

УДК 621.3

Методы повышения качества регулирования типовой каскадной САР

Шандроха А. Р.

Научный руководитель – д.т.н., профессор КУЛАКОВ Г. Т.

Широкое распространение в области автоматизации теплоэнергетических процессов получили следующие методы расчёта параметров оптимальной динамической настройки типовых каскадных САР [1÷3]. Для дальнейшего улучшения качества регулирования типовых каскадных САР предлагаем использовать следующие методы оптимизации динамики этих систем. Возможное повышение качества регулирования с использованием предложенных методов покажем на примере САР регулятора общего воздуха каскадной САР с коррекцией по содержанию свободного кислорода в уходящих дымовых газах, структурная схема которой приведена на рисунке 1.

Таблица 1 – Динамика объекта регулирования

$K_{оп} = 1^{\circ}\text{C}/(\text{T}/\text{ч})$	$K_{ин} = 0.8$
$T_{оп} = 4.5 \text{ с}$	$T_k = 12 \text{ с}$
$\sigma_{оп} = 0.5 \text{ с}$	$K_B = 5^{\circ}\text{C}/\%$
$\tau_1 = 3 \text{ с}$	$T_B = 20 \text{ с}$

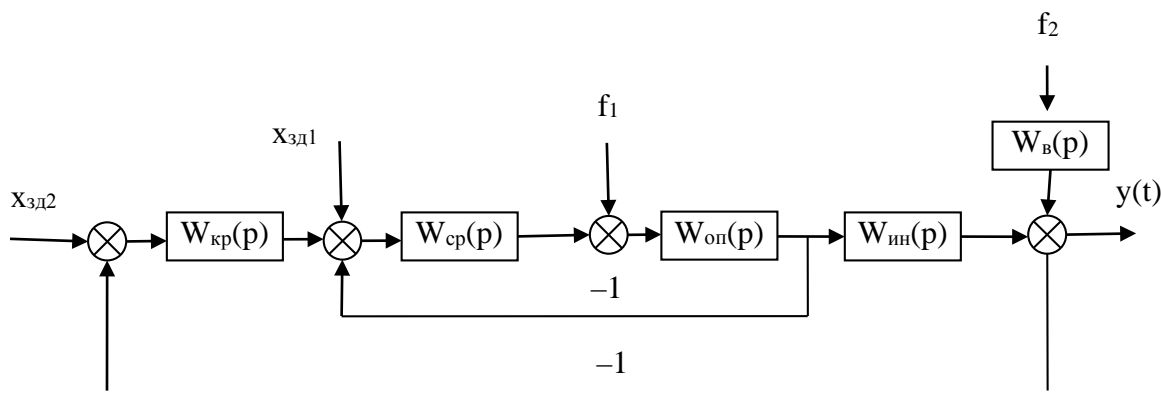


Рисунок 1 – Структурная схема типовой каскадной САР

Передаточная функция элементов САР имеют следующий вид:

Стабилизирующий регулятор (СР):

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

где  $K_{p1}$  – коэффициент передачи;  $T_{u1}$  – время интегрирования СР.

Корректирующий регулятор (КР):

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

где  $K_{p2}$  – коэффициент передачи;  $T_{u2}$  – время интегрирования КР.

Опережающий участок объекта регулирования:

$$W_{on}(p) = \frac{\kappa_{on}}{(T_{on}p+1)(\sigma_{on}p+1)} = \frac{1}{(4.5p+1)(0.5p+1)}, \quad (3)$$

где  $\kappa_{on}$  – коэффициент передачи;  $T_{on}$ ,  $\sigma_{on}$  – соответственно большая и меньшая постоянная времени передаточной функции опережающего участка (ОУ).

Инерционный участок объекта регулирования:

$$W_{ин}(p) = \frac{K_{ин} e^{-\tau_1 p}}{T_k p + 1} = \frac{0,8 \cdot e^{-3p}}{12p + 1}, \quad (4)$$

где  $\kappa_{ин}$  – коэффициент передачи;  $T_k$  – постоянная времени передаточной функции инерционного участка (ИУ),  $\tau_1$  – время запаздывания.

Передаточная функция крайнего внешнего возмущения:

$$W_{\epsilon}(p) = \frac{\kappa_{\epsilon}}{T_{\epsilon} p + 1} = \frac{5}{20p + 1}, \quad (5)$$

где  $\kappa_{\epsilon}$  – коэффициент передачи;  $T_{\epsilon}$  – постоянная времени передаточной функции крайнего внешнего возмущения.

