

УДК 65-2

ОПТИМИЗАЦИЯ САР ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ С КОРРЕКЦИЕЙ ПО СО

Жаврид А.В.

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

За основу возьмем каскадную САР с ПИ-законом регулирования [1]:

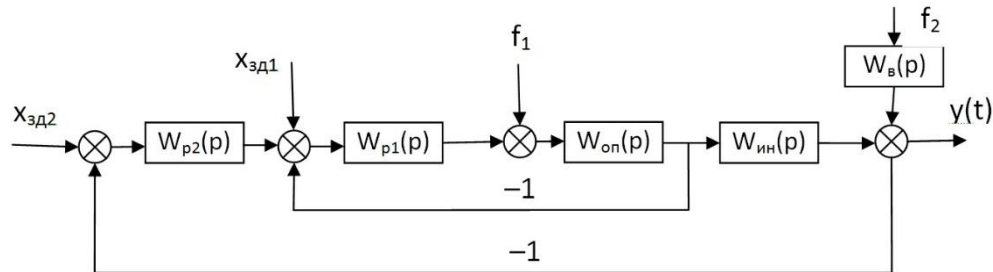


Рисунок 1. Схема КСАР

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 $W_{оп}(p)$ [2]:

$$T = \frac{T_{оп}}{\sigma_{оп}} = \frac{15}{1,5} = 10; T = T_{оп\sigma_{оп}} = 151,5 = 10$$

Относительный коэффициент передачи регулятора:

$$K = K_{pl} \cdot K_{оп} = 0,7395T \left(1 + \frac{1}{T}\right)^2 - 1 = 7,948; K = K_{р1} \cdot K_{оп} = 0,7395T + 1T^2 - 1 = 7,948$$

$$K_{pl} = \frac{K}{K_{оп}} = \frac{7,948}{1,0} = 7,948; K_{р1} = K K_{оп} = 7,948 \cdot 1,0 = 7,948 \text{ т}^\circ\text{С}$$

Относительное время интегрирование:

$$I = \frac{T_{ил}}{\sigma_{оп}} = \frac{6,36K}{T(1+1/T)^3} = \frac{6,36 \cdot 7,948}{13,31} = 3,798;$$

$$T_{ил} = I \cdot \sigma_{оп} = 3,798 \cdot 0,5 = 1,9 \text{ с};$$

$$W_{pl}(p) = \frac{K_{pl}(T_{ил}p+1)}{T_{ил}p} = \frac{7,95 \cdot (1,9p+1)}{1,9p}$$

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 $W_{ин}(p)$ [2]:

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2}}; K_{p2} = \frac{T_k}{2\kappa_{ин} \tau_y} = \frac{15}{2 \cdot 1,0 \cdot 3} = 2,5;$$

$$\varepsilon = 1; K_{p2} = \frac{T_k}{4\kappa_{ин} \tau_y} = \frac{15}{4 \cdot 1,0 \cdot 3} = 1,25;$$

$$T_{и2} = T_k = 15c; T_{и2} = T_k = 15c$$

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}; W_{p2}(p) = \frac{K_{p2}(T_{и2}p+1)}{T_{и2}p} = \frac{2,5(15p+1)}{15p}$$

$$\xi = 1; W_{p2}(p) = \frac{K_{p2}(T_{и2}p+1)}{T_{и2}p} = \frac{1,25(15p+1)}{15p}$$

Расчет структурно-параметрической оптимизации КСАР [3].

Стабилизирующий регулятор: $W_p(p) = (W_{оп}(p))^{-1} W_{зд}^{pc}(p)$, для $n=1$

$$W_{p1}(p) = \frac{W_{зд2}(p)}{W_{оп}^*(p)} \cdot \frac{1}{1-W_{зд1}(p)} = \frac{T_{оп}p+1}{\kappa_{оп}} \cdot \frac{1}{T_{зд1}p} = \frac{5,5p+1}{T_{зд1}p}$$

содержит в себе критерий

оптимальности $W_{зд1}(p) = \frac{1}{T_{зд1}p+1}$, где $T_{зд1}$ выбираем из условия относительной максимальной величины $\bar{x}_p^M = 1,618$.

