

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

ОПТИМИЗАЦИЯ ФИЛЬТРОВ СОБСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ САМОНАСТРАИВАЮЩЕЙСЯ САУ ОБЪЕКТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТИПА

Технологические процессы как объекты управления характеризуются существенным запаздыванием реакции управляемых переменных на управляющие воздействия и большим количеством изменяющихся факторов, влияющих на процесс, но практически недоступных для измерения. Эти особенности на практике часто приводят к существенному ухудшению работы систем управления с типовыми алгоритмами и усложняют построение самонастраивающихся систем управления для данного типа объектов. Факторы, в зависимости от последствий их проявления на объекте управления, подразделяют на неконтролируемые координатные и параметрические возмущения. В статье рассматривается случай, когда спектральный состав параметрических возмущений является существенно более низкочастотным по сравнению со спектральным составом координатных возмущений. Факторы, вызывающие высокочастотные изменения управляемых переменных, которые не могут быть скомпенсированы управляющими воздействиями, рассматриваются как шумы. Для объектов технологического типа, у которых параметрические возмущения вызывают изменения коэффициента передачи, предложена структура самонастраивающейся системы автоматического управления. В отличие от многих известных, принцип ее работы предполагает пассивную идентификацию изменений коэффициента передачи в замкнутом контуре. Из общего движения замкнутой системы, которое возникает под влиянием координатных возмущений, с помощью полосовых фильтров выделяется составляющая собственного движения. По изменениям в спектре этой составляющей контур самонастройки определяет текущие значения коэффициента передачи объекта управления и изменяет коэффициент передачи регулятора системы стабилизации для сохранения устойчивой ее работы. Проведены компьютерные эксперименты по оценке влияния изменений спектрального состава координатных возмущений и шумов на качество самонастройки, показана возможность проведения оптимального параметрического синтеза системы, предложены рекомендации по приближенному определению параметров контура самонастройки.

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

НОМЕНКЛАТУРА

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;

ЛПФ – линейные полосовые фильтры;

ОУ – объект управления;

САУ – система автоматического регулирования;

САРС – САУ самонастраивающаяся;

САУ – система автоматического управления;

ФНЧ – фильтр низкой частоты;

A^z – константа, определяющая запас устойчивости линейной САУ;

$\hat{D}_{\tilde{y}_a}(t, \tau_{oc})$ и $\hat{D}_{\tilde{y}_{ma}}(t, \tau_{oc})$ – оценки дисперсий переменных на выходах полосовых фильтров;

$f_k(t)$ – координатные неконтролируемые возмущения;

$f_p(t)$ – параметрические неконтролируемые возмущения;

$f_n(t)$ – широкополосные шумы;

k_o – коэффициент передачи ОУ;

k_m – коэффициент передачи модели ОУ;

k_r – коэффициент передачи регулятора САУ;

t_n, t_{mod} – моменты времени, соответствующие началу и концу моделирования;

$y(t)$ – управляемая переменная, как функция времени t ;

$y^z(t)$ – заданное значение управляемой переменной;

$\tilde{y}(t)$ – составляющая $y(t)$, характеризующая собственное движение в замкнутом контуре САУ (средне-частотная);

$\bar{y}(t)$ – постоянная либо медленно меняющаяся составляющая, обусловлена $y^z(t)$ и $f_k(t)$. Когда $y^z(t)=const$ и $f_k(t)=const$, то в астатических САУ $\bar{y}(t) = y^z$;

$y_l(t)$ – составляющая $y(t)$, вызванная координатными возмущениями $f_k(t)$ (низкочастотная);

$y_n(t)$ – составляющая, вызванная шумами $f_n(t)$ (высокочастотная);

$y_m(t)$ – переменная на выходе модели ОУ;

$\tilde{y}_a(t), \tilde{y}_{ma}(t)$ – переменные на выходах полосовых фильтров;

s – оператор дифференцирования;

ω_L, ω_H – частоты срезов полосовых фильтров в низкочастотной и высокочастотной области;

τ_{oc} – скользящий интервал времени усреднения переменных.

ВВЕДЕНИЕ

Технологические процессы, как специфический тип объектов управления, имеют характерные особенности, которые отличают их от других типов: мобильного, механического, электротехнического, электронного и др. К ним, прежде всего, относятся: а) физическая распределенность каналов управления, проявляющаяся в значительных запаздываниях реакции управляемых переменных на управляющие воздействия; б) большое количество факторов, влияющих на работу ОУ, но практически недоступных для измерения (характеристики сырьевых и энергетических потоков, состояние рабо-

чих органів, поверхностей теплообміну і т. д.), проявляються як неконтрольовані координатні і параметричні порушення, які змінюють значення управляємих змінних і властивості каналів управління [1]. Ці особливості, якщо їх розглядати в контексті даної статті, суттєво ускладнюють побудову самонастроюваних систем для ОУ технологічного типу.

Розділення порушень на координатні і параметричні в значительній мірі умовно. Воно продиктовано необхідністю математичного описання і ціле-направленого аналізу САУ. К координатним відносять те порушення, які проявляються в змінах поточних значень управляємих змінних ОУ (їх координатах стану). К параметричним – те, які відображаються змінами значень параметрів в моделях ОУ. Вони не тільки змінюють значення управляємих змінних, але і, що принципово важливо, змінюють характер власного руху САУ (руху в замкнутому контурі), впливаючи на його стійкість. Як показує практика, координатні порушення обумовлюються значенно більш швидкими процесами (із перерахованих раніше), ніж параметричні порушення. Тому для розглядаємих ОУ технологічного типу спектральний склад параметричних порушень приймається суттєво більш низькочастотним по порівнянню зі спектральним складом координатних порушень.

Порушення, викликаючі достатньо високочастотні зміни управляємих змінних, які не можуть ніколи-нібудь ефективно бути компенсовані управляючим впливом в контурі зворотного зв'язку САУ, назовемо шумами. Очевидно, що таке визначення шумів включає в себе і шуми вимірювання. В моделях шуми зручно розглядати як змінну, аддитивну управляемій змінній.

Найбільш часто параметричні порушення викликають зміни коефіцієнта передачі ОУ. Відносительний діапазон його зміни може досягати і навіть перевищувати значення десяти [2]. При таких змінах коефіцієнта передачі типовий САУ з незмінними параметрами регулятора буде працювати або дуже неефективно (при налаштуванні параметрів на випадок максимального значення коефіцієнта передачі ОУ) або періодично буде втрачати стійкість. Самонастройка регулятора в цьому випадку є безальтернативним інструментом збереження компромісу між показателями якості і стійкістю процесів в системі автоматичного управління таким ОУ.

Об'єкт дослідження в даній статті – самонастроювана система автоматичного управління об'єктом технологічного типу, здатна ідентифікувати змінюючийся під впливом параметричних порушень коефіцієнт передачі об'єкта і змінювати коефіцієнт передачі регулятора системи стабілізації для збереження стійкої її роботи.

