

## УДОСКОНАЛЕНИЙ АЛГОРИТМ АДАПТАЦІЇ ЗА КРИТИЧНОЮ ЧАСТОТОЮ КОЛИВАНЬ

### **Вступ**

Сучасне виробництво безупинно ставить задачі, для рішення яких доцільне або необхідне застосування принципів адаптації (самонастроювання). Найбільш інтенсивно ці принципи застосовуються в системах автоматичного керування об'єктами, характеристики яких заздалегідь невідомі, або змінюються із часом. Використання звичайних принципів керування за цих обставин часто виявляється малоефективним, оскільки в цьому випадку потрібен занадто великий обсяг інформації про характеристики керованого процесу. Адаптивні системи керування забезпечують одноразове або епізодичне автоматичне настроювання регулятора.

Інший практичний сенс застосування адаптивних систем – це здатність безупинно парировати дрейф характеристик об'єкта керування, який пов'язаний із старінням устаткування (наприклад, збільшенням накипу в теплообмінниках; впливом зовнішнього середовища; реконструкцією устаткування, що входить у технологічний комплекс і т.п.)

В цьому випадку доцільне використання регуляторів з безперервним процесом адаптації, принципи побудови яких викладені в [1]. Моделювання систем з подібними регуляторами дає можливість на стадії розробки перевірити відповідність встановлених параметрів обраному критерію якості у кожний момент часу. Це дозволяє побудувати високоякісні адаптивні системи регулювання для широкого класу промислових об'єктів.

Статтю присвячено актуальній задачі моделювання та удосконалення зазначених систем для регулювання технологічних процесів і об'єктів.

### **Структура та алгоритм роботи системи з адаптацією за критичною частотою коливань**

Розглянемо систему автоматичного керування з адаптивним ПІД-регулятором з адаптацією за критичною частотою коливань системи [1], структуру якої наведено на рисунку 1. Відповідно до відомого принципу частотний розподіл каналів керування й самонастроювання здійснюється шляхом включення точно настроєного на частоту пробних коливань загороджувального фільтра (ЗФ) у зворотний зв'язок основного контуру керування системи. Загороджувальний фільтр розриває коло зворотного зв'язку на частоті критичних коливань об'єкта, що дозволяє використати відомий метод Циглера – Ніколса для розрахунку параметрів регулятора [1].

Відстеження критичної частоти об'єкта, на якій фазовий зсув між входом і виходом дорівнює  $-3,14$  рад., здійснюється блоком фазового автотопідстроювання частоти (БФАЧ). Блок змінює частоту і фазу генерато-

ра синусоїдальних коливань ( $\Gamma$ ) таким чином, щоб забезпечити цей фазовий зсув між входом і виходом. За допомогою блоку синхронного детектування (СД) здійснюється виділення встановлених значень амплітуди й фази пробних коливань у вихідному сигналі ( $Y$ ) об'єкта керування.

