

¹Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем Одеської національної академії харчових технологій, Одеса, Україна

²Аспірант кафедри автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем Одеської національної академії харчових технологій, Одеса, Україна

ПРИНЦИПИ, АЛГОРИТМИ І РЕЗУЛЬТАТИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ САМОНАЛАГОДЖУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ

Актуальність. Самоналагодження параметрів регуляторів є актуальним при керуванні об'єктами технологічного типу, тому що зміни властивостей сировини й енергоносіїв, деградація устаткування в ході технологічного процесу змінюють не тільки значення керованих змінних, але й характер власного руху систем автоматичного регулювання в замкнутому контурі. У математичних моделях такі впливи відносять до параметричних збурень і відображають їх у тому числі за допомогою змінного коефіцієнта передачі об'єкта керування. Для ряду технологічних об'єктів керування діапазон його зміни може перевищувати значення десять. При цьому типові системи регулювання з незмінними параметрами регулятора втрачають стійкість і переходять у позиційний режим роботи. Щоб зберегти компроміс між показниками якості й стійкістю процесів у системі з такими об'єктами, необхідно використовувати самоналагодження параметрів регулятора.

Мета. Підвищення ефективності самоналагоджувальної системи керування, яка для ідентифікації змінного коефіцієнта передачі об'єкта керування використовує складову власного руху.

Метод. Пропонується вдосконалення принципів і алгоритмів роботи самоналагоджувальної системи, які підвищують її стійкість і динамічну точність. Для цього в склад вихідної системи включаються нові ланки і зв'язки. Враховуючи наявність у системі нелінійних і нестационарних ланок, для її дослідження обране імітаційне моделювання в середовищі Simulink пакета програм Matlab.

Результати. Сплановані і проведені комп'ютерні експерименти з моделями альтернативних структур системи за умов, які наближені до реальних умов її функціонування. Проведене тестування типовими моделями змін коефіцієнта передачі об'єкта. Отримані графіки і числові показники, що характеризують ефективність роботи самоналагоджувальної системи вихідної і удосконаленої структур.

Висновки. Для підвищення стійкості і динамічної точності системи необхідно зменшити інерційність її контуру самоналагодження, вплив фазових зрушень фільтрованих змінних у цьому контурі на формування оцінок імовірносних характеристик, а також вплив коефіцієнта передачі об'єкта на похибку регулювання контуру самоналагодження.

Ключові слова: самоналагоджувальна САК, коефіцієнт передачі, власний рух, смуговий фільтр, оптимальний параметричний синтез.

НОМЕНКЛАТУРА

A^z – константа, яка визначає запас стійкості лінійної САР;

$\hat{\sigma}_{\tilde{y}_a}(t, \tau_{oc})$ і $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_{ma}}(t, \tau_{oc})$ – оцінки середньоквадратич-

них відхилень змінних на виходах обчислювачів оцінок;

$f_k(t)$ – координатні неконтрольовані збурювання;

$f_p(t)$ – параметричні неконтрольовані збурювання;

$f_n(t)$ – широкосмугові шуми;

k_o – коефіцієнт передачі ОК;

k_m – коефіцієнт передачі моделі ОК;

k_r – коефіцієнт передачі регулятора САР;

L – логічна функція перемикавання;

t_n, t_{mod} – моменти часу, відповідні до початку й кінцю моделювання;

$y(t)$ – керована змінна, як функція часу t ;

$y^z(t)$ – задане значення керованої змінної;

$\tilde{y}(t)$ – складова $y(t)$, яка характеризує власний рух у замкнутому контурі САР (середньочастотна);

$y_l(t)$ – складова $y(t)$, викликана координатними збуреннями $f_k(t)$ (низькочастотна);

$y_n(t)$ – складова $y(t)$, викликана шумами $f_n(t)$ (високочастотна);

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

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

s – оператор диференціювання;

t_{oc} – ковзний інтервал часу усереднення змінних;

W – передатний оператор;

ω_L, ω_H – частоти зрізів смугових фільтрів у низько-частотній і високочастотній області;

σ^z – задане значення середньоквадратичного відхилення;

АЧХ – амплитудо-частотна характеристика;

ОК – об'єкт керування;

САР – система автоматичного регулювання;

САРС – САР самоналагоджувальна;

САК – система автоматичного керування;

ФНЧ – фільтр низької частоти.

ВСТУП

Питання самоналагодження було й залишається актуальним при керуванні об'єктами технологічного типу [1], тому що зміни властивостей сировини й енергоносіїв, деградація устаткування в ході технологічного процесу змінюють не тільки значення керованих змінних, але й характер власного руху систем автоматичного регулювання (САР) у замкнутому контурі. У математичних моделях такі впливи відносять до параметричних збурень і відображають їх у тому числі за допомогою змінного коефіцієнта передачі $k_o(t)$ об'єкта керування. Для ряду технологічних об'єктів керування (ОК) діапазон його зміни може перевищувати значення десять [2]. При цьому типові САР з незмінними параметрами регулятора втрачають стійкість «у малому» і переходять у позиційний режим роботи. Щоб зберегти компроміс між показниками якості й стійкістю процесів у САР такими ОК, необхідно використовувати самоналагодження параметрів регулятора.

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

Предмет дослідження – принципи підвищення стійкості і динамічної точності контура самоналагодження.

Мета досліджень – показати можливості вдосконалювання алгоритмів самоналагодження як способу підвищення ефективності систем керування об'єктами технологічного типу.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розроблена вдосконалена структура САРС, яка представлена на рис. 1. Вона включає до свого складу елементи вихідної структури, що показані без виділення кольором і додаткові елементи, що виділені кольором. Математична модель системи, яка відповідає цій структурній схемі, представлена двома взаємозалежними системами диференціальних і алгебраїчних рівнянь: (1)–(3) – для САР і (4)–(16) – для блоку самоналагодження.

$$\left\{ \begin{aligned} y_o(t) &= W^o(s) \cdot (u(t) + f_k(t)) \cdot k_o(t) + f_n(t), & (1) \\ y(t) &= W^{lf}(s) \cdot y_o(t) + y(t=0), & (2) \\ u(t) &= W^r(s) \cdot e(t) \cdot k_r(t) + u(t=0) = \\ &= W^r(s) \cdot (y^z - y(t)) \cdot k_r(t) + u(t=0). & (3) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} y_m(t) &= W^m(s) \cdot u(t), & (4) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \tilde{y}_a(t) &= W^{bf}(s) \cdot y(t), & (5) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \tilde{y}_{ma}(t) &= W^{bf}(s) \cdot y_m(t), & (6) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} u_L(t) &= L(\tilde{y}_a(t), \tilde{y}_{ma}(t)), & (7) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \tilde{y}_k(t) &= \begin{cases} \tilde{y}_a(t), u_L(t) = 1 \\ \tilde{y}_a(t = t_k), u_L(t) = 0 \end{cases}, & (8) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \tilde{y}_{mk}(t) &= \begin{cases} \tilde{y}_{ma}(t), u_L(t) = 1 \\ \tilde{y}_{ma}(t = t_k), u_L(t) = 0 \end{cases}, & (9) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t_{oc}, t) &= \sqrt{W^{eo}(s) \cdot \tilde{y}_k^2(t)}, & (10) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t_{oc}, t) &= \sqrt{W^{eo}(s) \cdot \tilde{y}_{mk}^2(t)}, & (11) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_1(t) &= \hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t_{oc}, t) \cdot u_{sd}(t), & (12) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_2(t) &= \hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t_{oc}, t) \cdot u_{sd}(t) \cdot k_m(t), & (13) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} k_m(t) &= W^{pr}(s) \cdot e_1(t) + k_m(t=0) = \\ &= W^{pr}(s) \cdot (\sigma_1(t) - \sigma_2(t)) + k_m(t=0), & (14) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} u_{sd}(t) &= W^{sd}(s) \cdot e_2(t) + u_{SD}(t=0) = \\ &= W^{sd}(s) \cdot (\sigma^z - \sigma_1(t)) + u_{sd}(t=0), & (15) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} k_r(t) &= A^z / k_o(t). & (16) \end{aligned} \right.$$