Ціль досліджень – виявити вплив змін спектрального складу координатних порушень і шумів на показники якості роботи САУ при різних параметрах блоку самонастроювання, визначити оптимальні значення цих параметрів, запропонувати рекомендації по їх приблизному визначенню.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В САУ зміни во часі регульованої змінної $y(t)$ відносно заданого значення y^* часто представляють в формі сумми змушеної складової $y_v(t)$, яка визначається властивостями зовнішніх координатних порушень $f_k(t)$, шумів $f_n(t)$, впливаючих на об'єкт управління і власної складової $y_c(t)$, залежної від параметрів ОУ і регулятора [3]:

$$y(t) = y_v(t) + y_c(t).$$

С другої сторони, зміни во часі регульованої змінної $y(t)$ можна представити в формі аддитивної моделі складових з різним спектральним складом [1]:

$$y(t) = \bar{y}(t) + y_l(t) + \tilde{y}(t) + y_n(t).$$

Зміни коефіцієнта передачі ОУ $k_o(t)$ відображаються в змінах $\tilde{y}(t)$. В випадку, коли з допомогою фільтрів, спробуємо приблизно, вдасться виділити із загального руху $y(t)$ середнечастотну складову $\tilde{y}(t)$, яка характеризує головним чином власний рух $y_c(t)$ САУ, то по змінам параметрів цієї складової можна судити про поточні значення коефіцієнта передачі $k_o(t)$ об'єкта управління.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Більшість відомих систем самонастроювання використовують спеціально організовані тестові рухи в САУ для ідентифікації поточних змін коефіцієнта передачі ОУ [4]. При цьому виникає небезпека порушень регламентів в змінах регульованої змінної ОУ і, як наслідок, – аварійних ситуацій. Відомі також самонастроювані системи з пасивною ідентифікацією в замкнутому контурі САУ [5, 6], які використовують зміни регульованої змінної ОУ, суттєво виникаючі в результаті впливу координатних порушень. Из загального руху регульованої змінної ОУ з допомогою фільтрів високої частоти виділяється компонента, спектральний склад якої характеризує власний рух САУ, і по змінам в спектрі якої судять об змінах коефіцієнта передачі ОУ. К сожалению, в [5, 6] не приведено яких-либ рекомендацій по вибору структури і параметрів фільтрів, а також критеріїв їх оптимізації.

В [7] в упрощеному варіанті при розкритому контурі самонастроювання визначено підхід к вибору структури і параметрів фільтрів для самонастроюваних САУ. В якості лінійних фільтрів для САУ рекомендовані полосові фільтри Баттерворта не нижче четвертого порядку.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Розглянемо структурну схему і принцип роботи самонастроюваної САУ (см. рис. 1). В процесі експлуатації на ОУ діють зовнішні неконтрольовані координатні $f_k(t)$ і параметричні $f_p(t)$ порушення, а також широкополосні шуми $f_n(t)$, які в загальному випадку представляють собою випадкові процеси. При зміні режимів роботи, а також внаслідок

процессов деградации оборудования изменяется, в частности, коэффициент передачи k_o ОУ. Регулятор САР стабилизирует регулируемую координату $y(t)$ на уровне y^z , частично подавляя последствия влияния координатных возмущений $f_k(t)$ на управляемую переменную $y(t)$, оставаясь работоспособным в некотором узком диапазоне изменений k_o ОУ. Для подавления шумов $f_n(t)$ в системе используется ФНЧ.

Значительные параметрические возмущения $f_p(t)$, вызывающие изменения k_o , требуют перенастройки коэффициента передачи k_r регулятора САР в реальном времени для сохранения устойчивости системы. Эту функцию в САРС выполняет блок самонастройки. В его состав входит модель ОУ, на вход которой подается управляющее воздействие $u(t)$ регулятора САР. Управляемая переменная $y(t)$ объекта и выход его модели $y_m(t)$ поступают на входы полосовых фильтров. Последние подавляют последствия влияния на $y(t)$ и $y_m(t)$ координатных возмущений $f_k(t)$ и шумов $f_n(t)$. На выходе фильтров формируются переменные $\tilde{y}_a(t)$ и $\tilde{y}_{ma}(t)$, характеризующие собственное движение САР. Вычислители оценок дисперсии на скользящем интервале времени τ_{oc} усредняют переменные $\tilde{y}_a(t)$ и $\tilde{y}_{ma}(t)$, вычисляя оценки их дисперсий $\hat{D}_{\tilde{y}_a}(t, \tau_{oc})$ и $\hat{D}_{\tilde{y}_{ma}}(t, \tau_{oc})$, которые, как показано в [7], пропорциональны текущим значениям квад-

ратов коэффициентов передачи $k_o^2(t), k_m^2(t)$ ОУ и его модели. Изменения оценки дисперсии $\hat{D}_{\tilde{y}_a}(t, \tau_{oc})$ свидетельствуют о начавшихся изменениях коэффициента передачи $k_o(t)$ ОУ.

Параметрический регулятор воспринимает сигнал разности оценок $e1(t, \tau_{oc}) = \hat{D}_{\tilde{y}_a}(t, \tau_{oc}) - \hat{D}_{\tilde{y}_{ma}}(t, \tau_{oc})$ и стабилизирует оценку дисперсии $\hat{D}_{\tilde{y}_{ma}}(t, \tau_{oc})$ модели на уровне оценки дисперсии $\hat{D}_{\tilde{y}_a}(t, \tau_{oc})$ ОУ за счет изменения коэффициента передачи $k_m(t)$ модели. Другими словами, модель ОУ и параметрический регулятор в реальном времени отслеживают изменения $k_o(t)$ ОУ и подстраивают коэффициент передачи $k_m(t)$ модели. Текущее значение $k_m(t)$, пропорциональное $k_o(t)$, с выхода параметрического регулятора поступает также на вычислитель k_r , который определяет значение коэффициента передачи $k_r(t)$ регулятора САР, исходя из постоянства произведения $A^z = k_o \cdot k_r$. Тем самым обеспечивается устойчивая работа основного контура САР при изменениях коэффициента передачи ОУ.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В структуре САРС присутствуют несколько нелинейностей, поэтому аналитическое решение задач ее анали-