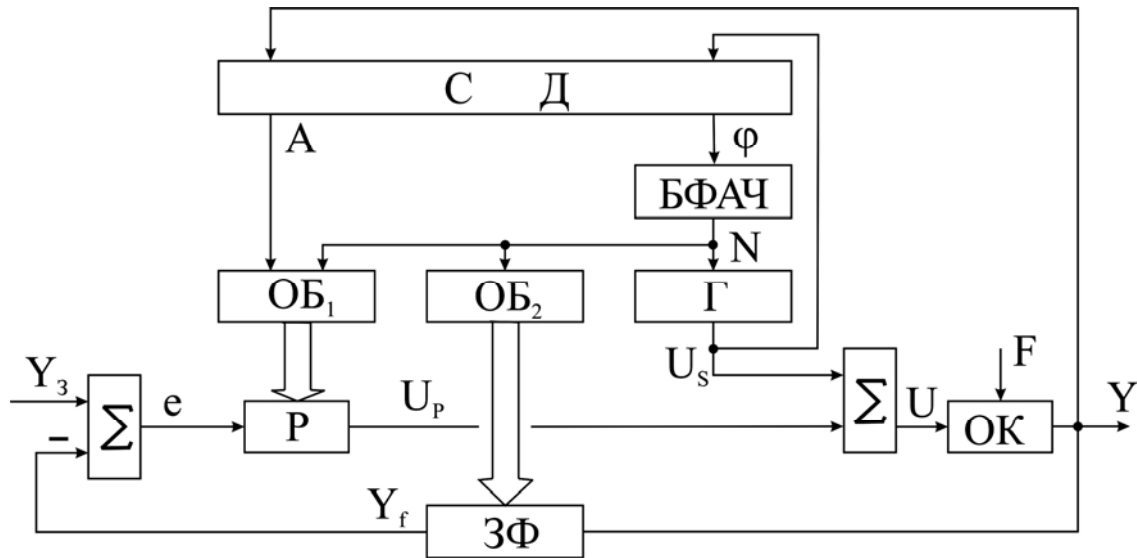


Рисунок 1 - Структура системи автоматичного керування

ОК – об'єкт керування;  $e$  – сигнал помилки;  $U_p$  – сигнал з регулятора;  $U_s$  – сигнал пробних коливань;  $F$  – вплив, що збурює;  $U$  – сигнал на вході об'єкта керування;  $Y_f$  – сигнал з загороджувального фільтра;  $Y_3$  – сигнал завдання;  $N$  – нормований період пробних коливань;  $A$  – амплітуда сигналу на частоті критичних коливань об'єкта;  $\phi$  – фаза сигналу на частоті критичних коливань об'єкта.

Рівняння динаміки цифрового загороджувального фільтра другого порядку в координатах вхід – вихід має такий вигляд:

$$y_f(k) = -cy_f(k-2) + b[y(k-1) - y_f(k-1)] + a[y(k-2) + y(k)], \quad (1)$$

де  $y(k)$  – сигнал на вході фільтра;

$y_f(k)$  – сигнал на його виході;

$a, b, c$  – коефіцієнти ЗФ.

Негативний вплив динаміки загороджувального фільтра на запас стійкості в системі треба врахувати при розрахунку параметрів регулятора. Експериментально було встановлено, що для об'єкта першого порядку із запізнюванням формули Циглера – Ніколса для розрахунку параметрів регулятора повинні бути скореговані в такий спосіб:

$$K_p = 0,6/(k A_{кр}), \quad (2)$$

$$T_u = 0,65 T_{кр}, \quad (3)$$

$$T_\delta = 0,1625 T_{кр}, \quad (4)$$

де  $k$  – коефіцієнт корекції (в даному випадку  $k = 1,3$ );

$A_{кр}$ , – амплітуда критичних коливань об'єкта керування;

$T_{кр}$  – період критичних коливань об'єкта керування.

Візьмемо до уваги, що для об'єкта другого порядку із запізнюванням

коефіцієнт корекції складає  $k=1,6$ , оскільки збільшується коефіцієнт посилення об'єкта при зсуві вліво його критичної частоти коливань [2].

Розглянемо алгоритми роботи основних блоків адаптивної системи керування. Коефіцієнти ПД-регулятора (Р) вираховуються обчислювальним блоком ОБ<sub>1</sub> за виразами (2...4). Розрахунок коефіцієнтів ЗФ (1) здійснюється в обчислювальному блоці ОБ<sub>2</sub> таким чином:

$$\begin{aligned} a &= \frac{(1 + \omega^2)}{f}, \\ b &= \frac{2(1 - \omega^2)}{f}, \\ c &= \frac{1 - \omega/D + \omega^2}{f}, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $D$  – добротність загороджувального фільтра;

$$f = 1 + \frac{\omega}{D} + \omega^2;$$

$\omega$  – кругова частота.

Чим більше значення  $D$ , тим менше вплив загороджувального фільтра на динаміку системи. Одночасно зменшується швидкість загасання пробної складової в загороджувальному фільтрі, що призводить до збільшення часу самонастроювання в системі [2].

У блоці СД обчислюється синусна  $A_S$  та косинусна  $A_C$  складові вектора АФХ об'єкта на поточній ( $j$ -тій) частоті пробних коливань:

$$\begin{aligned} A_S(j) &= \sum_{i=0}^{nN_j} \frac{Y(i) \sin(\alpha_i)}{nN_j}, \\ A_C(j) &= \sum_{i=0}^{nN_j} \frac{Y(i) \cos(\alpha_i)}{nN_j}, \end{aligned} \quad (6)$$

де  $i$  – момент квантування;

$Y(i)$  – значення сигналу на вході синхронного детектора в  $i$ -й момент;

$n$  – кількість періодів пробних коливань, що аналізуються;

$N_j$  – нормований період пробних коливань, що дорівнює відношенню періоду пробних коливань до величини періоду квантування.