Стабилизирующий регулятор направлен на оптимальную обработку внутреннего возмущения  $f_1$ , поэтому расчет его параметров оптимальной динамической настройки выполняют по методу частичной компенсации (МЧК) по передаточной функции опережающего участка объекта регулирования [1]. Корректирующий регулятор направлен на оптимальную обработку крайнего внешнего возмущения  $f_2$ , поэтому расчет его параметров оптимальной динамической настройки выполняют по методу полной компенсации в частном виде (МПК в ЧВ) с различным коэффициентами демпфирования ( $\xi_1$  и  $\xi_2$ ) по передаточной функции инерционного участка объекта регулирования [1].

Расчет параметров оптимальной динамической настройки стабилизирующего регулятора производим по следующему алгоритму [1]:

1) Определяем относительную постоянную времени опережающего участка ОР:

$$T = \frac{T_{on}}{\sigma_{on}} = \frac{4.5}{0.5} = 9. \quad (6)$$

2) Рассчитываем относительный коэффициент передачи СР:

$$K = \frac{A_1}{A_2^2} \cdot T \cdot \left(1 + \frac{1}{T}\right)^2 - 1 = 0.7395 \cdot 9 \cdot \left(1 + \frac{1}{9}\right)^2 - 1 = 7,216. \quad (7)$$

где  $A_1=2,539$ ,  $A_2=1,853$  – коэффициенты Вышнеградского, определяющие численные значения критерия качества.

3) Находим абсолютное значение коэффициента передачи СР:

$$\kappa_{p1} = \frac{K}{\kappa_{on}} = \frac{7.216}{1} = 7.216 \frac{m / \mu}{^{\circ}C}, \quad (8)$$

4) Рассчитываем относительное значение времени интегрирования:

$$I = \frac{6.36 \cdot K}{T \cdot \left(1 + \frac{1}{T}\right)^3} = \frac{6.36 \cdot 7.216}{9 \cdot \left(1 + \frac{1}{9}\right)^3} = 3.718. \quad (9)$$

5) Находим абсолютное значение времени интегрирования:

$$T_{u1} = I \cdot \sigma_{on} = 3.718 \cdot 0.5 = 1.859 \text{ с}. \quad (10)$$

В результате передаточная функция СР примет вид:

$$W_{p1}(p) = \frac{K_{p1}(T_{u1}p + 1)}{T_{u1}p} = \frac{7.216 \cdot (1.859p + 1)}{1.859p}. \quad (11)$$

Расчет параметров оптимальной динамической настройки корректирующего регулятора проводим по следующему алгоритму:

1) Численное значение постоянной времени передаточной функции (4) инерционного участка объекта:

$$T_k = T_{ин} + \sigma_{ин} = 12 \text{ с} \quad (12)$$

2) Производим расчёт параметров динамической настройки КР при коэффициенте демпфирования  $\xi_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}$ :

$$T_{и2} = T_k = 12 \text{ с} - \text{ время интегрирования}; \quad (13)$$

$$K_{p2} = \frac{T_k}{4 \cdot \xi_1^2 \cdot K_{ин} \cdot \tau_y} = \frac{12}{4 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 \cdot 0.8 \cdot 3} = 2.5 \quad - \text{ коэффициент передачи КР} \quad (14)$$

В результате передаточная функция КР примет следующий вид:

$$W_{p2}(p) = \frac{K_{p2}(T_{u2}p + 1)}{T_{u2}p} = \frac{2.5 \cdot (12p + 1)}{12p}. \quad (15)$$

Аналогично рассчитываем параметры динамической настройки КР при коэффициенте демпфирования  $\xi_2 = 1$ :

$$K_{p2} = \frac{T_k}{4 \cdot \xi_2^2 \cdot K_{ин} \cdot \tau_y} = \frac{12}{4 \cdot 1^2 \cdot 0.8 \cdot 3} = 1.25; \quad (16)$$

$$W_{p2}(p) = \frac{K_{p2}(T_{u2}p + 1)}{T_{u2}p} = \frac{1.25 \cdot (12p + 1)}{12p}. \quad (17)$$

Использование указанных методов позволяет получить лучшие прямые показатели качества при обработке основных воздействий по сравнению с методами [2]. Вместе с тем качество регулирования в системе можно повышать с использованием предлагаемых методов. Для улучшения качества обработки крайнего внешнего возмущения уменьшаем  $\tau_1$  и на ту же величину увеличиваем  $T_k$  так, чтобы сумма  $(T_k + \tau_1)$  постоянных времени при первых производных дифференциального уравнения объекта оставалось постоянной.

