

## ВДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ САМОНАЛАГОДЖУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЇЇ ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ

**Хобін В. А.** – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем Одеської національної академії харчових технологій, Одеса, Україна.

**Левінський В. М.** – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем Одеської національної академії харчових технологій, Одеса, Україна.

**Левінський М. В.** – канд. техн. наук, старший викладач кафедри автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем Одеської національної академії харчових технологій, Одеса, Україна.

### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Цілий ряд об'єктів технологічного типу відзначаються суттєво нелінійною статичною характеристикою, коли коефіцієнт передачі по каналу регулювання змінюється в десять і більше раз. При цьому типові системи регулювання з незмінними параметрами регулятора втрачають стійкість і переходять у позиційний режим роботи. Зберегти компроміс між показниками якості і стійкістю процесів у системі з такими об'єктами дозволяють САР із самоналагодженням параметрів регулятора. Їх алгоритми повинні забезпечувати ефективне функціонування системи не лише в сталих, але і в перехідних по каналу завдання режимів, коли об'єкт переводиться із початкового стану, частіше з «холостого ходу», в стан номінального навантаження. Регульована змінна в пускових режимах не повинна порушувати регламентні значення технологічного процесу, бо це може призвести до виникнення аварійних ситуацій.

**Мета.** Вдосконалити алгоритми САР із самоналагодженням для пускових режимів об'єкту, забезпечивши за час пуску завершення процедури самоналагодження і зниження ймовірності виникнення аварійних ситуацій.

**Метод.** За рахунок аналізу сприятливих і несприятливих факторів для самоналагодження евристичним методом запропоноване коректування алгоритмів, отриманих для сталого режиму, на період пуску об'єкта. Перевірка ефективності коректування алгоритмів проводиться шляхом імітаційного моделювання системи в середовищі Simulink пакета програм Matlab.

**Результати.** Сплановані і проведені комп'ютерні експерименти з моделями альтернативних структур самоналагоджувальної системи. Отримані графіки і числові показники, які характеризують ефективність її роботи в пускових режимах.

**Висновки.** Для завершення процедури самоналагодження протягом періоду пуску та для запобігання неприпустимих динамічних помилок регулювання необхідно: а) збільшити коефіцієнт передачі регулятора і зменшити інерційність фільтрів в контурі самоналагодження на період пуску; б) встановити початкові значення коефіцієнта передачі моделі об'єкта регулювання на рівні максимально можливих значень його коефіцієнта передачі.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** САР із самоналагодженням, коефіцієнт передачі, складова власного руху, пусковий режим.

### АБРЕВІАТУРИ

ОР – об'єкт регулювання;  
ПКС – параметри контуру самоналагодження;  
САР – система автоматичного регулювання;  
САРС – САР самоналагоджувальна;  
ФНЧ – фільтр низької частоти.

### НОМЕНКЛАТУРА

$A^z$  – константа запасу стійкості САР;  
 $\mathcal{F}(t)$  – коефіцієнт масштабування в режимі пуску;  
 $e(t)$  – помилка регулювання САР;  
 $e_1(t)$  – помилка регулювання контуру самоналагодження  $k_m(t)$ ;  
 $e_2(t)$  – помилка регулювання контуру масштабування  $k_m(t)$ ;  
 $f_k(t)$  – координатні неконтрольовані збурення;  
 $f_p(t)$  – параметричні неконтрольовані збурення;  
 $f_n(t)$  – широкопasmові шуми;  
 $I_1, I_3$  – показники точності роботи САРС;  
 $k_o(t)$  – коефіцієнт передачі ОР;  
 $k_m(t)$  – коефіцієнт передачі моделі ОР;  
 $k_{mf}(t)$  – значення коефіцієнта передачі моделі ОР на виході погоджувального фільтра;  
 $k_m^z$  – початкове задане значення коефіцієнта передачі моделі ОР;

$k_r$  – коефіцієнт передачі регулятора САР;  
 $k_{pr}$  – коефіцієнт передачі регулятора контуру самоналагодження  $k_m(t)$ ;  
 $L$  – логічний оператор;  
 $s$  – оператор диференціювання;  
 $t_{mod}$  – час моделювання;  
 $t_p$  – час пуску ОР;  
 $T_d$  – постійна часу диференціатора;  
 $T_{oe}$  – постійна часу усереднюючого фільтра;  
 $T_{mf}$  – постійна часу погоджувального фільтра;  
 $T_{zs}$  – постійна часу задатчика;  
 $u(t)$  – керуючий вплив регулятора САР;  
 $u_{f_k}(t)$  – складова  $u(t)$ , викликана  $f_k(t)$ ;  
 $u_{y,zs}(t)$  – складова  $u(t)$ , викликана  $y^{zs}(t)$ ;  
 $u_L(t)$  – керуючий вплив блока перевірки синфазності змінних;  
 $u_{sd}(t)$  – керуючий вплив регулятора  $\sigma$ ;  
 $W^d(s)$  – передатний оператор диференціатора;  
 $W^o(s)$  – передатний оператор ОР;  
 $W^r(s)$  – передатний оператор регулятора САР;  
 $W^{fj}(s)$  – передатний оператор ФНЧ для зменшення впливу  $f_n(t)$ ;  
 $W^m(s)$  – передатний оператор моделі ОР;  
 $W^{bf}(s)$  – передатний оператор смужових фільтрів;

$W^{eo}(s, t)$  – передатний оператор усереднюючих фільтрів;

$W^{mj}(s, t)$  – передатний оператор погоджувального фільтра;

$W^{pr}(s, t)$  – передатний оператор регулятора  $k_m$ ;

$W^{sd}(s)$  – передатний оператор регулятора  $\sigma_1$ ;

$W^z(s)$  – передатний оператор задатчика;

$y_o(t)$  – регульована змінна ОР;

$y(t)$  – регульована змінна ОР на виході ФНЧ;

$y^z$  – задане значення регульованої змінної;

$y^{zs}(t)$  – задана змінна на виході задатчика;

$y^{zd}(t)$  – змінна на виході диференціатора;

$y_{reg}$  – регламентне значення регульованої змінної;

$y_m(t)$  – змінна на виході моделі ОР;

$\tilde{y}_a(t), \tilde{y}_{ma}(t)$  – змінні на виходах смугових фільтрів;

$\tilde{y}_k(t), \tilde{y}_{mk}(t)$  – змінні на виходах ключів з пам'яттю;

$\hat{\sigma}_{\tilde{y}_a}(t, t_{oc}), \hat{\sigma}_{\tilde{y}_{ma}}(t, t_{oc})$  – оцінки середньоквадратичних відхилень змінних на виходах обчислювачів оцінок;

$\sigma_1(t), \sigma_2(t)$  – масштабовані значення оцінок;

$\sigma^z$  – задане значення середньоквадратичного відхилення.