Дискретний аргумент тригонометричних функцій змінюється в діапазоні від  $0$  до  $2\pi$  й обчислюється за виразом:

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + \frac{2\pi}{N_j}. \quad (7)$$

Поточні значення амплітуди й фази пробних коливань визначаються:

$$\begin{aligned} A_T(j) &= 2\sqrt{A_S^2(j) + A_C^2(j)}, \\ \varphi_T(j) &= \arctg \frac{A_C(j)}{A_S(j)}. \end{aligned} \quad (8)$$

З огляду на те, що майже всі промислові об'єкти керування вносять негативні фазові зсуви зі збільшенням частоти пробних коливань, здійснюється уточнення поточного значення фази за умовами:

якщо  $A_S < 0$ , то  $\varphi_T(j) = \varphi_T(j) - \pi$ ;

якщо  $A_S \geq 0$  й  $A_C \geq 0$ , то  $\varphi_T(j) = \varphi_T(j) - 2\pi$ .

Для зменшення дисперсії оцінок амплітуди й фази в блоці СД використовується фільтр змінного середнього по 2...5 поточним значенням величин  $A_T(j)$  й  $\varphi_T(j)$ . Вихідними величинами цих фільтрів є змінні  $A$  та  $\varphi$ .

Для оцінки встановлених значень амплітуди та фази в блоці СД вимірюються також величини похибок на кожному аналізованому інтервалі (9). Якщо ці величини перебувають у певному полі допуску, то логічний блок дозволяє роботу обчислювальних блоків ОБ<sub>1</sub> і ОБ<sub>2</sub>.

$$\begin{aligned} \delta A(j) &= \left| \frac{A(j) - A(j-1)}{A(j)} \right|, \\ \delta \varphi(j) &= \left| \frac{\varphi(j) - \varphi(j-1)}{\varphi(j)} \right|. \end{aligned} \quad (9)$$

Блок фазового автопідстроювання частоти, працюючи за інтегральним законом керування (10), змінює нормований період коливань  $N$  цифрового генератора синусоїдальних коливань таким чином, щоб підтримувати поточний фазовий зсув на заданому рівні  $\varphi_3 = -\pi$ :

$$N(j+1) = N(j) \left( \frac{b\varphi(j)}{\varphi_3} + (1-b) \right), \quad (10)$$

де  $b = 0,5 \dots 1,5$  – коефіцієнт підсилення контура регулювання.

При цьому під значенням  $\varphi(j)$  розуміється встановлене значення фазового зсуву на  $j$ -ому періоді пробних коливань [1].

### **Модель адаптивного ПІД-регулятора**

Модель адаптивного ПІД-регулятора з настроюванням за критичною частотою коливань системи, яку побудовано з використанням програми *Simulink* пакета *MATLAB*, зображено на рисунку 2.

Найважливішим елементом моделі є ПІД-регулятор (PID Controller), який також містить елемент порівняння сигналу зворотного зв'язку й сигналу завдання (Set). У вихідний сигнал регулятора за допомогою суматора вносяться пробні коливання з вихода генератора (Generator). Регулюючий сигнал разом із пробними коливаннями подається на вхід (Input) блоку широтно-імпульсної модуляції (PWM).

Вихідний сигнал із PWM подається на перший вхід (Input) об'єкта керування (Object), а на його другий вхід подається вплив, що збурює (Begin\_value). Сигнал з виходу об'єкта керування зворотно подається на перший вхід (Input) загороджувального фільтра (Filter), а на другий його вхід (Per) подається сигнал про період пробних коливань, що виробляється відповідним генератором (Gen\_Per) і потрібен для настроювання коефіцієнтів ЗФ. З виходу загороджувального фільтра (Output) сигнал зворотного

зв'язку, оброблений даним фільтром, потрапляє на вхід ПІД-регулятора, де подається на елемент порівняння із сигналом завдання.