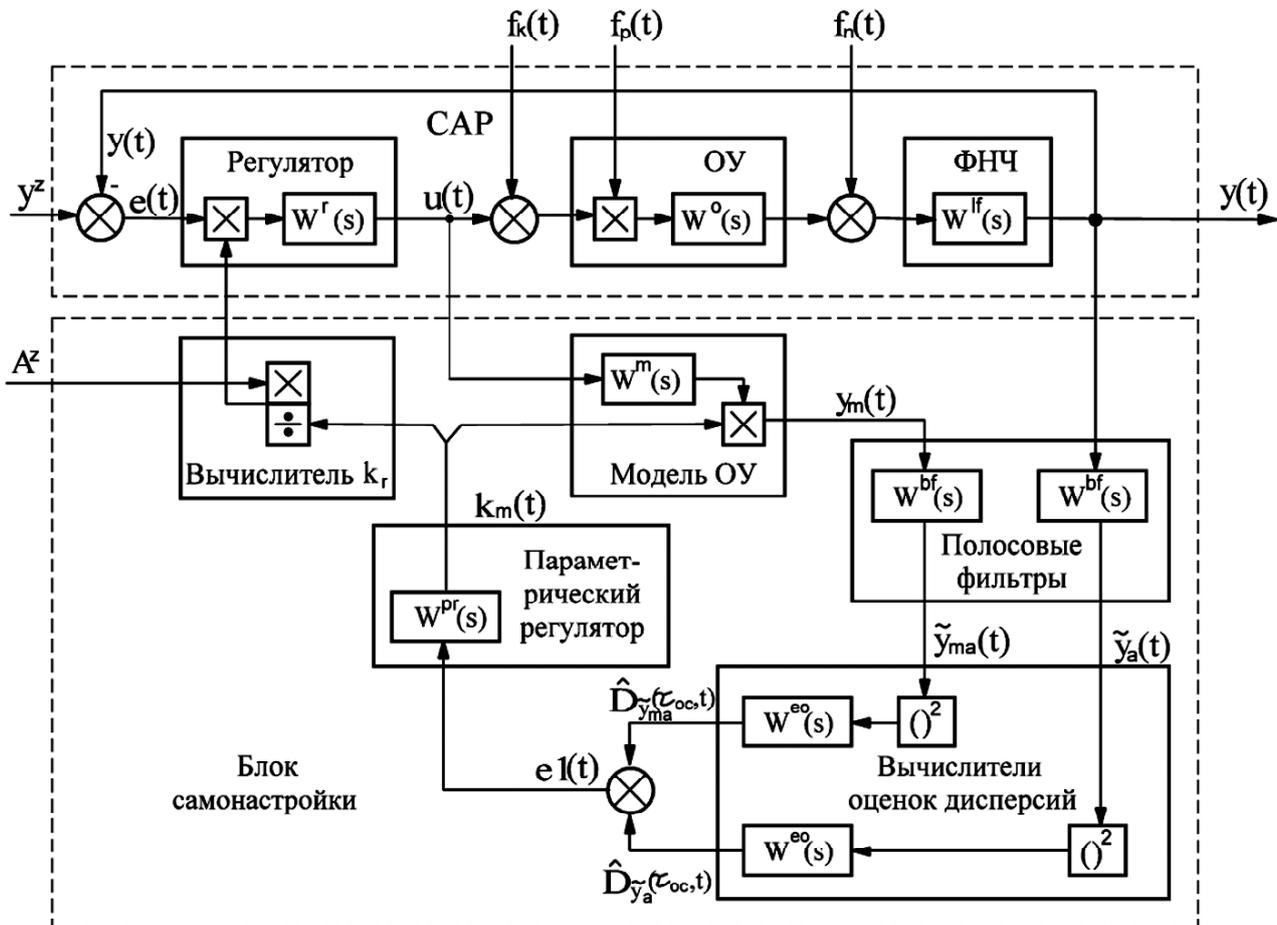


Рисунок 1 – Структурная схема САРС

за и синтез затруднено. Учывая это, инструментом для исследования САРС выбрано ее моделирование в среде Simulink/Matlab и проведен многофакторный компьютерный эксперимент.

Рассмотрим условия проведения сравнительных исследований.

Динамика ОУ представлена моделью «виртуально-го» ОУ с передаточной функцией:

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

где $\tau_o = 1$, $T_o = 1$ – значения времени запаздывания и постоянной времени, определенные согласно рекомендаций [8]. При моделировании коэффициент передачи ОУ изменялся по гармоническому закону $k_o(t) = 1 + 0,6 \sin(0,01t)$.

Передаточная функция регулятора САРС:

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

где $k_r = 1,63$; $T_{iz} = 3,15$ – значения коэффициента передачи и времени изодрома, соответствующие оптимуму интегрального квадратичного критерия ошибки регулирования.

Модели координатных возмущений по каналу « f_k - y »

$f_k(t) = m_{fk} + \tilde{f}_k(t)$:

$$m_{fk} = 1, S_{\tilde{f}_k}(\omega) = 1 / (1 + (\omega/0,25)^4), \quad (3)$$

$$m_{fk} = 1, S_{\tilde{f}_k}(\omega) = 1 / (1 + (\omega/0,5)^4), \quad (4)$$

$$m_{fk} = 1, S_{\tilde{f}_k}(\omega) = 1 / (1 + (\omega/0,75)^4), \quad (5)$$

где m_{fk} – постоянная составляющая, $f_k(t)$, $S_{\tilde{f}_k}(\omega)$ – спектральная плотность случайной составляющей $\tilde{f}_k(t)$.

Случайная составляющая $\tilde{f}_k(t)$ формировалась с помощью фильтра с передаточной функцией $W^{fk}(s) = \omega_{fk}^2 / (s^2 + \sqrt{2} \cdot \omega_{fk} s + \omega_{fk}^2)$ из сигнала псевдобелого шума при частотах среза $\omega_{fk} \in 0,25; 0,5; 0,75$ рад/с.

Высокочастотные шумы $f_n(t)$ формировались из сигнала псевдобелого шума с помощью полосового фильтра с вариантами передаточных функций:

$$W_1^{fn}(s) = \frac{s^2}{s^2 + 1,414 \cdot \omega_L s + \omega_L^2} \cdot \frac{\omega_H^2}{s^2 + 1,414 \cdot \omega_H s + \omega_H^2} = \frac{s^2}{s^2 + 1,414 \cdot 2s + 2^2} \cdot \frac{4^2}{s^2 + 1,414 \cdot 4s + 4^2}, \quad (6)$$

$$W_2^{fn}(s) = \frac{s^2}{s^2 + 1,414 \cdot 4s + 4^2} \cdot \frac{6^2}{s^2 + 1,414 \cdot 6s + 6^2}, \quad (7)$$

$$W_3^{fn}(s) = \frac{s^2}{s^2 + 1,414 \cdot 6s + 36} \cdot \frac{64}{s^2 + 1,414 \cdot 8s + 64}. \quad (8)$$

Для подавления высокочастотных шумов $f_n(t)$ в САРС использовался фильтр низкой частоты

$$W^{lf}(s) = \frac{3^2}{s^2 + 1,414 \cdot 3s + 3^2}. \quad (9)$$

Модель ОУ в контуре самонастройки:

$$W^m(s) = \frac{k_m}{(T_m s + 1)} \exp(-\tau_m s), \quad (10)$$

где k_m – настраиваемый коэффициент передачи, $\tau_m = \tau_o$, $T_m = T_o$ – значения времени запаздывания и постоянной времени.