$$T_k + \tau_1 = 15 \text{ с}; \quad (18)$$

$$\tau_{1y} = \frac{\tau_1}{1.618} = \frac{3}{1.618} = 1.85 \text{ с}; \quad (19)$$

$$T_{ky} = T_k + \tau_1 - \tau_{1y} = 13.15 \text{ с}; \quad (20)$$

$$K_{p2.1} = \frac{T_{ky}}{4 \cdot \xi_1^2 \cdot K_{ин} \cdot \tau_{1y}} = \frac{13.15}{4 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 \cdot 0.8 \cdot 1.85} = 4.431; \quad (21)$$

$$K_{p2.2} = \frac{T_{ky}}{4 \cdot \xi_2^2 \cdot K_{ин} \cdot \tau_{1y}} = \frac{13.15}{4 \cdot 1^2 \cdot 0.8 \cdot 1.85} = 2.216. \quad (22)$$

Для улучшения качества отработки внутреннего возмущения коэффициенты Вышнеградского в формуле (7) параметров динамической настройки СР корректируем с учётом правила золотого сечения [3] по следующей формуле:

$$K_{(ПЗС)} = \frac{A_{1(ПЗС)}}{A_{2(ПЗС)}^2} \cdot T \cdot \left(1 + \frac{1}{T}\right)^2 - 1, \quad (23)$$

где  $A_{1 ПЗС} = 2.618$ ,  $A_{2 ПЗС} = 1.618$  – коэффициенты, выбранные по ПЗС.

Расчёт скорректированной настройки СР производим по формуле (23):

$$K_{(ПЗС)} = \frac{2.618}{1.618^2} \cdot 9 \cdot \left(1 + \frac{1}{9}\right)^2 - 1 = 10.111, \quad (24)$$

(25)

$$K_{p(ПЗС)} = \frac{K_{(ПЗС)}}{K_{он}} = \frac{10.111}{1} = 10.111 \frac{T}{\text{с}}.$$

Относительное значение времени интегрирования корректируем по формуле (9) с новым значением  $K$ :

$$I_{(ПЗС)} = \frac{6.36 \cdot K_{(ПЗС)}}{T \cdot \left(1 + \frac{1}{T}\right)^3} = \frac{6.36 \cdot 10.111}{9 \cdot \left(1 + \frac{1}{9}\right)^3} = 5.209; \quad (26)$$

$$T_u^{ПЗС} = I_{ПЗС} \cdot \sigma_{он} = 5.209 \cdot 0.5 = 2.605 \text{ с}. \quad (27)$$

Структурные схемы моделирования переходных процессов по разным методам расчёта параметров оптимальной динамической системы приведены на рисунке 2, а график переходных процессов – на рисунке 3.