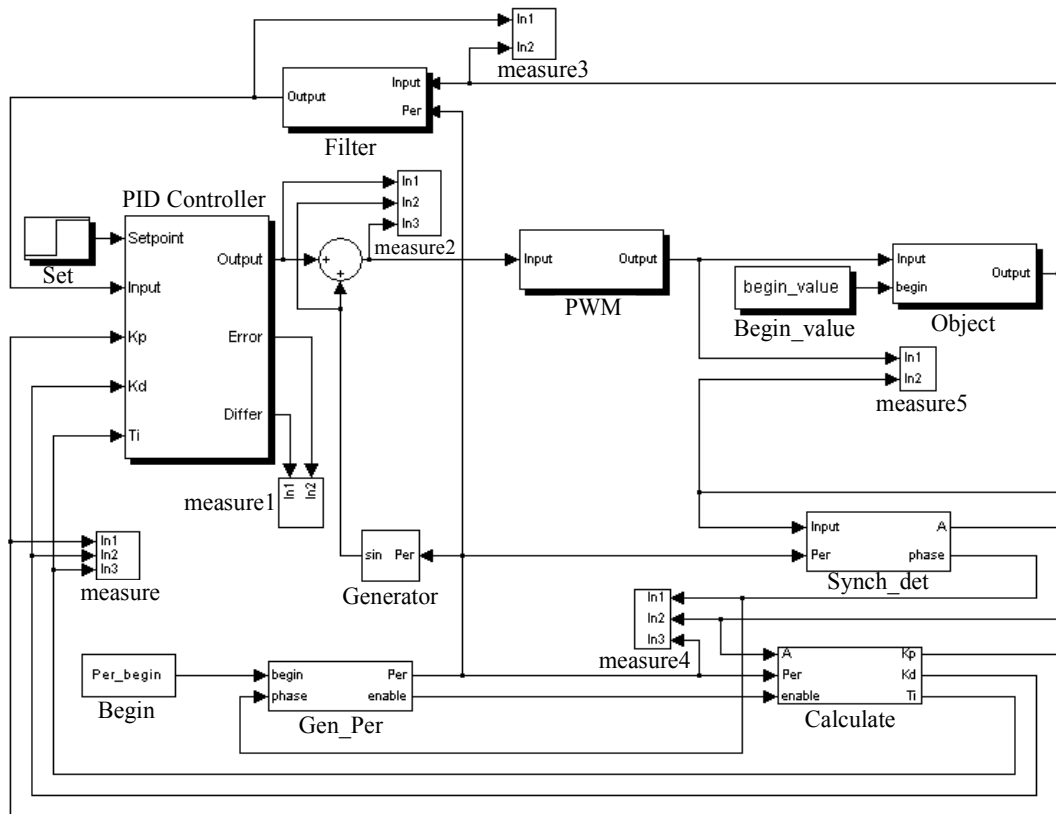


Рисунок 2 - Модель системи автоматичного керування

Сигнал з виходу об'єкта керування по контуру самонастроювання також подається на перший вхід (Input) блоку *синхронного детектування* (Synch\_det), на другий вхід якого поступає сигнал про період пробних коливань (Per). Завданням блоку синхронного детектування є визначення величини коефіцієнта підсилення амплітуди пробних коливань (A) та значення зсуву фази пробних коливань (phase) об'єктом керування.

Величина зсуву фази пробних коливань у вихідному сигналі об'єкта керування із виходу блоку синхронного детектування подається на вхід блоку *фазового автонідстроювання частоти* (Gen\_Per). На інший вхід цього блоку також подається сигнал, величина якого дорівнює величині початкового періоду пробних коливань (begin). Завдання даного блоку – відстеження частоти пробних коливань, на якій фазовий зсув цих коливань між входом і виходом об'єкта керування дорівнює певному заданому значенню. Виходом даного блоку є сигнал, що дорівнює величині періоду пробних коливань на поточному кроці моделювання. Цей сигнал подається на входи блоків Filter, Synch\_det генератора пробних коливань (Generator), обчислювального блоку (Calculate). Блок генератора пробних коливань, виходячи зі значення вхідного сигналу, що дорівнює величині періоду пробних коливань, генерує синусоїдальний сигнал. Цей сигнал і є пробним.

