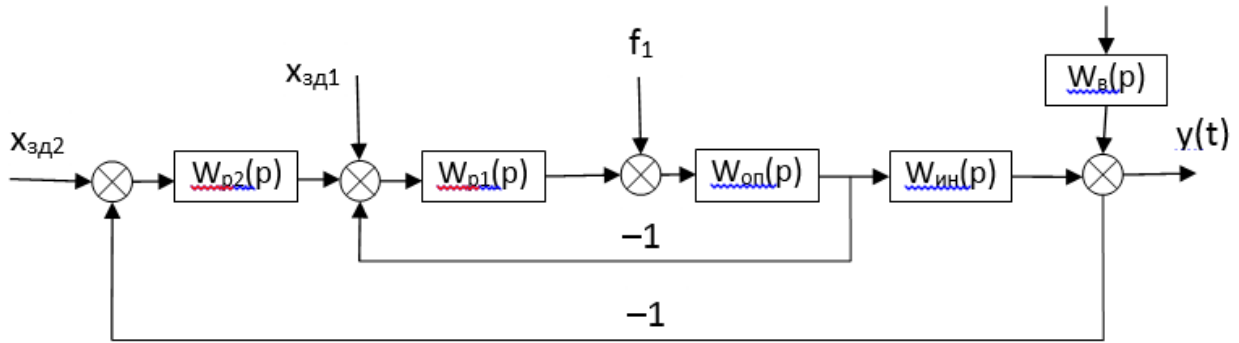


Рисунок 1 – Схема КСАР

Постановка задачи:

Для анализатора O_2 :

$$\begin{aligned} K_{on} &= 1; K_{ин} = 1; \\ T_{оп} &= 5 \text{ с}; \sigma_{оп} = 0,5 \text{ с}; \\ T_{ин} &= 10 \text{ с}; \sigma_{ин} = 5 \text{ с}; \tau_y = 2 \text{ с}; \end{aligned}$$

Стабилизирующий регулятор:

$$W_{p1}(p) = \frac{K_{p1}(T_{u1}p + 1)}{T_{u1}p} \quad (1)$$

Корректирующий регулятор:

$$W_{p2}(p) = \frac{K_{p2}(T_{u2}p + 1)}{T_{u2}p} \quad (2)$$

Опережающий участок объекта регулирования:

$$W_{on}(p) = \frac{K_{on}}{(T_{on}p + 1)(\sigma_{on}p + 1)} = \frac{1}{(5p + 1)(0,5p + 1)}; \quad (3)$$

Инерционный участок объекта регулирования:

$$W_{ин}(p) = \frac{K_{ин}e^{-\tau_y p}}{(T_{ин}p + 1)(\sigma_{ин}p + 1)} \quad (4)$$

Крайнее внешнее возмущение:

$$W_v(p) = \frac{10}{30p + 1}; \quad (5)$$

Типовой расчет параметров оптимальной динамической настройки типовой КСАР по методам БНТУ:

Стабилизирующий регулятор направлен на оптимальную обработку внутреннего возмущения f_1 , поэтому расчет выполняется по МЧК, по передаточной функции опережающего участка объекта регулирования $W_{оп}(p)$.

$$W_{p1}(p) = \frac{K_{p1}(T_{u1}p + 1)}{T_{u1}p} = \frac{7,95 \cdot (1,9p + 1)}{1,9p} \quad (6)$$

Корректирующий регулятор направлен на оптимальную обработку крайнего внешнего возмущения f_2 , поэтому расчет выполняется по МПК в ЧВ с различным коэффициентом демпфирования по передаточной функции инерционного участка объекта регулирования $W_{ин}(p)$.

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}; W_{p2}(p) = \frac{K_{p2}(T_{u2}p + 1)}{T_{u2}p} = \frac{3,75(15p + 1)}{15p} \quad (7)$$

$$\xi = 1; W_{p2}(p) = \frac{K_{p2}(T_{u2}p + 1)}{T_{u2}p} = \frac{1,875(15p + 1)}{15p} \quad (8)$$

Приведенный способ предназначен для реализации аналоговыми методами. Если использовать микропроцессорную технику, возможны иные варианты реализации и создание новых схем. Это открывает новые возможности для оптимизации и улучшения качества регулирования.

