

УДК 621.181.6

## МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ И ЭКСПРЕСС-МЕТОДЫ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ САР

Войтенкова Д.А.

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

В работе представлено сравнение показателей качества ПИД-регулятора на основе метода локализации, который разработан на кафедре «Автоматика» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ) [1] и метод структурно-параметрической оптимизации Белорусского национального технического университета (БНТУ).

Передаточная функция объекта имеет следующий вид [1]:

$$W_{OY}(p) = \frac{y}{u} = \frac{K_{OY}}{p^2 + a_1 p + a_2}, \quad (1)$$

где  $y$  – выходная переменная;  $u$  – управление;  $K_{OY}$  – коэффициент передачи объекта;  $a_1$  и  $a_2$  – номинальные значения параметров, которые могут изменяться произвольным образом в ограниченном диапазоне.

Для расчета параметров динамической настройки САР (рис. 1) при отработке скачка задания зададимся критерием оптимальности:  $t_p \leq 1c, \sigma = 0\%$ .

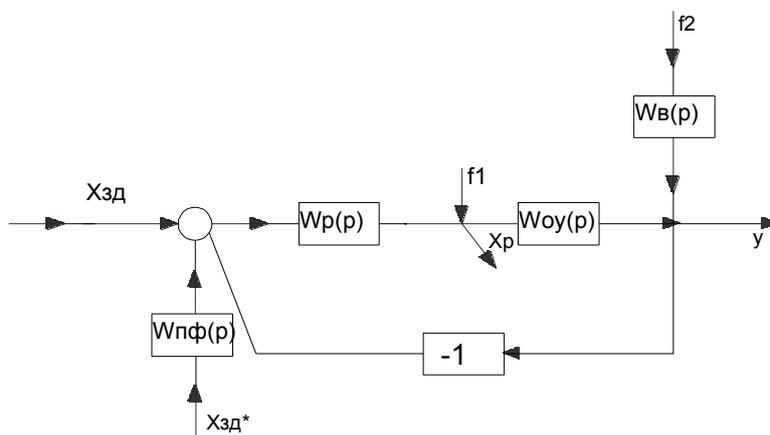


Рисунок 1. Структурная схема САР НГТУ:

$W_p(p)$  – передаточная функция ПИД-регулятора;  $W_{OY}(p)$  – передаточная функция объекта;  $W_{нф}(p)$  – передаточная функция фильтра для устранения перерегулирования;  $W_в(p)$  – передаточная функция крайнего внешнего возмущения

Расчет параметров динамической настройки ПИД-регулятора по методу локализации [1].

Передаточная функция ПИД-регулятора:

$$W_{ПИД}(p) = \frac{u}{\Delta} = K_{П} + \frac{K_{И}}{p} + \frac{K_{Д}p}{\tau_1 p + 1}. \quad (2)$$

$$W_{ПИД}(p) = \frac{(K_{Д} + \tau_1 K_{П})p^2 + (K_{П} + \tau_1 K_{И})p + K_{И}}{p(\tau_1 p + 1)}. \quad (3)$$

Здесь

$$K = K_{Д} + \tau_1 K_{П}, \quad c_1 = \frac{K_{П} + \tau_1 K_{И}}{K_{Д} + \tau_1 K_{П}}, \quad c_2 = \frac{K_{И}}{K_{Д} + \tau_1 K_{П}}, \quad (4)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – параметры передаточной функции.

$$W_{ПИД}(p) = \frac{K(p^2 + c_1 p + c_2)}{p(\tau_1 p + 1)}. \quad (5)$$

Для устранения «нулей» передаточной функции и улучшения качества переходного процесса введен предварительный фильтр:

$$W_{ПФ}(p) = \frac{c_2}{p^2 + c_1 p + c_2}. \quad (6)$$

Исходя из требований к точности регулирования, рассчитывают коэффициент усиления  $K$  по соотношению  $KK_{OY} \geq (20 \dots 100)$ , что соответствует статической ошибке  $\delta^0 \leq (0,05 \dots 0,01)$ .

