

УДК 621.316.76:681.513.54

*к.т.н. Дрючин В.Г.  
к.т.н. Ткачев Р.Ю.  
(ДонГТУ, г Алчевск, Украина)*

## **ДВУХРЕГУЛЯТОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ**

*Розглядається метод синтезу системи з двома регуляторами для одновимірних лінійних об'єктів із запізнюванням. Пристрої, що управляють, реалізуються на базі інтегруючих фільтрів, наводяться вирази, що забезпечують розрахунок параметрів регулятора за заданими показниками якості.*

***Ключові слова:** система з двома регуляторами, інтегруючий фільтр, запізнювання.*

*Рассматривается метод синтеза системы с двумя регуляторами для одномерных линейных объектов с запаздыванием. Управляющие устройства реализуются на базе интегрирующих фильтров, приводятся выражения, обеспечивающие расчет параметров регулятора по заданным показателям качества.*

***Ключевые слова:** система с двумя регуляторами, интегрирующий фильтр, запаздывание.*

### **Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.**

Синтезу систем управления объектами с запаздыванием посвящено значительное количество работ [1-6], в которых рассматриваются вопросы устойчивости и качества, что свидетельствует об актуальности задачи синтеза регуляторов указанных систем. Большинство технологических агрегатов работают в форсированном режиме, т.е. при переменной нагрузке, поэтому в процессе их функционирования довольно в широких пределах изменяются параметры объекта управления такие как: коэффициент усиления, постоянная времени, время чистого запаздывания. Эти параметры объекта при увеличении скорости протекания процессов в управлении существенно ухудшают показатели качества работы замкнутой системы. Кроме того, наличие запаздывания в контуре управления ведет к возрастанию фазового сдвига, что может вызвать неустойчивость замкнутой системы даже при небольших коэффициентах усиления регулятора [3]. Поэтому эксплуатация таких автоматиче-

ских систем требует совершенствования методов управления объектами с запаздыванием.

**Анализ исследований и публикаций.** В работе [6] рассмотрены вопросы синтеза регуляторов систем управления объектами с запаздыванием с позиции построения их на базе интегрирующих фильтров и обеспечения требуемых (заданных) качественных показателей. При этом, однако, следует отметить, что изменение величины времени запаздывания влияет на качественные показатели системы в целом. Предложенный в [6] метод синтеза регулятора в определенной степени устраняет необходимость моделирования запаздывания в регуляторе с одновременным замыканием системы по возмущению. Такое построение регулятора существенно определяет зависимость качества регулирования от параметров дифференцирующего звена, введенного в интегрирующий фильтр, а также не позволяет задать (обеспечить) требуемые качественные показатели при отработке параметрических и внешних возмущений. В связи с этим поставим задачу синтеза регуляторов систем управления объектами с запаздыванием, обеспечивающих требуемые качественные показатели при отработке как задающих воздействий, так параметрических, и внешних возмущений.

**Постановка задачи.** Рассмотрим систему управления объектом с запаздыванием, движение которого определяется уравнением:

$$\left[ p^n + b_1 p^{n-1} + b_2 p^{n-2} \dots + b_k p^{n-k} + \dots + b_n \right] x_1 = d e^{-\tau p} U, \quad (1)$$

где  $x_1$  - выходная координата объекта;  $U$  - управление объекта;

$p = \frac{d}{dt}$  - оператор дифференцирования;  $b_1, \dots, b_k, \dots, b_n, d$  - постоянные коэффициенты;  $\tau$  - время запаздывания.

Требуемые качественные показатели замкнутой системы управления по заданию вполне определенно задаются желаемым дифференциальным уравнением

$$\left[ p^\nu + \gamma_1 p^{\nu-1} + \dots + \gamma_k p^{\nu-k} + \dots + \gamma_\nu \right] x_1 = \gamma_\nu e^{-\tau p} x_3 \quad (2)$$

где  $x_3$  - задающее воздействие системы;  $\nu$  - порядок синтезируемой системы;  $\gamma_1, \dots, \gamma_k, \dots, \gamma_\nu$  - коэффициенты, задающие распределение корней характеристического уравнения.