Ставиться завдання порівняти точність САРС вихідної структури й удосконаленої САРС за показниками

$$I_1 = \int_{t_n}^{t_{mod}} e^2(t) dt / (t_{mod} - t_n), \quad (17)$$

$$I_3 = \int_{t_n}^{t_{mod}} (k_o(t) - k_m(t))^2 dt / (t_{mod} - t_n). \quad (18)$$

при впливі на систему координатних збурень $f_k(t)$ і шумів $f_n(t)$ випадкового характеру, тестових змін параметричних збурень $f_p(t) = k_o(t)$ лінійного, гармонійного й стрибкоподібного виду.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Як правило, нормативи й правила виконання технологічних процесів накладають обмеження на алгоритми (способи) самоналагодження [1]. Самоналагодження за рахунок подачі на систему керування штучних тестових сигналів, перевід її в розімкнутий режим або на межу стійкості часто неприйнятні, тому що виникає ризик порушень регламентів. У таких умовах, на наш погляд, кращими є алгоритми самоналагодження, які припускають пасивну ідентифікацію поточних значень змінного коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК. Вона використовує природно виникаючі рухи керованої змінної $y(t)$ у замкнутому контурі системи керування при впливі на процес зовнішніх неконтрольованих координатних збурень $f_k(t)$ і шумів $f_n(t)$ випадкового характеру [4]. Така можливість з'являється завдяки тому, що для більшості ОК технологічного типу в спектральному складі керованої змінної $y(t)$ вдається виділити складову власного руху САР (її замкнутого контуру), яка проявляється у вигляді випадкових коливань середньої частоти $\tilde{y}(t)$ на тлі більш низькочастотних коливань $y_l(t)$, викликаних координатними збуреннями $f_k(t)$, і більш високочастотних коливань $y_n(t)$, викликаних шумами $f_n(t)$. Для виділення $\tilde{y}(t)$ доцільно використовувати лінійні смугові фільтри, рекомендації з вибору яких наведені в [5]. Оскільки $\tilde{y}(t)$ – випадковий процес, то змінний у часі коефіцієнт передачі $k_o(t)$ ОК будуть характеризувати не миттєві значення $\tilde{y}(t)$, а його усереднені в часі параметри, зокрема, оцінка дисперсії $\hat{D}_{\tilde{y}}(t_{oc}, t)$, отримана на ковзному інтервалі часу t_{oc} . В [5] показано, що оцінка $\hat{D}_{\tilde{y}}(t_{oc}, t)$ пропорційна $k_o^2(t)$ ОК. Після визначення поточних значень $k_o(t)$, може бути обчислений і коефіцієнт передачі $k_r(t)$ регулятора САР, який забезпечує заданий ступінь її стійкості. Самоналагоджувальна САР вихідної структури розглянута в [6], де досліджувався вплив змін спектрального складу координатних збурень і шумів на показники якості її роботи при різних параметрах блоку самоналагодження.

Поряд з позитивними якостями, результати моделювання САРС вихідної структури показують недостатню точність підстроювання коефіцієнта передачі $k_m(t)$ моделі до змінного коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК. Перелік причин низької точності розглянемо нижче.

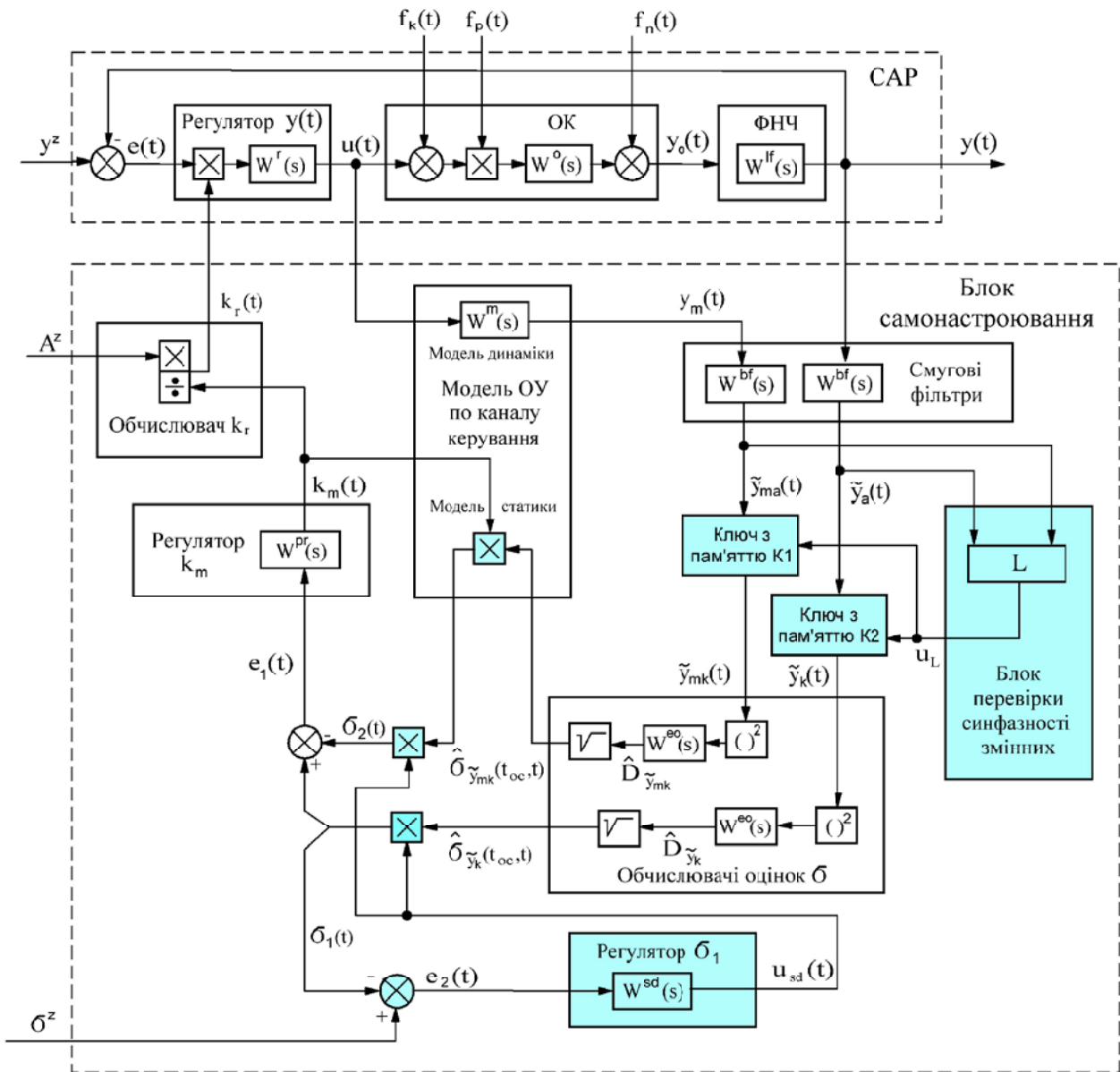


Рисунок 1 – Структурна схема САРС

Перша причина. У ланцюг зворотного зв'язку регулятора k_m входять інерційності смугових фільтрів і обчислювачів оцінок, що змушує обмежувати коефіцієнт передачі регулятора k_m для збереження стійкості контуру самоналагодження. Це неминуче позначається на точності відтворення змінного коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК.