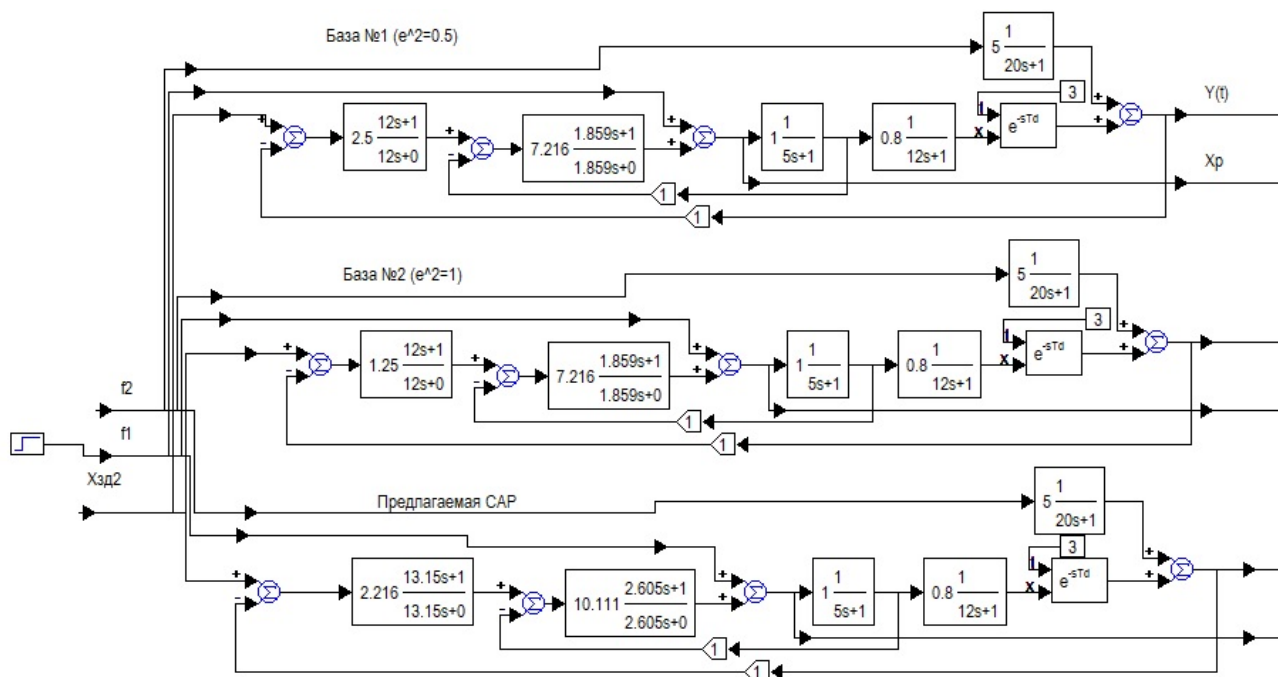
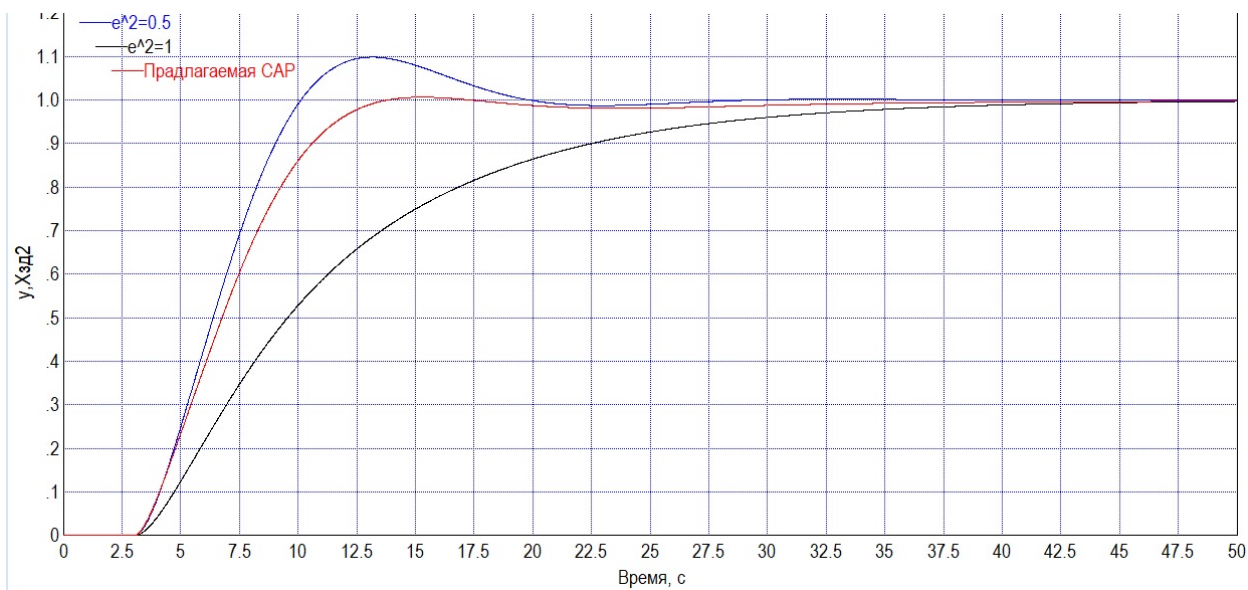
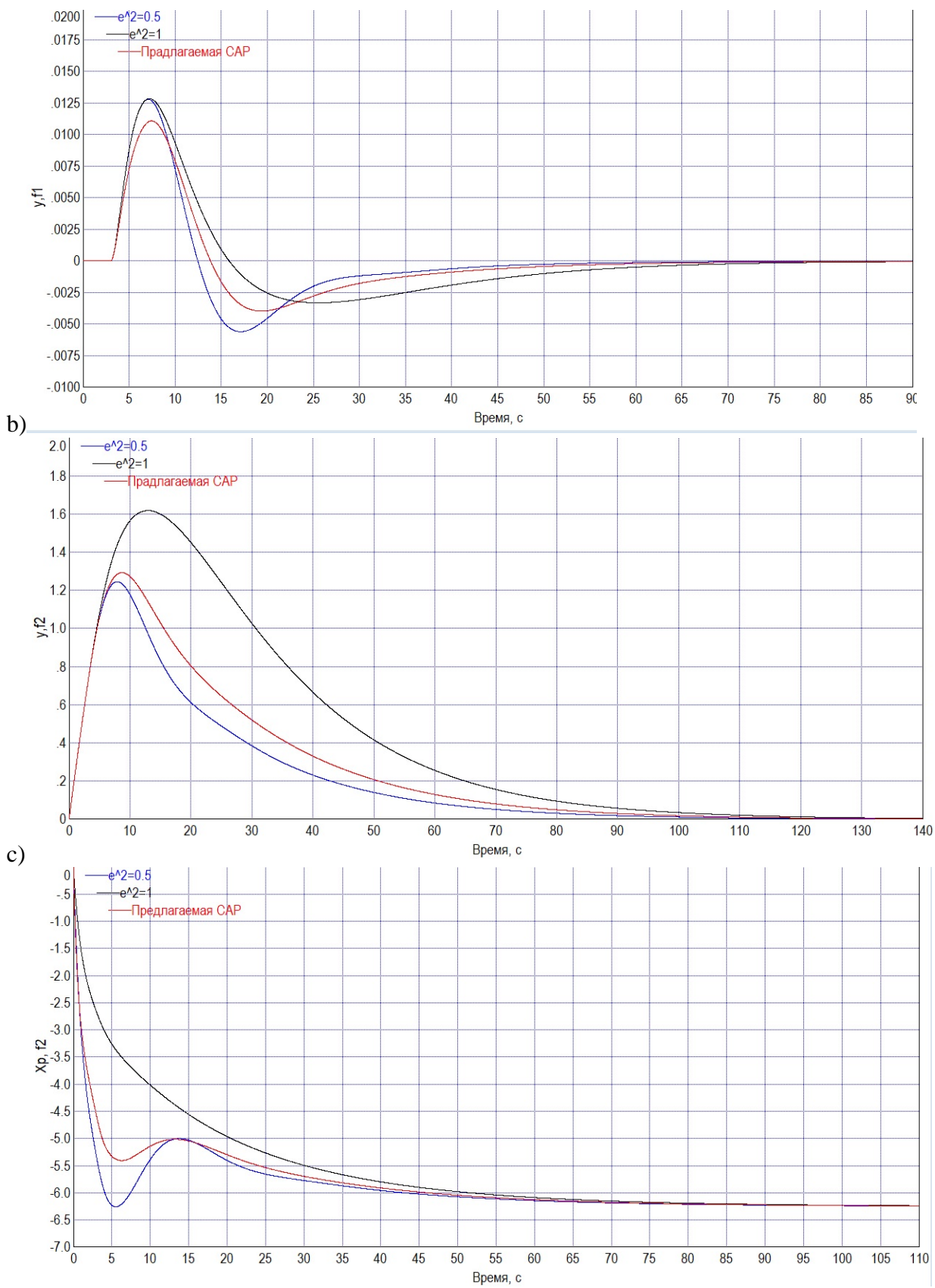