Передаточная функция объекта управления:

$$W_{OY}(p) = \frac{10}{p^2 + 3p + 10}. \quad (7)$$

Параметры регулятора при выбранном значении  $K=1$  и  $\tau_1 = 0,01$  равны:  $K_{П} = 6,8, K_{И} = 20, K_{Д} = 0,932$ . Тогда:

$$K = 0,932 + 0,01 \cdot 20 = 1; \quad c_1 = \frac{6,8 + 0,01 \cdot 20}{0,932 + 0,01 \cdot 6,8} = 7; \quad c_2 = \frac{20}{0,932 + 0,01 \cdot 6,8} = 20; \quad (8)$$

$$W_{ПИД}(p) = \frac{1(p^2 + 7p + 20)}{p(0,01p + 1)}; \quad (9)$$

$$W_{ПФ}(p) = \frac{20}{p^2 + 7p + 20}. \quad (10)$$

Передаточная функция крайнего внешнего возмущения:

$$W_{\epsilon}(p) = \frac{k_{\epsilon}}{T_{\epsilon}p + 1} = \frac{10}{0,236p + 1}; \quad (11)$$

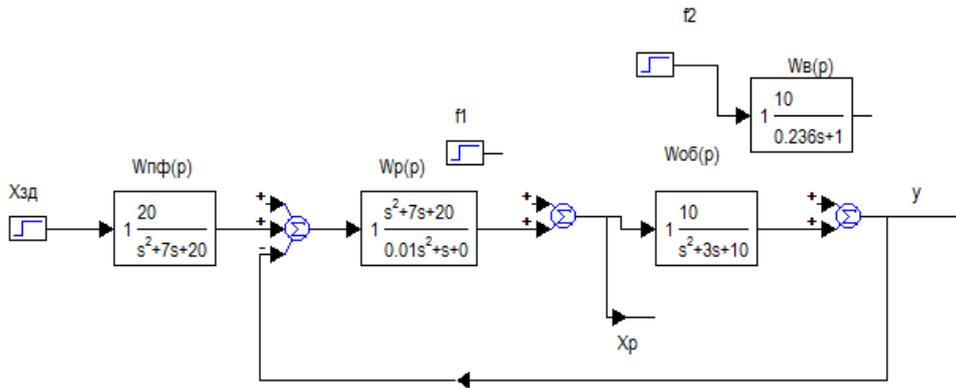


Рисунок 2. Структурная схема моделирования САР НГТУ

Расчет параметров динамической настройки оптимального регулятора проведен на основе экспресс-метода структурно-параметрической оптимизации БНТУ [2] (рис. 3).

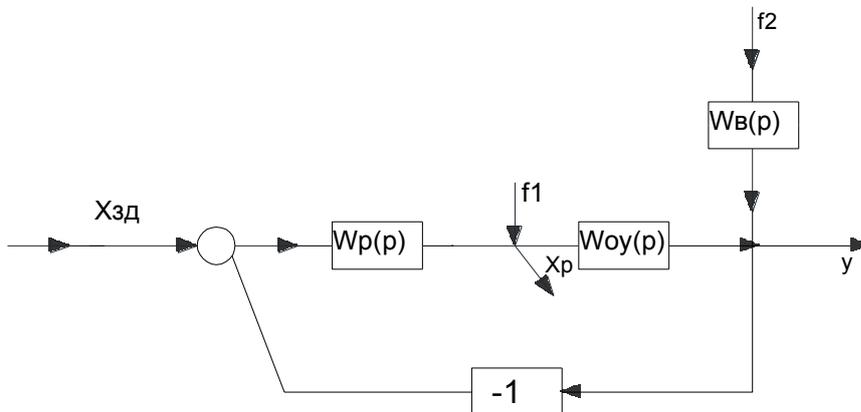


Рисунок 3. Структурная схема САР БНТУ

$W_p(p)$  – передаточная функция регулятора;  $W_{oy}(p)$  – передаточная функция объекта;  $W_{\epsilon}(p)$  – передаточная функция крайнего внешнего возмущения

Передаточная функция оптимального регулятора, настроенного по методу БНТУ:

$$W_p^{opt}(p) = [W_{oy}(p)]^{-1} W_{zd}^{PC(n=2)}, \tag{12}$$

где 
$$W_{zd}^{PC(n=2)} = \frac{1}{2T_{zd}p(\frac{T_{zd}}{2}p+1)}; \tag{13}$$

$W_{zd}^{PC(n=2)}$  – заданная передаточная функция разомкнутой системы по задающему воздействию.