Структурно-параметрическая оптимизация каскадной САР для анализатора O_2

Алгоритм действий:

Стабилизирующий регулятор: $W_p(p) = (W_{он}(p))^{-1} W_{з\partial}^{pc}(p)$, для $n=1$

$$W_{p1}(p) = \frac{W_{з\partial 2}(p)}{W_{он}^*(p)} \cdot \frac{1}{1 - W_{з\partial 1}(p)} = \frac{T_{он}p + 1}{\kappa_{он}} \cdot \frac{1}{T_{з\partial 1}p} = \frac{5,5p + 1}{T_{з\partial 1}p} \quad (9)$$

содержит в себе критерий оптимальности $W_{з\partial 1}(p) = \frac{1}{T_{з\partial 1}p + 1} \quad (10)$

Корректирующий регулятор с учетом динамики внутреннего контура.

$$W_{p2}(p) = (W_1(p)W_{з\partial 1}(p))^{-1} W_{з\partial}^{pc}(p), \text{ для } n=3 \quad (11)$$

$$W_{p2}(p) = \frac{(10p + 1)(5p + 1)(T_{з\partial 1}p + 1)}{(T_{з\partial 2}p + 1)^3} \cdot \frac{1}{1 - W_{з\partial 2}^o(p)e^{-2p}} \quad (12)$$

В САР с такими регулируемыми устройствами качество регулирования можно изменять, изменяя величину $T_{з\partial 1}$ и $T_{з\partial 2}$, пользуясь ПЗС. С помощью изменения величин указанных показателей можно добиться уменьшения времени полного регулирования в переходных процессах или увеличить его, подбирая оптимальный для работы системы.

Изменение амплитуды колебаний при обработке крайнего внешнего возмущения достигается изменением величины $T_{з\partial}$ в долях от τ_y по правилу золотого сечения. В

данном случае наилучший результат, достигнут при значении – 0,146 (перерегулирование при отработке скачка задания меньше на 8%, чем при 0,054; при отработке крайнего внешнего возмущения амплитуда уменьшается на 44%, чем при 0,618). Причем дальнейшие попытки моделирования при еще более маленьком значении $T_{3\partial}$ не привели к улучшению качества регулирования – оно осталось на том же уровне.

Т.к. СПО КСАР с выбранными параметрами имеет лучшие показатели для отработки всех возможных возмущений. Модифицированная схема имеет более сложную структуру, что вызывает сложности при работе с аналоговым оборудованием, но не представляет собой проблемы, если настройка и работа производится на микропроцессорном оборудовании.

Инвариантная КСАР для анализатора O_2 .

Алгоритм действий:

Стабилизирующий регулятор:

$$W_p(p) = (W_{on}(p))^{-1} W_{3\partial}^{pc}(p), \text{ для } n=1$$

$$W_{p1}(p) = \frac{W_{3\partial 2}(p)}{W_{on}^*(p)} \cdot \frac{1}{1 - W_{3\partial 1}(p)} = \frac{T_{on}p + 1}{\kappa_{on}} \cdot \frac{1}{T_{3\partial 1}p} = \frac{5,5p + 1}{T_{3\partial 1}p} \quad (13)$$

Корректирующий регулятор с учетом динамики внутреннего контура.

$$W_{p2}(p) = (W_1(p)W_{3\partial 1}(p))^{-1} W_{3\partial}^{pc}(p) \quad (14)$$

$$W_{p2}(p) = \frac{(10p + 1)(5p + 1)(T_{3\partial 1}p + 1)}{(T_{3\partial 2}p + 1)^3} \cdot \frac{1}{1 - W_{3\partial 2}^o(p)e^{-2p}} \quad (15)$$

$$W_1^m(p) = \frac{K_{un}e^{-\tau_y p}}{(T_{un}p + 1)(\sigma_{un}p + 1)} = \frac{1e^{-2p}}{(10p + 1)(5p + 1)} \quad (16)$$

