

## МЕТОД СИНТЕЗУ РАДІОТЕХНІЧНИХ СЛІДКУВАЛЬНИХ СИСТЕМ ВИСОКОЇ ТОЧНОСТІ З РОЗДІЛЕНИМИ ПРОЦЕДУРАМИ УПРАВЛІННЯ І ФІЛЬТРАЦІЇ

**Ревенко В. Б.** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки і електроніки Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова, Житомир, Україна.

**Карашук Н. М.** – канд. техн. наук, доцент, старший викладач кафедри телекомунікацій та радіотехніки Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова, Житомир, Україна.

### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** У комбінованих системах автоматичного управління (САУ) з принципом керування за збуренням виникають труднощі контролю збурень у деяких об'єктах радіотехнічних систем та дещо менша точність. Це особливо помітно, коли на об'єкт діє кілька рівноцінних збурень, врахування яких потребує підвищення складності і зменшення надійності САУ. А нехтування різко знижує точність системи. Тому є необхідність у розробці методу синтезу радіотехнічних слідкувальних систем, який усуває вказані недоліки.

**Мета.** Розробка методу синтезу автоматичних слідкувальних систем високої точності із розділеними процедурами управління та фільтрації в умовах, коли величина, яка управляється, не вимірюється (вхідний корисний вплив), при наявності збурень для побудови слідкувальних систем (особливо радіотехнічних, де вхідна корисна дія не вимірюється, а тому комбіноване управління не можливе).

**Метод.** Для досягнення мети дослідження використовувалися методи теорії автоматичного управління.

**Результати.** Показано, що в слідкувальних САУ, які працюють за відхиленням існує протиріччя між умовами роздільного синтезу фільтра оцінювання (згладжування) і фільтра (регулятора) управління.

Запропоновано рішення задачі управління і оцінювання в рамках двоконтурних систем, еквівалентних комбінованим системам. Другий контур можна представити добутком зворотної передаточної функції за помилкою першого контуру на передаточну функцію регулятора, охопленого позитивним зворотнім зв'язком, а також на зворотню передаточну функцію об'єкту управління без інтегруючих ланок. Запропоновано замість розімкнутого регулятора застосувати фільтр оцінювання з передаточною функцією замкнутого фільтра для отримання оцінки.

Характеристичний поліном двоконтурної системи автоматичного управління виключає вплив стійкого фільтра оцінювання другого контуру на стійкість всієї САУ. Поліном чисельника передаточної функції за помилкою повинен мати різницю поліномів, що забезпечує досягнення інваріантності.

Двоконтурна САУ являється еквівалентною комбінованій, так як в ній забезпечується: інваріантність помилки відносно задавальної дії без безпосереднього її вимірювання; стійкість першого контуру при стійкому другому контурі.

Синтезована двоконтурна САУ, еквівалентна комбінованій. Розрахований та побудований фільтр оцінювання, проведений аналіз впливу цього фільтра на астатизм САУ (тобто на її точність).

**Висновки.** Наукова новизна розробленого методу синтезу автоматичних слідкувальних систем високої точності із розділеними процедурами управління та фільтрації в умовах, коли величина, яка управляється, не вимірюється при наявності збурень полягає в тому, що еквівалентність комбінованим системам, на відміну від методів диференціальних зв'язків, досягається не трьома, а двома контурами управління. Практична значущість полягає в тому, що запропонований метод доцільно застосовувати для побудови слідкувальних радіотехнічних систем, де вхідна корисна дія не вимірюється при наявності зовнішніх впливів та збурень, в системах управління літальними апаратами.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** радіотехнічні слідкувальні системи; висока точність; метод синтезу; системи автоматичного управління; передаточна функція; інваріантність; пристрій управління; об'єкт управління; фільтр оцінювання; контур; регулятор.

### АБРЕВІАТУРИ

САУ – система автоматичного управління;

ПФ – передаточна функція.

### НОМЕНКЛАТУРА

$A(p)$  – поліном, який впливає на управління;

$A_1(p)$  – поліном чисельника ПФ за помилкою одноконтурної системи (рис. 2) [14];

$A_k(p)$  – поліном чисельника ПФ еквівалентної комбінованій САУ за помилкою цієї ж системи;

$B(p)$  – поліном, який впливає на оцінювання;

$B_{per2}(p)$  – поліном ПФ регулятора 2 (рис. 2) [14];

$C(p)$  – характеристичний поліном замкнутої слідкувальної САУ;

$C_1(p)$  – поліном знаменника ПФ одноконтурної системи (рис. 2) [14];

$C_k(p)$  – характеристичний поліном системи, еквівалентної комбінованій САУ;

$C_{per2}(p)$  – поліном ПФ регулятора 2 (рис. 2) [14];

$F(t)$  – невідома функція часу;

$g(t)$  – адитивна суміш задавального впливу  $x(t)$  та збурення  $f(t)$ ;

$I$  – одинична матриця;

$P_{11}(t), P_{21}(t)$  – елементи кореляційної матриці помилки фільтрації, які визначаються із відомого рівняння Рикатті [6];

$[PI - A]^{-1}$  – зворотна характеристична матриця стану, яка виражається через під'єднану матрицю  $[PI - A]^{\wedge}$ ;

$\tilde{u}(t)$  – нев'язка управління;

$W_{Oy}(p)$  – передаточна функція об'єкту управління;

$W_{per}(p)$  – передаточна функція регулятора;

$W_{\phi}(p)$  – передаточна функція фільтра;

$\hat{x}(t)$  – оцінка задавального впливу;

$\sigma_f^2$  – дисперсія збурення  $f(t)$ .

