

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

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

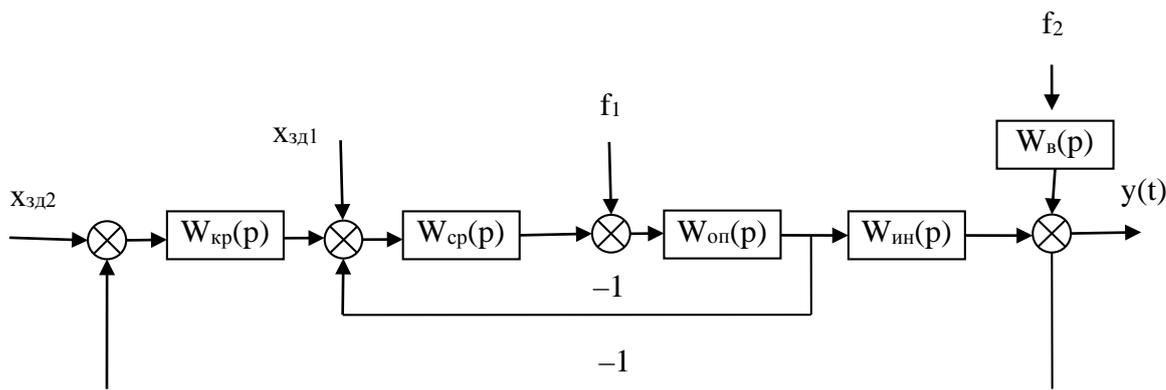


Рисунок 1 – Структурная схема типовой каскадной САР

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 κ_{on} – коэффициент передачи; T_{on} , σ_{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), τ_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 κ_{ϵ} – коэффициент передачи; T_{ϵ} – 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 коэффициентом демпфирования (ξ_1 и ξ_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 τ_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.