Передаточные функции вариантов ЛПФ (взяты фильтры Баттерворта, АЧХ которых имеет горизонтальный участок в полосе пропускания [9]):

$$a) W_1^{bf}(s) = \frac{s^2}{s^2 + 1,414 \cdot \omega_L s + \omega_L^2} \cdot \frac{\omega_H^2}{s^2 + 1,414 \cdot \omega_H s + \omega_H^2}; \quad (11)$$

$$b) W_3^{bf}(s) = \frac{s^2}{s^2 + 1,848 \cdot \omega_L \cdot s + \omega_L^2} \cdot \frac{s^2}{s^2 + 0,765 \cdot \omega_L \cdot s + \omega_L^2} \times \frac{\omega_H^2}{s^2 + 1,848 \cdot \omega_H \cdot s + \omega_H^2} \cdot \frac{\omega_L^2}{s^2 + 0,765 \cdot \omega_H \cdot s + \omega_H^2}. \quad (12)$$

Оценки дисперсий $\hat{D}_{\tilde{y}_a}(t, \tau_{oc})$ и $\hat{D}_{\tilde{y}_{ma}}(t, \tau_{oc})$ определялись путем экспоненциально взвешенного усреднения случайных процессов $\tilde{y}_a^2(t)$ и $\tilde{y}_{ma}^2(t)$ на скользящем интервале усреднения $\tau_{oc} = 2 \cdot T_{oe}$ по зависимостям [10]:

$$\hat{D}_{\tilde{y}_a}(t, \tau_{oc}) = W^{eo}(s) \cdot \tilde{y}_a^2(t) = \frac{1}{T_{oe} s + 1} \cdot \tilde{y}_a^2(t),$$

$$\hat{D}_{\tilde{y}_{ma}}(t, \tau_{oc}) = W^{eo}(s) \cdot \tilde{y}_{ma}^2(t) = \frac{1}{T_{oe} s + 1} \cdot \tilde{y}_{ma}^2(t). \quad (13)$$

Передаточная функция параметрического регулятора аналогична (2):

$$W^{rp}(s) = k_{rp} \cdot (1 + 1/T_{izp} s), \quad (14)$$

где k_{rp} ; T_{izp} – коэффициент передачи и время изодрома.

Опишем планирование компьютерных экспериментов. Цель проведения экспериментов – определить влияние изменений спектрального состава внешних возмущений и шумов на показатели качества работы САРС при различных параметрах блока самонастройки. Качество оценивалось по интегральным квадратичным критериям:

$$I_1 = \int_{t_n}^{t_{mod}} e^2(t) dt / (t_{mod} - t_n), \quad (15)$$

$$I_2 = \int_{t_n}^{t_{mod}} e^{12}(t) dt / (t_{mod} - t_n), \quad (16)$$

$$I_3 = \int_{t_n}^{t_{mod}} (k_o(t) - k_m(t))^2 dt / (t_{mod} - t_n). \quad (17)$$

Следует отметить, что критерий (15) является основным, т.к. характеризует качество работы САР по значениям ошибки регулирования $e(t)$. Критерии (16), (17) – вспомогательные, и служат для оценки качества самонастройки коэффициента передачи модели $k_m(t)$ к изменяющемуся коэффициенту передачи $k_o(t)$ ОУ.

Степень близости переменных на выходах фильтров $\tilde{y}_a(t)$ и $\tilde{y}_{ma}(t)$ оценивалась по статистическому коэффициенту корреляции [11]:

$$\hat{r}_{\tilde{y}_a \tilde{y}_{ma}} = \frac{\hat{R}_{\tilde{y}_a \tilde{y}_{ma}}(\tau_k = 0)}{\hat{\sigma}_{\tilde{y}_a} \cdot \hat{\sigma}_{\tilde{y}_{ma}}} = \frac{1}{t_{\text{mod}} - t_n} \frac{\int_{t_n}^{t_{\text{mod}}} \tilde{y}_a(t) \cdot \tilde{y}_{ma}(t) dt}{\sqrt{\frac{1}{t_{\text{mod}} - t_n} \int_{t_n}^{t_{\text{mod}}} \tilde{y}_a^2(t) dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{t_{\text{mod}} - t_n} \int_{t_n}^{t_{\text{mod}}} \tilde{y}_{ma}^2(t) dt}}, \quad (18)$$

где на интервале моделирования $t_{\text{mod}} - t_n$ определены оценки: $\hat{R}_{\tilde{y}_a \tilde{y}_{ma}}(\tau_k = 0)$ – корреляционного момента при нулевом сдвиге между процессами; $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_a}$, $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_{ma}}$ – среднеквадратических отклонений переменных $\tilde{y}_a(t)$ и $\tilde{y}_{ma}(t)$.

Компьютерные эксперименты предполагают целенаправленное имитационное моделирование структур-

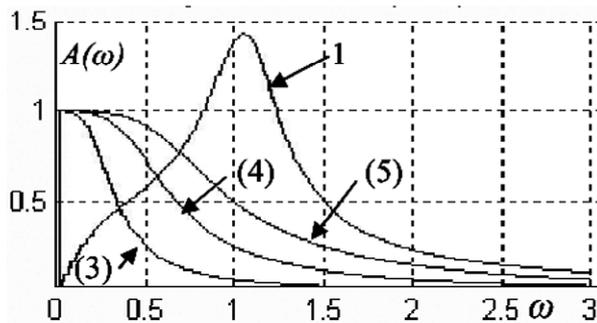
ной схемы по рис. 1 в среде Simulink пакета программ Matlab. Рассматривались варианты САР в составе «виртуального» ОУ (1), регулятора (2), фильтра низкой частоты (9) при воздействии координатных возмущений $f_k(t)$ с вариантами моделей (3), (4), (5) и шумов $f_n(t)$ с вариантами моделей (6), (7), (8). Обоснование выбора параметров моделей следует из рис. 2: модели (3), (4) $f_k(t)$ имеют низкочастотный характер по сравнению с АЧХ САР, что соответствует принятому ранее условию о низкочастотном характере координатных возмущений. Модель (5) $f_k(t)$ намерено была выбрана с нарушением данного условия. Аналогично модели (7), (8) $f_n(t)$ можно отнести к высокочастотным шумам, а модель (6) $f_n(t)$ уже занимает среднечастотную область, где располагается АЧХ САР.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

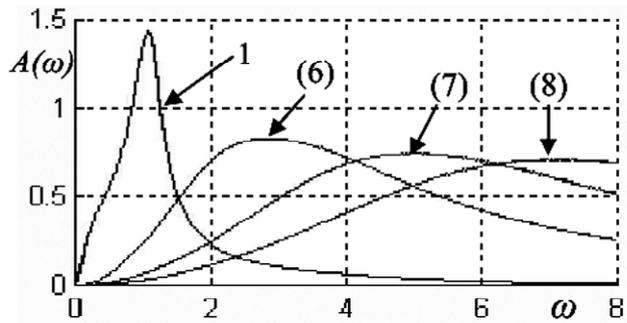
С помощью программы Design Optimization пакета Matlab/Simulink был проведен поиск зависимости

$$k_{rp}^*, T_{izp}^*, T_{oe}^*, \omega_L^*, \omega_H^* = \arg \min I_1(k_{rp}, T_{izp}, T_{oe}, \omega_H, \omega_L) \quad (19)$$

и определены оптимальные значения параметров контура самонастройки САРС k_{rp}^* , T_{izp}^* , T_{oe}^* , ω_L^* , ω_H^* при неизменных параметрах контура САР и моделях внешних воздействий (4), (7). Зафиксировав ряд параметров на уровне оптимальных значений, можно определить сечение зависимости (19) как функцию от параметра, значения которого изменяются. Как следует из рис. 3 и рис. 4, по всем сечениям (19) наблюдается экстремум – минимум I_1 .