## ВСТУП

Підвищення точності автоматичних систем є однією із основних проблем теорії автоматичного управління. Найбільш перспективними в цьому відношенні є клас комбінованих систем, в яких одночасно реалізовані принципи управління за відхиленням та за задавальною дією. Значні можливості підвищення точності відтворення в цих системах пояснюються відсутністю протиріччя між умовами інваріантності та стійкості. Математичною основою побудови високоякісних комбінованих САУ, в яких можливо досягнути незалежності (інваріантності) управляємої величини від збурення та точного відтворення задавальної дії, є теорія інваріантності. Тому досягнення інваріантності без порушення стійкості дозволяє підвищити точність відтворення [3, 4, 9, 18].

Досягнення інваріантності (високої точності) без порушення стійкості систем автоматичного управління розглядається в значній кількості робіт, наприклад [1–3, 5, 7, 11–13, 15, 17–35]. Проблема адаптивного нейронного управління із слідкуванням за зворотним зв'язком за виходом для класу невизначених нелінійних систем, які не перемикаються в структурі нестроного зворотного зв'язку з середнім часом затримки, досліджується в [22]. В [23] розглянуто проблему адаптивного нейронного управління стійкого до відмов для класу нелінійних систем з невизначеною комутацією і нестрогим зворотним зв'язком із динамікою та станами, які не моделюються та не вимірюються. Адаптивні стратегії навчання нейронних мереж на основі консенсусних стратегій управління запропоновані в [26].

Адаптивне управління потребує вхідного впливу, який вимірюється. Також підвищується складність реалізації для отримання високої точності. У випадку, коли вхідний вплив не вимірюється (невідомий) адаптивні алгоритми не завжди доцільні.

Краще всього подібні задачі розв'язуються в класі комбінованих автоматичних систем, що працюють за помилкою і задавальним (збурюючим) впливом за наявності перешкод [4, 16, 31–35]. Комбінований ал-

горитм управління стендом для випробовування мікрогравітаційного середовища літального апарату може ефективно скоротити час маневру із збереженням високоточного управління, враховуючи вимоги маневру під великим кутом, запропоновано в [21].

У слідкувальних САУ, які працюють за відхиленням, існують протиріччя між умовами роздільного синтезу фільтрів оцінювання та управління [11–14].

В умовах, якщо зовнішні впливи (задавальний та збурюючий) не вимірюються, доцільно використувати теорію САУ, які еквівалентні комбінованим автоматичним системам (з точки зору інваріантності та стійкості) та реалізують метод диференціальних зв'язків, або оцінювання змінних станів розширеного об'єкту.

**Об'єктом дослідження** є автоматичні слідкувальні системи з непрямим вимірюванням зовнішніх дій.

**Предметом дослідження** – принципи та методи теорії автоматичного управління і обробки інформації.

**Метою статті** є розробка методу синтезу автоматичних слідкувальних систем високої точності із розділеними процедурами управління та фільтрації в умовах, коли величина, яка управляється, не вимірюється (вхідний корисний вплив), при наявності збурень для побудови слідкувальних систем (особливо радіотехнічних, де вхідна корисна дія не вимірюється, а тому комбіноване управління не можливе).

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

У [14] отримано умови інваріантності одноконтурної САУ (рис. 1). Зокрема передаточну функцію за помилкою управління (1) та (2), умову інваріантності (3), характеристичне рівняння (4) [14]. Показано за допомогою виразів (3), (4), що умова інваріантності входить в характеристичне рівняння, тому досягнення умов інваріантності пов'язане із зміною характеристичного рівняння, тобто із зміною коренів на комплексній площині  $p$  [14]. Тому в одноконтурній САУ не можливо досягти інваріантності без зміни стійкості системи.

Відомо, що задача синтезу слідкувальних САУ часто ставиться як задача оцінювання. Це пояснюється наступним чином:

– на вході слідкувальної САУ разом із задавальним (корисним) впливом присутні збурення та перешкоди, які необхідно відфільтрувати від задавального впливу;

– враховуючи, що в слідкувальних САУ задавальний вплив часто безпосередньо не вимірюється, необхідно даний фільтр ставити в замкнутий контур управління та синтезувати його за всіма правилами теорії оцінювання [6].

Структурна схема одноконтурної слідкувальної САУ з фільтром оцінювання всередині контуру управління показана на рис. 1.

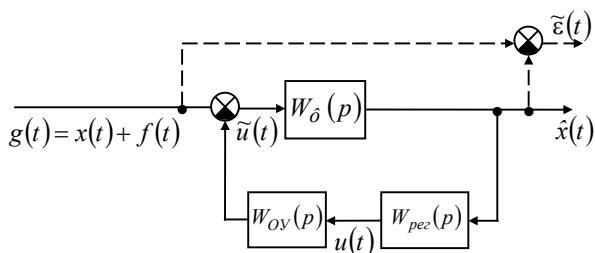


Рисунок 1 – Структурна схема одноконтурної слідкувальної САУ з фільтром оцінювання всередині контуру

Покажемо, що в слідкувальних САУ, які працюють за відхиленням, існує протиріччя між умовами роздільного синтезу фільтра оцінювання (згладжування) і фільтра (регулятора) управління.

Для цього введемо нев'язку оцінювання

$$\tilde{\varepsilon}(t) = g(t) - \hat{x}(t). \quad (1)$$

Відношення нев'язки управління  $\tilde{u}(t)$  до вхідного впливу  $g(t)$  визначимо у вигляді передаточної функції за помилкою, тобто

$$\frac{\tilde{u}(t)}{g(t)} = \frac{A(p)}{C(p)}, \quad p \equiv \frac{d}{dt}. \quad (2)$$

Відношення нев'язки оцінювання  $\tilde{\varepsilon}(t)$  до вхідного впливу  $g(t)$  визначимо аналогічно, тобто

$$\frac{\tilde{\varepsilon}(t)}{g(t)} = \frac{B(p)}{C(p)}, \quad p \equiv \frac{d}{dt}. \quad (3)$$

Із (1) маємо наступний вираз для оцінки

$$\hat{x}(t) = g(t) - \tilde{\varepsilon}(t) \quad (4)$$

яка повинна (відповідно до рис. 1) формуватися за нев'язкою управління  $\tilde{u}(t)$ .