$$W_p^{opt}(p) = (W_{оп}^*)^{-1} \cdot \frac{W_{зд}^{zc}}{1-W_{зд}^{zc}},$$

$$W_p^{opt}(p) = \frac{W_{зд}^{zc}}{W_{оп}^*} \cdot \frac{1}{1-W_{зд}^{zc}} = \frac{(T_{оп}^*p+1)}{K_{оп}(T_{зд}p+1)} \cdot \frac{1}{1-W_{зд}^{zc}},$$

$$W_{\phi}(p) = \frac{(T_{оп}^*p+1)}{K_{оп}(T_{зд1}p+1)},$$

Раскрываем скобки и пренебрегаем вторыми производными, получаем:

$$\bar{x}_p^{max} = 1,618 = \frac{T_{оп}^*}{K_{оп}T_{зд1}},$$

$$T_{зд1} = \frac{T_{оп}^*}{K_{оп}\bar{x}_p^{max}} = \frac{5,5}{1 \cdot 1,618} = 3,4c.$$

Корректирующий регулятор с учетом динамики внутреннего контура.

$$W_{p2}(p) = (W_1(p)W_{зд1}(p))^{-1} W_{зд}^{pc}(p) p = W_{здpc}(p), \text{ для } n=3$$

$$W_{p2}(p) = \frac{(10p+1)(5p+1)(T_{зд1}p+1)}{(T_{зд2}p+1)^3} \cdot \frac{1}{1-W_{зд2}^0(p)e^{-2p}},$$

где $T_{зд2}$ выбираем из условия относительной максимальной величины $\bar{x}_p^M = 1,618$.

$$W_p^{opt}(p) = (W_I)^{-1} \cdot \frac{W_{зд}^{zc}}{1 - W_{зд}^{zc}},$$

$$W_p^{opt}(p) = \frac{W_{зд}^{zc}}{W_I} \cdot \frac{1}{1 - W_{зд}^{zc}} = \frac{(10p+1)(5p+1)(T_{зд1}p+1)}{(T_{зд2}p+1)^3} \cdot \frac{1}{1 - W_{зд}^{zc}},$$

$$W_\phi(p) = \frac{(10p+1)(5p+1)(T_{зд1}p+1)}{(T_{зд2}p+1)^3}.$$

Раскрываем скобки и пренебрегаем третьими и вторыми производными, получаем:

$$\bar{x}_p^{max} = 1,618 = \sqrt[3]{\frac{(10+5+3,4)}{T_{зд2}}},$$

$$T_{зд2} = \sqrt[3]{\frac{(10+5+3,4)}{\bar{x}_p^{max}}} = \sqrt[3]{\frac{18,4}{1,618}} = 2,3с.$$

В САР с такими регулируемыми устройствами качество регулирования можно изменять, изменяя величину $T_{зд1}$ и $T_{зд2}$, пользуясь ПЗС, изменяя условия относительной максимальной величины \bar{x}_p^M . С помощью изменения величин указанных показателей можно добиться уменьшения времени полного регулирования в переходных процессах или увеличить его, подбирая оптимальный для работы системы.

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.

Расчет инвариантной КСАР [3].

Стабилизирующий регулятор: $p=Wздpc(p)$, для $n=1$

$$W_{p1}(p) = \frac{W_{зд2}(p)}{W_{оп}^*(p)} \cdot \frac{1}{1 - W_{зд1}(p)} = \frac{T_{он}p+1}{K_{он}} \cdot \frac{1}{T_{зд1}p} = \frac{5,5p+1}{T_{зд1}p}$$

где $T_{зд1}$ $T_{зд1}$ выбираем из условия относительной максимальной величины $\bar{x}_p^{max}=1,618$.