## ВСТУП

Об'єкти технологічного типу досить часто характеризуються суттєво нелінійною статичною характеристикою. Коефіцієнт передачі по каналу регулювання у них може змінюватися більше, ніж в десять раз [1, 2, 3]. При цьому типові системи регулювання з незмінними параметрами регулятора втрачають стійкість і переходять у позиційний режим роботи. Зберегти компроміс між показниками якості і стійкістю процесів у системі з такими об'єктами дозволяють САРС із самоналагодженням параметрів регулятора [4, 5]. Їх алгоритми повинні забезпечували ефективне функціонування системи не лише в сталих, але і в перехідних по каналу завдання режимах, коли об'єкт переводиться із початкового стану, частіше за «холостого ходу», в стан номінального навантаження. Регульована змінна ОР в пускових режимах не повинна порушувати регламентні значення технологічного процесу, бо це може призвести до виникнення аварійних ситуацій. Складність вирішення цієї задачі обумовлена апріорною невизначеністю початкового значення коефіцієнта передачі об'єкта на момент замикання зворотного зв'язку в САРС.

Об'єкт дослідження в даній статті – самоналагоджувальна система автоматичного регулювання об'єктом технологічного типу.

Предмет дослідження – алгоритми самоналагодження коефіцієнта передачі регулятора САРС для сталих режимів і їх модифікація для пускових режимів об'єкта.

Мета досліджень – вдосконалити алгоритми САРС для пускових режимів об'єкту, забезпечивши за час пуску

завершення процедури самоналагодження і зниження ймовірності виникнення аварійних ситуацій.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Математична модель САРС описується двома взаємозалежними системами диференціальних рівнянь, представлених в операторній формі запису, і алгебраїчними рівняннями: (1) – для САР і (2) – для блоку самоналагодження [5]:

$$\begin{cases} y_o(t) = W^o(s) \cdot (u(t) + f_k(t)) \cdot k_o(t) + f_n(t) \\ y(t) = W^{lf}(s) \cdot y_o(t), \quad y(t=0) \\ u(t) = W^r(s) \cdot (y^z - y(t)) \cdot k_r(t), \quad u(t=0) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} y_m(t) = W^m(s) \cdot u(t) \\ \tilde{y}_a(t) = W^{bf}(s) \cdot y(t) \\ \tilde{y}_{ma}(t) = W^{bf}(s) \cdot y_m(t) \\ u_L(t) = L(\tilde{y}_a(t), \tilde{y}_{ma}(t)) \\ \tilde{y}_k(t) = \begin{cases} \tilde{y}_a(t), u_L(t) = 1 \\ \tilde{y}_a(t = t_k), u_L(t) = 0 \end{cases} \\ \tilde{y}_{mk}(t) = \begin{cases} \tilde{y}_{ma}(t), u_L(t) = 1 \\ \tilde{y}_{ma}(t = t_k), u_L(t) = 0 \end{cases} \\ \hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t, t_{oc}) = \sqrt{W^{eo}(s) \cdot \tilde{y}_k^2(t)} \\ \hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t, t_{oc}) = \sqrt{W^{eo}(s) \cdot \tilde{y}_{mk}^2(t)} \\ \sigma_1(t) = \hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t, t_{oc}) \cdot u_{sd}(t) \\ \sigma_2(t) = \hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t, t_{oc}) \cdot u_{sd}(t) \cdot k_m(t) \\ k_m(t) = W^{pr}(s) \cdot (\sigma_1(t) - \sigma_2(t)), \quad k_m(t=0) \\ u_{sd}(t) = W^{sd}(s) \cdot (\sigma^z - \sigma_1(t)), \quad u_{sd}(t=0) \\ k_r(t) = A^z / k_m(t), \end{cases} \quad (2)$$

де  $y(t=0), u(t=0), k_m(t=0), u_{sd}(t=0)$  – початкові значення відповідних змінних в момент пуску системи при  $t=0$ .

Точність альтернативних структур САРС визначається за показниками:

$$I_1 = \frac{1}{t_{mod}} \int_0^{t_{mod}} e^2(t) dt, \quad I_3 = \frac{1}{t_{mod}} \int_0^{t_{mod}} (k_o(t) - k_m(t))^2 dt \quad (3)$$

При пусковій об'єкта за час  $t_p$  керована змінна  $y(t)$  не повинна вийти за регламентні допуски  $y_{reg}$ , тобто:

$$y(t) \leq y_{reg} \quad \text{при } t \in (0, t_p). \quad (4)$$

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

У статтях [4, 5] розглядалася робота САРС при впливі на об'єкт регулювання (ОР) технологічного типу координатних збурень  $f_k(t)$  і шумів  $f_n(t)$  випадкового характеру, а також параметричних збурень  $f_p(t)$ , які проявлялися в змінах його коефіцієнта передачі  $k_o(t)$ . При цьому передбачалося, що регульована змінна  $y(t)$  уже вийшла в околицю заданого значення  $y^z \equiv \text{const}$  і перехідні складові в  $y(t)$ , викликані зміною  $y^z(t)$ , відсутні.

У даній статті розглядається робота САРС у зворотній ситуації, коли задане значення  $y^r(t)$  регульованої змінної  $y(t)$  змінюється. Одним з найбільш складних для ефективного управління є зміна  $y^r(t)$  від значення, що відповідає вихідному стану об'єкта (частіше «холостому ходу»), до значення його номінального стану, тобто керування пусковими режимами ОР. Це стандартна (типова) задача керування [6, 7, 8], алгоритми якої реалізують «безударний» пуск. Його особливості – узгодження початкових значень заданої і регульованої змінних, тобто забезпечення рівності  $y^r(t=0)=y(t=0)$  і формування за допомогою задатчика «плавної», наприклад, експонентної траєкторії зміни  $y^{zs}(t)$ , що виводить ОР на номінальний режим роботи.

Вимоги до САРС у пусковому режимі – за час перехідного процесу, тобто дуже швидко, забезпечити самоналагодження коефіцієнта передачі головного регулятора на апіорі невідоме значення коефіцієнта передачі об'єкта керування; забезпечити безударний, плавний перехід у роботі системи від пускового до сталого режиму; мінімізувати ризики порушень регульованою змінною регламентних значень.