Необхідний процес для отримання  $g(t)$  із нев'язки  $\tilde{u}(t)$  маємо із (2)

$$g(t) = \frac{C(p)}{A(p)} \tilde{u}(t), \quad p \equiv \frac{d}{dt}, \quad (5)$$

а аналогічний необхідний процес для  $\tilde{\varepsilon}(t)$  – із (3) з урахуванням (5), тобто

$$\tilde{\varepsilon}(t) = \frac{B(p)}{A(p)} \tilde{u}(t), \quad p \equiv \frac{d}{dt}. \quad (6)$$

Підставляючи праві частини (5) і (6) в (4), маємо

$$\hat{x}(t) = \frac{C(p) - B(p)}{A(p)} \tilde{u}(t), \quad p \equiv \frac{d}{dt}, \quad (7)$$

звідки передаточна функція фільтра оцінювання наступна

$$W_{\phi}(p) = \frac{C(p) - B(p)}{A(p)}. \quad (8)$$

З іншого боку, передаточна функція за помилкою (нев'язкою управління) буде

$$\frac{A(p)}{C(p)} = \frac{1}{1 + W_{\phi}(p)W_{\text{рег}}(p)W_{\text{Oy}}(p)}. \quad (9)$$

Звідки

$$A(p) + A(p)W_{\phi}(p)W_{\text{рег}}(p)W_{\text{Oy}}(p) = C(p),$$

$$W_{\text{рег}}(p) = \frac{C(p) - A(p)}{A(p)W_{\phi}(p)W_{\text{Oy}}(p)}. \quad (10)$$

Підставляючи в (10) вираз (8) для передаточної функції фільтра, маємо

$$W_{\text{рег}}(p) = \frac{C(p) - A(p)}{[C(p) - A(p)]W_{\text{Oy}}(p)}. \quad (11)$$

Із аналізу виразів (8) для фільтра та (11) для регулятора видно, що всі три поліноми  $A(p)$ ,  $B(p)$ ,  $C(p)$  входять в ці структури, що не дозволяє отримати роздільний синтез як фільтра оцінювання, так і фільтра (регулятора) управління.

Навіть якщо при синтезі регулятора будуть задіяні тільки два поліноми  $A(p)$  та  $C(p)$ , то для синтезу фільтра оцінювання буде залишатися вільним тільки поліном  $B(p)$ , що недостатньо для побудови оптимального фільтра оцінювання [6]. Тому в слідкувальних САУ, які працюють за відхиленням, існує протиріччя між умовами роздільного синтезу фільтрів оцінювання та управління.

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Відомо ряд робіт про методи синтезу регуляторів комбінованих САУ та їх місце розташування в розімкнених каналах (у зв'язках за задавальним та збудюючим впливами).

Так, наприклад, задача синтезу систем, яка дозволяє компенсувати дію збурень, сформована Г. В. Щипановим, В. С. Кулебакиним та Б. Г. Петровим вказані шляхи практичної реалізації компенсації [1, 7–9].

Методи синтезу регуляторів при компенсації зовнішніх збурень та відновленні задавальних впливів із умов досягнення інваріантності помилки відносно даних впливів розглянуті А. Г. Івахненко, Г. Ф. Зайцевим, Б. М. Менским для комбінованих САУ, а та-

кож для САУ еквівалентних комбінованим автоматичним системам (з точки зору стійкості).

Застосування величини, яка управляється (виходу системи) для побудови систем, еквівалентних комбінованим потребує додаткових апаратних затрат та вносить додаткові помилки вимірювання величини, яка управляється.

### 3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Відомо, що слідкувальна система – автоматична система, мета якої полягає у формуванні величини, яка управляється згідно з невідомою вхідною функцією часу:

$$x(t) = F(t), \varepsilon_{\text{ст}} = x(t) - y(t) \leq \varepsilon_{\text{доп}},$$

де  $F(t)$  – невідома функція часу.

У слідкувальній системі величина, що управляється, повинна слідкувати за задавальною дією, яка плавно змінюється, але є невідомою функцією часу.

В САУ для організації управління найчастіше вхідний сигнал  $x(t)$  порівнюється із сигналом зворотного зв'язку  $y_{33}(t)$ . Як правило, в слідкувальних системах реалізований принцип управління за відхиленням.

Сучасні системи автоматичного управління високої точності будуються на основі принципу комбінованого управління, тобто сполучення принципів за відхиленням та задавальною дією, за відхиленням та за збуренням, за відхиленням та задавальною дією та за збуренням та ін.

При цьому точність роботи комбінованих систем, як правило, вища, ніж у системах, де реалізується один принцип управління.

Якщо вхідна корисна дія не вимірюється (невідомо), то комбіноване управління, сполучення принципів за відхиленням (похибкою) та задавальною дією, не можливе [4, 5, 14, 18].

Відомо, що для отримання комбінованого управління  $u_k$  необхідно мати дві складові [4, 16, 18]

$$u_k = u_1(\varepsilon) + u_2(x),$$

де складова  $u_1$  залежить від похибки  $\varepsilon$  (перший контур), а  $u_2$  – від задавального впливу  $x$  (другий контур).

Враховуючи, що в системах еквівалентних комбінованим задавальний вплив безпосередньо не вимірюється, то зробимо наступним чином. Задавальний вплив  $X$  можна отримати із сигналу похибки  $\varepsilon_k$  системи, еквівалентної комбінованій САУ [10].