Выбор численных значений  $T_{zd}$  осуществляем с использованием ряда чисел правила золотого сечения, приняв за целое  $t_p$ . Выбираем следующее значение заданной постоянной времени (единственного параметра динамической настройки регулятора):

$$T_{zd}^{opt} = 0,09t_p = 0,09 \text{ с}; \tag{14}$$

$$W_p^{opt}(p) = \frac{0,1p^2+0,3p+1}{2T_{zd}p(\frac{T_{zd}}{2}p+1)} = \frac{0,1p^2+0,3p+1}{0,0081p^2+0,18p}. \tag{15}$$

В результате реализуем следующую схему моделирования САР (рис. 4):

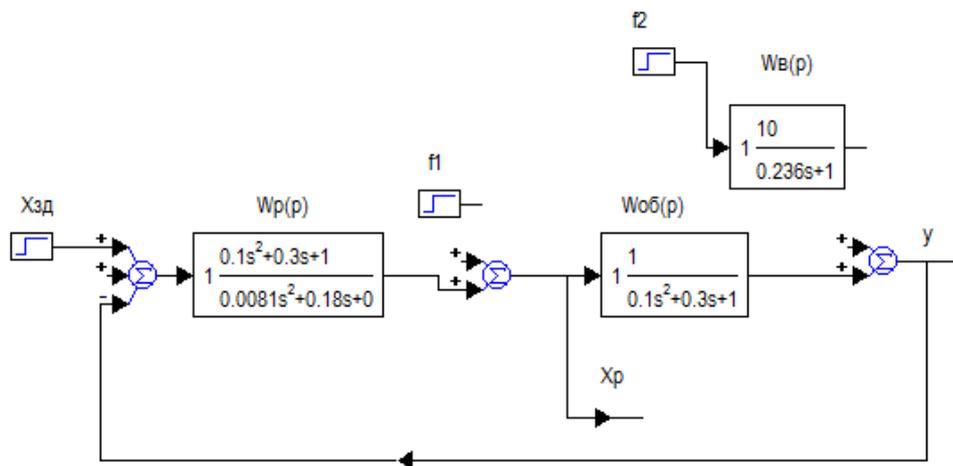


Рисунок 4. Структурная схема моделирования САР БНТУ

Результаты моделирования переходных процессов при отработке скачка задания представлены на рисунке 5.

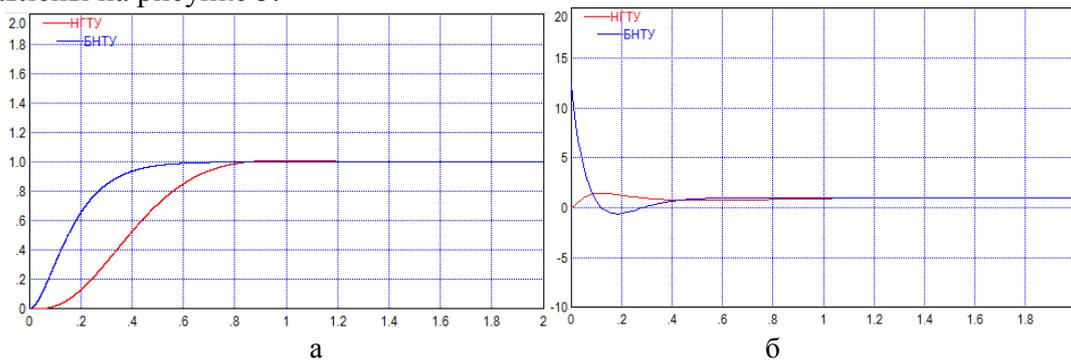


Рисунок 5. Графики переходных процессов при отработке скачка задания с выводом на печать: а – основной регулируемой величины  $y$ , б – регулирующего воздействия  $x_p$

Как видно из рисунка, оба регулятора соответствуют критерию оптимальности: время регулирования  $t_p \leq 1$ , перерегулирование  $\sigma = 0\%$ . Однако полное время отработки скачка задания у БНТУ на 40% меньше, чем у НГТУ.