Условие инвариантности:

$$W_{yк}^{f2}(p)W_{3\partial 2}(p) = 1 - W_{3\partial 2}(p) \quad (17)$$

$$W_{yк}^{f2}(p) = \frac{1 - W_{3\partial 2}(p)}{W_{3\partial 2}(p)} = \frac{3T_{3\partial 2} \left(\frac{T_{3\partial 2}^2}{3} p^2 + T_{3\partial 2}p + 1 \right)}{(T_{3\partial 2}p + 1)^3} \quad (18)$$

Принимаем $T_{3\partial 3} = T_{3\partial 2}$, пренебрегаем третьей производной в знаменателе и второй производной в числителе, то

$$W_{yк}^{f2}(p) = \frac{3T_{3\partial 2}p}{T_{3\partial 2}p + 1} \quad (19)$$

Проведем сравнение базы (типовая КСАР, настроенная по методике БНТУ) с наилучшей СПО и инвариантной КСАР.

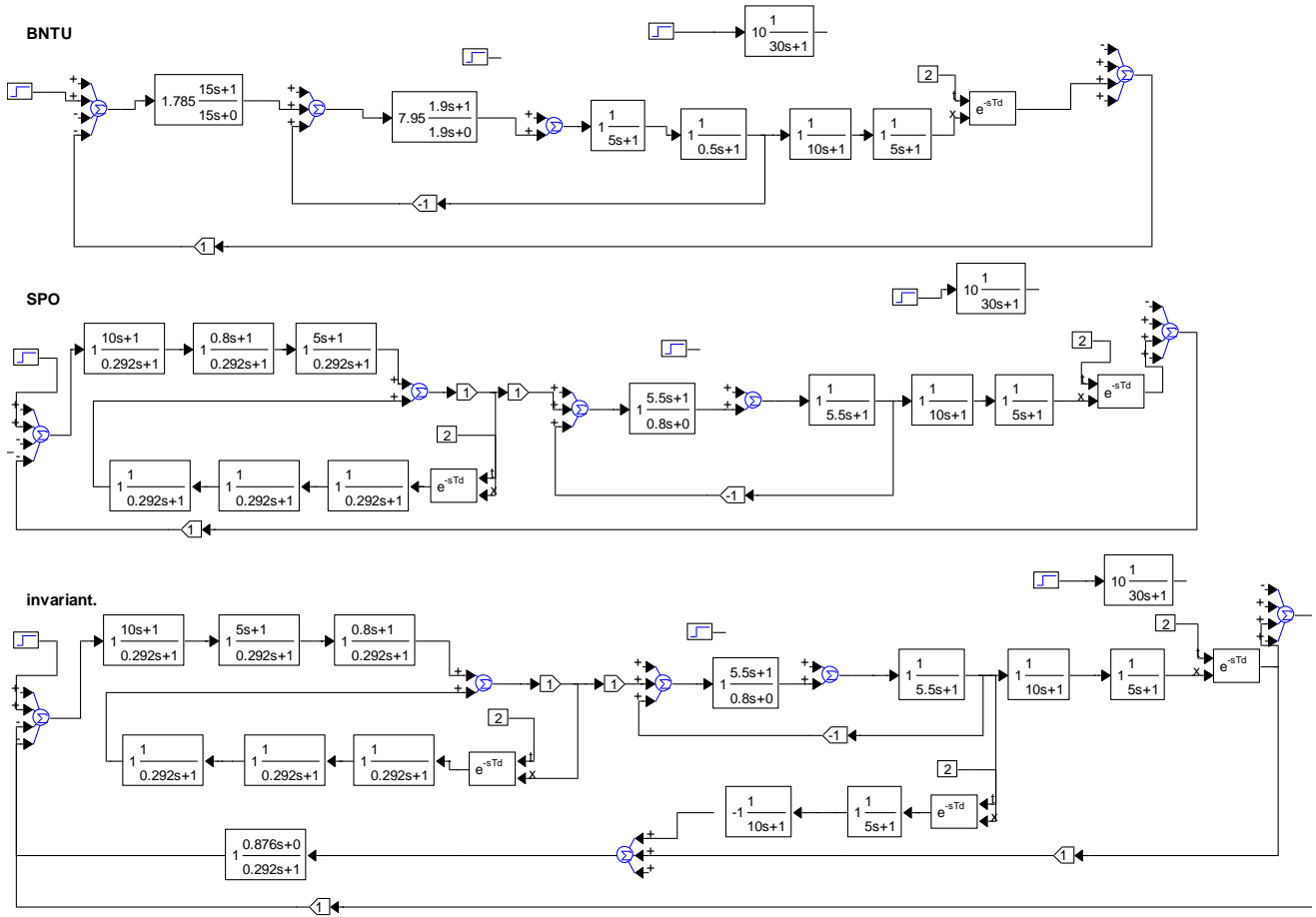


Рисунок 2 – Структурные схемы

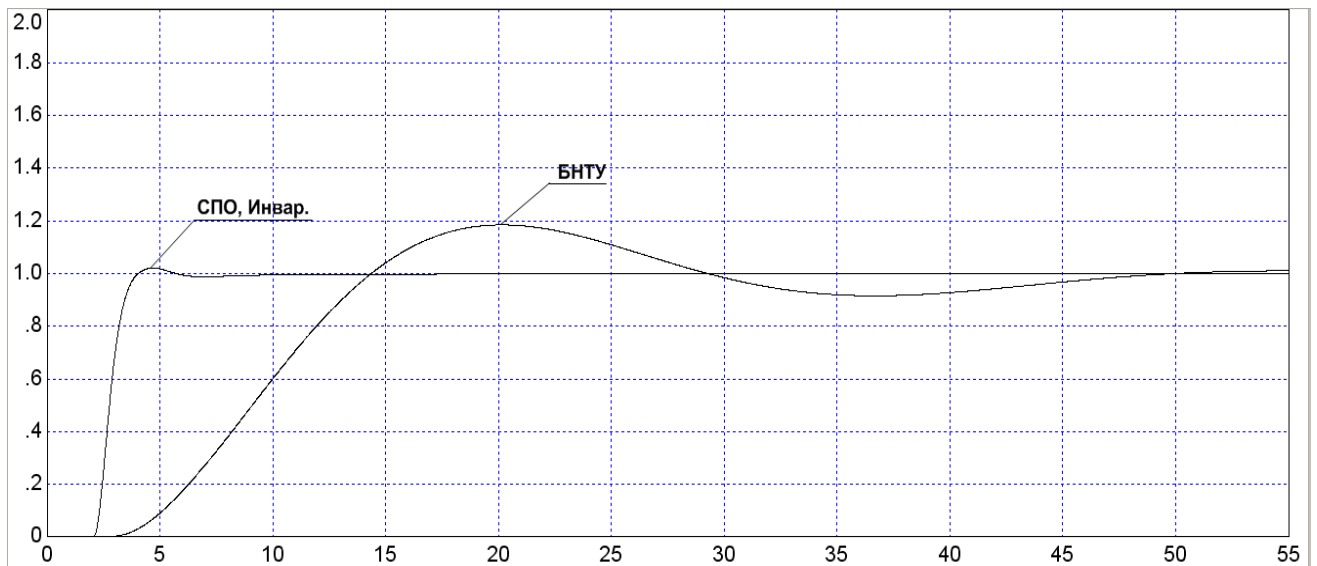


Рисунок 3 – Обработка скачка задания

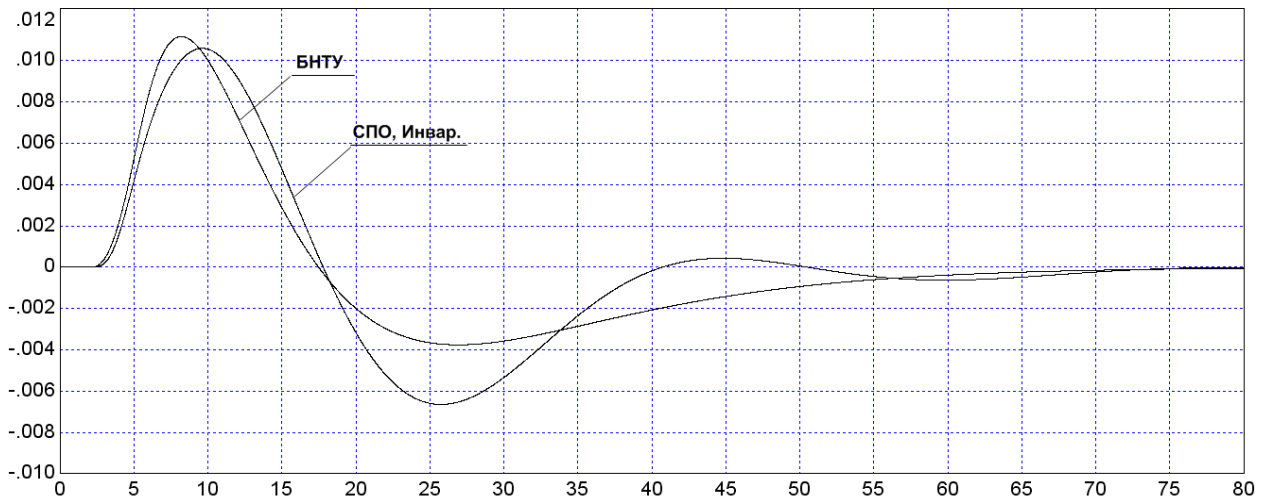


Рисунок 4 – Отработка внутреннего возмущения

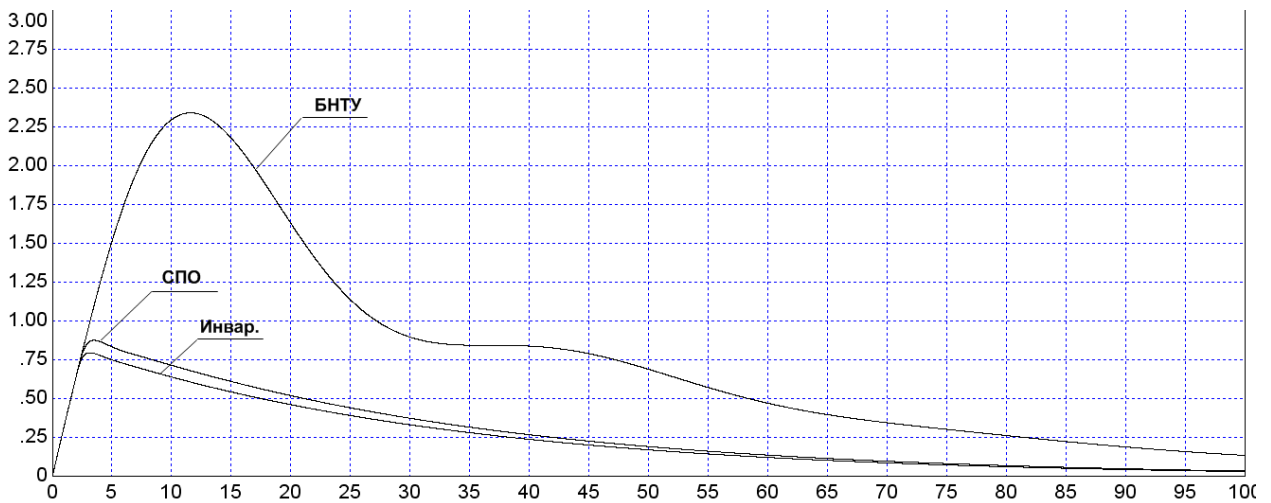


Рисунок 5 – Отработка крайнего внешнего возмущения

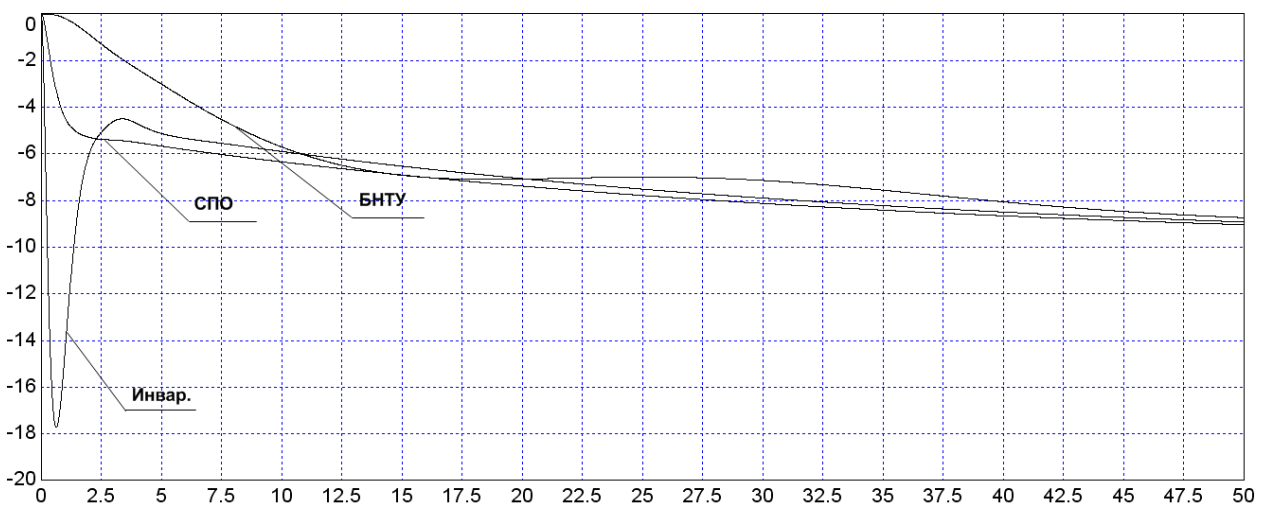


Рисунок 6 – Регулирующее воздействие