Використовуючи відношення

$$\frac{\varepsilon_k(p)}{X(p)} = \frac{A_k(p)}{C_k(p)},$$

отримаємо

$$X(p) = \frac{C_k(p)}{A_k(p)} \varepsilon_k(p) \quad (12)$$

У [14] розв'язання задачі управління розглянуто в рамках двоконтурних систем, еквівалентних комбінованим системам (рис. 2), в яких перший блок другого контуру здійснює операцію виведення  $x$  із  $\varepsilon_k$  за виразом (12).

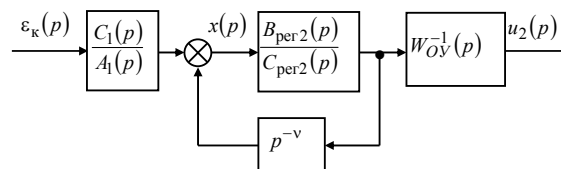


Рисунок 2 – Структурна схема розімкнутого другого контуру із замкнутим регулятором

Передаточну функцію другого регулятора (другий блок другого контуру) задано наступним виразом

$$W_{\text{рег}2}(p) = \frac{B_{\text{пер}2}(p)}{C_{\text{пер}2}(p)}. \quad (13)$$

Третій блок здійснює інверсію передаточної функції об'єкту управління  $W_{\text{OY}}(p)$ .

Отримано інваріантність без порушення стійкості першого контуру (рис. 2) [14].

Характеристичний поліном  $C_k(p)$  двоконтурної САУ має вид

$$C_k(p) = C_1(p)C_{\text{пер}2}(p). \quad (14)$$

Це усуває вплив другого контуру на стійкість першого.

Розглянута двоконтурна САУ в [14] еквівалентна комбінованій САУ, оскільки в ній забезпечуються:

інваріантність помилки відносно задавального впливу без безпосереднього його вимірювання;

стійкість першого контуру за умовою стійкого другого контуру.

До структурної схеми розімкнутого другого контуру (рис. 2) [14] з урахуванням (13), (14) та (15) відноситься добуток наступних передаточних функцій (без урахування  $W_{\text{OY}}^{-1}(p)$ ):

$$\frac{C_k(p)}{A_k(p)} W_{\text{рег}2}(p) = \frac{C_1(p)C_{\text{пер}2}(p)}{A_1(p)[C_{\text{пер}2}(p) - B_{\text{пер}2}(p)p^{-\nu}]} \frac{B_{\text{пер}2}(p)}{C_{\text{пер}2}(p)}.$$

Після ділення чисельника та знаменника на  $C_{\text{пер}2}^2(p)$  отримаємо:



$$W_{3\Phi}(p, t) = \frac{\frac{1}{C \frac{p}{1-A} K(t)}}{\left[ \frac{1}{1 + C \frac{p}{1-A} K(t)} \right]} = \frac{C[PI - A]^{-1} K(t)}{\left[ 1 + C[PI - A]^{-1} K(t) \right]} \quad (18)$$

$$[PI - A]^{-1} = \frac{[PI - A]^{\wedge}}{\Delta} \quad (19)$$

Замінивши зворотну характеристичну матрицю стану у виразі (18) на праву частину виразу (19), отримаємо

$$W_{3\Phi}(p, t) = \frac{C[PI - A]^{\wedge} K(t)}{\Delta + C[PI - A]^{\wedge} K(t)} \quad (20)$$

де чисельник

$$C[PI - A]^{\wedge} K(t) = B_{\Phi}(p, t) \quad (21)$$

– поліном чисельника оптимального фільтра, а знаменник

$$\Delta + C[PI - A]^{\wedge} K(t) = C_{\Phi}(p, t) \quad (22)$$

– поліном знаменника оптимального фільтра. Тоді різниця між поліномами фільтра

$$C_{\Phi}(p, t) - B_{\Phi}(p, t)p^{\nu} = \Delta + C[PI - A]^{\wedge} K(t) - C[PI - A]^{\wedge} K(t)p^{\nu} \quad (23)$$

Із аналізу виразу (23) випливає, що якщо б астатизм першого контуру дорівнював нулю ( $\nu = 0$ ), то вказана різниця дорівнювала  $\Delta$ .

Для випадку, який розглядається

$$\Delta = \det[PI - A] = \det \begin{bmatrix} p & -1 \\ 0 & p \end{bmatrix} = p^2 \quad (24)$$

Тоді поліном чисельника передаточної функції двоконтурної системи за помилкою

$$A_{\kappa}(p) = A_1(p)p^2 \quad (25)$$

При цьому астатизм підвищується на два порядки ( $\Delta\nu = 2$ ), тобто двоконтурна САУ рис. 4. крім розв'язання задачі оцінювання задавального впливу

приводить до підвищення астатизму на два порядки, якщо б в першому контурі не було астатизму. При цьому сам фільтр стійкий і не впливає на стійкість першого контуру. В чому легко перекопатися, якщо знайти поліном  $C_{\Phi}(p, t)$  за виразом (22).

Послідовність визначення приседнаної матриці наступна:

$$[PI - A]^T = \begin{bmatrix} p & 0 \\ -1 & p \end{bmatrix} \Rightarrow [PI - A]^{\wedge} = \begin{bmatrix} p & 1 \\ 0 & p \end{bmatrix} \quad (26)$$

Тоді відповідно до (22), (16), (24) та (26)

$$C_{\Phi}(p, t) = p^2 + K_{11}(t)p + K_{21}(t), \quad (27)$$

де

$$K_{11}(t) = \frac{P_{11}(t)}{\sigma_f^2}, \quad K_{21}(t) = \frac{P_{21}(t)}{\sigma_f^2} \quad (28)$$

елементи вагової матриці  $K(t)$ .

Характеристичний поліном двоконтурної САУ має вид

$$C_{\kappa}(p, t) = C_1(p)C_{\Phi}(p, t), \quad (29)$$

що виключає вплив стійкого фільтра оцінювання на стійкість всієї САУ.

Відповідно до поставленої задачі розглянемо вплив фільтра на точність САУ при наявності в першому контурі астатизму першого порядку ( $\nu = 1$ ).