Задача состоит в определении структуры регулятора и его параметров, чтобы построенное по структуре реальное звено корректирующего устройства обеспечивало бы в реальной системе (регулятор + реальный объект) динамические характеристики близкие к заданным.

**Изложение материала и его результаты.** Предположим, что обратная связь в системе осуществляется через безынерционное звено с коэффициентом передачи  $k_{oc}$ , а регулятор описывается дифференциальным уравнением

$$R_1(p, \tau)(x_3 - z) = R_2(p, \tau)u_1, \quad (3)$$

где  $z$  - выход звена обратной связи, то есть  $z = k_{oc}x_1$ ;  $R_1(p, \tau)$ ,  $R_2(p, \tau)$  - многочлены некоторых степеней оператора дифференцирования, зависящие от времени запаздывания.

Решая совместно (1) и (3) относительно входной и выходной координат замкнутой системы и сравнивая с (2), получим

$$\begin{aligned} R_1(p, \tau) &= \gamma_\nu \left[ p^\nu + b_1 p^{\nu-1} + b_2 p^{\nu-2} \dots + b_k p^{\nu-k} + \dots + b_n \right]; \\ R_2(p, \tau) &= d \left[ p^\nu + \gamma_1 p^{\nu-1} + \gamma_2 p^{\nu-2} \dots + \gamma_k p^{\nu-k} + \dots + \gamma_\nu k_{oc} (1 - e^{-\tau p}) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Регулятор (3) реализуем при  $\nu \geq n$  в выражениях (4). Обычно для обеспечения помехозащищенности принимают  $\nu = n + 1$ . Указанный регулятор можно реализовать на базе интегрирующего фильтра [3]:

$$\begin{aligned} \dot{y}_i &= y_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, \nu - 1 \\ \dot{y}_\nu &= u_1^*, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{где } u_1^* = (x_3 - z) - \gamma_1 y_\nu - \dots - \gamma_k y_k - \dots - \gamma_\nu k_{oc} y_1 (1 - e^{-\tau p}).$$

Фазовые координаты фильтра (5) позволяют сформировать управление

$$u_1 = \frac{\gamma_\nu}{d} [y_\nu + b_1 y_{\nu-1} + \dots + b_k y_k + \dots + b_n y_1]. \quad (6)$$

Анализ (4) показывает, что при построении регулятора необходимо модель звена запаздывания объекта, что не всегда приемлемо, ибо в большинстве технологических объектов управления запаздывание является переменной величиной. Несоответствие запаздывания модели регулятора запаздыванию объекта приводит к изменению качественных показателей системы управления при отработке задающего воздействия. Учитывая, что  $x_1 = \gamma_\nu y_1 e^{-p\tau}$ , можно при построении регулятора (4) не

моделировать запаздывание самого объекта. С учетом этого управление  $u_1^*$  фильтра (5), на базе которого выполняется регулятор (4), будет определяться

$$u_1^* = (x_3 - z) - \gamma_1 y_v - \dots - \gamma_k y_k - \dots - \gamma_v y_1 + k_{oc} x_1 \quad (7)$$

Анализируя (7), можно отметить, что система при таком регуляторе будет инвариантна к изменению времени запаздывания объекта, однако она будет разомкнута к внешним и параметрическим возмущениям, действующим на объект управления. Для устранения указанного недостатка введем второй регулятор, аналогичный (4), а именно

$$\begin{aligned} R_{11}(p, \tau_m) &= \gamma_v [p^n + b_1 p^{n-1} + b_2 p^{n-2} \dots + b_k p^{n-k} + \dots + b_n]; \\ R_{22}(p, \tau_m) &= d [p^\nu + \gamma_1 p^{\nu-1} + \gamma_2 p^{\nu-2} \dots + \gamma_k p^{\nu-k} + \dots + \gamma_\nu k_{oc} (1 - e^{-\tau_m p})], \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\tau_m$  – время запаздывания модели.