Таблица 1 – Основные ППК

	x _{зд}		f ₁		f ₂		x _p
	tp, с	σ, %	tp, с	A ₁ ⁺	tp, с	A ₁ ⁺	
БНТУ	45,6	20,9	0	0,011	137,9	2,291	-10
СПО	3,76	2	0	0,011	102,5	0,873	-17,8
Инвар.	3,76	2	0	0,011	100,8	0,752	-10

На графиках видно, что применение СПО и инвариантности дает положительный эффект как для отработки скачка задания (почти исчезает перерегулирование, полное время регулирования уменьшается с 45,6 с до 3,76 с), так и для внешнего воздействия (в инвариантной КСАР на 67% уменьшается амплитуда перерегулирования, на 37,1 с уменьшается время полного регулирования).

Необходимо также проверить реакцию данной системы на плановое изменение нагрузки:

Условие инвариантности:

$$W_{ук}^{f_2}(p)W_{зод}(p) = (1 - W_{зод}(p))W_г(p) \cdot e^{-t_{пз}p}; \tag{20}$$

В данной схеме равенства:

$$W_{зод}(p) = e^{-\tau_n p}; \tag{21}$$

$$t_{зод} = \tau_y; \tag{22}$$

Плановое изменение нагрузки:

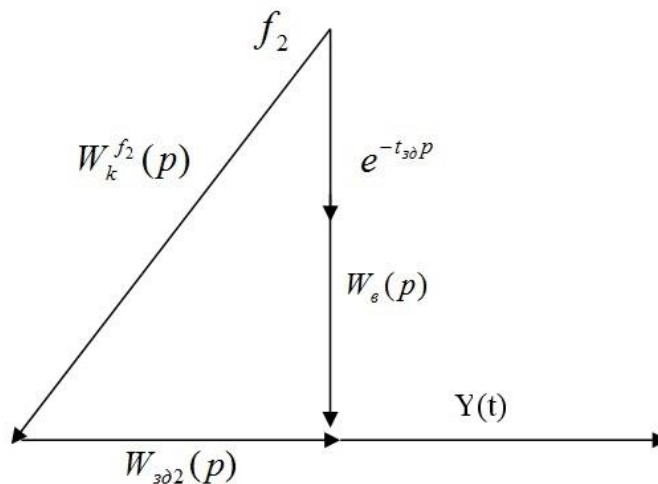


Рисунок 7 – Схема вывода условия инвариантности y(t) по отношению к f₂ при плановом изменении нагрузки