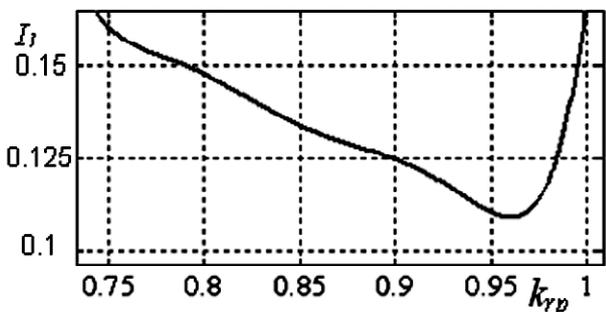
а



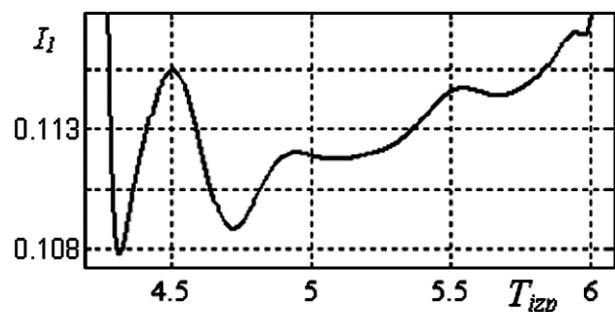
б

Рисунок 2 – АЧХ:

а – САР, б – фильтров, формирующих внешние воздействия (4)–(8)



а



б

Рисунок 3 – Зависимости критерия оптимизации I_1 (15) от параметров параметрического регулятора (14): а – k_{rp} , б – T_{izp}

Однако он находится вблизи от границы устойчивости и САРС с оптимальными параметрами $k_{rp}^*, T_{izp}^*, T_{oe}^*, \omega_L^*, \omega_H^*$ является негрубой к изменяющимся условиям функционирования. Поэтому можно принять следующую рекомендацию по выбору параметров контура самонастройки САРС: параметры $k_{rp}, T_{oe}, \omega_L, \omega_H$ следует выбирать на 10...15% меньше оптимальных, а параметр T_{izp} – на 10...15% больше.

На рис. 5 представлены АЧХ полосовых фильтров (11), (12) с оптимальными частотами срезов ω_L^*, ω_H^* , которые получены при воздействии внешних возмущений $f_k(t)$ (4) и шумов $f_n(t)$ (7). Если в результате предварительной идентификации удастся получить зависимости спектральной плотности мощности случайных процессов $f_k(t)$ и $f_n(t)$, а следовательно и модели формирующих фильтров типа (4), (7), то на основании рис. 5 можно сформулировать рекомендации по выбору настроек полосовых фильтров (11), (12), АЧХ которых должны пересекаться с АЧХ формирующих фильтров (4), (7) на уровне 0,5...0,6.

Эффективность выделения полосовыми фильтрами (11) собственного движения САРС иллюстрирует рис. 6. Следует отметить, что, невзирая на существенные вне-

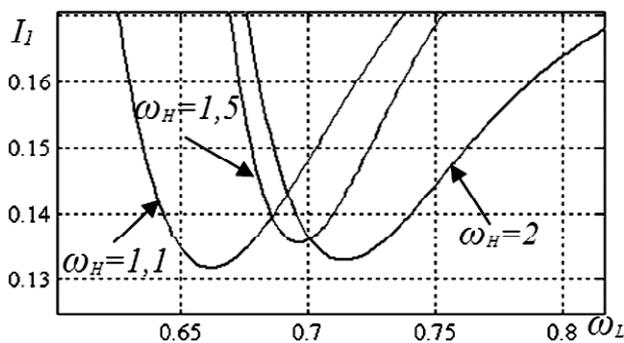
шние отличия в изменениях регулируемой переменной $y(t)$ ОУ и $y_m(t)$ его модели, после фильтрации переменные $\tilde{y}_a(t)$ и $\tilde{y}_{ma}(t)$ становятся более близкими по спектральному составу. На всех графиках оценок спектральных плотностей $\hat{S}(\omega)$ отчетливо выделяется резонансная частота ω_{rez} АЧХ САРС.

Как следует из рис. 5 и 6, в качестве рекомендаций по выбору первоначальных значений частот среза полосовых фильтров (11) можно принять $\omega_L \approx \omega_{8\tau_o} = 2\pi/8\tau_o$ и $\omega_H \approx \omega_{2\tau_o} = 2\pi/2\tau_o$.

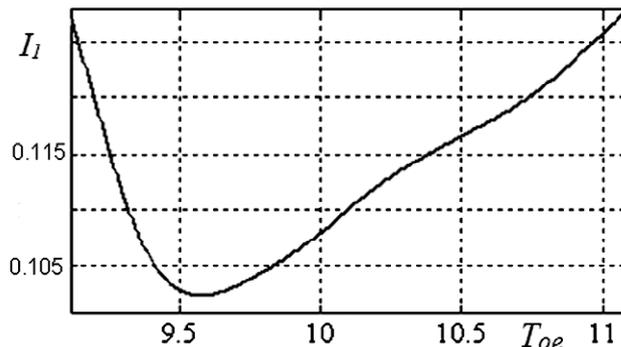
Рис. 7 позволяет провести сравнительный анализ работы САРС без самонастройки и САРС.

При изменении коэффициента передачи ОУ $k_o(t) = 1 + 0,6\sin(0,01t)$ САРС без самонастройки становится неустойчивой. САРС за счет отслеживания изменений $k_o(t) \Rightarrow k_m(t)$ и последующего перерасчета коэффициента передачи $k_r(t)$ регулятора основного контура САРС остается работоспособной.

Степень близости $k_m(t)$ к $k_o(t)$, т.е. качество самонастройки при использовании фильтров (11) можно оценить по табл. 1.