Регулятор (8) аналогично можно реализовать на базе интегрирующего фильтра

$$\begin{aligned} \dot{y}_{ii} &= y_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, v-1 \\ \dot{y}_{vv} &= u_{11}^* \end{aligned} \quad (9)$$

где  $u_{11}^* = (x_3 - z) - \gamma_1 y_{vv} - \dots - \gamma_k y_{kk} - \dots - \gamma_v y_{11} (1 - k_{oc} e^{-\tau p})$

При этом фазовые координаты фильтра (9) используются при формировании управления

$$u_1 = \frac{\gamma_v}{d} [y_{vv} + b_1 y_{(v-1)(v-1)} + \dots + b_k y_{kk} + \dots + b_n y_{11}] \quad (10)$$

Результирующее управление, действующее на объект, будет определяться

$$U = u_1 + u_{11} \quad (11)$$

причем  $u_1$  обеспечивает отработку задающего воздействия, а  $u_{11}$  – отработку возмущений, действующих на объект. При действии на объект

возмущающего воздействия  $f$  движение системы будет определяться уравнением

$$\begin{aligned} & \left( p^n + b_1 p^{n-1} + \dots + b_k p^{n-k} + \dots + b_n \right) \cdot \left( p^\nu + \gamma_1 p^{\nu-1} + \dots + \right. \\ & \left. + \gamma_k p^{\nu-k} + \dots + \gamma_\nu k_{oc} \left( 1 - e^{-\tau_m p} \right) + \gamma_\nu k_{oc} e^{-\tau p} \right) = \pm f \cdot de^{-\tau p} \times (12) \\ & \times \left( p^\nu + \gamma_1 p^{\nu-1} + \dots + \gamma_k p^{\nu-k} + \dots + \gamma_\nu k_{oc} \left( 1 - e^{-\tau_m p} \right) \right). \end{aligned}$$

Анализ (12) показывает, что в статике возмущающее воздействие, действующее на объект, полностью отрабатывается.

Структурная схема системы управления, синтезированная в соответствии с изложенным выше приведена на рис. 1.

В качестве иллюстрации, предложенного метода синтеза двухрегуляторной системы управления объектом с запаздыванием, рассмотрим пример.

Пусть задан объект управления математическое описание, которого характеризуется уравнением вида

$$p^3 + b_1 p^2 + b_2 p + b_3 = b_3 e^{-\tau p} U,$$

где  $b_1=2,167$ ;  $b_2=0,339$ ;  $b_3=0,014$ ;  $3 \leq \tau \leq 25,5$  мин.

Требуемые качественные показатели замкнутой системы управления зададим дифференциальным уравнением

$$\left( p^4 + \gamma_1 p^3 + \gamma_2 p^2 + \gamma_3 p + \gamma_4 \right) y = \gamma_4 e^{-\tau p} x_3,$$

где  $\gamma_1=0,6$ ;  $\gamma_2=0,135$ ;  $\gamma_3=0,0135$ ;  $\gamma_4=0,0005$  – коэффициенты обеспечивающие апериодический переходный в замкнутой системе длительностью 160 мин без учета времени запаздывания,  $\tau=9,5$  мин.

Допустим, что замыкание системы осуществляется через безынерционное звено  $k_{oc} = 1$ .

Определим уравнение регулятора (3) согласно изложенному методу

$$\begin{aligned} & \left( p^3 + b_1 p^2 + b_2 p + b_3 \right) \gamma_4 (x_3 - z) = \\ & = \left( p^4 + \gamma_1 p^3 + \gamma_2 p^2 + \gamma_3 p + \gamma_4 \left( 1 - e^{-\tau p} \right) \right) b_3 U. \end{aligned}$$

Реализация регулятора (3) с учетом (7) на базе интегрирующего фильтра будет осуществляться по дифференциальным уравнениям