$$W_p^{opt}(p) = (W_{оп}^*)^{-1} \cdot \frac{W_{зд}^{zc}}{1 - W_{зд}^{zc}},$$

$$W_p^{opt}(p) = \frac{W_{зд}^{zc}}{W_{оп}^*} \cdot \frac{1}{1 - W_{зд}^{zc}} = \frac{(T_{он}^*p+1)}{K_{он}(T_{зд}p+1)} \cdot \frac{1}{1 - W_{зд}^{zc}},$$

$$W_\phi(p) = \frac{(T_{он}^*p+1)}{K_{он}(T_{зд1}p+1)}.$$

Раскрываем скобки и пренебрегаем третьими и вторыми производными, получаем:

$$\bar{x}_p^{max} = 1,618 = \frac{T_{оп}^*}{K_{оп} T_{зд1}},$$

$$T_{зд1} = \frac{T_{оп}^*}{K_{оп} \bar{x}_p^{max}} = \frac{5,5}{1 \cdot 1,618} = 3,4 \text{ с},$$

$$W_{p1}(p) = \frac{W_{зд2}(p)}{W_{оп}^*(p)} \cdot \frac{1}{1 - W_{зд1}(p)} = \frac{T_{оп} p + 1}{K_{оп}} \cdot \frac{1}{T_{зд1} p} = \frac{5,5 p + 1}{T_{зд1} p}$$

Корректирующий регулятор с учетом динамики внутреннего контура.

$$W_{p2}(p) = (W_1(p)W_{зд1}(p))^{-1} W_{зд}^{pc}(p)$$

$$W_{p2}(p) = \frac{(10p+1)(5p+1)(T_{зд1}p+1)}{(T_{зд2}p+1)^3} \cdot \frac{1}{1 - W_{зд2}^o(p)e^{-2p}}$$

где $T_{зд2}$ выбираем из условия относительной максимальной величины $\bar{x}_p^M = 1,618$.

$$W_p^{opt}(p) = (W_1)^{-1} \cdot \frac{W_{зд}^{зс}}{1 - W_{зд}^{зс}},$$

$$W_p^{opt}(p) = \frac{W_{зд}^{зс}}{W_1} \cdot \frac{1}{1 - W_{зд}^{зс}} = \frac{(10p+1)(5p+1)(T_{зд1}p+1)}{(T_{зд2}p+1)^3} \cdot \frac{1}{1 - W_{зд}^{зс}},$$

$$W_\phi(p) = \frac{(10p+1)(5p+1)(T_{зд1}p+1)}{(T_{зд2}p+1)^3}.$$

Раскрываем скобки и пренебрегаем третьими и вторыми производными, получаем:

$$\bar{x}_p^{max} = 1,618 = \sqrt[3]{\frac{(10+5+3,4)}{T_{зд2}}},$$

$$T_{зд2} = \sqrt[3]{\frac{(10+5+3,4)}{\bar{x}_p^{max}}} = \sqrt[3]{\frac{18,4}{1,618}} = 2,3 \text{ с}.$$

$$W_1^M(p) = \frac{K_{ин} e^{-\tau_y p}}{(T_{ин} p + 1)(\sigma_{ин} p + 1)} = \frac{1e^{-2p}}{(10p+1)(5p+1)}$$

Условие инвариантности:

$$W_{ук}^{f2}(p)W_{зд2}(p) = 1 - W_{зд2}(p) p = 1 - p$$

$$W_{ук}^{f2}(p) = \frac{1 - W_{зд2}(p)}{W_{зд2}(p)} = \frac{3T_{зд2} \left(\frac{T_{зд2}^2}{3} p^2 + T_{зд2} p + 1 \right)}{(T_{зд2} p + 1)}$$

Принимаем $T_{зд3}=T_{зд2}$, пренебрегаем третьей производной в знаменателе и второй производной в числителе, то $W_{ук}^{f2}(p) = \frac{3T_{зд2}p}{T_{зд2}p + 1}$

Сравнение типовой КСАР, настроенная по методике БНТУ с СПО и инвариантной КСАР:

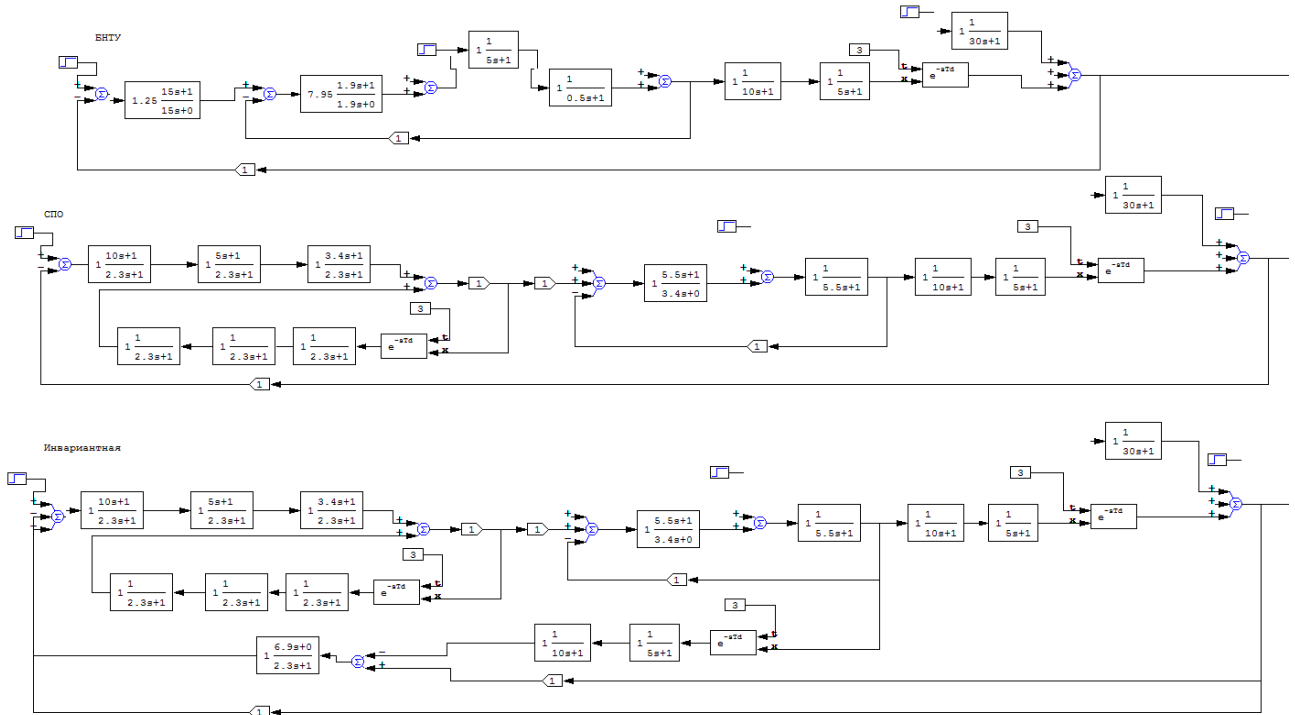


Рисунок 2. Структурные схемы

Построение переходных процессов при различных входных воздействиях:

- 1 – типовая САР настроенная по методике БНТУ;
- 2 – СПО КСАР для анализатора СО;
- 3 – Инвариантная САР для анализатора СО;