Для улучшения качества переходного процесса при отработке внутреннего и внешнего возмущения дополнительно введем стабилизирующий регулятор и устройство компенсации (УК).

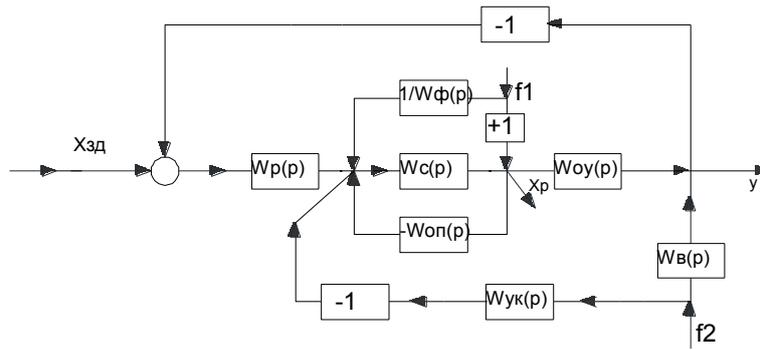


Рисунок 6. Усовершенствованная структурная схема САУ БНТУ:

$W_p(p)$  – передаточная функция регулятора;  $W_{oy}(p)$  – передаточная функция объекта регулирования;  $W_c(p)$  – передаточная функция стабилизирующего регулятора;  $W_\varepsilon(p)$  – передаточная функция крайнего внешнего возмущения;  $W_\varepsilon(p)$  – передаточная функция фильтра;  $W_{ук}(p)$  – передаточная функция устройства компенсации.

где  $W_c(p)$  – передаточная функция стабилизирующего регулятора,

$$W_c(p) = \frac{0,1p+1}{0,1p}. \quad (16)$$

$W_{он}(p)$  – передаточная функция опережающего участка,

$$W_{он}(p) = \frac{1}{0,1p+1}. \quad (17)$$

Условие инвариантности  $y(t)$  при отработке крайнего внешнего возмущения имеет вид:

$$W_{ук}^{f2}(p) \cdot W_{oy}(p) = W_\varepsilon(p). \quad (18)$$

Из передаточной функции (18) находим:

$$W_{ук}^{f2}(p) = \frac{W_\varepsilon(p)}{W_{oy}(p)}; \quad (19)$$

С учетом (7) и (11):

$$W_{ук}^{f2}(p) = \frac{p^2+3p+10}{10(T_{з\deltaз}p+1)^2 T_\varepsilon p+1} \frac{k_\varepsilon}{T_\varepsilon p+1}. \quad (20)$$

$$W_{ук}^{f2}(p) = \frac{p^2+3p+10}{10(0,236p+1) T_{з\deltaз}p+1} \frac{10}{T_{з\deltaз}p+1}. \quad (20)$$

Выбор численных значений  $T_{з\deltaз}$  (параметр динамической настройки УК) осуществляем с использование ряда чисел правила золотого сечения, приняв за целое  $t_p$ . Выбираем следующее значение заданной постоянной времени:

где  $T_{з\deltaз} = 0,035t_p = 0,035 c$ ;

$$W_{ук}^{f2}(p) = \frac{p^2+3p+10}{0,008226p^2+0,271p+1} W_\varepsilon(p). \quad (21)$$