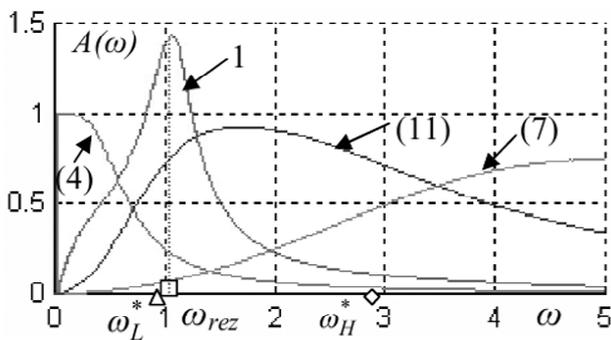


а

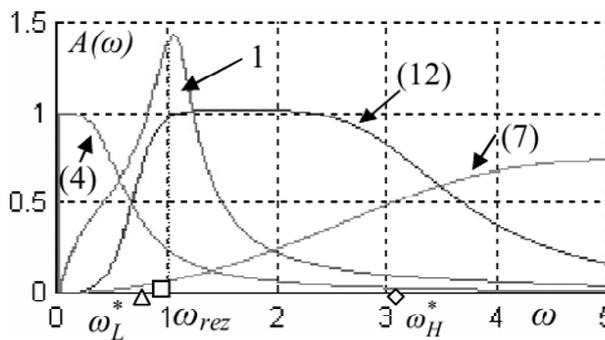


б

Рисунок 4 – Зависимости критерия оптимизации I_1 (15) от параметров:
 а – полосовых фильтров (11); б – фильтра усреднения (13)



а



б

Рисунок 5 – АЧХ: 1 – САРС, полосовых фильтров (11), (12) и фильтров (4), (7), формирующих внешние воздействия $f_k(t)$ и $f_n(t)$;
 ω_{rez} – резонансная частота АЧХ САРС, $\Delta, \diamond, \square$ – метки частот $\omega_L^*, \omega_H^*, \omega_{rez}$

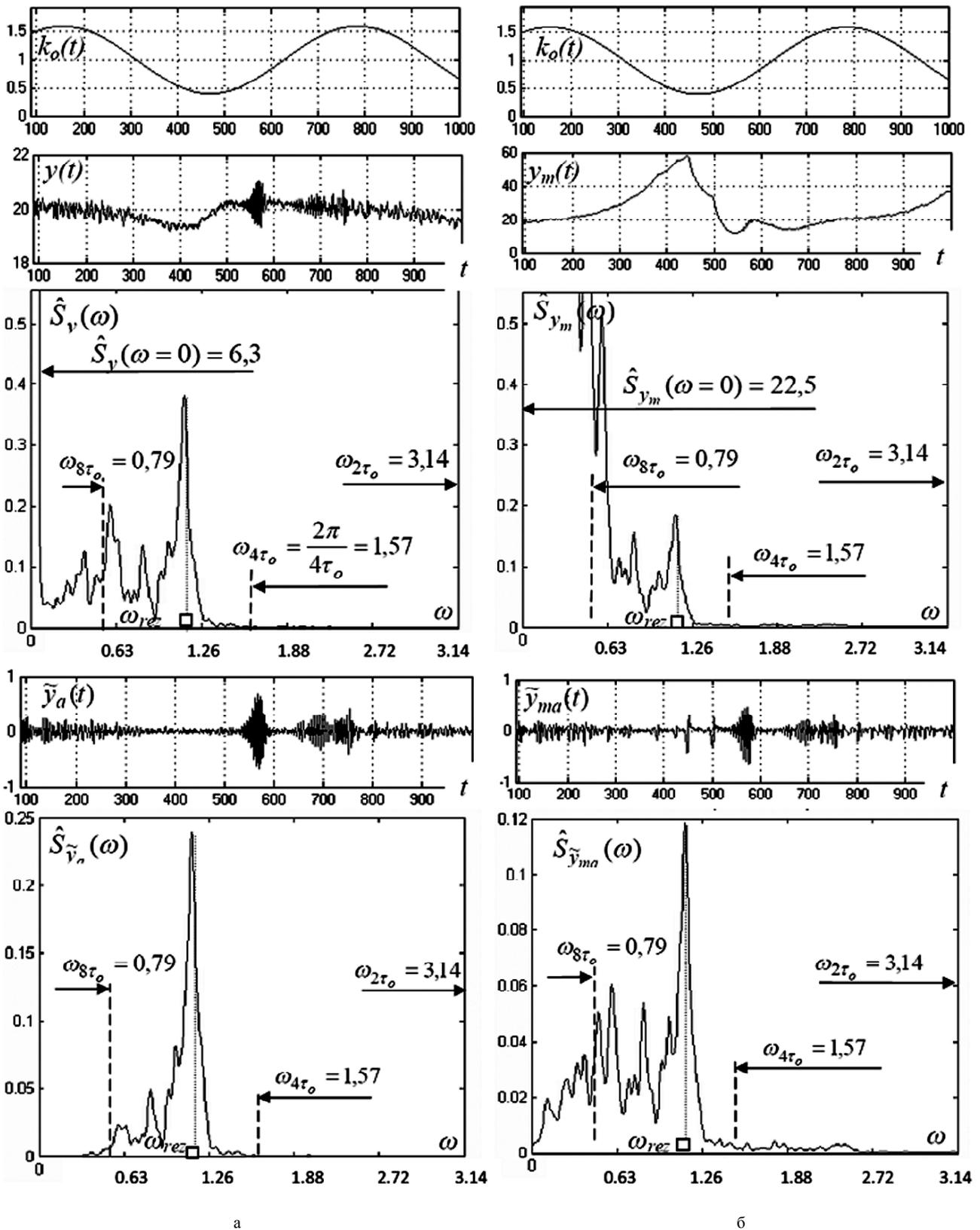


Рисунок 6 – Результаты моделирования влияния изменений коэффициента передачи $k_o(t)$ на характер изменений регулируемой переменной $y(t)$ ОУ (а) и $y_m(t)$ ее модели (б) до и после фильтрации (\square – метка ω_{rez})