Передумови для вирішення задачі наступні. У пускових режимах ОР проявляються два типи специфічних факторів: а) «сприятливих» – які сприяють скороченню часу самоналагодження; б) «несприятливих» – які підвищують ризики виникнення аварійних ситуацій через більші відхилення регульованої змінної  $y(t)$  від траєкторії змін  $y^{zs}(t)$  заданого значення.

До сприятливих факторів можна віднести наступні три. Перший – у пускових режимах впливом координатних збурень  $f_k(t)$  на регульовану змінну  $y(t)$  можна знехтувати, тому що: а) у момент замикання контуру регулювання, тобто при  $t=0$ , алгоритми «безударного» пуску компенсують наслідки впливу  $f_k(t=0)$  на регульовану змінну  $y(t)$ ; б) спектральний склад  $f_k(t)$  у порівнянні зі спектральним складом керуючого впливу  $u(t)$  більш низькочастотний і на інтервалі часу зміни  $y^{zs}(t)$  значні зміни  $f_k(t)$  неможливі. Другий – у пускових режимах складова керуючого впливу  $u_{f_k}(t)$ , яка викликана впливом  $f_k(t)$  на ОР, набагато менша за абсолютним значенням складової  $u_{y^{zs}}(t)$ , викликаній зміною  $y^{zs}(t)$ . Для таких умов можна прийняти  $u(t) \approx u_{y^{zs}}(t)$ . Третій – складова керуючого впливу  $u_{y^{zs}}(t)$  одночасно впливає на ОР і на його модель, тому фази коливань змінних  $y(t)$  і  $y_m(t)$  практично збігаються.

Несприятливий фактор один. Він пов'язаний з апіорною невизначеністю фактичних властивостей ОР, точніше – значенням його коефіцієнта передачі  $k_o(t=0)$  на момент замикання контуру регулювання САРС. У таких умовах формальний підхід до вибору коефіцієнта передачі моделі ОР  $k_m(t=0)$  може привести до того, що розраховане по суттєво заниженому значенню  $k_m(t=0)$  початкове значення коефіцієнта передачі  $k_o(t=0)$  головного регулятора виявиться не виправдано високим. Це, при наявності істотного запізнення в контурі регулювання, приведе до перехід-

них процесів зі значними динамічними відхиленнями  $y(t)$  від  $y^{zs}(t \rightarrow \infty) = y^r$ , що спровокує виникнення аварійних ситуацій.

Проілюструвати перераховані фактори зручно на прикладі результатів моделювання САРС із розімкнутим контуром самоналагодження, коли  $k_o(t)=1,2 k_m(t)$  (див. рис. 1).

Аналіз процесів в такій САРС показує наступне: за час зміни  $y^{zs}(t)$  низькочастотні координатні збурення  $f_k(t)$  суттєво не міняються (сприятливий фактор 1). Керуючий вплив  $u(t)$ , хоча й складається із двох складових, але очевидно, що внеском  $u_{f_k}(t)$  у порівнянні  $u_{y^{zs}}(t)$  у пусковому режимі можна знехтувати (сприятливий фактор 2). Зміни змінних  $y(t)$  і  $y_m(t)$  під впливом складової  $u_{y^{zs}}(t)$  відбуваються практично синфазно (сприятливий фактор 3). Але навіть при відносно невеликій невідповідності коефіцієнтів передачі  $k_o(t)$  і  $k_m(t)$  динамічні відхилення регульованої змінної  $y(t)$  відносно  $y^{zs}(t)$  у пусковому режимі досить великі (більше 10), що може привести до виникнення аварійних ситуацій (несприятливий фактор).

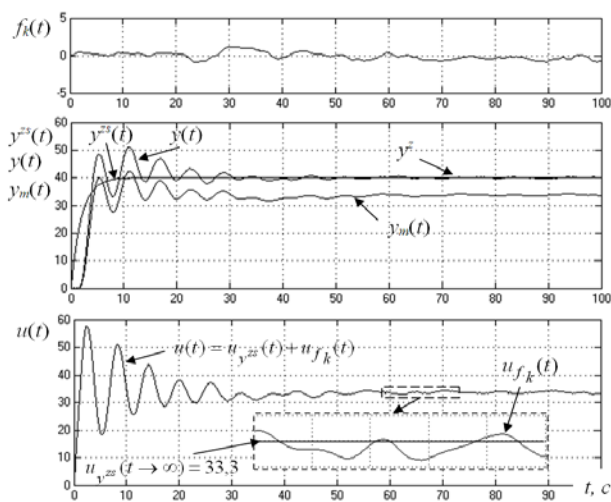


Рисунок 1 – Фрагменти змін змінних САРС з розімкнутим контуром самоналагодження в пусковому режимі при  $k_o(t)=1,2 k_m(t)$

### 3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Вимоги до процесу самоналагодження САРС у пускових режимах вимагають коректування алгоритмів, які були розроблені для сталих режимів. Аналіз об'єктивних факторів, проведений вище, визначив наступні раціональні шляхи коректування:

- збільшення швидкодії контуру самоналагодження для його завершення за час пускового режиму – досягається за рахунок збільшення коефіцієнта передачі регулятора  $k_m(t)$  контуру самоналагодження і зменшення інерційності усереднюючих фільтрів;
- безударне перемикання контуру самоналагодження з пускового на сталий режим – досягається за рахунок плавної зміни коефіцієнта передачі регулятора  $k_m$  контуру самоналагодження і інерційності усере-

дноючих фільтрів, наприклад, пропорційно  $dy^{zs}(t)/dt$ ;

в) мінімізація ризиків порушень регульованою змінною регламентних значень – досягається за рахунок встановлення таких початкових значень коефіцієнта передачі  $k_m(t=0)$  моделі ОР, при яких перехідні процеси в контурі регулювання САРС навіть при несприятливих фактичних значеннях  $k_o(t) \rightarrow k_o^{max}$ , будуть мати мінімальні значення максимальних динамічних відхилень  $y(t)$  від  $y^z$ .

Структурна схема САРС, яка відображає реалізацію запропонованих шляхів коректування, представлена на рис. 2. На цій схемі, у порівнянні з її варіантом в [5], додаткові або видозмінені елементи структури САРС виділені тонуванням.

Математичний опис виділених елементів структури САРС для максимально простого варіанта їх реалізації представлений нижче.

Задатчик визначає траєкторію виходу регульованої змінної  $y(t)$  на задане значення  $y^z$  по наступному рівнянню руху, представленому в операторній формі:

$$y^{zs}(t) = W^z(s) \cdot y^z, \quad y^{zs}(t=0) = y(t=0). \quad (5)$$

Одним з найбільш простих варіантів задатчика є його реалізація у вигляді інерційної ланки першого порядку, коли  $W^z(s) = 1/(T_{zs}s + 1)$ . Встановлення початкових умов  $y^{zs}(t=0) = y(t=0)$  забезпечує безударність замикання контуру регулювання.