Аналіз лівої частини виразу (23) показує, що при  $\nu = 1$  необхідно в поліномі  $B_{\Phi}(p, t)$  мати множник  $p$ . Це стає можливим, якщо передаточно функцію замкнутого фільтра помножити на похідну, яка фізично реалізується

$$\frac{\tau p}{1 + \tau p}, \quad (30)$$

тобто

$$W_{3\Phi}(p, t) = \frac{B_{\Phi}(p, t) \tau p}{C_{\Phi}(p, t) (1 + \tau p)}, \quad (31)$$

де  $C_{\Phi}(p, t)$  визначається виразом (27), а вираз для  $B_{\Phi}(p, t)$  на основі (21) прийме вигляд

$$B_{\Phi}(p, t) = K_{11}(t)p + K_{21}(t) \quad (32)$$

Тоді структурна схема розімкненого другого контуру в САУ рис. 4. прийме вигляд. рис. 6.

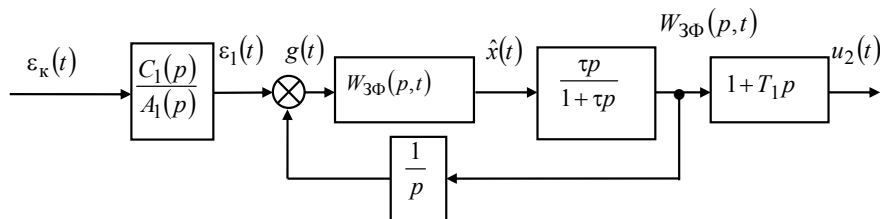


Рисунок 6 – Структурна схема розімкненого другого контуру із похідною, яка фізично реалізується

Складемо добуток наступних поліномів:

$$\begin{aligned} B_{\Phi}(p,t)\tau p &= K_{11}(t)\tau p^2 + K_{21}(t)\tau p = \\ &= B_{\text{пер}2}(p,t), \\ C_{\Phi}(p,t)(1+\tau p) &= \\ &= [p^2 + K_{11}(t)p + K_{21}(t)](1+\tau p) = \\ &= \tau p^3 + (1+\tau K_{11}(t))p^2 + (K_{11}(t) + \tau K_{21}(t))p + \\ &+ K_{21}(t) = C_{\text{пер}2}(p,t). \end{aligned}$$

Знову складемо перетворену різницю між поліномами фільтра (як ліва частина виразу (23)):

$$\begin{aligned} C_{\text{пер}2}(p,t) - B_{\text{пер}2}(p,t)p^{-1} &= \\ &= \tau p^3 + (1+\tau K_{11}(t))p^2 + (K_{11}(t) + \tau K_{21}(t))p + \\ &+ K_{21}(t) - K_{11}(t)\tau p - K_{21}(t)\tau. \end{aligned} \quad (33)$$

Якщо  $\tau = 1$  із (33) маємо

$$\begin{aligned} C_{\text{пер}2}(p,t) - B_{\text{пер}2}(p,t)p^{-1} &= \\ &= p[p^2 + (1 + K_{11}(t))p + K_{21}(t)]. \end{aligned}$$

Через наявність вільного множника  $p$ , поліном чисельника передаточної функції двоконтурної системи за помилкою має вигляд

$$\begin{aligned} A_k(p) &= A_1(p) \times \\ &\times p[p^2 + (1 + K_{11}(t))p + K_{21}(t)], \end{aligned} \quad (34)$$

що свідчить про підвищення порядку астатизму на одиницю ( $\Delta v = 1$ ). При цьому характеристичний поліном двоконтурної САУ

$$C_k(p,t) = C_1(p)C_{\Phi}(p,t)(1+\tau p), \quad (35)$$

звідки видно, що порівняно із виразом (29), в системі з'являється один новий стійкий корінь  $-1/\tau$ , який не впливає на стійкість двоконтурної САУ.

Таким чином, запропонований метод доцільно застосовувати для побудови радіотехнічних систем (в системах управління трафіком високошвидкісних мультисервісних мереж зв'язку), у системах управ-

ління літальними апаратами різного призначення (безпілотними літальними апаратами, квадрокоптерами, штучними супутниками Землі, літаками різного призначення).

## 5 РЕЗУЛЬТАТИ

Синтезована двоконтурна САУ, еквівалентна комбінованій. Розрахований та побудований фільтр оцінювання (рис. 5), проведений аналіз впливу цього фільтра на астатизм САУ (тобто на її точність). Поліноми  $B_{\Phi}(p,t)$ ,  $C_{\Phi}(p,t)$ ,  $A_k(p,t)$ ,  $C_k(p,t)$  при різних значеннях астатизму першого контуру наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Поліноми передаточних функцій САУ

$v$	0	1
$B_{\Phi}(p,t)$	$K_{11}(t)p + K_{21}(t)$	$[K_{11}(t)p + K_{21}(t)]\tau p$
$C_{\Phi}(p,t)$	$p^2 + K_{11}(t)p + K_{21}(t)$	$[p^2 + K_{11}(t)p + K_{21}(t)] \times (1 + \tau p)$
$A_k(p,t)$	$A_1(p)p^2$	$A_1(p)p[p^2 + (1 + K_{11}(t)) \times p + K_{21}(t)]$
$C_k(p,t)$	$C_1(p)C_{\Phi}(p,t)$	$C_1(p)C_{\Phi}(p,t)(1 + \tau p)$

Порівняльна оцінка ефективності синтезованої системи з існуючою проведена аналітичним методом [23, 31–35] та методом математичного моделювання, при подачі на вхід одиничного перепаду швидкості (стрибок за швидкістю). На рис. 7 наведені графіки перехідних процесів: 1 – для існуючої системи; 2 – для системи, синтезованої за даним методом.