Друга причина. Зміна коефіцієнта передачі об'єкта $k_o(t)$ не викликає фазового зрушення фільтрованих змінних ОК і його моделі $\tilde{y}_a(t)$ й $\tilde{y}_{ma}(t)$ у часі, тому що при цьому буде змінюватися амплітуда змінних, але їх фази (знаки) залишаються однаковими. А розбіжність динамічних властивостей об'єкта керування і його моделі, тобто неоднакові запізнення й інерційності викличуть фазове зрушення змінних $\tilde{y}_a(t)$ й $\tilde{y}_{ma}(t)$. Крім того, у реальних умовах у складі збурень можуть з'являтися, наприклад, східчасті складові. Вони приводять до появи в складі керованої змінної $y(t)$ складових широкого спектрального складу, з яких середньочастотні складові не

можуть бути відфільтровані смуговими фільтрами. Це також викликає фазові зрушення між змінними $\tilde{y}_a(t)$ й $\tilde{y}_{ma}(t)$. Важливо, що всі розглянуті фазові зрушення цих змінних змінюють поточну різницю оцінок $e_1(t)$ без змін при цьому коефіцієнта передачі об'єкта керування. САРС вихідної структури не враховує природу появи поточної різниці $e_1(t)$, а саме виникла вона в результаті зміни коефіцієнта передачі $k_o(t)$ об'єкта або в результаті фазових зрушень змінних $\tilde{y}_a(t)$ й $\tilde{y}_{ma}(t)$. Це й зменшує точність визначення коефіцієнта передачі $k_m(t)$ моделі об'єкта керування.

Третя причина пов'язана із змінним коефіцієнтом передачі контуру самоналагодження. При зменшенні коефіцієнта передачі $k_o(t)$ об'єкта керування зміни керованої змінної $y(t)$, викликані змінами і збурень і керуючих впливів, зменшуються. А це приводить до зменшення абсолютних значень поточної різниці оцінок $e_1(t)$. У випадку збільшення коефіцієнта передачі об'єкта різниця,

навпаки – збільшується. Т.ч., у САРС вихідної структури при змінах коефіцієнта передачі об'єкта $k_o(t)$ змінюється коефіцієнт передачі контуру самоналагодження. При високих коефіцієнтах передачі контуру самоналагодження процеси в ньому будуть мати високу коливальність, а при низьких – будуть повільними. Це, в обох випадках, знижує точність визначення коефіцієнта передачі $k_o(t)$ об'єкта керування.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Розглянемо принципи підвищення ефективності контуру самоналагодження, які реалізуються додатковими елементами САРС. Результати їх застосування будуть проілюстровані нижче в розділі «Результати».

1. Зменшення інерційності контуру самоналагодження. Досягається за рахунок виключення з контуру регулятора k_m послідовно включених інерційностей смугових $W^{bf}(s)$ і осереднюючих $W^{eo}(s)$ фільтрів. Блок множення, який реалізує модель статичної ОК, конкретніше – модель його коефіцієнта передачі $k_m(t)$ переноситься від моделі динаміки ОК $W^m(s)$ до виходу обчислювача оцінки $\hat{G}_{\tilde{y}_{mk}}$. Контур самоналагодження стає малоінерційним. У результаті поліпшується його динаміка й розширюється запас стійкості, а також знімається проблема установки початкових умов в інерційних ланках. Це дозволяє збільшити коефіцієнт передачі контуру самоналагодження й підвищити динамічну точність відтворення коефіцієнтом передачі $k_m(t)$ моделі змінного коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК при збереженні запасу стійкості контуру.

2. Зменшення впливу фазових зрушень у контурі самоналагодження. Досягається за рахунок включення до складу системи блоку перевірки синфазності змінних і ключів з пам'яттю К1, К2. Алгоритм їх функціонування наступний. Коли змінні $\tilde{y}_a(t)$ й $\tilde{y}_{ma}(t)$ змінюються синфазно (знаки їх однакові), вплив негативних факторів, розглянутих раніше, мінімальний. У такі інтервали часу блок перевірки синфазності змінних встановлює індикатор $u_i=1$, замикаються ключі К1, К2 і їх вихідні змінні $\tilde{y}_k(t)$ й $\tilde{y}_{mk}(t)$ повторюють змінні $\tilde{y}_a(t)$ й $\tilde{y}_{ma}(t)$ на входах. Коли синфазність $\tilde{y}_a(t)$ і $\tilde{y}_{ma}(t)$ під впливом негативних факторів порушується, блок перевірки синфазності змінних у момент часу t_k встановлює індикатор $u_i=0$, ключі К1, К2 розмикаються й на їхніх виходах запам'ятовуються й зберігаються на всьому поточному інтервалі порушень синфазності значення $\tilde{y}_a(t=t_k)$, $\tilde{y}_{ma}(t=t_k)$.

3. Стабілізація оцінки імовірнісної характеристики фільтрованої керованої змінної об'єкта на заданому значенні із одночасним пропорційним масштабуванням оцінки імовірнісної характеристики фільтрованої змінної його моделі. Досягається за рахунок включення до складу САРС регулятора σ_1 і двох блоків множення, які виконують функцію масштабування. При змінах коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК регулятор, змінюючи керуючий вплив $u_{sd}(t)$, стабілізує значення змінної на заданому рівні. Стабілізація здійснюється масштабуванням оцінки до значення (12). Щоб зберегти пропорційність змінних, також одночасно масштабується й оцінка до значення (13). Т.ч., змінні значення коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК вже менше

впливають на значення помилки регулювання $e_1(t)$ контуру самоналагодження. Тому надалі будемо формулювати цей принцип більш коротко – стабілізація нормованої помилки контуру самоналагодження.

Оскільки в структурі САРС є кілька взаємозалежних контурів регулювання, нелінійні й нестационарні ланки, то аналітичне рішення задач її аналізу утруднене. Тому для дослідження системи обране імітаційне моделювання в середовищі Simulink пакета програм Matlab, у якому проведений багатфакторний комп'ютерний експеримент із моделями ОК й збурень, що характерні для об'єктів технологічного типу.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

В комп'ютерних експериментах використовувалися наступні моделі.

Передатні функції «еквівалентного» ОК – інерційної частини ОК й ФНЧ:

$$W^o(s) = \frac{1}{T_o s + 1} \cdot \exp(-\tau_o s),$$

$$W^{lf}(s) = \frac{\omega_{lf}^2}{s^2 + 1,414 \cdot \omega_{lf} s + \omega_{lf}^2}, \quad (17)$$

де $\tau_o = 1$, $T_o = 2$ – нормовані значення часу запізнення й постійної часу [7]; $\omega_{lf} = 3$ – частота зрізу ФНЧ. В (2) $y(t=0) = y_o(t)$.

Параметричні збурення – змінний коефіцієнт передачі ОК:

$$f_p(t) = k_o(t) = 1 + s_l \cdot t, \quad (18a)$$

$$f_p(t) = k_o(t) = 4 \cdot \sin(0,005 \cdot t), \quad (18б)$$

$$f_p(t) = k_o(t) = \begin{cases} 1 + 6 \cdot \sin(0,005 \cdot t), & 6 \cdot \sin(0,005 \cdot t) \geq 0 \\ 1 + 0,55 \cdot \sin(0,005 \cdot t), & 6 \cdot \sin(0,005 \cdot t) < 0 \end{cases}, \quad (18в)$$

або
$$f_p(t) = k_o(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}, \quad (18г)$$

де $s_l = 0,002$ або $s_l = -0,002$.

Координатні збурення:

$$f_k(t) = m_{fk} + \tilde{f}_k(t) = -5 + \tilde{f}_k(t), \quad (19a)$$

$$f_k(t) = m_{fk} + \tilde{f}_k(t) = \tilde{f}_k(t) - 5 + \begin{cases} 1, & t < 150 + 150 \cdot n \\ 0, & t \geq 150 + 150 \cdot n \end{cases}, \quad (19б)$$

$$f_k(t) = m_{fk} + \tilde{f}_k(t) = \tilde{f}_k(t) - 5 + \begin{cases} 1, & t < 300 + 300 \cdot n \\ -1, & t \geq 300 + 300 \cdot n \end{cases}, \quad (19в)$$

де m_{fk} – детермінована складова; $\tilde{f}_k(t)$ – випадкова складова, яка формувалася за допомогою фільтра з передатною функцією $W^{fk}(s) = \omega_{fk}^2 / (s^2 + 1,414 \cdot \omega_{fk} s + \omega_{fk}^2)$ із сигналу псевдобілого шуму при частоті зрізу $\omega_{fk} = 0,5$ рад/с; n – ціла частина від $t_{mod} / 150$, t_{mod} – час моделювання.