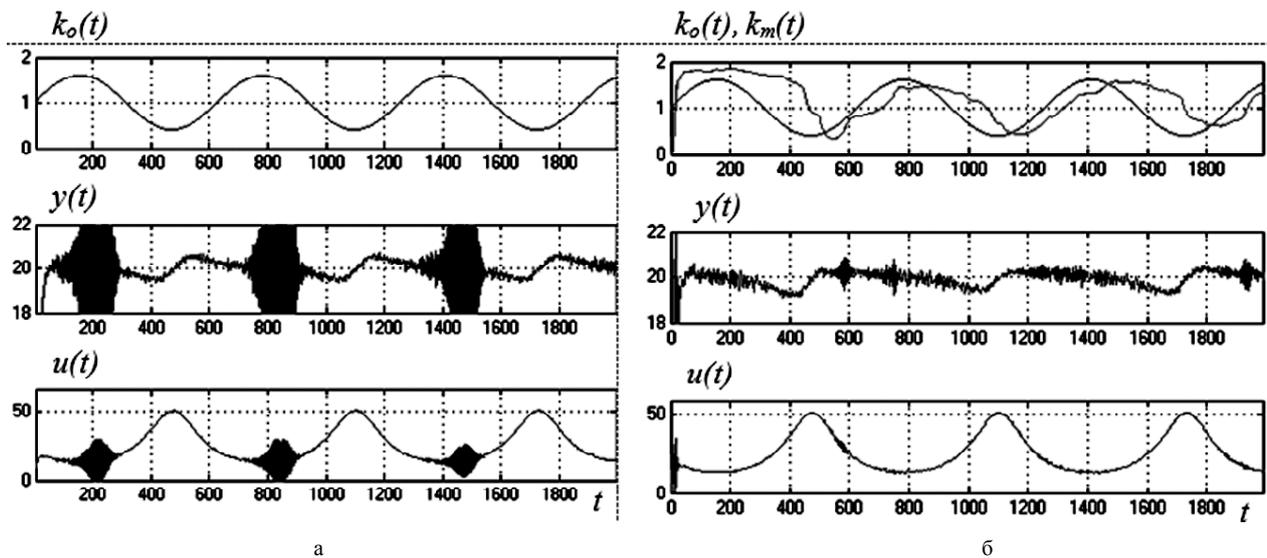


Рисунок 7 – Реализации во времени изменений координат под влиянием изменений $k_o(t)$ ОУ: а – CAP; б – CAPC

Таблица 1 – Результаты моделирования по определению влияния изменений спектрального состава координатных возмущений $f_k(t)$ и шумов $f_n(t)$ на показатели качества работы CAPC

№ варианта	Модели возмущений и шумов (см. рис. 2)	Фрагменты реализаций $k_o(t), k_m(t)$	Значения оценок критериев
1	$f_k(t) \rightarrow (4)$ $f_n(t) \rightarrow (7)$		$\hat{I}_1 = 0,108$ $\hat{I}_2 = 0,61 \cdot 10^{-3}$ $\hat{I}_3 = 0,199$ $\hat{r}_{y_a \tilde{y}_{ma}} = 0,66$
2	$f_k(t) \rightarrow (3)$ $f_n(t) \rightarrow (7)$		$\hat{I}_1 = 0,116$ $\hat{I}_2 = 0,27 \cdot 10^{-3}$ $\hat{I}_3 = 0,252$ $\hat{r}_{y_a \tilde{y}_{ma}} = 0,54$
3	$f_k(t) \rightarrow (5)$ $f_n(t) \rightarrow (7)$		$\hat{I}_1 = 0,164$ $\hat{I}_2 = 1,13 \cdot 10^{-3}$ $\hat{I}_3 = 0,318$ $\hat{r}_{y_a \tilde{y}_{ma}} = 0,7$
4	$f_k(t) \rightarrow (4)$ $f_n(t) \rightarrow (6)$		$\hat{I}_1 = 0,121$ $\hat{I}_2 = 0,64 \cdot 10^{-3}$ $\hat{I}_3 = 0,243$ $\hat{r}_{y_a \tilde{y}_{ma}} = 0,64$
5	$f_k(t) \rightarrow (4)$ $f_n(t) \rightarrow (8)$		$\hat{I}_1 = 0,12$ $\hat{I}_2 = 0,81 \cdot 10^{-3}$ $\hat{I}_3 = 0,193$ $\hat{r}_{y_a \tilde{y}_{ma}} = 0,77$

6 ОБСУЖДЕНИЯ

Вариант 1 из таблицы является опорным для сравнения, т.к. для него определялись оптимальные значения $k_{rp}^*, T_{izp}^*, T_{oe}^*, \omega_L^*, \omega_H^*$ параметров контура самонастройки. Варианты 3 и 4 иллюстрируют нарушения принятых условий о низкочастотном характере координатных возмущений $f_k(t)$ и высокочастотном характере шумов $f_n(t)$. Для работы в данных условиях САРС не предназначена. Существенное ухудшение качества самонастройки (увеличение критерия I_3) наблюдается для варианта 2, что можно объяснить снижением интенсивности координатного возмущения $f_k(t)$ (используется модель (3)), в результате чего уменьшается и составляющая собственного движения САР. Для данного варианта необходимо в дальнейшем предусмотреть совершенствование структуры параметрического регулятора. Для варианта 5 наблюдается некоторое улучшение качества самонастройки, о чем можно судить по критерию I_3 . В данном случае уменьшается влияние $f_n(t)$ на контур самонастройки по сравнению с вариантом 1.

Из рассмотренных критериев интегральный квадратичный показатель ошибки САР (15) наиболее полно характеризует качество ее работы и эффективность самонастройки. Фрагменты реализаций $k_c(t)$, $k_m(t)$ указывают на существующие неидеальности выделения собственного движения САР, а также на ухудшения качества самонастройки при уменьшении коэффициента передачи ОУ.

ВЫВОДЫ

Результаты моделирования САРС подтверждают теоретические обоснования возможности идентификации в замкнутом контуре САР изменяющегося коэффициента передачи ОУ за счет выделения собственной составляющей из общего движения регулируемой переменной, которое возникает под воздействием координатных возмущений.

Влияние параметров контура самонастройки на интегральный квадратичный показатель ошибки САР носит экстремальный характер, что делает целесообразной процедуру его оптимального параметрического синтеза.

Контур самонастройки САРС сохраняет работоспособность, в том числе устойчивость, в широком диапазоне изменений спектрального состава координатных возмущений и шумов.

Повышение эффективности самонастройки и работы САРС в целом потенциально возможно за счет отражения в алгоритмах самонастройки объективно суще-

ствующих неидеальностей выделения собственного движения САР и фактически изменяющегося коэффициента передачи контура самонастройки при изменении размаха колебаний регулируемой переменной ОУ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в соответствии с планом госбюджетной тематики научной школы «Моделирование и оптимальное управление технологическими процессами хранения и переработки сельскохозяйственной продукции» Одесской национальной академии пищевых технологий при поддержке компании С-инжиниринг, г. Одесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хобин В. А. Системы гарантирующего управления технологическими агрегатами: основы теории, практика применения / В. А. Хобин. – Одесса : «ТЭС», 2008. – 306 с.
2. Изерман Р. Цифровые системы управления: пер. англ. / Р. Изерман. – М. : Мир, 1984. – 541 с.
3. Основы автоматического регулирования / [М. А. Айзерман, Д. А. Башкиров, П. В. Бромберг и др.]; под ред. В. В. Солодовникова. – М. : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы «Машгиз», 1954. – 1117 с.
4. Александров А. Г. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов в технических системах [Электронный ресурс] / А. Г. Александров, М. В. Паленов. – Режим доступа: <http://adaplab.ru/papers/alex/UKI12.pdf>
5. Авторское свидетельство SU 1241192 A1 СССР, G 05 B 13/02. Самонастраивающаяся система / В. А. Хобин, А. Г. Плева ; заявитель Одесский технологический институт пищевой промышленности им. М. В. Ломоносова. – № 3821296/24-24; заявл. 06.12.84; опубл. 30.06.86. Бюл. 24. – 7 с.
6. Патент на корисну модель UA36671 Україна, МПК²⁰⁰⁶ G05B13/02. Самоналагоджувальна система / В. А. Хобін, О. А. Марчук (Україна); заявник Одеська національна академія харчових технологій. – № u200801328; заявл. 04.02.2008; опубл. 10.11.2008. Бюл. 21. – 5 с.
7. Khobin V. A. Filters research for free motion extraction in self tuning automatic control systems / V. A. Khobin, M. V. Levinskyi // ATBP journal. – 2016. – № 3 (27). – P. 5–16.
8. Левінський М. В. Тестові САР для дослідження алгоритмів їх самоналаштування / М. В. Левінський // Наукові праці ОНАХТ : наукове видання. – Одеса : 2015. – Вип. 48. – С. 142–146.
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.
11. Лившиц Н. А. Вероятностный анализ систем автоматического управления / Н. А. Лившиц, В. Н. Пугачев. – М. : Издательство «Советское радио», 1963. – 896 с.