Обчислювальний блок розраховує параметри ПІД-регулятора  $K_p$ ,  $K_d$ ,

$T_i$ , виходячи зі значень сигналів коефіцієнта підсилення амплітуди та періоду пробних коливань, величини яких надходять на входи (A й Per) даного блоку. На третій вхід блоку подається сигнал дозволу роботи контуру адаптації (enable). Генератор сигналу (Set) моделює керуючий вплив завдання. Блоки вимірювання (measure...measure5) служать для побудови досліджуваних сигналів та їх запису до робочої області MATLAB.

Для квазістаціонарних об'єктів керування доцільно періодично вмикати контур самонастроювання. Періодичність визначається швидкістю дрейфу параметрів об'єкта. Для нестационарних об'єктів необхідна безперервна робота контуру адаптації й розрахунок параметрів регулятора за скорегованими формулами Циглера-Ніколса.

### **Удосконалений алгоритм адаптації ПІД-регулятора**

У результаті випробувань моделі для прискорення процесу адаптації був змінений алгоритм визначення нового періоду пробних коливань (10) на ділянці фазочастотної характеристики, де фазовий зсув цих коливань  $-3,2 < \varphi < -2,8$  рад. Визначення періоду пробних коливань базується на припущенні, що на вищезгаданій ділянці фазочастотної характеристики дана характеристика змінюється лінійно. Тому, маючи дві точки фазочастотної характеристики на даній ділянці, можна легко розрахувати період критичних коливань. Розрахунок відбувається таким чином:

$$T_{\text{new}} = T_{\text{in}} + \frac{0,8 * (T_b - T_{\text{in}})(\varphi_3 - \varphi_{\text{in}})}{\varphi_b - \varphi_{\text{in}}}, \quad (11)$$

$$T_{\text{new}} = T_{\text{in}} + \frac{1,25 * (T_b - T_{\text{in}})(\varphi_3 - \varphi_{\text{in}})}{\varphi_b - \varphi_{\text{in}}}, \quad (12)$$

$$T_{\text{new}} = T_{\text{in}} + \frac{(T_b - T_{\text{in}})(\varphi_3 - \varphi_{\text{in}})}{\varphi_b - \varphi_{\text{in}}}, \quad (13)$$

де  $T_{\text{new}}$  – період пробних коливань, що розраховується;  $T_{\text{in}}$  – період пробних коливань на попередньому кроці роботи каналу адаптації;  $T_b$  – період пробних коливань на поточному кроці роботи каналу адаптації;  $\varphi_3$  – заданий фазовий зсув пробних коливань;  $\varphi_{\text{in}}$  – фазовий зсув пробних коливань на попередньому кроці роботи каналу адаптації;  $\varphi_b$  – фазовий зсув пробних коливань на поточному кроці роботи каналу адаптації;

У даному алгоритмі (11) застосовується на ділянці фазочастотної характеристики, де фазовий зсув пробних коливань, як на поточному, так і на попередньому кроці роботи каналу адаптації  $-\pi < \varphi < -2,8$  рад. (12) застосовується на ділянці фазочастотної характеристики, де фазовий зсув пробних коливань на обох вищезгаданих кроках роботи каналу адаптації  $-3,2$  рад.  $< \varphi < -\pi$ . (13) застосовується на ділянці фазочастотної характеристики, де фазовий зсув пробних коливань на одному з кроків роботи каналу адаптації (поточному або попередньому) більше, ніж заданий  $-\pi$  і менше, ніж  $-2,8$

радіан. На іншому кроці роботи каналу адаптації (попередньому або поточному) цей фазовий зсув більше, ніж  $-3,2$  радіан і менше, ніж заданий  $-\pi$ .

Коефіцієнти  $0,8$  і  $1,25$  у виразах (11) і (12), відповідно, отримані за результатами моделювання і враховують нелінійність, характерну для фазочастотної характеристики широких груп об'єктів керування.

Зміна алгоритму визначення нового періоду пробних коливань дозволила зменшити час адаптації майже втричі.