Високочастотні шуми $f_n(t)$ формувалися із сигналу псевдобілого шуму за допомогою смугового фільтра з передатною функцією

$$W_1^{fn}(s) = \frac{s^2}{s^2 + 1,414 \cdot 6s + 6^2} \cdot \frac{8^2}{s^2 + 1,414 \cdot 8s + 8^2} \quad (20)$$

Передатна функція інерційної частини регулятора $y(t)$:

$$W^r(s) = 1 + 1/T_{iz}s + 1/T_{iz}T_{iz1}s^2, \quad (21)$$

де $T_{iz}=3,15$, $T_{iz1}=8,33$ – постійні часу. Їхні значення, як і $k_r(t=0) = A^z = 1,63$, відповідають мінімуму інтегрального квадратичного критерію помилки регулювання. Підстави для вибору $W^r(s)$ представлені в [8]. В (3) $u(t=0) = y(t=0)/k_o(t)$.

Передатна функція моделі динаміки ОК:

$$W^m(s) = \frac{1}{(T_ms + 1)} \cdot \exp(-\tau_ms), \quad (22)$$

де $\tau_m = 1,55$; $T_m = 2$ – значення часу запізнення й постійної часу. Первісне значення τ_m дорівнює $\tau_o^{ekv} = 1,55$ «еквівалентного» ОК з урахуванням ФНЧ (17).

Передатна функція лінійних смугових фільтрів:

$$W^{bf}(s) = \frac{s^2}{s^2 + 1,414 \cdot \omega_L s + \omega_L^2} \cdot \frac{\omega_H^2}{s^2 + 1,414 \cdot \omega_H s + \omega_H^2}, \quad (23)$$

де ω_L , ω_H – частоти зрізу в низькочастотній і високочастотній області фільтрів Баттерворта [9]). Чисельні значення частот зрізів визначаються в процедурі оптимізації.

Індикатор блоку перевірки синфазності змінних:

$$u_L(t) = L(\tilde{y}_a(t), \tilde{y}_{ma}(t)) = \begin{cases} 1, \text{sgn}(\tilde{y}_a(t)) \cdot \text{sgn}(\tilde{y}_{ma}(t)) = 1 \\ 0, \text{sgn}(\tilde{y}_a(t)) \cdot \text{sgn}(\tilde{y}_{ma}(t)) = -1 \end{cases} \quad (24)$$

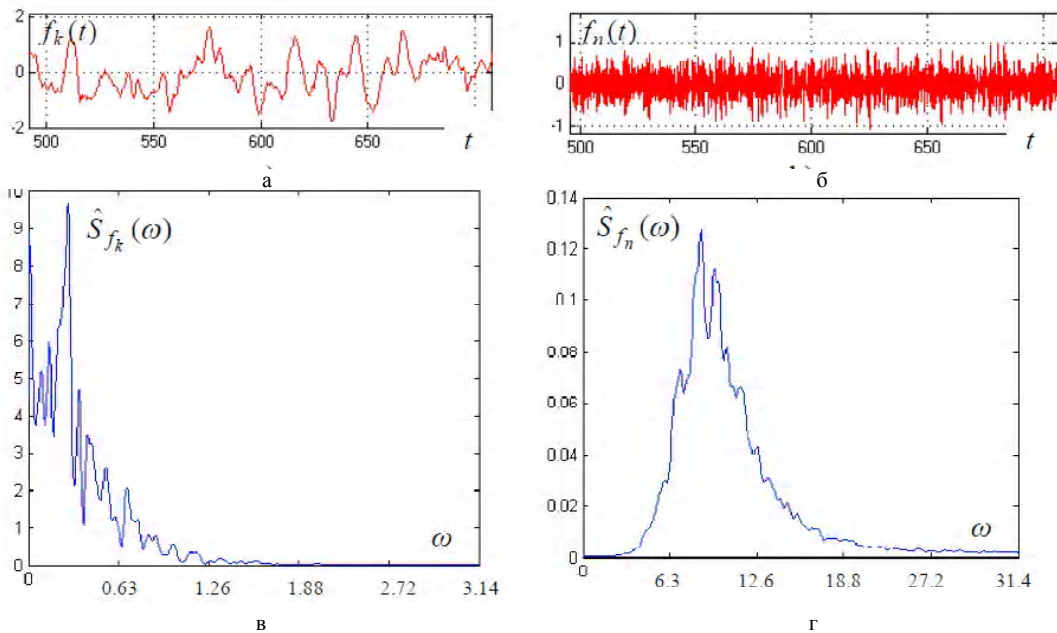


Рисунок 2 – Фрагменти реалізацій у часі (а, б) і оцінки спектральної щільності (в, г) координатних збурень $f_k(t)$ і шумів $f_n(t)$, які впливають на САР

Передатна функція осереднюючих фільтрів:

$$W^{oe}(s) = \frac{1}{(T_{oe}s + 1)} \quad (25)$$

для експонентного усереднення випадкових процесів $\tilde{y}_k^2(t)$, $\tilde{y}_{mk}^2(t)$ на ковзному інтервалі $t_{oc} = 2 \cdot T_{oe}$ і розрахунку оцінок $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t_{oc}, t)$, $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t_{oc}, t)$ [10]. Чисельне значення T_{oe} визначається в процедурі оптимізації.

Передатна функція регулятора k_m :

$$W^{Pr}(s) = k_{pr}(1 + 1/T_{izp}s + 1/T_{izp}T_{izp1}s^2), \quad (26)$$

де k_{pr} ; T_{izp} , T_{izp1} – коефіцієнт передачі й постійні часу. Їхні чисельні значення визначаються в процедурі оптимізації.

В (14) $k_m(t=0) = k_o(t=0) = 1$.

Передатна функція регулятора σ_1 :

$$W^{sd}(s) = k_{sd}(1 + 1/T_{isd}s), \quad (27)$$

де k_{sd} ; T_{isd} – коефіцієнт передачі й час ізодрому. Їхні чисельні значення визначаються в процедурі оптимізації. В (15) $u_{sd}(t=0) = 1$.

Мета проведення експериментів – визначити точність підтримки керованої змінної на заданому значенні і точність визначення поточних значень коефіцієнта передачі моделі відносно коефіцієнта передачі об’єкта керування при різних варіантах структури САРС.

Слід зазначити, що показник (17) був обраний у якості критерію при оптимізації роботи САРС. Його мінімум забезпечувався добором параметрів (23), (25)–(27) за допомогою програми Design Optimization пакета Matlab. Показник (18) служить для оцінки точності самоналагодження коефіцієнта передачі моделі $k_m(t)$ до змінного коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК. Комп’ютерні експерименти передбачали цілеспрямоване імітаційне моделювання варіантів структурних схем по рис. 1 у середовищу Simulink пакета програм Matlab.

При проведенні комп'ютерних експериментів необхідно було забезпечити попередньо прийняті умови про низькочастотний характер координатних збурень $f_k(t)$ і високочастотний характер шумів $f_n(t)$ щодо частотної області, де спостерігається власний рух САРС об'єктом технологічного типу.

Дані рисунків 2 і 3 підтверджують коректність вибору моделей збурень і шумів для даної САРС.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

1. Зменшення інерційності контуру самоналагодження. Ефект застосування зазначеного принципу ілюструє рис. 4. Він дозволяє по характеру зміни змінних $k_o(t)$, $k_m(t)$ порівняти стійкість і динамічну точність САРС вихідної структури і САРС із малоінерційним контуром самоналагодження.