Статья поступила в редакцию 24.11.2016.

После доработки 01.12.2016.

Хобін В. А.¹, Левінський М. В.²

¹Д-р техн. наук, професор, завідуючий 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

ОПТИМІЗАЦІЯ ФІЛЬТРІВ ВЛАСНОГО РУХУ САМОНАЛАГОДЖУВАЛЬНОЇ САУ ОБ'ЄКТОМ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ

Технологічні процеси як об'єкти керування характеризуються істотним запізненням реакції керованих змінних на керуючі впливи і великою кількістю мінливих факторів, які впливають на процес, але практично недоступні для виміру. Ці особливості на практиці часто приводять до істотного погіршення роботи систем керування з типовими алгоритмами й суттєво ускладнюють побудову самоналагоджувальних систем керування для даного типу об'єктів. Фактори, залежно від наслідків їх прояву на об'єкті керування, підрозділяють на неконтрольовані координатні й параметричні збурення. У статті розглядається випадок, коли спектральний склад параметричних

збурень є суттєво більш низькочастотним у порівнянні зі спектральним складом координатних збурень. Фактори, що викликають високочастісні зміни керованих змінних, які не можуть бути скомпенсовані керуючими впливами, розглядаються як шуми. Для об'єктів технологічного типу, у яких параметричні збурення викликають зміни коефіцієнта передачі, запропонована структура самоналагоджувальної системи автоматичного керування. На відміну від багатьох відомих, принцип її роботи припускає пасивну ідентифікацію змін коефіцієнта передачі в замкнутому контурі. Із загального руху замкнутої системи, який виникає під впливом координатних збурень, за допомогою смугових фільтрів виділяється складова власного руху. По змінах у спектрі цієї складової контур самоналагодження визначає поточні значення коефіцієнта передачі об'єкта керування й змінює коефіцієнт передачі регулятора системи стабілізації для збереження стійкої її роботи. Проведені комп'ютерні експерименти по оцінці впливу змін спектрального складу координатних збурень і шумів на якість самоналагодження, показана можливість проведення оптимального параметричного синтезу системи, запропоновані рекомендації з наближеного визначення параметрів контуру самоналагодження.

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

OWN MOTION FILTERS OPTIMISATION FOR SELF-TUNING ACS WITH THE TECHNOLOGICAL TYPE OF CONTROL OBJECT

Technological processes as control objects are characterized by substantial delay in controlled variables response to control action and considerable quantity of varying factors, which have influence on the process, but, practically, inaccessible for measurement. These specifics, in practice, often lead to substantial decrease in operation quality of the control system with typical algorithms and significantly make it harder to design and develop self-tuning control systems for these types of control objects. Factors, depending on the sequences of the impacts they have on the control object, are subdivided into non-controllable coordinate and parametric disturbances. In this article the case is considered, when spectral composition of parametric disturbances is substantially lower in frequency range in comparison to coordinate disturbances spectral composition. Factors, which cause high-frequency changes in controlled variables, which cannot be compensated by the control actions, are considered as noises. For control objects of technological type, in which transition coefficient changes under the influence of parametric disturbances, the structure of self-tuning automatic control system is proposed. Unlike many known, principle of its operation includes passive identification of the transition coefficient changes in the closed-loop circuit. From the overall movement of the closed-loop system, which arises under the influence of the coordinate disturbances, the part of the own motion of the system is being separated utilizing band pass filters. By detecting the changes in spectrum of this component, self-tuning loop determines current value of control object transition coefficient and changes the value of controller transition coefficient in the stabilization circuit for maintaining the stable operation of the system. Computer experiments for evaluation of how coordinate disturbances and noises spectral composition change influence the quality of self-tuning were carried out, the possibility of carrying out the optimal parametric synthesis of the system is shown, recommendations for approximate evaluation of the self-tuning loop parameters are proposed.

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

REFERENCES

1. Hobin V. A. Sistemy garantiruyuschego upravleniya tehnologicheskimi agregatami: osnovyi teorii, praktika primeneniya. Odessa, «TES», 2008, 306 p.
2. Izerman R. Tsifrovyye sistemy upravleniya: per. angl. Moscow, Mir, 1984, 541 p.
4. Aleksandrov A. G., Palyonov M. V. Sostoyanie i perspektivy razvitiya adaptivnyh PID-regulyatorov v tehniceskikh sistemah [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://adaplab.ru/papers/alex/UKI12.pdf>
5. Hobin V. A., Pleve A. G. Avtorskoe svidetelstvo SU 1241192 A1 SSSR, G 05 B 13/02. Samonastroyayushchaya sistema, zayavitel Odesskiy tehnologicheskij institut pischevoj promyshlennosti im. M. V. Lomonosova. № 3821296/24–24; zayav. 06.12.84; opubl. 30.06.86. Byul. 24, 7 p.
6. Hobin V. A., Marchuk O. A. (Ukraina) Patent na korysnu model 36671 Ukraina, MPK²⁰⁰⁶ G05B13/02. Samonalagodzhuvalna systema; zayavnyk Odeska natsionalna akademiya harchovyh tehnologij. № u200801328; zayavl. 04.02.2008; opubl. 10.11.2008. Byul. 21, 5 p.
7. Khobin V. A., Levinskyi M. V. Filters research for free motion extraction in self tuning automatic control systems, *ATBP journal*, 2016, No. 3 (27), pp. 5–16.
8. Levinskyi M. V. Testovi SAR dlya doslidzhennya algoritmu yih samonalashtuvannya, *Naukovi pratsi ONAHT: naukovye vidannya*. Odesa, 2015, Vyp. 48, pp. 142–146.
9. Tittse U., Shenk K. Poluprovodnikovaya shemotekhnika. T. II. Moscow, Izdatelstvo DMK, 2007, 942 p.
10. Kulikov E. I. Metody izmereniya sluchaynyh protsessov. Moscow, Radio i svyaz, 1986, 282 p.
11. Livshits N. A., Pugachyov V. N. Veroyatnostnyy analiz sistem avtomaticheskogo upravleniya. Moscow, Izdatelstvo «Sovetskoe radio», 1963, 896 p.