Рисунок 2 – Структурные схемы моделирования типовой КСАР, оптимизированной по трём различным методам



а)



д) Рисунок 3 – Графики переходных процессов КСАР при основных воздействиях и различных методах расчёта параметров динамической настройки:  
 а – отработка скачка задания; б –отработка внутреннего возмущения;  
 с – отработка крайнего внешнего возмущения; д – изменение регулирующего воздействия при отработке крайнего внешнего возмущения.

### ВЫВОДЫ

1. Из анализа графиков переходных процессов сравниваемых САР следует, что при отработке скачка задания минимальное время регулирования без перерегулирования обеспечивает предлагаемая САР, т.к. при этом время регулирования сократилось в два раза, по сравнению с лучшей типовой ( $\xi=1$ ).

2. При отработке внутреннего возмущения в предлагаемой САР максимальная динамическая ошибка регулирования уменьшилась на 14,5%, а время регулирования сократилось на 16,7%.

3. При отработке наиболее опасного крайнего внешнего возмущения максимальная динамическая ошибка предлагаемой САР уменьшилась на 12%, а время регулирования практически одинаково.

Таким образом предложенные методы позволили повысить качество регулирования КСАР простыми средствами.

### Литература

1. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: Спр. пособие / Г.Т.Кулаков. – Мн.: Выш. шк., 1984. – 192 с., ил.
2. Теория автоматического управления: учебник для вузов / В.Я.Ротач. – 4-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 400 с., ил.
3. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учеб. пособие / Г. Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г. Т. Кулакова. – Минск: Вышэйшая школа, 2017.– 238с.: ил.