Відзначимо, що даний рисунок відбиває динаміку цих варіантів системи для конкретного прикладу, тобто при впливі координатних збурень (19а), шумів (20) і при збігу динамічних властивостей моделі (22) з ОК (17). Разом з тим, характер реакції змінних САРС на зменшення ко-

ефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК був подібним для всього широкого діапазону функціонування, який розглядався при моделюванні системи. Аналіз рис. 4 показує:

– у САРС вихідної структури зміни коефіцієнта передачі моделі $k_m(t)$ у період часу, який передує зоні нестійкої роботи, носять низькочастотний характер у порівнянні зі змінами керованої змінної $y(t)$. Для розглянутого прикладу середньоквадратична частота коливань $k_m(t)$ $f_{k_m}^{ms} = 1/T_{k_m}^{ms} \approx 0,006$ Гц, а для $y(t)$ $f_y^{ms} = 1/T_y^{ms} \approx 0,1$ Гц (див. рис. 4а). Відповідно, нормовані значення середньоквадратичних періодів $T_{k_m}^{msn} = T_{k_m}^{ms} / \tau_o^{ekv} \approx 103$ і $T_y^{msn} = T_y^{ms} / \tau_o^{ekv} \approx 6,5$. При зменшенні $k_o(t)$ виникають досить тривалі відрізки часу $T_{k_m}^{ms} / 2 \approx 80$ с, на яких $k_m(t)$ під впливом координатних збурень $f_k(t)$ наближається до нуля. На цих відрізках коефіцієнт передачі $k_o(t)$ регулятора $y(t)$, який визначається обчислювачем k_p , суттєво зростає. САРС стає нестійкою, а САРС непрацездатною;

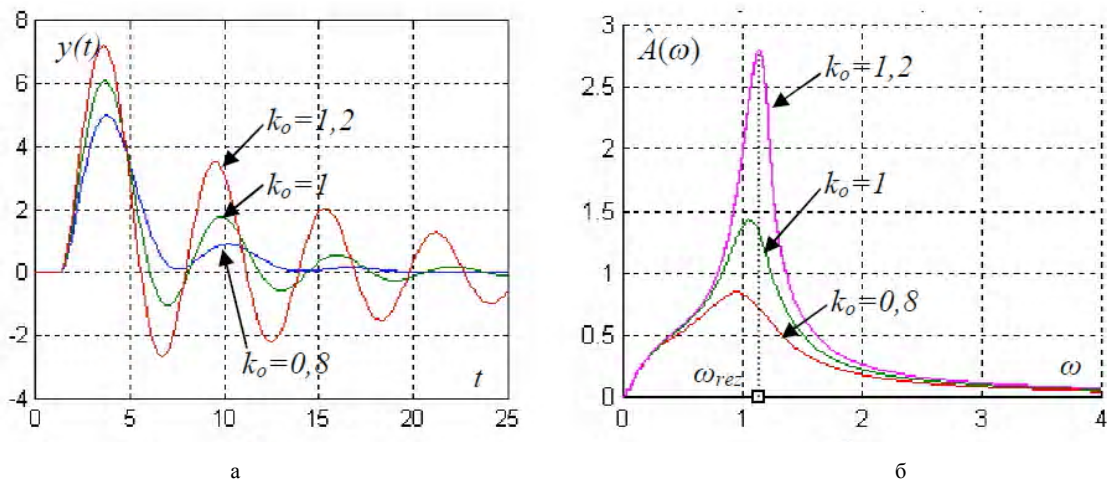


Рисунок 3 – Перехідні (а) і амплітудо-частотні (б) характеристики САРС при різних коефіцієнтах передачі k_o ОК (ω_{rez} – резонансна частота)

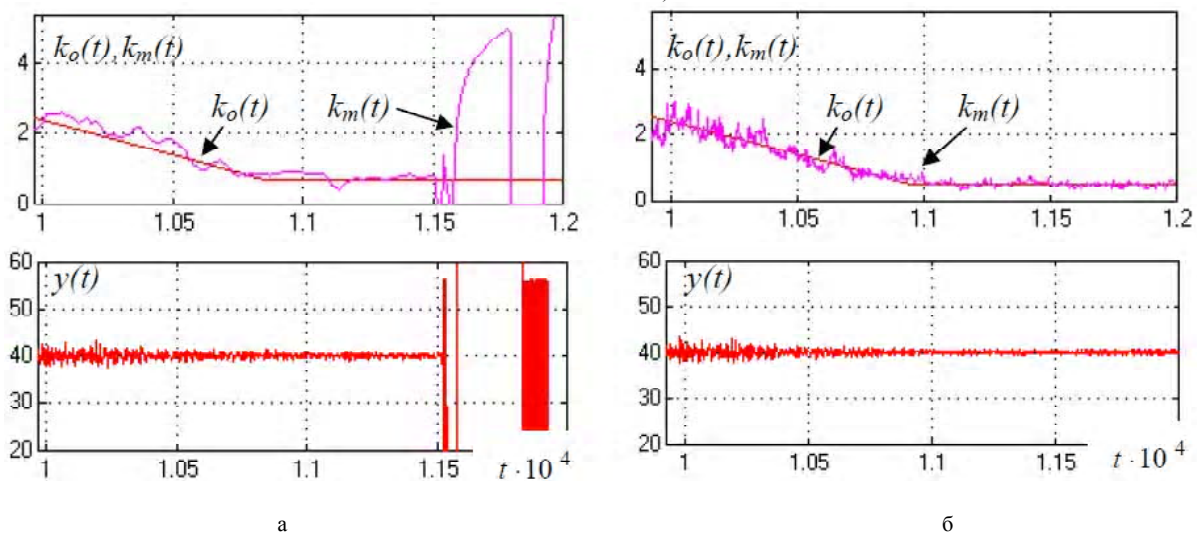


Рисунок 4 – Фрагменти змін змінних САРС на зменшення коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК:
 а – вихідної структури; б – системи із малоінерційним контуром самоналагодження

– у САРС із малоінерційним контуром самоналагодження зміни коефіцієнта передачі моделі $k_m(t)$ більш високочастотні. Для розглянутого прикладу середньоквадратична частота коливань $k_m(t)$ $f_{k_m}^{ms} = 1/T_{k_m}^{ms} \approx 0,04$ Гц, а для $y(t)$ $f_y^{ms} = 1/T_y^{ms} \approx 0,12$ Гц (див. рис. 4б). Відповідно, нормовані значення середньоквадратичних періодів $T_{k_m}^{msn} = T_{k_m}^{ms} / \tau_o^{ekv} \approx 16$ і $T_y^{msn} = T_y^{ms} / \tau_o^{ekv} \approx 5,3$. Такий же характер мають і зміни коефіцієнта передачі $k_r(t)$ регулятора $y(t)$. Короткі відрізки часу $T_{k_m}^{ms} / 2 \approx 12,5$ с, на яких спостерігається ріст $k_r(t)$, змінюються такими ж по тривалості відрізками часу, на яких $k_r(t)$ зменшується. При цьому САРС залишається стійкою, тому що ці відрізки менші за час перехідного процесу (див. рис. 3а).

2. Зменшення впливу фазових зрушень у контурі самоналагодження. Ефект застосування зазначеного принципу ілюструє рис. 5. Він дозволяє порівняти реакції змінних у системі на присутність факторів, які викликають фазові зрушення для САРС вихідної структури й САРС із зменшенням впливу фазових зрушень у контурі самоналагодження.

Щоб виключити вплив змін коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК на процес самоналагодження, експеримент проводився при постійному номінальному значенні $k_o=1$, але в присутності факторів, які викликають фазові зрушення змінних $\tilde{y}_a(t)$ і $\tilde{y}_{ma}(t)$, а саме: у складі координатних збурень $f_k(t)$ спостерігалися східчасті складові (використана модель $f_k(t)$ (19в)) і запізнення в моделі τ_m перевищувало запізнення «еквівалентного» ОК $\tau_m = 1,5 \cdot \tau_o^{ekv}$. Процес самоналагодження в САРС вихідної структури

нестійкий через зрушені по фазі коливання змінних $\tilde{y}_a(t)$ і $\tilde{y}_{ma}(t)$, які відбиваються в коливаннях помилки регулювання $e_1(t)$ контуру самоналагодження й, у підсумку, у коливаннях коефіцієнта передачі $k_r(t)$ регулятора $y(t)$ САРС (див. рис. 5а). При додаванні в структуру САРС блоку перевірки синфазності змінних і ключів з пам'яттю не синфазні зміни змінних $\tilde{y}_a(t)$ і $\tilde{y}_{ma}(t)$ блокуються й процес самоналагодження стає стійким (див. рис. 5б).