Передаточная функция устройства компенсации:

$$W_k^{f_2}(p) = \frac{(1 - W_{зод}(p))W_г(p) \cdot e^{-t_{зод}p}}{W_{зод}(p)} = \frac{K_E \cdot \tau_y p}{(T_E p + 1)(\tau_y p + 1)}; \tag{23}$$

Пренебрегаем второй производной:

$$W_k^{f_2}(p) = \frac{K_B \cdot \tau_y p}{(T_B + \tau_y)p + 1}; \tag{24}$$

Для объекта третьей степени:

$$W_k^{f_2}(p) = \frac{3K_B \cdot T_{\text{з\delta}2} p \left(\frac{T_{\text{з\delta}2}^2}{3} p^2 + T_{\text{з\delta}2} p + 1 \right)}{\left(\frac{T_B}{3} p + 1 \right)^3}; \tag{25}$$

В данной схеме равенства:

$$W_{\text{з\delta}2}(p) = e^{-\tau_y p} = e^{-34p}; \tag{26}$$

$$t_{\text{з\delta}3} = \tau_y = 34; \tag{27}$$

Передаточная функция устройства компенсации:

$$W_k^{f_2}(p) = \frac{(1 - W_{\text{з\delta}2}(p))W_{\epsilon}(p) \cdot e^{-t_{\text{з\delta}2}p}}{W_{\text{з\delta}2}(p)} = \frac{K_B \cdot \tau_y p}{(T_B p + 1)(\tau_y p + 1)} = \frac{10 \cdot 2p}{(30p + 1)(2p + 1)} \tag{28}$$

Пренебрегаем второй производной при p и получаем:

$$W_k^{f_2}(p) = \frac{K_B \cdot \tau_y p}{(T_B + \tau_y)p + 1} = 10 \frac{2p}{(30+2)p + 1} = 10 \frac{2p}{32p + 1}; \tag{29}$$