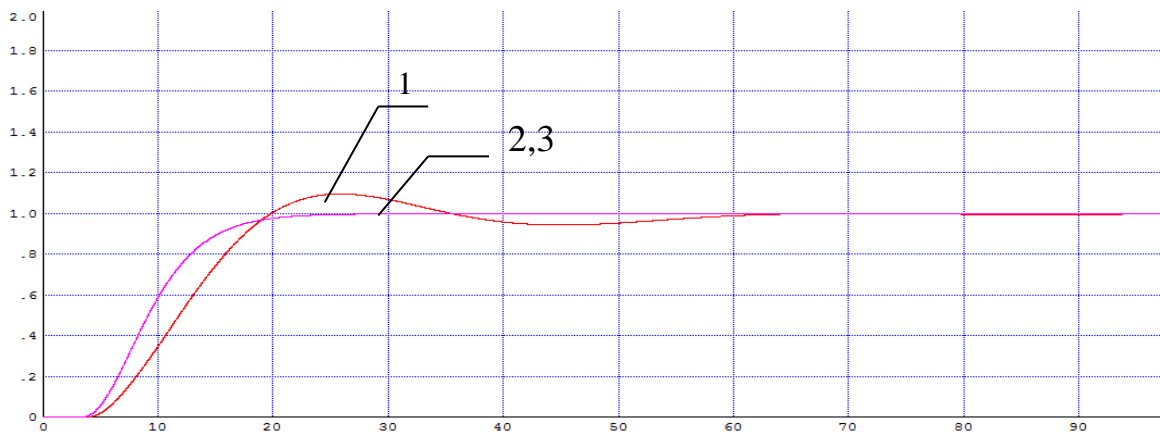


Рисунок 3. Отработка скачка задания

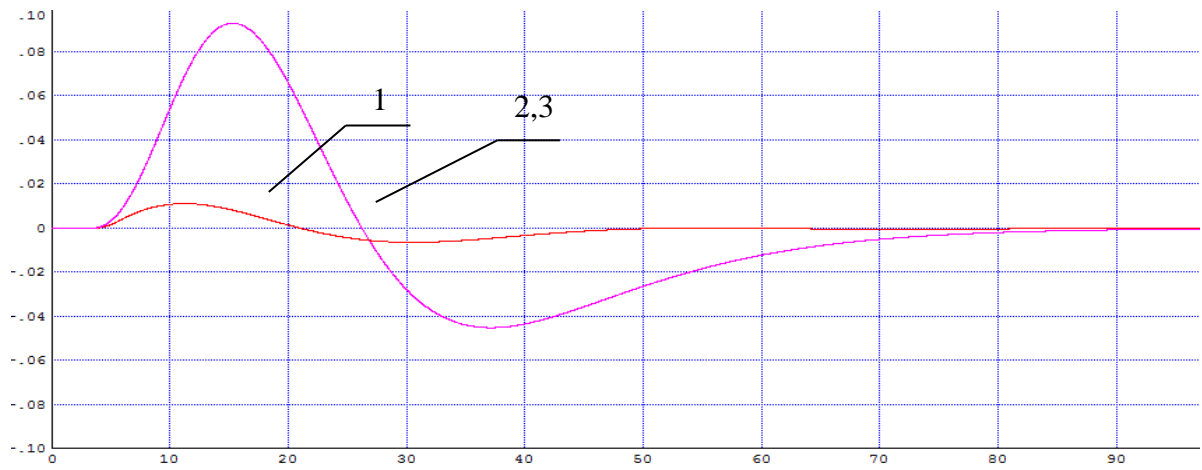


Рисунок 4. Отработка внутреннего возмущения

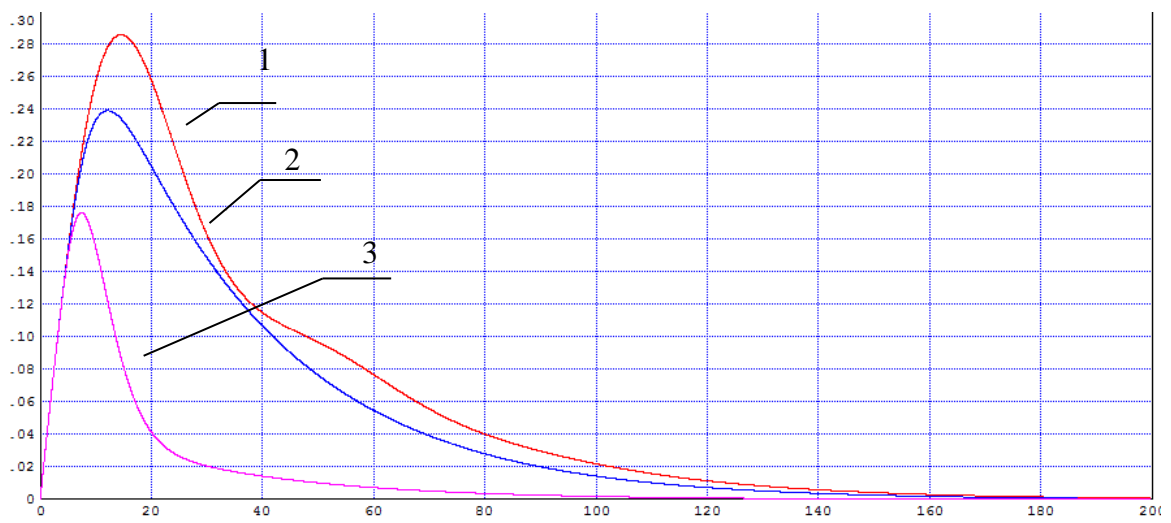


Рисунок 5. Отработка крайнего внешнего возмущения

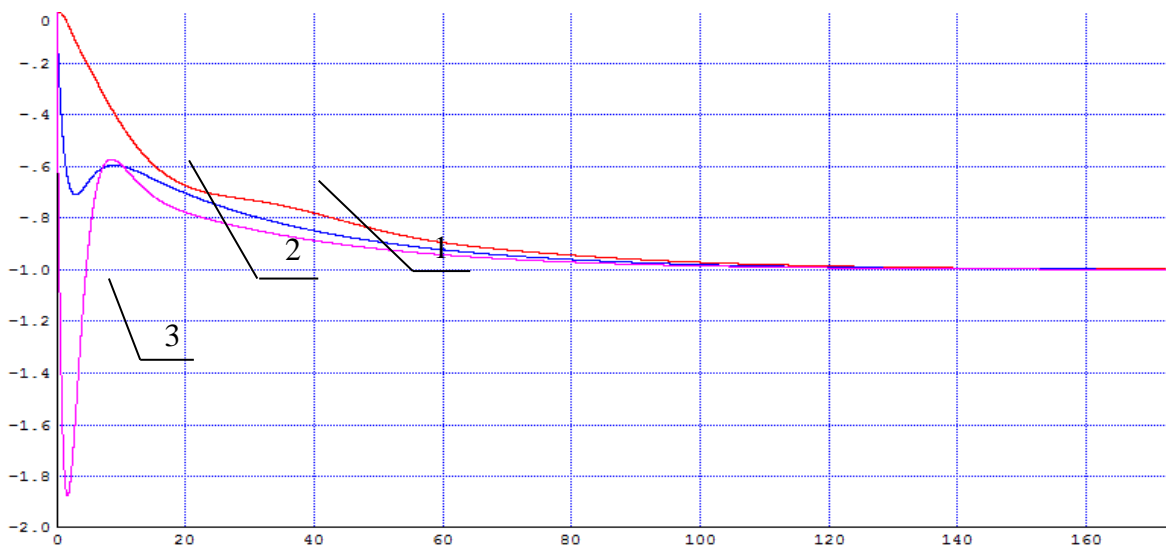


Рисунок 6. Регулирующее воздействие

Таблица 1 – Основные ППК

Методика \ Параметр	$x_{зд}$		f_1		f_2		x_p
	tp, c	$\sigma, \%$	tp, c	A_1^+	tp, c	A_1^+	
Типовая КСАР, рассчитанная по методам БНТУ	65	20,9	50	0,011	137,9	2,291	-1
Структурно-параметрическая оптимизация КСАР	23	0	90	0,092	154	0,24	-1
Инвариантная САР	23	0	90	0,092	110	0,175	-1,88

На графиках видно, что применение инвариантности дает положительный эффект как для отработки скачка задания (почти исчезает перерегулирование, полное время регулирования уменьшается с 65 с до 23 с), так и для внешнего воздействия (в инвариантной КСАР на 2,116 уменьшается амплитуда перерегулирования, на 27,9 с уменьшается время полного регулирования); применение СПО дает положительный эффект как для отработки скачка задания (почти исчезает перерегулирование, полное время регулирования уменьшается с 65 с до 23 с), так и для внешнего воздействия (значительно уменьшается амплитуда перерегулирования с 2,291 до 0,24, но полное время регулирования увеличивается на 16.5 с).

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.

Литература

1. Плетнев, Г. П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учебник для студентов и вузов / Г.П. Плетнев. – 4-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 352с., ил.
2. Кулаков, Г. Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования / Г.Т. Кулаков. - Минск: Вышэйш. шк., 1984. - 192 с.
3. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами/ под ред. Г.Т. Кулаков. – Минск: Вышэйшая школа, 2017 – 240 с.