3. Стабілізація нормованої помилки контуру самоналагодження. Ефект застосування зазначеного принципу ілюструє рис. 6. Він дозволяє порівняти реакції змінних у системі вихідної структури і у САРС зі стабілізацією оцінки $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t_{oc}, t)$ і пропорційним масштабуванням $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t_{oc}, t)$, які виконують регулятор σ_1 і два блоки множення.

Аналіз рисунку 6 показує:

– у САРС вихідної структури (див. рис. 6а) при збільшенні коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК зростають абсолютні значення оцінки $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t_{oc}, t)$, а потім і коливання помилки $e_1(t)$ контуру самоналагодження, що негативно позначається на точності його роботи – зростають коливання $k_m(t)$ відносно $k_o(t)$;

– введення в структуру САРС регулятора σ_1 і блоків множення дозволяє стабілізувати змінну $\sigma_1(t)$ на заданому рівні σ^z (див. рис. 6б). Так як масштабується не тільки $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t_{oc}, t)$, але пропорційно також і $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t_{oc}, t)$, то коливання помилки $e_1(t)$, а значить і коефіцієнт передачі контуру самоналагодження, уже практично не зале-

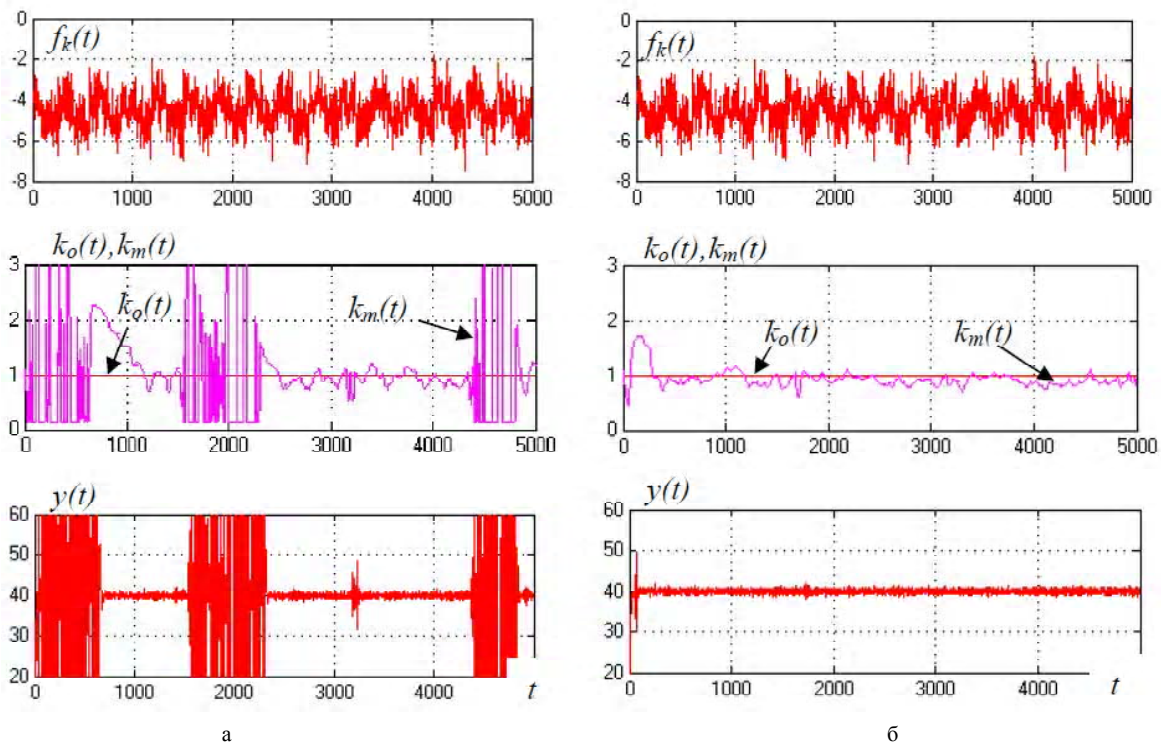


Рисунок 5 – Фрагменти змін змінних САРС на присутність факторів, які викликають фазові зрушення: а – для вихідної структури; б – для системи із зменшенням впливу фазових зрушень у контурі самоналагодження

жать від значень $k_o(t)$ ОК. Як наслідок, зростає точність даного контуру, про що можна судити за значеннями показника I_3 .

У цілому результати експериментів підтверджують, що реалізація в САРС запропонованих принципів підви-

щує стійкість і динамічну точність контуру самоналагодження. Наприклад, на рис. 7 показана робота САРС удосконаленої структури в умовах, наближених до

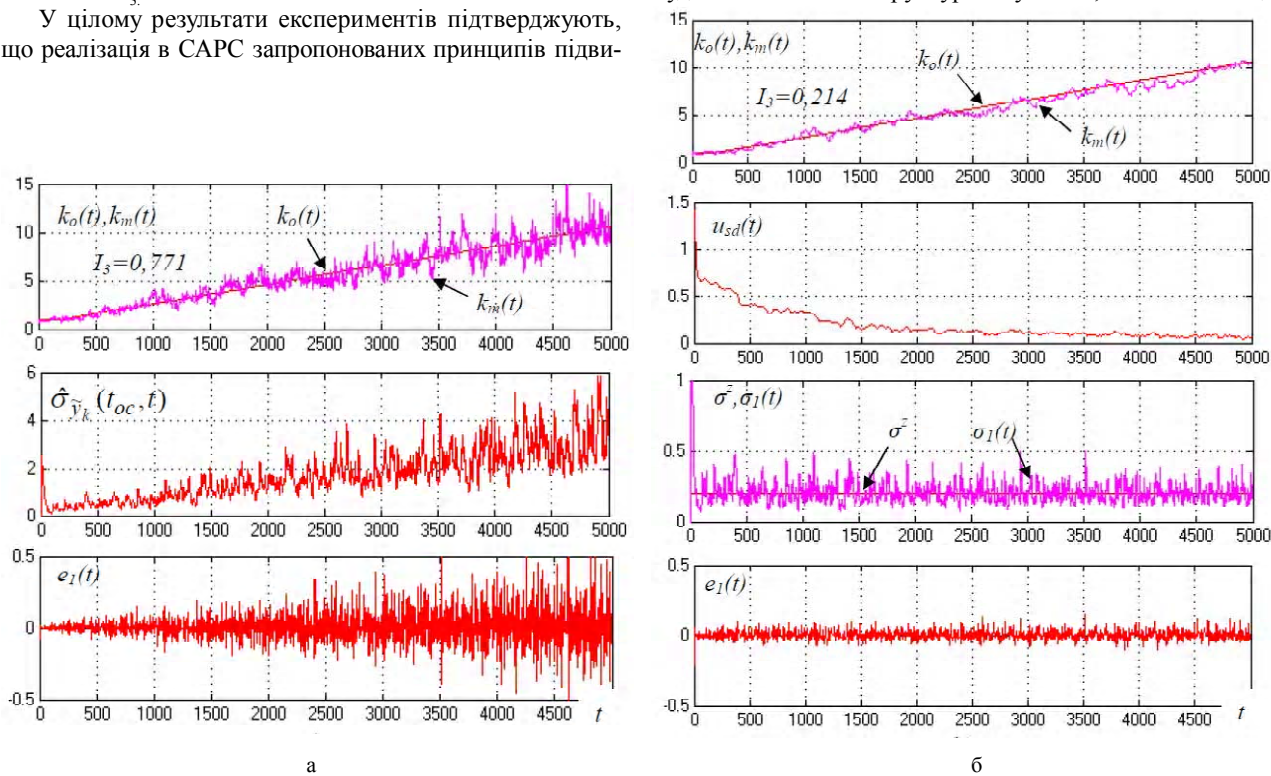


Рисунок 6 – Фрагменти змін змінних САРС:

а – вихідної структури; б – для системи зі стабілізацією нормованої помилки контуру самоналагодження