Рациональна структура обчислювача коефіцієнта масштабування  $d^z(t)$ , яка обґрунтована в ході комп'ютерних експериментів, має вигляд:

$$d^z(t) = \begin{cases} 1 + y^{zd}(t), & \text{при } 1 + y^{zd}(t) < d^{z \max} \\ d^{z \max}, & \text{при } 1 + y^{zd}(t) \geq d^{z \max} \end{cases}, \quad (6)$$

$$y^{zd}(t) = W^d(s) \cdot y^{zs}(t) = (T_d s / (0,2 \cdot T_d s + 1)) \cdot y^{zs}(t). \quad (7)$$

Константа  $d^{z \max}$  обмежує зміни  $k_{pr}(t)$ ,  $T_{oe}(t)$ ,  $T_m(t)$  і тому впливає на стійкість контуру самоналагодження.

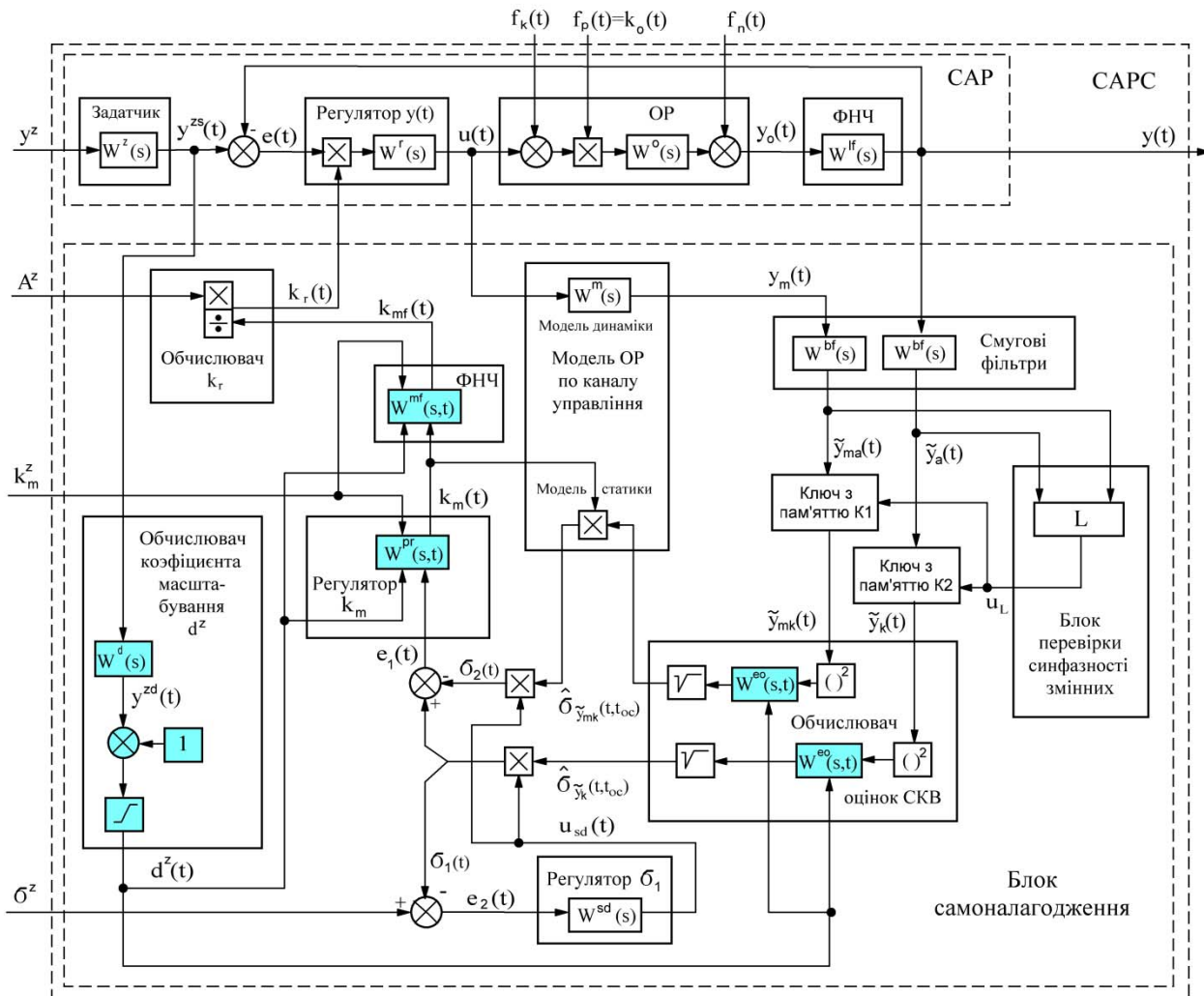


Рисунок 2 – Структурна схема САРС

В [5] були визначені оптимальні параметри  $k_{pr}^*$ ,  $T_{oe}^*$ ,  $T_{mf}^*$  для сталого режиму функціонування САРС. В режимі пуску їх масштабування ведеться по співвідношеннях:

$$k_{pr}(t) = k_{pr}^* \cdot d^z(t), \quad T_{oe}(t) = T_{oe}^* / d^z(t), \\ T_{mf}(t) = T_{mf}^* / d^z(t). \quad (8)$$

Надалі дане коректування алгоритмів самоналагодження САРС будемо скорочено називати масштабуванням ПКС.

Безударний перехід між пусковим і сталим режимом роботи контуру самоналагодження САРС забезпечується характером зміни змінної  $d^z(t)$  у фінальній стадії пускового режиму. Вона зменшується прямопропорційно швидкості зміни  $y^{zs}(t)$ , прагнучи до одиниці. При цьому поточні значення параметрів  $k_{pr}(t)$ ,  $T_{oe}(t)$ ,  $T_{mf}(t)$  відповідно до (8) змінюються, прагнучи до своїх оптимальних для сталого режиму значень  $k_{pr}^*$ ,  $T_{oe}^*$ ,  $T_{mf}^*$ .