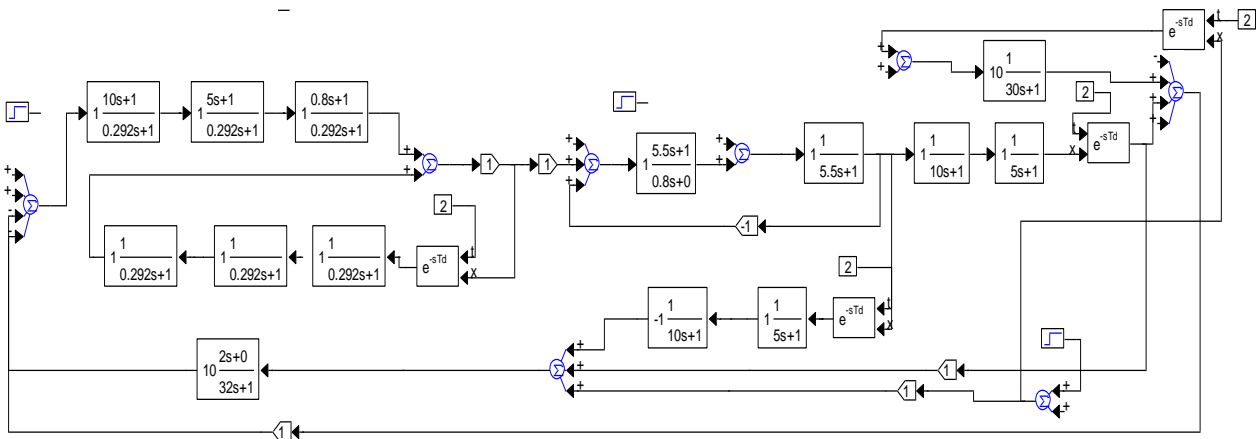


Рисунок 8 – Структурная схема ПИД анализатора O_2

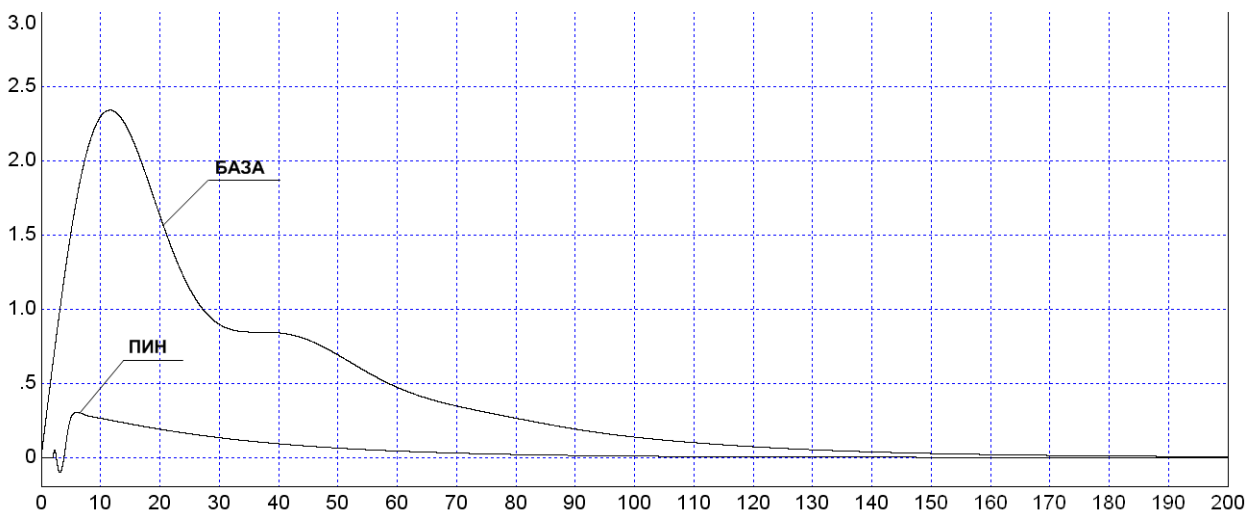


Рисунок 9 – Обработка крайнего внешнего возмущения

При таком построении системы мы видим улучшение качества регулирования при обработке крайнего внешнего возмущения, по сравнению с базовой обработкой (амплитуда уменьшается на 86,9% в анализаторе O_2).

Таким образом максимальный эффект в улучшении качества регулирования дает совмещение различных методов оптимизации. В данном случае совместное использование инвариантности и современных технических средств для создания комбинированных систем дает наилучший результат по сравнению с их использованием по отдельности.

Выводы

В результате проведенных исследований видно, что применение СПО и инвариантности дает положительный эффект как для обработки скачка задания (почти исчезает перерегулирование, полное время регулирования уменьшается с 45,6с до 3,76с), так и для внешнего воздействия (в инвариантной КСАР на 67% уменьшается амплитуда перерегулирования, на 37,1 с уменьшается время полного регулирования).

При построении системы с плановым изменением нагрузки мы увидели улучшение качества регулирования при обработке крайнего внешнего возмущения, по сравнению с базовой обработкой (амплитуда уменьшается на 86,9%).

Также было установлено, что качество регулирования процесса горения улучшается за счет разности двух сигналов O_2 и CO , вместо типовой КСАР с одним датчиком по кислороду в уходящих газах.

Литература

1. Кулаков, Г.Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования / Г.Т. Кулаков. – Мн.: Выш. шк., 1984. – 192 с.
2. Кулаков, Г.Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования / Г.Т. Кулаков. – Мн.: УП Технопринт, 2003. – 135 с.
3. Кузьмицкий, И.Ф. Теория автоматического управления: Учебник / И.Ф. Кузьмицкий, Г.Т. Кулаков. – Мн.: БГТУ, 2010. – 574 с.