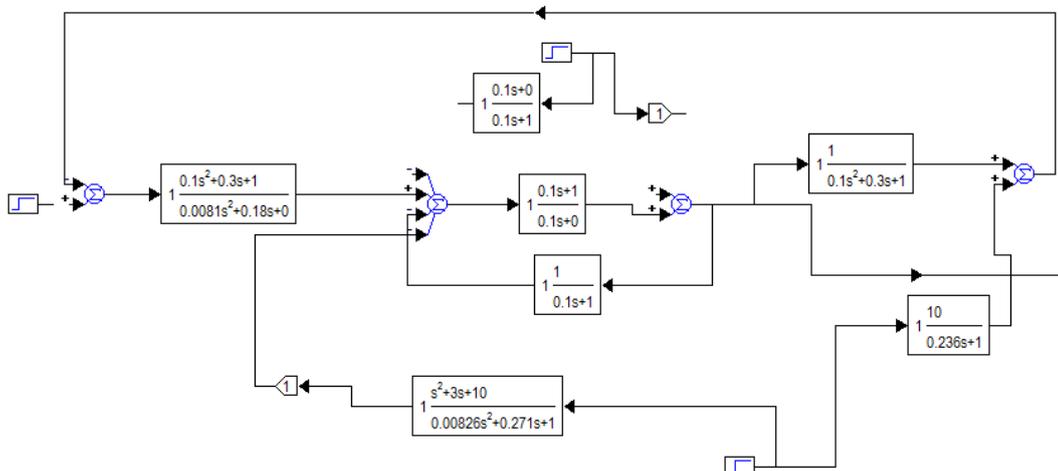


Рисунок 7. Усовершенствованная структурная схема САУ БНТУ

Результаты моделирования переходных процессов при отработке внутреннего и внешнего возмущения представлены на рисунках 8, 9.

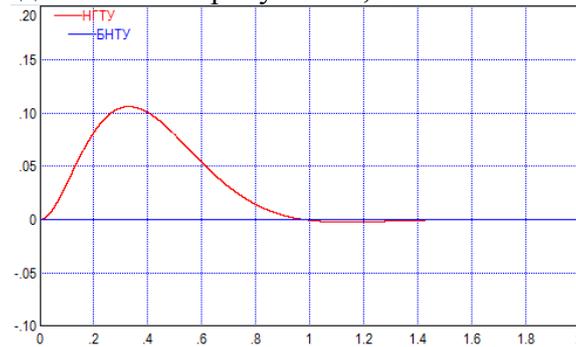


Рисунок 8. График переходного процесса при отработке внутреннего возмущения с выводом на печать основной регулирующей величины  $y$

При сравнении методов видно, что при отработке внутреннего возмущения в методе НГТУ появляется ошибка регулирования 11%, время регулирования порядка 1 с, в БНТУ достигнута полная инвариантность  $y$  при изменении  $f_1$ .

С учетом изменения (20) и  $T_{здз} = 0,035с$ :

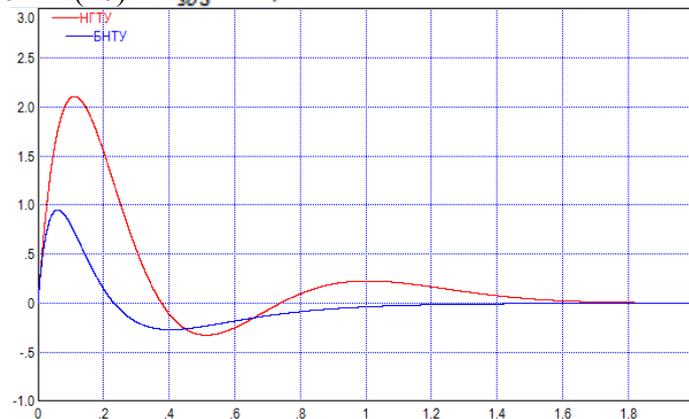


Рисунок 9. График переходного процесса при отработке внешнего возмущения с выводом на печать основной регулируемой величины  $y$

При измерении регулируемой величины под воздействием внешнего возмущения время регулирования  $y$  БНТУ составляет порядка 1,5 с.

#### Литература

1. Земцов Н.С., Французова Г.А. Расчет параметров робастного ПИД-регулятора на основе метода локализации // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2013. - №4. – 13 т.
2. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами/ под ред. Г.Т. Кулаков. – Минск: Высшэйшая школа, 2017 – 240 с.