Важливим ресурсом мінімізації ризиків порушень керованою змінною регламентних обмежень у пусковому режимі є вибір початкових значень коефіцієнта передачі моделі ОР  $k_m(t=0) = k_m^z$  і  $k_{mf}(t=0) = k_m^z$ , які із часом будуть перераховуватися регулятором  $W^{pr}(s,t)$  і згладжуватися фільтром низької частоти  $W^{mf}(s,t)$ . Встановлення цих початкових значень здійснюється за рахунок встановлення відповідних (однакових) початкових умов інтеграторів регулятора і фільтра. У ситуації, коли фактичне значення коефіцієнта передачі  $k_o(t=0)$  ОР невідоме, доцільно прийняти в якості  $k_m(t=0)$  і  $k_{mf}(t=0)$  значення  $k_m^z = k_o^{\max}$ . Це знизить первісне значення  $k_r(t=0)$  коефіцієнта передачі головного регулятора, яке обчислюється в обчислювачі  $k_r$  по залежності  $k_r(t) = A^z / k_{mf}(t)$ . У результаті вплив несприятливого фактора буде мінімізований.

Системи рівнянь (1–2) з доповненнями (5–8) аналітично вирішені бути не можуть. Конструктивна альтернатива такому рішенню – імітаційне моделювання САРС в середовищі Simulink/Matlab [9, 10].

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Метою комп'ютерних експериментів було проілюструвати можливості впливу на показники якості процесів регулювання і самоналагодження в САРС деяких основних параметрів налагодження. Задача параметричної оптимізації САРС у пускових режимах не ставилася по декільком обставинам:

а) при керуванні об'єктами технологічного типу перехідні процеси в режимі пуску становлять малу частку часу в порівнянні із сталими процесами, що, зокрема, робить неактуальною мінімізацію часу перехідного процесу;

б) у пускових режимах при зміні регульованої змінної  $y(t)$  у самому широкому діапазоні необхідно

враховувати нелінійність властивостей ОР, а у формальній постановці зробити це практично неможливо.

Особливості експериментів:

а) їхньою основою стали ті ж моделі, на яких проводилися дослідження роботи САРС у сталому режимі [5]. При цьому додатково введені моделі задатчика і обчислювача коефіцієнта масштабування  $d^z$ , скоректовані моделі регулятора  $k_m$ , усереднюючих та погоджувального фільтрів;

б) інтервал моделювання обраний рівним  $t_{mod}=50$  с. За цей час для всіх розглянутих варіантів САРС перехідний процес пускового режиму практично закінчувався;

в) показники ефективності САРС (3) аналогічні [5], але межі інтегрування включають тільки інтервал пускового режиму.

г) значення постійних часу задатчика  $T_z$ , по черзі, встановлювалися рівними:  $T_z=2$  с,  $T_z=5$  с,  $T_z=10$  с;

д) модель обчислювача коефіцієнта масштабування  $d^z(t)$  відповідає виразам (6), (7), значення параметрів яких на основі попередніх експериментів прийняті наступними:  $d^z^{\max} = 20$ ,  $T_d=5$  с.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТИ

Моделювання містило в собі декілька груп експериментів, результати двох з них представлені на рис. 3, 4. На рис. 3 – результати моделювання САРС за структурою [5] без масштабування ПКС для двох різних фактичних значень коефіцієнта передачі  $k_o(t)=5$  і  $k_o(t)=0,45$  об'єкта з найбільш імовірним початковим значенням коефіцієнта передачі  $k_m(t=0)=1$  моделі ОР. На рис. 4 – результати моделювання САРС із масштабуванням ПКС при встановленні початкових умов  $k_m(t=0)$  на рівень  $k_m(t=0) = k_m^z = k_o^{\max}$ .

Аналіз результатів експериментів:

а) з рис. 3 для САРС без масштабування ПКС випливає, що у всіх випадках самоналагодження  $k_m(t)$  до значення  $k_o(t)$  відбувається раніше, ніж закінчуються перехідні процеси  $y(t)$  пускового режиму. Якщо фактичне значення коефіцієнта передачі  $k_o(t)=5$  ОР перевищує початкове значення коефіцієнта передачі  $k_m(t=0)=1$  його моделі, то при значеннях постійної часу задатчика  $T_z=2$  с,  $T_z=5$  с регульована змінна  $y(t)$  порушує регламентні значення  $y_{reg}=60$  (див. рис. 3а, 3б). При  $T_z=10$  с перехідний процес  $y(t)$  пускового режиму сильно коливальний.

Якщо  $k_o(t)=0,45$ , що менше, ніж  $k_m(t=0)=1$ , то перехідні процеси  $y(t)$ ,  $k_m(t)$  пускового режиму мають аперіодичний характер, порушень  $y(t)$  регламентних значень не спостерігається;

б) з рис. 4 для САРС із масштабуванням ПКС випливає, що час самоналагодження  $k_m(t)$  до значення  $k_o(t)=5$  у порівнянні з рис. 3 скоротився. Інтенсифікація самоналагодження знайшла своє відбиття і у значеннях показників  $I_1$  і  $I_3$ , які на рис. 4 менші, ніж на рис. 3. Перехідні процеси  $y(t)$ ,  $k_m(t)$  пускового режиму набули аперіодичний характер. Вихід керованої змінної  $y(t)$  на задане значення  $y^z$  відбувається без порушень регламентних значень  $y_{reg}=60$  навіть тоді, коли