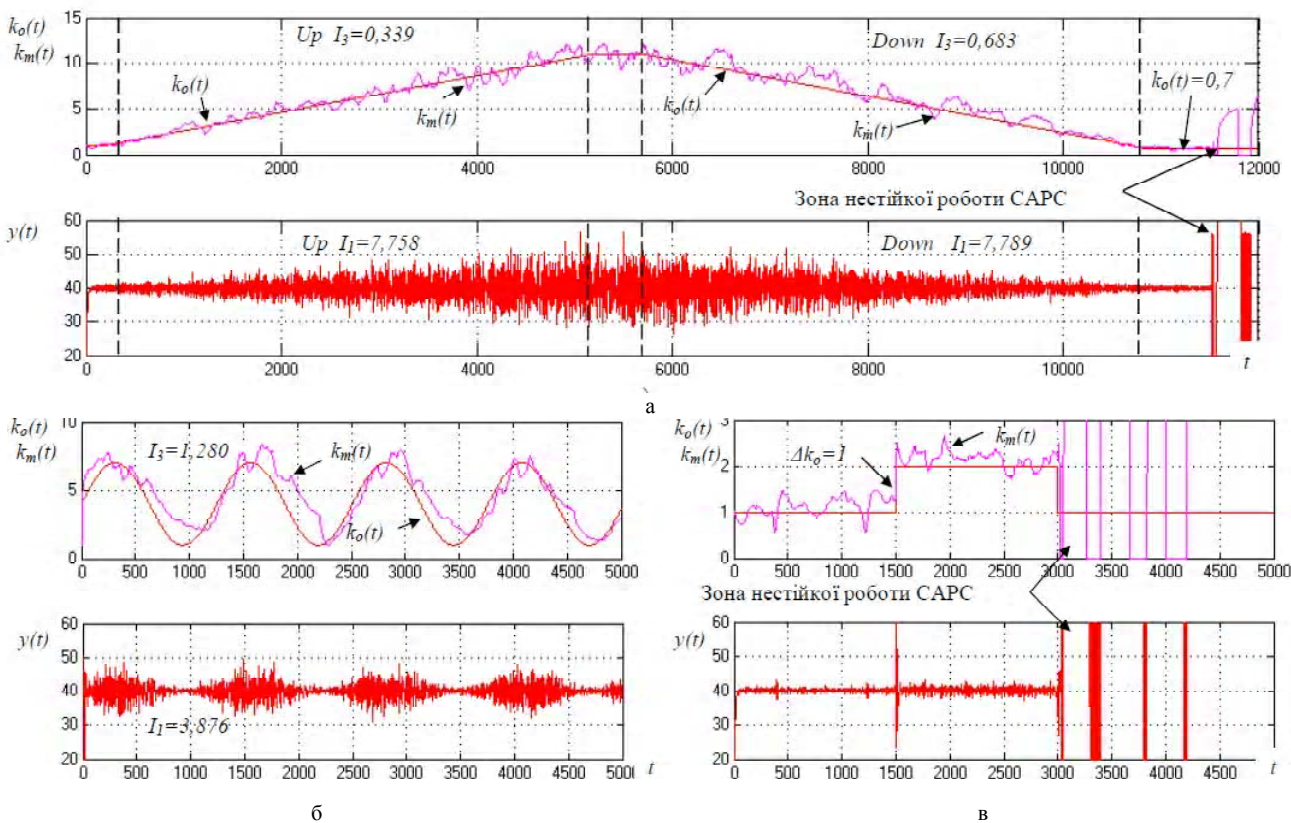


Рисунок 7 – Зміни змінних САРС в умовах, наближених до реальних, на тестові зміни коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОУ:
 а – по моделі (18а), б – по моделі (18в), в – по моделі (18г)

реальних. При моделюванні таких умов використовувалася модель координатних збурень $f_k(t)$ (19в), шумів (20) і запізнення в моделі τ_m спеціально було встановлено з перевищенням запізнення «еквівалентного» ОУ $\tau_m = 1,5 \cdot \tau_o^{ekv}$.

В усіх розглянутих випадках система виявилася стійкою, забезпечуючи прийнятні для практичного застосування показники I_1, I_3 .

6 ОБГОВОРЕННЯ

Особливо слід виділити здатність системи удосконаленої структури до роботи в умовах змін коефіцієнта передачі ОК в широкому діапазоні без необхідності переналаштувань параметрів регулятора контуру самоналагодження. Так, наприклад, САРС на рис. 7 цілком роботоспроможна при $ko(t) \in 0,45 \dots 11$. В таких самих умовах САРС вихідної структури потребує переналаштувань.

Об'єднання трьох розглянутих принципів удосконалення структури САРС підвищує не лише точність її самоналагодження, а й збільшує робастність до змін параметрів ОК та його моделі. Як показали додаткові експерименти, об'єм яких виходить за межі даної статті, розширюється діапазон змін часу запізнення ОК та його моделі, в рамках яких система залишається стійкою.

Хоча дана система розроблялась за умов, коли спектральний склад параметричних збурень (змін коефіцієнта передачі ОК) більш низькочастотний у порівнянні із спектральним складом керованої змінної, тим не менш, як показали результати експериментів, вона виявилася роботоспроможною і за умов стрибкоподібних змін коефіцієнта передачі ОК (див. рис. 7).

Моделювання достатньо повно відбиває реальні умови експлуатації САРС об'єктами керування технологічного типу. Представлені результати моделювання дозволяють на якісному й, частково, на кількісному рівні провести порівняльний аналіз варіантів розглянутих САРС і зробити висновок про їхню коректність і можливості поширення на широкий клас реальних об'єктів керування.

ВИСНОВКИ

Проведені комп'ютерні експерименти підтвердили підвищення ефективності САРС, зокрема, точності визначення коефіцієнта передачі моделі до змінного коефіцієнта передачі об'єкта керування в умовах впливу координатних збурень і шумів, а також підвищення робастності системи до варіацій параметрів збурень, об'єкта керування і його моделі за рахунок:

- а) зменшення інерційності контуру самоналагодження;
 - б) зменшення впливу фазових зрушень фільтрованих керованих змінних об'єкта і його моделі на формування оцінок їх імовірнісних характеристик;
 - в) стабілізації оцінки імовірнісної характеристики фільтрованої керованої змінної об'єкта на заданому значенні з пропорційним масштабуванням оцінки імовірнісної характеристики фільтрованої змінної його моделі.
- Реалізація зазначених принципів забезпечувалася, відповідно, за рахунок:

а) виключення з контуру самоналагодження інерційностей смугових і осереднюючих фільтрів;

б) формування оцінок імовірнісних характеристик з поточними значеннями керованих змінних при збігу їх знаків, запам'ятовування цих значень в момент розбіжності знаків, збереження їх на всьому поточному інтервалі порушень синфазності і формування по них оцінок імовірнісних характеристик;

в) одночасного пропорційного масштабування оцінок імовірнісних характеристик фільтрованої керованої змінної об'єкта і його моделі.

Ці варіанти реалізації підтвердили свою працездатність.

Спільне застосування зазначених принципів не викликає протиріч. Вони взаємно доповнюють один одного в підвищенні стійкості і динамічної точності контуру самоналагодження, в результаті чого підвищується й точність підтримки регульованої змінної на заданому значенні.