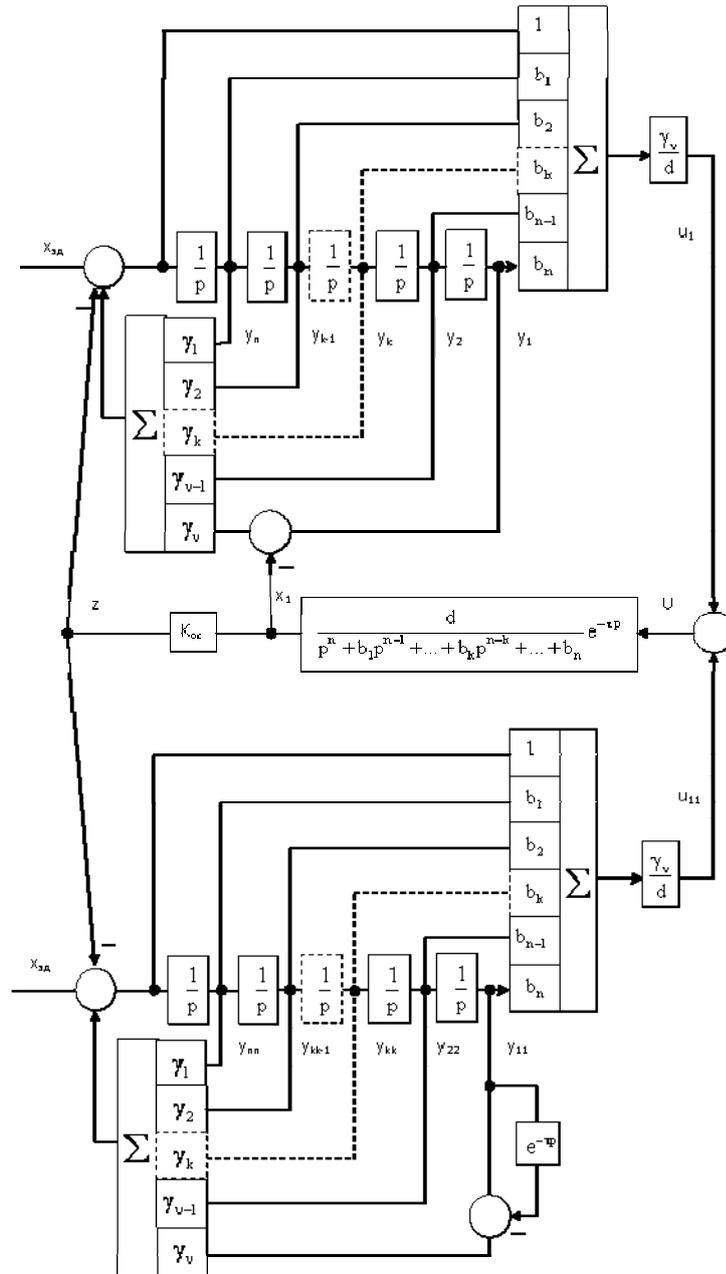


Рисунок 1 – Структурная схема двухрегуляторной замкнутой системы с запаздыванием

$$\dot{y}_1 = y_2;$$

$$\dot{y}_2 = y_3;$$

$$\dot{y}_3 = y_4;$$

$$\dot{y}_4 = x_3 - z - \gamma_1 y_4 - \gamma_2 y_3 - \gamma_3 y_2 - \gamma_4 y_1 + \gamma_4 K_{oc} x_1,$$

фазовые координаты, которого позволяют сформировать управление

$$u_1 = \frac{\gamma_4}{b_3} (b_1 y_3 + b_2 y_2 + b_3 y_1).$$

Аналогично, второй регулятор будет реализован на базе интегрирующего фильтра по дифференциальным уравнениям

$$\dot{y}_{11} = y_{22};$$

$$\dot{y}_{22} = y_{33};$$

$$\dot{y}_{33} = y_{44};$$

$$\dot{y}_{44} = x_3 - x_1 - \gamma_1 y_{44} - \gamma_2 y_{33} - \gamma_3 y_{22} - \gamma_4 (1 - e^{-\tau_m p}) y_{11},$$

фазовые координаты, которого также формируют управление

$$u_{11} = \frac{\gamma_4}{b_3} (b_1 y_{33} + b_2 y_{22} + b_3 y_{11}).$$

Результирующее управление, действующее на объект, будет определяться выражением (11).