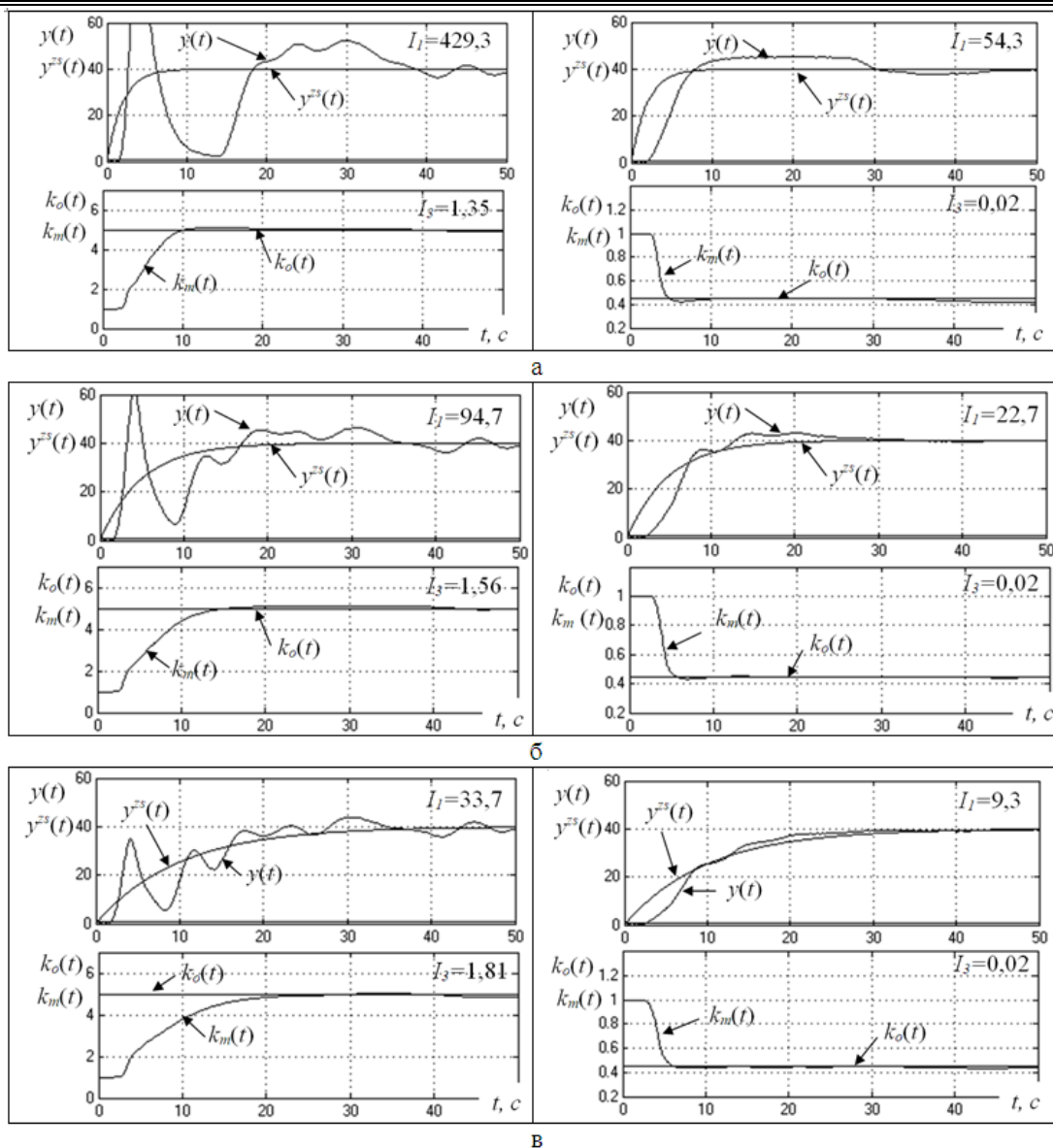


Рисунок 3 – Фрагменти змін змінних САРС без масштабування ПКС у пускових режимах з різними постійними часу  $T_z$  задатчика: а –  $T_z=2$  с; б –  $T_z=5$  с; в –  $T_z=10$  с при  $k_m(t=0)=1$  і різних значеннях  $k_o(t)$

траєкторія  $y^{zs}(t)$ , яка задається задатчиком, швидка ( $T_z=2$  с, див. рис. 4а). Правда, для випадку  $k_o(t)=0,45$  спостерігається деяке погіршення показників якості  $I_1$  і  $I_3$  у порівнянні з рис. 3. Але, враховуючи, що час пускового режиму незрівнянно менший часу роботи ОР технологічного типу у сталому режимі, то даними погіршеннями можна знехтувати.

Графіки, представлені на рис. 4, також показують, що за рахунок плавного зменшення значень змінної  $d^f(t)$  у фінальній стадії пускового режиму змінна  $k_m(t)$  також змінюється плавно, безударно при переході до її значень у сталому режимі роботи САРС.

## 6 ОБГОВОРЕННЯ

Результати, отримані при дослідженні САРС під час пускових режимів, додатково підтверджують правомірність концепції самоналагодження регулятора в замкнутій САР на основі пасивної ідентифікації

об'єкта регулювання з виділенням із загального руху регульованих змінних об'єкта і його моделі складових їхнього власного руху. Під час пуску складова власного руху регульованої змінної суттєво превалює над її вимушеною складовою, що створює сприятливі умови для інтенсифікації процесу самоналагодження.

При керуванні об'єктами неперервних технологій слід відмітити, що для них перехідні процеси в режимі пуску становлять, як правило, малу частку часу в порівнянні зі сталими процесами. Тому задача мінімізації часу переходного (пускового) процесу для таких об'єктів неактуальна. Для об'єктів з періодичними технологіями задачу пошуку оптимальних значень параметрів САРС для пускового режиму вже доцільно вирішувати. Очевидно, вона повинна зводитися до