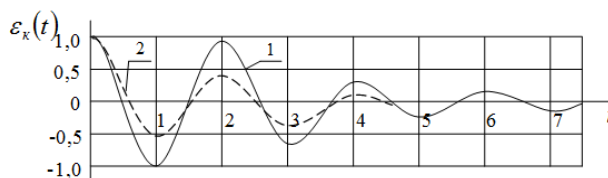


Рисунок 7 – Графіки перехідних процесів

Порівняльний аналіз показує, що при однакових умовах роботи показники якості перехідного процесу синтезованої системи вищі.

Результати моделювання слідкувальних систем з фільтрами (регуляторами) управління та оцінювання показали їх значну ефективність.

При застосуванні синтезованої двохконтурної САУ підвищується також точність супроводження, особливо маневруючих об'єктів, і тому зменшується можливість зриву супроводження.

## 6 ОБГОВОРЕННЯ

1. Запропонований метод синтезу двоконтурних систем, еквівалентних комбінованим, з розділеними процедурами управління та фільтрації, в умовах наявності одночасно як вхідного (задавального) впливу, так і зовнішніх впливів та збурень.

2. Розроблений метод дозволяє синтезувати слідкувальні САУ високої точності, еквівалентні комбінованим, в умовах, якщо управляюча величина не вимірюється (вхідна корисна дія).

3. В даному апараті побудови САУ, еквівалентність комбінованим системам, на відміну від методу диференціальних зв'язків, досягається не трьома, а двома контурами управління.

4. Розроблений метод дозволяє здійснити роздільний синтез фільтрів оцінювання у двоконтурних слідкувальних САУ, еквівалентних комбінованим.

5. Синтезована двоконтурна САУ, еквівалентна комбінованій. Розрахований та побудований фільтр оцінювання, здійснений аналіз впливу цього фільтру на астатизм САУ (тобто на її точність).

## ВИСНОВКИ

**Наукова новизна** отриманих результатів проведеного дослідження полягає в розробленні методу синтезу слідкувальних САУ високої точності, еквівалентних комбінованим, в умовах, якщо управляюча величина не вимірюється (вхідна корисна дія). Еквівалентність комбінованим системам, на відміну від методу диференціальних зв'язків, досягається не трьома, а двома контурами управління. Розроблений метод дозволяє здійснити роздільний синтез фільтрів оцінювання у двоконтурних слідкувальних САУ, еквівалентних комбінованим.

Запропонований метод доцільно застосовувати для побудови слідкувальних систем (особливо радіотехнічних, де вхідна корисна дія не вимірюється при наявності зовнішніх впливів та збурень, а тому і комбіноване управління не можливе), а також в системах управління літальними апаратами різного призначення.

**Перспективи подальших досліджень** в даному напрямку полягають у застосуванні запропонованого методу синтезу для дискретних САУ та при розробці систем управління літальними апаратами різного призначення.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Гайдук А. Р. К условиям существования абсолютно инвариантных к неизмеряемым воздействиям систем / А. Р. Гайдук // Автомат. и телемех. – 2010. – № 8 – С. 3–12.
2. Жуков В. П. О существовании инвариантных простых контуров в инвариантных множествах нелинейных динамических систем второго порядка /

В. П. Жуков // Автомат. и телемех. – 2002. – № 3 – С. 36–49.

3. Зайцев Г. Ф. Синтез дискретных систем на основе условий инвариантности по каналам оценивания и управления / Г. Ф. Зайцев, Ю. А. Пушкарев // Теория инвариантности, теория чувствительности и их применение. Тез. док. VII Всесоюзное совещ. – Москва : Институт проблем управления, 1987. – 162 с.
4. Зайцев Г. Ф. Комбинированные следящие системы / Г. Ф. Зайцев. – Київ : Техника, 1978. – 262 с.
5. Методы современной теории автоматического управления / Под общей ред. К. А. Пупкова. – Москва : МГУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 747 с.
6. Медич Дж. Статистические оптимальные линейные оценки и управление / Дж. Медич. – Москва : Энергия, 1973. – 439 с.
7. Петров Б. Н. Теория автоматического управления: Избранные труды. Т. 1. / Б. Н. Петров. – Москва : Наука, 1983. – 429 с.
8. Петров Б. Н. Управление авиационными и космическими аппаратами: Избранные труды. Т. 2. / Б. Н. Петров. – Москва : Наука, 1983. – 328 с.
9. Петров Б. Н. Принцип инвариантности в измерительной технике / Б. Н. Петров, В. А. Виктор, Б. В. Лункин. – Москва: Наука, 1976. – 239 с.
10. Пушкарев Ю. А. Анализ и синтез дискретных систем оценивания / Ю. А. Пушкарев. – Москва : МО СССР, 1989. – 350 с.
11. Пушкарев Ю. А. Новые эффективные цифровые фильтры второго и третьего порядка / Ю. А. Пушкарев, В. Б. Ревенко // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1994. – Т. 37, № 4. – С. 54–61.
12. Пушкарев Ю. А. Новый структурный метод синтеза эффективных цифровых фильтров обработки информации для автоматических следящих систем / Ю. А. Пушкарев, В. Б. Ревенко // Институт кибернетики УССР им. акад. В. М. Глушкова. Проблемы управления и информатики. – 1995. – № 1. – С. 138–148.
13. Пушкарев Ю. А. Метод конструирования следящей системы с цифровым фильтром внутри контура слежения и повышенной точностью управления / Ю. А. Пушкарев, В. Б. Ревенко // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2005. – Т. 48, № 10. – С. 29–37.
14. Ревенко В. Б. Метод синтеза следящих систем автоматического управления высокой точности / В. Б. Ревенко, Н. Н. Карашук // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. – Київ, 2021. – Вип. № 87. – С. 30–38. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2021.87.30-38>.
15. Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления / Под общей редакцией К. А. Пупкова. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 735 с.
16. Солнечный Э. М. Инвариантность и астатизм в системах без измерения возмущения / Э. М. Солнечный // Автомат. и телемех. – 2008. – № 12. – С. 76–85.
17. Уткин В. А. Инвариантность и автономность в системах с разделяемыми движениями / В. А. Уткин // Автомат. и телемех. – 2001. – Вып. 11. – С. 73–94.
18. Теория управления. Терминология. Вып. 107. – Москва: Наука, 1988. – 56 с.
19. Davison E. J. The output control of linear time-invariant systems with unmeasurable arbitrary disturbances / E. J. Davison // IEEE. Trans. – 1972. – Vol. 17, No. 5. – P. 621–630.



20. Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory / [S. Boyd, L. Ghaoui, E. Feron, V. Balakrishnan]. – Philadelphia : STAM, 1994. – 193 p.
21. Zhiming Chen. Research on High-Precision Attitude Control of Joint Actuator of Three-Axis Air-Bearing Test Bed / [Chen Zhiming, Luo Zhouhuai, Wu Yunhua et al.] // Journal of Control Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1. – P. 11. doi.org/10.1155/2021/5582541.
22. Neural network-based adaptive tracking control for switched nonlinear systems with prescribed performance: an average dwell time switching approach / [Y. Wang, B. Niu, H. Wang et al.] // Neurocomputing. – 2021. – Vol. 435. – P. 295–306. doi.org/10.1016/j.neucom.2020.10.023.
23. Ma L. Small-gain technique-based adaptive neural output-feedback fault-tolerant control of switched nonlinear systems with unmodeled dynamics / [L. Ma, N. Xu, X. Zhao et al.] // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. – 2020. – Vol. 49. – P. 1–12. doi.org/10.1109/TSMC.2020.2964822.
24. Nonfragile fault-tolerant control of suspension systems subject to input quantization and actuator fault / [J. Xiong, X. Chang, J. H. Park et al.] // International Journal of Robust and Nonlinear Control. – 2020. – Vol. 30. – P. 6720–6743. doi.org/10.1002/rnc.5135.
25. Yuan W. Adaptive backstepping sliding mode control of the hybrid conveying mechanism with mismatched disturbances via nonlinear disturbance observers / W. Yuan, G. Gao, and J. Li // Journal of Control Science and Engineering. – 2020. – Vol. 2020. – 13 p. Article ID 7376503. doi.org/10.1155/2020/7376503.
26. Jin X. Adaptive fault-tolerant consensus for a class of leader-following systems using neural network learning strategy / [X. Jin, X. Zhao, J. Yu et al.] // Neural Netw. – 2020. – Vol. 121. – P. 474–483. doi.org/10.1016/j.neunet.2019.09.028.
27. Yao X. Disturbance-observer-based fault tolerant control of high-speed trains: a Markovian jump system model approach / X. Yao, L. Wu, L. Guo // IEEE Trans Syst Man Cybernet Syst. – 2020. – Vol. 50(4). – P. 1476–1485. doi.org/10.1109/TSMC.2018.2866618.38.
28. Observer-based fixed-time continuous nonsingular terminal sliding mode control of quadrotor aircraft under uncertainties and disturbances for robust trajectory tracking: Theory and experiment / [Omar Mechaliab, Limei Xu, Ya Huang et al.] // Control Engineering Practice. – 2021. – Vol. 111. article 104806. doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104806.
29. Sharma Manmohan. Control of a quadrotor with network induced time delay / Manmohan Sharma, Indrani Kar // ISA Transactions. – 2021. – Vol. 111. – P. 132–143. doi.org/10.1016/j.isatra.2020.11.008.
30. Benjamin Kuo C. Automatic Control Systems / Kuo C. Benjamin. – Technology and Engineering, 1995. – 928 p. ISBN: 9788120309685, 9788120309685.
31. Dorf Richard C. Modern Control Systems, Global Edition. 13th Edition / Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. – Pearson (Intl), 2019. – 1032 p.
32. Ageev S. A. An Adaptive Method for Assessing Traffic Characteristics in High-Speed Multiservice Communication Networks Based on a Fuzzy Control Procedure / S. A. Ageev, A. A. Privalov, A. A. Butsanets // Intellectual control systems. – 2021. – Vol. 82. – P. 1222–1232. doi.org/10.1134/S0005117921070067.
33. Bazhenov S. G. Stability Analysis of an Airplane with MIMO Control System Based on Frequency Methods / S. G. Bazhenov, A. N. Kozyaichev, V. S. Korolev // Control sciences. – 2021. – Vol. 82. – P. 1271–1280. doi.org/10.1134/S0005117921070109.
34. Alexandrov V. A. Optimization of the Altitude and Speed Profile of the Aircraft Cruise with Fixed Arrival Time / V. A. Alexandrov, E. Yu. Zybin, M. V. Khlebnikov // Automation and Remote Control. – 2021. – Vol. 82. – P. 1169–1182. doi.org/10.1134/S0005117921070031.
35. Hien N. van. An object-oriented systems engineering point of view to develop controllers of quadrotor unmanned aerial vehicles / N. van Hien, V.-T. Truong, and N.-T. Bui // International Journal of Aerospace Engineering. – 2020. – Vol. 2020. Article ID 8862864. – 17 p. doi.org/10.1155/2020/8862864.

Стаття надійшла до редакції 07.04.2023.  
Після доробки 26.06.2023.

UDC 621.391.17

## A METHOD FOR SYNTHESIS OF HIGH PRECISION RADIO TRACKING SYSTEMS WITH SPLIT CONTROL AND FILTERING PROCEDURES

**Revenko V. B.** – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electrical Engineering and Electronics of S. P. Korolev Military Institute of Zhytomyr, Zhytomyr, Ukraine.

**Karashchuk N. N.** – PhD, Associate Professor, Senior Instructor of the Chair of Telecommunication and Radiomachinery of S. P. Korolev Military Institute of Zhytomyr, Zhytomyr, Ukraine.