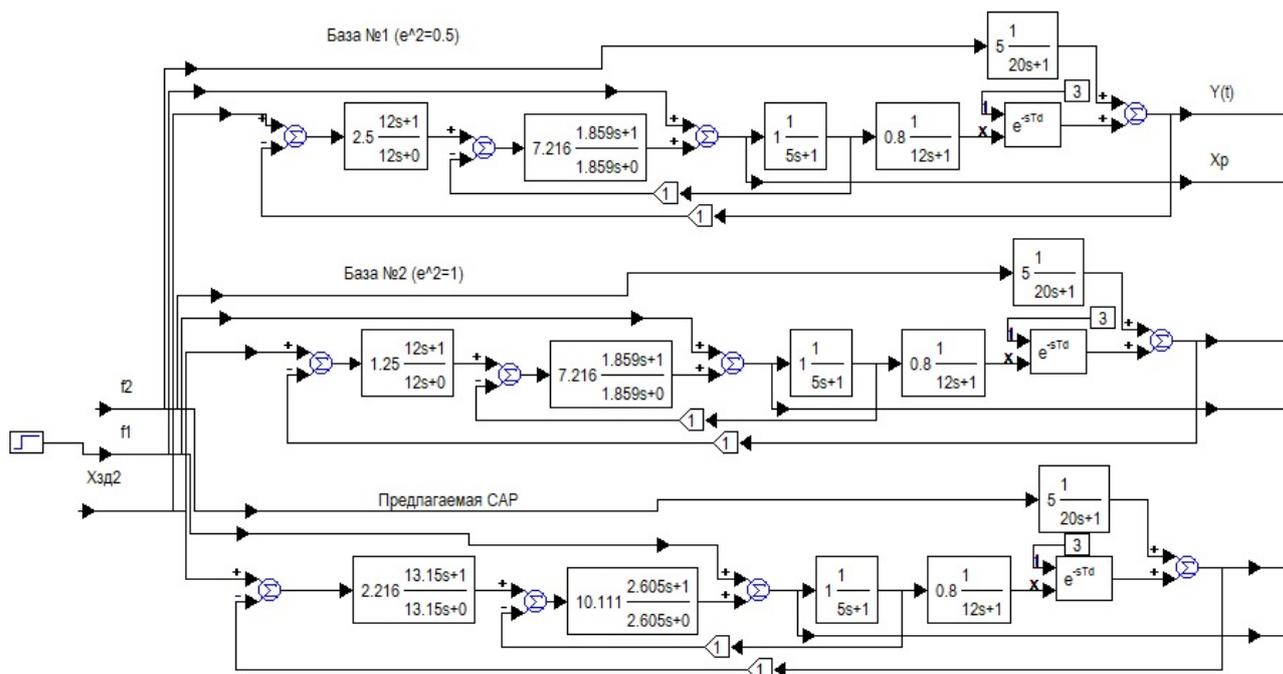
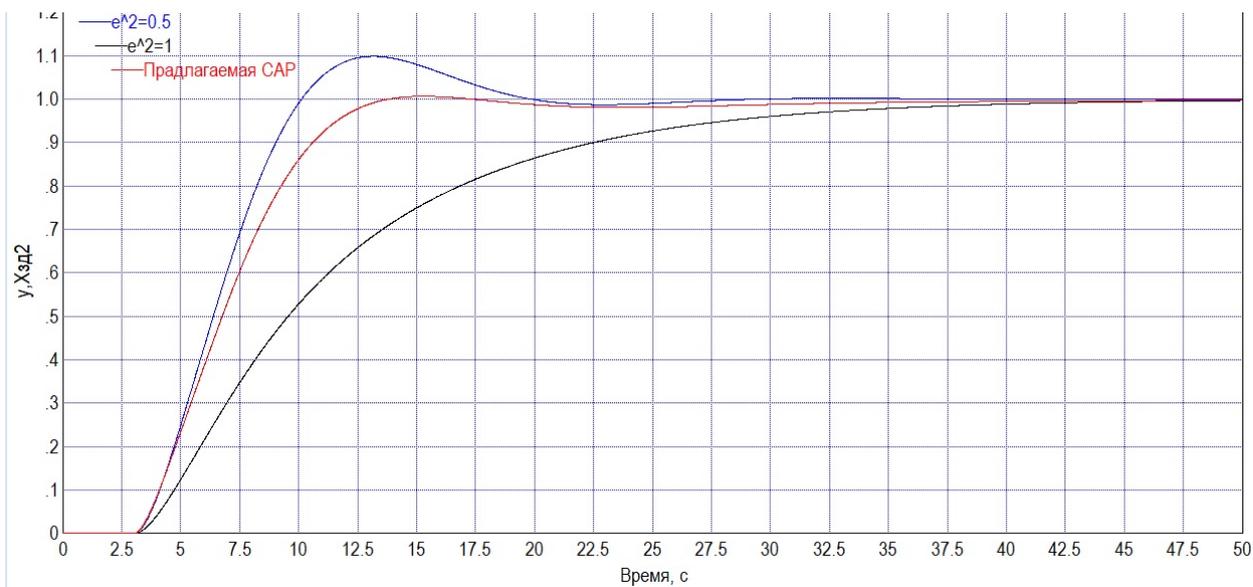
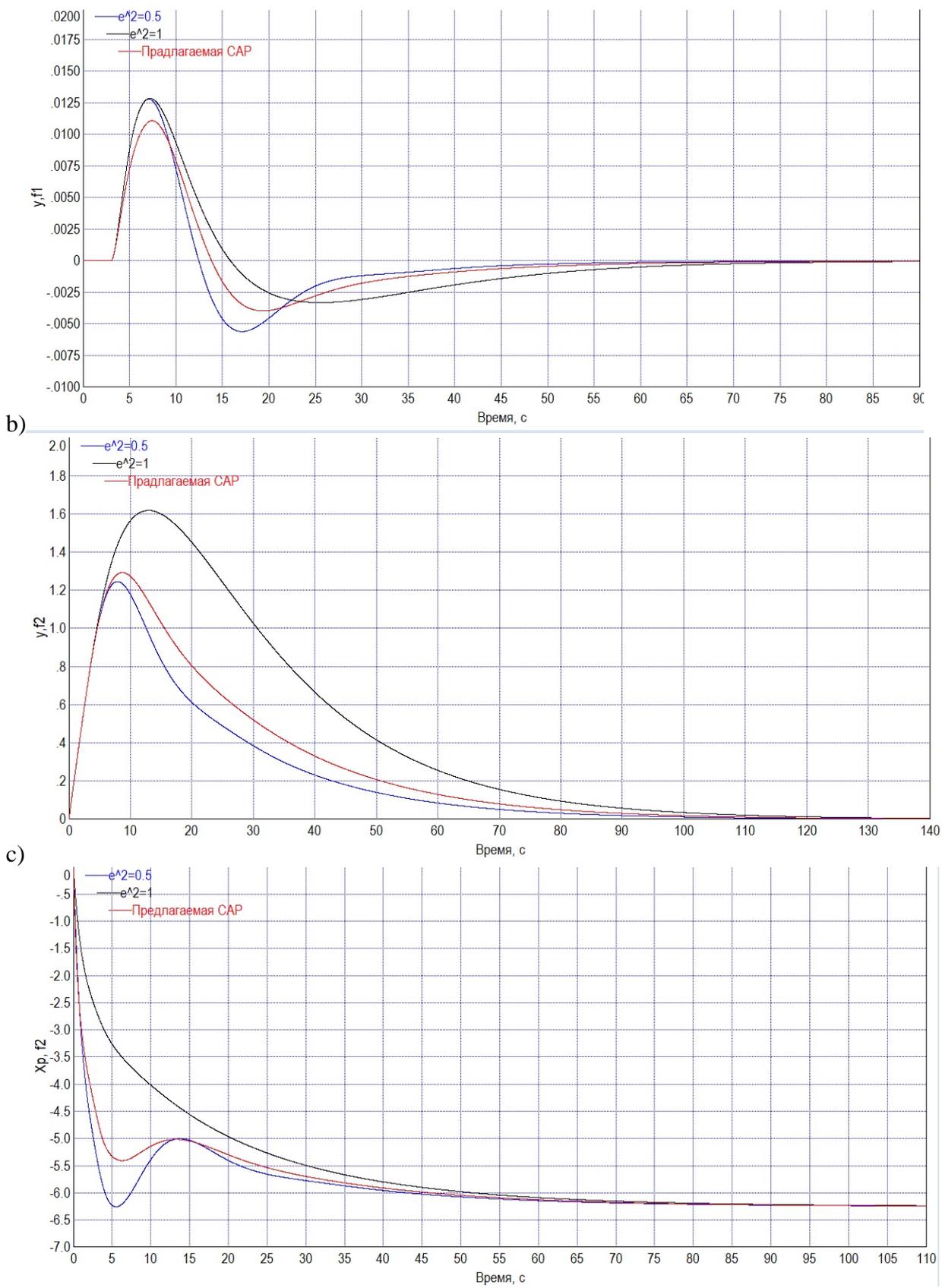


Рисунок 2 – Структурные схемы моделирования типовой КСАР, оптимизированной по трём различным методам



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.