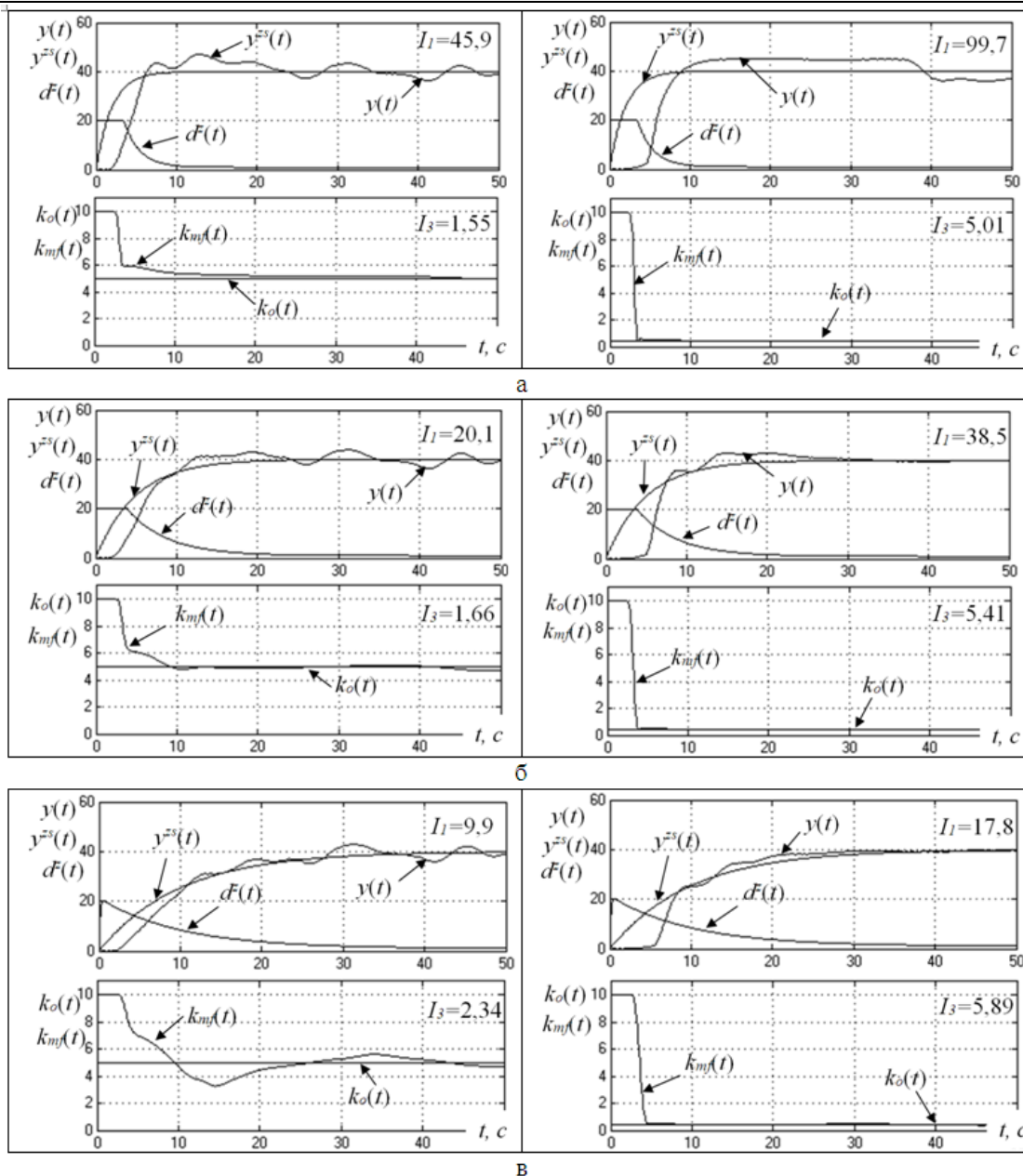


Рисунок 4 – Фрагменти змін змінних САРС із масштабуванням ПКС у пускових режимах для різних постійних часу  $T_z$  задатчика:

а –  $T_z=2$  с; б –  $T_z=5$  с; в –  $T_z=10$  с при  $k_m(t=0)=k_o^{\max}=10$  і різних значеннях  $k_o(t)$

пошуку компромісу між часом перехідного процесу і ризиками порушень регульованою змінною регламентних значень.

### ВИСНОВКИ

1. САРС, розроблена в [5], параметри якої оптимізовані для сталих режимів роботи, може бути використана для керування ОР технологічного типу і у пускових режимах. При цьому, щоб знизити ризик порушень регульованою змінною своїх регламентних значень, необхідно вибрати траєкторію зміни заданого значення, яка повільно змінюється, і раціональне початкове значення коефіцієнта передачі моделі ОР. Наприклад, встановити постійну часу аперіодичного задатчика більшу, ніж 7...10 часів запізнення об'єкта

регулювання, і початкове значення коефіцієнта передачі моделі близьким до максимально можливого значення коефіцієнта передачі ОР.

2. Прискорити процес виходу регульованої змінної на задане значення і при цьому мінімізувати ризики порушень регламентних значень можна за рахунок:

а) масштабування параметрів контуру самоналагодження, а саме – збільшення коефіцієнта передачі регулятора в контурі самоналагодження і зменшення інерційності усереднюючих та погоджувального фільтрів пропорційно швидкості зміни заданого значення;

б) встановлення початкових значень коефіцієнта передачі моделі об'єкта керування на рівні максимально можливих значень його коефіцієнта передачі, які встановлюються у вигляді початкових умов на інтег-

раторі регулятора і погоджувального фільтра контуру самоналагодження.

3. Розглянутий приклад масштабування параметрів контуру самоналагодження забезпечує його безударне перемикання з пускового режиму на сталий режим роботи.

### ПОДЯКИ

Робота виконана в рамках наукової школи «Моделювання і оптимальне керування технологічними процесами зберігання та переробки сільськогосподарської продукції» кафедри «Автоматизація технологічних процесів і робототехнічних систем» Одеської національної академії харчових технологій за підтримки компанії «С-Інжиніринг» м. Одеса.

### ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Landau I. D. Adaptive Control / I. D. Landau. – London : Springer-Verlag London Limited, 2011. – 234 p. DOI: 10.1007/978-0-85729-664-1\_1
2. Isermann R. Digital Control Systems / R. Isermann. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991. – 325 p. DOI: 10.1007/978-3-642-86420-9
3. Astrom K. The Future of PID Control / K. Astrom, T. Hagglund // IFAC Proceedings Volumes. – 2000. – Volume 33, Issue 4. – P. 19–30. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)38216-2
4. Хобин В. А. Оптимизация фильтров собственного движения самонастраивающейся САУ объектом технологического типа / В. А. Хобин, М. В. Левинский // Радио-

електроніка, інформатика, управління. – 2016. – № 4. – С. 120–129. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-4-15

5. Хобин В. А. Принципы, алгоритмы и результаты повышения эффективности самоналагоджывальной системы керування об'єктом технологічного типу / В. А. Хобин, М. В. Левінський // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2017. – №2. – С. 172–181. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-2-19
6. Adaptive Control. Algorithms, Analysis and Applications / [I. D. Landau, R. Lozano, M. M'Saad, A. Karimi]. – New York : Springer London Dordrecht Heidelberg, 2011. – 610 p. DOI: 10.1007/978-0-85729-664-1
7. Maggio M. The PID+p controller structure and its contextual model-based tuning / M. Maggio, A. Leva // IFAC Proceedings Volumes. – January 2011. – Volume 44, Issue 1. – P. 4101–4106. DOI: 10.3182/20110828-6-IT-1002.01029
8. Kolaj W. PLC-PID Tuner: Application for PID Tuning with SIMATIC S7 PLC Controllers / W. Kolaj, J. Mozaryn, M. Syfert // IFAC Proceedings Volumes. – 2010. – Volume 43, Issue 2. – P. 343–348. DOI: 10.3182/20100607-3-CZ-4010.00061.
9. Xue D. Linear feedback control: analysis and design with MATLAB / D. Xue, Y. Chen, D. Atherton. – Philadelphia: Siam, 2007. – 356 p. DOI: 10.1137/1.9780898718621
10. Higham D. MATLAB Guide, Third Edition / D. Higham, N. Higham. – Philadelphia: Siam, 2016. – 462 p. DOI: 10.1137/1.9781611974669

Стаття надійшла до редакції 15.07.2018.

Після доробки 21.08.2018.

УДК 681.52:62-503.57

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ САМОНАСТРАИВАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕЕ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ

**Хобин В. А.** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры автоматизации технологических процессов и робототехнических систем Одесской национальной академии пищевых технологий, Одесса, Украина.

**Левинский В. М.** – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и робототехнических систем Одесской национальной академии пищевых технологий, Одесса, Украина.