ПОДЯКИ

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

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Li Y. Patents, software and hardware for PID control: an overview and analysis of the current art / Y. Li, K. H. Ang, G. C. Y. Chong // IEEE Control Systems Magazine. – 2006. – Vol. 26, Issue 1. – P. 42–54.
2. Изерман Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. – М.: Мир, 1984. – 541 с.
3. А. с. 1241192 СССР, А1 G 05B 13/02. Самонастраивающаяся система / В.А. Хобин, А.Г. Плеве (СССР). – № 3821296/24-24; заявл. 06.12.84; опубл. 30.06.86, Бюл. 24. – 7 с.
4. Пат. 36671 Україна, МПК²⁰⁰⁶ G05B13/02. Самоналагоджувальна система / В. А. Хобин, О. А. Марчук (Україна); заявник Одеська національна академія харчових технологій. – № u200801328; заявл. 04.02.2008; опубл. 10.11.2008. Бюл. 21. – 5 с.
5. Khobin V. A. Filters research for free motion extraction in self tuning automatic control systems / V. A. Khobin, M. V. Levinskyi // ATBP journal. – 2016. – Vol. 27, Issue 3. – P. 5–16.
6. Хобин В. А. Оптимизация фильтров собственного движения самонастраивающейся САУ объектом технологического типа / В. А. Хобин, М. В. Левинский // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2016. – № 4. – С. 120–129.
7. Левінський М. В. Тестові САР для дослідження алгоритмів їх самоналаштування / М. В. Левінський // Наукові праці ОНАХТ. – 2015. – № 48. – С. 142–146.
8. Khobin V. A. Problem topicality of offset absence order increase in controllers during control of objects with varying transmission coefficient / V. A. Khobin, M. V. Levinskyi // ATBP journal. – 2016. – Vol. 26, Issue 2. – P. 31–38.
9. Титце У. Полупроводниковая схемотехника. Т. II. / У. Титце, К. Шенк. – М.: Издательство ДМК, 2007. – 942 с.
10. Куликов Е. И. Методы измерения случайных процессов / Е. И. Куликов. – М.: Радио и связь, 1986. – 282 с.

Стаття надійшла до редакції 14.03.2017.

Після доробки 18.04.2017.

Хобин В. А.¹, Левинский М. В.²

¹Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и робототехнических систем Одесской национальной академии пищевых технологий, Одесса, Украина

²Аспирант кафедры автоматизации технологических процессов и робототехнических систем Одесской национальной академии пищевых технологий, Одесса, Украина

ПРИНЦИПЫ, АЛГОРИТМЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ САМОНАСТРАИВАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТИПА

Актуальность. Самонастройка параметров регуляторов является актуальной при управлении объектами технологического типа, потому что изменения свойств сырья и энергоносителей, деградация оборудования в ходе технологического процесса меняют не только значение управляемых переменных, но и характер собственного движения систем автоматического регулирования в замкнутом контуре. В математических моделях такие влияния относят к параметрическим возмущениям и отображают их в том числе с помощью изменяющегося коэффициента передачи объекта управления. Для ряда технологических объектов управления диапазон его изменения может превышать значение десять. При этом типичные системы регулирования с неизменными параметрами регулятора теряют устойчивость и переходят в позиционный режим работы. Чтобы сохранить компромисс между показателями качества и устойчивостью процессов в системе с такими объектами, необходимо использовать самонастройку параметров регулятора.

Цель. Повышение эффективности самонастраиваемой системы управления, которая для идентификации изменяющегося коэффициента передачи объекта управления использует составляющую собственного движения.

Метод. Предлагаются усовершенствования принципов и алгоритмов работы самонастраиваемой системы, которые повышают ее устойчивость и динамическую точность. Для этого в состав исходной системы включают новые звенья и связи. Учитывая наличие в системе нелинейных и нестационарных звеньев, для ее исследования выбрано имитационное моделирование в среде Simulink пакета программ Matlab.

Результаты. Спланированы и проведены компьютерные эксперименты с моделями альтернативных структур системы для условий, которые приближены к реальным условиям ее функционирования. Проведено тестирование типовыми моделями изменений коэффициента передачи объекта. Получены графики и числовые показатели, которые характеризуют эффективность работы самонастраиваемой системы исходной и усовершенствованной структур.

Выводы. Для повышения устойчивости и динамической точности системы необходимо уменьшить инерционность ее контура самонастройки, влияние фазовых сдвигов фильтрованных переменных в этом контуре на формирование оценок вероятностных характеристик, а также влияние коэффициента передачи объекта на ошибку регулирования контура самонастройки.

Ключевые слова: самонастраиваемая САУ, коэффициент передачи, собственное движение, полосовой фильтр, оптимальный параметрический синтез.

Khobin V. A.¹, Levinskyi M. V.²

¹Dr.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

²Post-graduate of Automation of Technological Processes and Robot-Technical Systems Department of the Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine

PRINCIPLES, ALGORITHMS AND RESULTS OF EFFECTIVENESS INCREASE OF THE SELF-TUNING AUTOMATIC CONTROL SYSTEM WITH THE CONTROL OBJECT OF TECHNOLOGICAL TYPE

Context. The issue of self-tuning was and still remains relevant when controlling objects of technological type, because changing properties of raw materials and energy carriers, equipment degradation during technological process do change not only the values of the controlled variables, but also the nature of own motion of the automatic control systems (ACS) in the closed loop. In the mathematical models such impacts attribute to parametric disturbances and reflect them including with changing transition coefficient of the control object (CO). For a number of technological type CO the range of its change can exceed the value of ten. For all that typical ACS with constant controller parameters lose the stability in small and turn to position mode. To maintain a compromise between quality indicators and the processes stability in ACS of such CO, it is necessary to use self-tuning of controller parameters.

Objective. Increase of effectiveness in self-tuning automatic control system, which uses own part of motion to identify varying transition coefficient of the control object.

Method. The enhancements of principles and operating algorithms of self-tuning automatic control system (STACS) are proposed. They increase its stability and dynamic accuracy. To achieve this, new links and connections are inserted in the system. Taking into account the presence of non-linear and non-stationary links in the system, for its research the modeling in Simulink environment of the MatLab program package was chosen.

Results. Computer experiments with the models of alternative system structures were planned and carried out for the conditions, which are close to the real conditions of its operation. Testing with the typical models of CO transition coefficient change was carried out. The diagrams and numeric values, which characterize the effectiveness of STACS of initial and enhanced structures, were obtained.

Conclusions. To increase the stability and dynamic accuracy of the system, it is necessary to decrease the lag of its self-tuning loop, influence of filtered variables phase shifts in this circuit on forming the evaluations of the stochastic characteristics, as well as control object transition coefficient influence on the control error of the self-tuning loop.

Keywords: self-tuning ACS, transition coefficient, own motion, band pass filter, optimal parametric synthesis.

REFERENCES

1. Li Y., Ang K. H., Chong G. C. Y. Patents, software and hardware for PID control: an overview and analysis of the current art, *IEEE Control Systems Magazine*, 2006, Vol. 26, Issue 1, pp. 42–54.
2. Izerman R. Tsifrovyye sistemyi upravleniya. Moscow, Mir, 1984, 541 p.
3. Hobin V. A., Pleve A. G. (SSSR) A. s. 1241192 SSSR, A1 G 05B 13/02. Samonastravayuschayasya sistema. № 3821296/24-24; zayavl. 06.12.84; opubl. 30.06.86, Byul. 24, 7 p.
4. Hobin V. A., Marchuk O. A. (Ukrayina) Pat. 36671 Ukrayina, MPK2006 G05B13/02. Samonalagodzhuvalna sistema; zayavnik Odeska natsionalna akademiya harchovih tehnologiy. № u200801328; zayavl. 04.02.2008; opubl. 10.11.2008. Byul. 21, 5 p.
5. Khobin V. A., Levinskyi M. V. Filters research for free motion extraction in self tuning automatic control systems, *ATBP journal*, 2016, Vol. 27, Issue 3, pp. 5–16.
6. Hobin V. A., Levinskyi M. V. Optimizatsiya filtrov sobstvennogo dvizheniya samonastravayuscheyasya SAU ob'ektom tehnologicheskogo tipa, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 4, pp. 120–129.
7. Levinskyi M. V. Testovi SAR dlya doslidzhennya algoritmiv yih samonalashtuvannya, *Naukovi pratsi ONAHT*, 2015, No. 48, pp. 142–146.
8. Khobin V. A., Levinskyi M. V. Problem topicality of offset absence order increase in controllers during control of objects with varying transmission coefficient, *ATBP journal*, 2016, Vol. 26, Issue 2, pp. 31–38.
9. Tittse U., Shenk K. Poluprovodnikovaya shemotekhnika. T. II. Moscow, Izdatelstvo DMK, 2007, 942 p.
10. Kulikov E. I. Metodyi izmereniya sluchaynyih protsessov. Moscow, Radio i svyaz, 1986, 282 p.