На рис.2 приведены графики переходных процессов в смоделированной системе с двумя регуляторами. Действие возмущения на систему производилось в момент времени  $t=400$  мин. Здесь на рис. 2 кривая 1 соответствует системе с запаздыванием в объекте управления равным 3 мин, кривая 2 – 9,5 мин, кривая 3 – 25,5 мин. Из приведенных графиков видно, что система сохраняет устойчивость и заданное качество регулирования в условиях переменного времени запаздывания, зависящим как правило, для большинства технологических агрегатов от нагрузки.

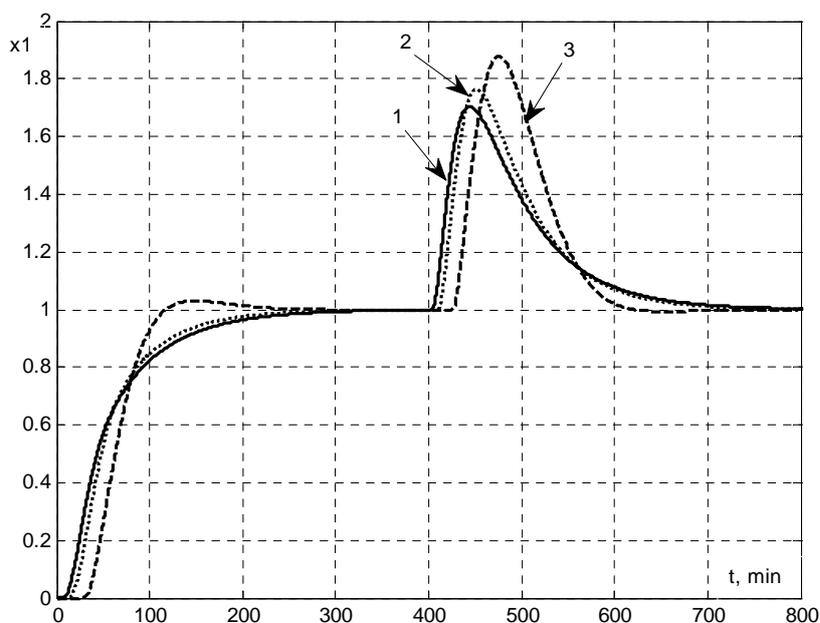


Рисунок 2 – Графики переходных процессов в системе с двумя регуляторами у условиях изменяющегося времени запаздывания

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Таким образом, в разработанной системе с двумя регуляторами происходит компенсация влияния запаздывания на устойчивость и качество системы в условиях изменения запаздывания объекта управления. Это свойство системы может быть применено к системам с переменным запаздыванием, а также к информационным системам с запаздыванием, имеющим случайный характер изменения.

### **Библиографический список**

1. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. Пер. с польского/ Х. Гурецкий – М.: Машиностроение, 1974. - 328 с.

2. Ключев А.С. Синтез быстродействующих регуляторов для объектов с запаздыванием/ А.С. Ключев, В.С. Карпов – М.: Энергоатомиздат, 1990. -176с.

3. Ульшин В.А. Адаптивное управление технологическими процессами: Монография/ В.А. Ульшин, Д.А. Зубов – Луганск: СЛУ, 2002. – 210с.

4. Кіку А.Г. Квазіоптимальні регулятори для об'єктів з чистим запізнюванням/ А.Г. Кіку, Т.І. Білоус// Праці міжнародної конференції з управління "Автоматика 2000" – Львів:ЛНУ, 2000. Том 2, С.115–120.

5. Фуртат И.Б. Адаптивное управление объектами с запаздыванием по выходу/ И.Б. Фуртат, А.М. Цыкунов// Известия ВУЗов. Приборостроение. –2005. –№ 7. – С. 15-19.

6. Дрючин В.Г. Синтез регуляторов на базе интегрирующих фильтров систем управления объектами с запаздыванием в координатах состояния и управления/ В.Г. Дрючин, Р.Ю. Ткачев// Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск: ДонГТУ, 2007. Вып.24 С.391-396.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. Паэрандом Ю.Э.**