**Левинский М. В.** – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры автоматизации технологических процессов и робототехнических систем Одесской национальной академии пищевых технологий, Одесса, Украина.

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Целый ряд объектов технологического типа отличаются существенно нелинейной статической характеристикой, когда коэффициент передачи по каналу регулирования меняется в десять и больше раз. При этом типичные системы регулирования с неизменными параметрами регулятора теряют устойчивость и переходят в позиционный режим работы. Сохранить компромисс между показателями качества и устойчивостью процессов в системе с такими объектами позволяют САР с самонастройкой параметров регулятора. Их алгоритмы должны обеспечивать эффективное функционирование системы не только в установившихся, но и в переходных по каналу задания режимах, когда объект переводится из начального состояния, чаще с «холостого хода», в состояние номинальной нагрузки. Регулированная переменная в пусковых режимах не должна нарушать регламентные значения технологического процесса, потому что это может привести к возникновению аварийных ситуаций.

**Цель.** Усовершенствовать алгоритмы САР с самонастройкой для пусковых режимов объекта, обеспечив за время пуска завершение процедуры самонастройки и снижение вероятности возникновения аварийных ситуаций.

**Метод.** За счет анализа благоприятных и неблагоприятных факторов для самонастройки эвристическим методом предложена корректировка алгоритмов, полученных для установившегося режима, на период пуска объекта. Проверка эффективности корректировки алгоритмов проводится путем имитационного моделирования системы в среде Simulink пакета программ Matlab.

**Результаты.** Спланированы и проведены компьютерные эксперименты с моделями альтернативных структур самонастраивающейся системы. Получены графики и числовые показатели, которые характеризуют эффективность её работы в пусковых режимах.

**Выводы.** Для завершения процедуры самонастройки на протяжении периода пуска и для предотвращения недопустимых динамических ошибок регулирования необходимо: а) увеличить коэффициент передачи регулятора и уменьшить инерционность фильтров в контуре самонастройки на период пуска; б) установить начальное значение коэффициента передачи модели объекта регулирования на уровне максимально возможных значений его коэффициента передачи.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** САР с самонастройкой, коэффициент передачи, составляющая собственного движения, пусковой режим.



## SELF-TUNING CONTROL SYSTEM ALGORITHMS IMPROVEMENT FOR PROVIDING EFFICIENCY OF ITS STARTING REGIMES

**Khobin V. A.** – Dr.Sc., Professor, Head of a Chair of Automation of Technological Processes and Robot-Technical Systems Department of the Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine.

**Levinskyi V. M.** – PhD., Associate Professor of Automation of Technological Processes and Robot-Technical Systems Department of the Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine.

**Levinskyi M. V.** – PhD., Senior teacher of Automation of Technological Processes and Robot-Technical Systems Department of the Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine.

### ABSTRACT

**Context.** A whole series of technological type control objects have substantially nonlinear static characteristic, when gain through control channel changes in ten or more times. At the same time typical control systems with unchanged controller parameters lose their stability and switch to the position mode of operation. Automatic control systems (ACS) with self-tuning of the controller parameters allow to save a compromise between quality indicators and processes stability in the systems with such objects. Their algorithms should provide effective system functioning not only in steady-state, but also in transient modes, when set point changes, when control object is being transferred from the initial state, more often from idling, to the state of nominal load. The controlled variable in the start-up modes must not violate the procedural limits of the technological process, since it can lead to emergency situations.

**Objective.** To improve the ACS algorithms with self-tuning for the start-up conditions of the control object, ensuring the completion of the self-tuning procedure during the start-up period and lowering the possibility of emergency situations.

**Method.** Utilizing analysis of the advantageous and disadvantageous factors for the self-tuning procedure, using heuristic method, correction for the algorithms, which were developed earlier for steady-states, was proposed for the start-up period. Algorithms correction efficiency is verified by simulation of the system in the Simulink environment of the MatLab software package.

**Results.** Computer experiments with models of alternative structures of the self-tuning system were planned and conducted. Obtained figures and numerical values characterize the efficiency of its operation in the start-up modes.

**Conclusions.** To complete the self-tuning procedure during the start-up period and to prevent unacceptable dynamic control errors, it is necessary to: a) increase the controller gain and decrease the persistence of the filters in the self-tuning loop during the start-up period; b) set the initial value of the control object model gain at the maximum possible level.

**KEYWORDS:** ACS with self-tuning, gain, own motion component, start-up period.

### REFERENCES

1. Landau I. D. Adaptive Control. London, Springer-Verlag London Limited, 2011, 234 p. DOI: 10.1007/978-0-85729-664-1\_1
2. Isermann R. Digital Control Systems. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991, 325 p. DOI: 10.1007/978-3-642-86420-9
3. Astrom K., Hagglund T. The Future of PID Control, *IFAC Proceedings Volumes*, April 2000, Volume 33, Issue 4, pp. 19–30. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)38216-2
4. Khobin V. A., Levinskyi M. V. Optimizacija fil'trov sobstvennogo dvizhenija samonastrai-vajushhejsja SAU objektom tehnologicheskogo tipa, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 4, pp. 120–129. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-4-15
5. Khobin V. A., Levinskyi M. V. Principi, algoritmi i rezul'tati pidvishhennja efektyvnosti samonalagodzhival'noi sistemi keruvannja ob'ektom tehnologichnogo tipu, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, No. 2, pp. 172–181. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-2-19
6. Landau I. D., Lozano R., M'Saad M., Karimi A. Adaptive Control. Algorithms, Analysis and Applications. New York, Springer London Dordrecht Heidelberg, 2011, 610 p. DOI: 10.1007/978-0-85729-664-1
7. Maggio M., Leva A. The PID+p controller structure and its contextual model-based tuning, *IFAC Proceedings Volumes*, January 2011, Volume 44, Issue 1, pp. 4101–4106. DOI: 10.3182/20110828-6-IT-1002.01029
8. Kolaj W., Syfert M. PLC-PIDTuner: Application for PID Tuning with SIMATIC S7 PLC Controllers, *IFAC Proceedings Volumes*, 2010, Volume 43, Issue 2, pp. 343–348. DOI: 10.3182/20100607-3-CZ-4010.00061.
9. Xue D., Chen Y., Atherton D. Linear feedback control: analysis and design with MATLAB, Philadelphia, Siam, 2007, 356 p. DOI: 10.1137/1.9780898718621
10. Higham D., Higham N. MATLAB Guide, Third Edition. Philadelphia, Siam, 2016, 462 p. DOI: 10.1137/1.9781611974669