### **Аналіз роботи адаптивного ПІД-регулятора**

Результати моделювання, виконаного для об'єкта керування, передаточна функція якого має вигляд (14), зображені на рисунках 3 та 4.

$$W(p) = \frac{1}{(350p + 1)(20p + 1)}. \quad (14)$$

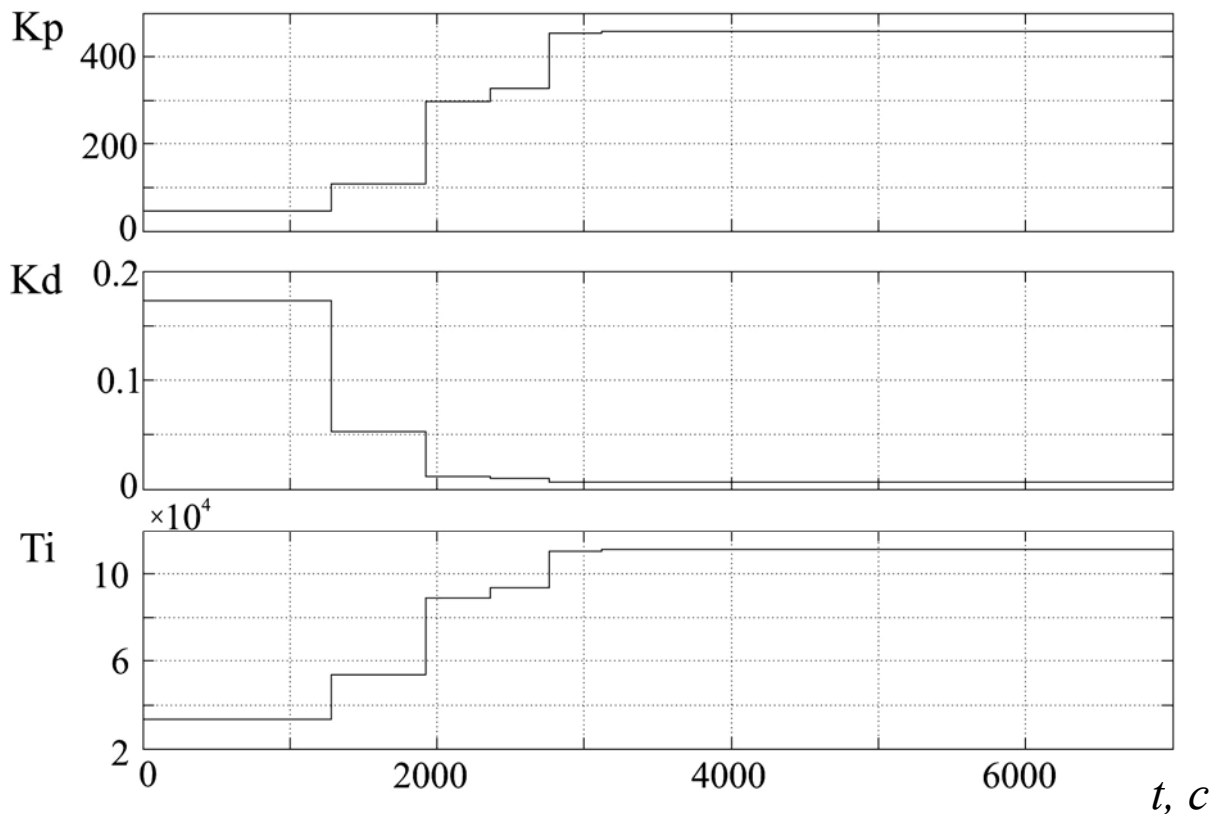


Рисунок 3 – Значення коефіцієнтів ПІД-регулятора

З рисунка 3 видно, як система адаптації із часом змінює параметри ПІД-регулятора, доки не вийде на їх сталі значення (після  $t = 2700$  с). Це свідчить про те, що знайдено потрібну частоту критичних коливань і надалі (при сталих параметрах об'єкта керування), адаптація відбуватися не буде. В даній системі це сталося через *чотири кроки* роботи каналу адаптації.

Вихід системи – сигнал з загороджувального фільтру  $U$  – зображений на рисунку 4. Сигналом завдання є стрибок регульованого параметру величиною від нуля до двохсот одиниць на момент часу  $50$  с.

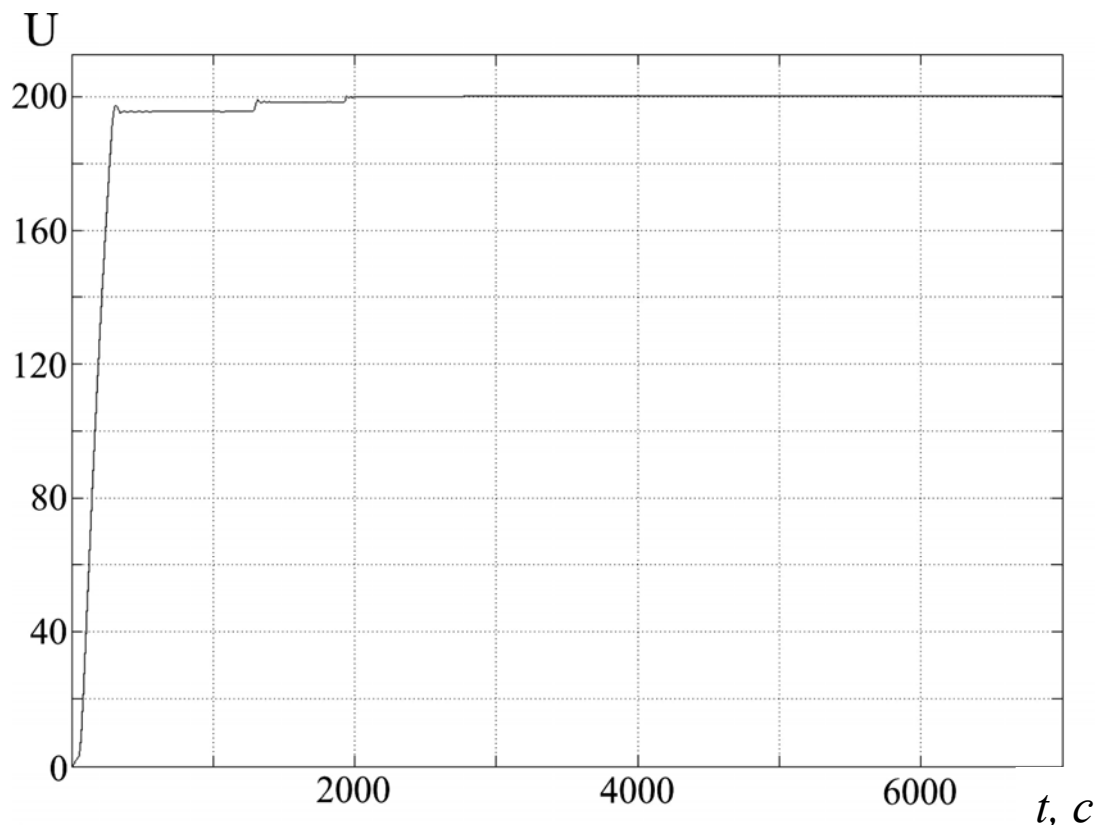


Рисунок 4 - Вихідний сигнал загороджувального фільтра

Як видно з даного рисунку, система автоматичного керування поступово за допомогою каналу адаптації самонастроюється на параметри, завдяки яким у вихідному сигналі зникає статична помилка регулювання.

### **Висновки**

1. Розглянуто структуру та розроблено модель ПД-регулятора з адаптацією за критичною частотою коливань. Запропоновано алгоритм визначення періоду пробних коливань, який дозволяє зменшити час адаптації.
2. На основі випробувань моделі доведена працездатність нового алгоритма та скориговані формули обчислення параметрів регулятора.
3. Сформульовано та вирішено задачу визначення поточного значення амплітуди й фази введених на критичній частоті примусових пробних коливань у вихідному сигналі об'єкта керування, що дає можливість настраювати регулятор на задану якість перехідного процесу.

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Литюга А.М., Клиначёв Н.В., Мазуров В.М. Теоретические основы построения эффективных АСУ ТП. – Тула, Челябинск: Offline версия 1.1, 2002. – 46 с.
2. Мазуров В.М., Спицын А.В. Адаптивная настройка регуляторов в Трейс Моуд: основы теории и практическая демонстрация. – 8-я междунар. конф. «Разработка АСУ ТП в системе Трейс Моуд: задачи и перспективы».