### ABSTRACT

**Context.** In combined automatic control systems (ACS) with the principle of control by disturbance, there are difficulties in controlling disturbances in some objects of radio engineering systems and somewhat lower accuracy. This is especially noticeable when the object is affected by several equal disturbances. Taking them into account requires increasing the complexity and reducing the reliability of the ACS. And neglect sharply reduces the accuracy of the system. Therefore, there is a need to develop a method of synthesis of radio technical tracking systems that eliminates the indicated shortcomings.

**Objective.** The article presents a synthesis method for high precision radio tracking systems, which are equivalent to combined systems with split control and filtering procedures when the entry useful (preset) action, which is not measured and external disturbances and interferences are present simultaneously.

**Method.** Methods of automatic control theory were used to achieve the goal of the research.

**Results.** It has been demonstrated that there is a conflict between the conditions for split synthesis of the evaluation (smoothing) filter and the control filter (regulator) in automatic tracking control systems operating with deviation.

The article offers a solution to the problem of control and evaluation in the framework of two-circuit systems, which are equivalent to combined systems. The second circuit can be presented as a product of a reverse transfer function with an error in the first

circuit to the transfer function of Controller, which has a positive feedback from the operator, as well as the reverse transfer function of the control object without integrating links. It is proposed to use for evaluation an evaluation filter with closed filter transfer function instead of an open regulator.

The characteristic polynomial of a two-circuit automatic control system (ACS) excludes the influence of the stable second-circuit evaluation filter on the stability of the entire ACS. The polynomial of the numerator of the transfer function must have the difference of polynomials by error, which ensures the achievement of invariance.

A double-circuit ACS is equivalent to a combined one, since it provides the following: invariance of the error with respect to the preset action without directly measuring it; stability of the first circuit with a stable second circuit.

The synthesized double-circuit ACS is equivalent to a combined one. The author has calculated and constructed the evaluation filter, the influence of this filter on ACS astatism (i. e., on its accuracy) has been analyzed.

**Conclusions.** The scientific novelty of the developed method of synthesis of high-precision automatic tracking systems with separate control and filtering procedures in conditions where the controlled value is not measured in the presence of disturbances is as follows. Equivalence to combined systems, in contrast to the methods of differential connections, is achieved not by three, but by two control loops. The practical significance lies in the fact that the proposed method is advisable to use for the construction of surveillance radio engineering systems, where the input useful effect is not measured in the presence of external influences and disturbances. In aircraft control systems.

**KEYWORDS:** radio tracking systems; high precision; synthesis method; automatic control systems; transfer function; invariance; control device; control object; evaluation filter; contour; regulator.

### REFERENCES

- Gaiduk A. R. To the conditions for the existence of systems absolutely invariant to unmeasured influences, *Automation and telemekhanics*, 2010, Iss. 8, pp. 3–12. (in Russian).
- Zhukov V. P. On the existence of invariant simple contours in invariant sets of second-order nonlinear dynamical systems, *Automation and telemekhanics*, 2002, Iss. 3, pp. 36–49. (in Russian).
- Zaitsev G. F. and Pushkarev Yu. A. Sintez diskretnykh sistem na osnove uslovii invariantnosti po kanalakh otsenivaniya i upravleniya, *Teoriya invariantnosti, teoriya chuvstvitel'nosti i ikh primenenie. Tez. dok. VII Vsesoyuznoe soveshch.* Moscow, Institut problem upravleniya, 1987, 162 p. (in Russian).
- Zaitsev G. F. Kombinirovannye sledyashchie sistemy. Kyiv, Equipment Publ., 1978, 262 p. (in Russian).
- Pupkov K. A. Metody sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya. Moscow, State University N. E. Bauman, 2000, 747 p. (in Russian).
- Medich Dzh. Statisticheskiye optimalnyye lineynyye otsenki i upravleniye. Moscow, Energiya, 1973, 439 p. (in Russian).
- Petrov B. N. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: Izbrannyye trudy. Vol.1. Moscow, Nauka, 1983, 429 p. (in Russian).
- Petrov B. N. Upravlenie aviatsionnymi i kosmicheskimi apparatami: Izbrannyye trudy, Vol. 1. Moscow, Nauka, 1983, 328 p. (in Russian).
- Petrov B. N., Viktorov V. A. and Lunkin B. V. Printsip invariantnosti v izmeritel'noi tekhnike. Moscow, Nauka, 1976, 239 p. (in Russian).
- Pushkarev Yu. A. Analiz i sintez diskretnykh sistem otsenivaniya. MO SSSR, 1989, 350 p. (in Russian).
- Pushkarev Yu. A. and Revenko V. B. New efficient digital filters of the second and third order, *Izv. universities. Radioelectronics*, 1994, Vol. 37, Iss. 4. (in Russian).
- Pushkarev Yu. A. and Revenko V. B. A new structural method for the synthesis of effective digital filters for information processing for automatic tracking systems. Institute of Cybernetics of the Ukrainian SSR named after acad. V.M. Glushkova. Problems of management and informatics, 1995, Iss. 1, pp. 138–148. (in Russian).
- Pushkarev Yu. A. and Revenko V. B. () Tracking system design method with a digital filter inside the tracking loop and increased control accuracy. *Izv. universities. Radioelectronics*, 2005, Vol. 48, Iss. 10, pp. 29–37. (in Russian).
- Revenko V. B. and Karashchuk N. N. () Method for Synthesis of High Precision Servo Systems, *Bulletin of NTUU KPI Radio Engineering Series. Radioequipment construction*. Kyiv, 2021, Iss. 87, pp. 30–38. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2021.87.30-38>. (in Ukraine).
- Punkova K. A. () Sintez regulatorov i teoriya optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniya. Moscow, State University N. E. Bauman, 2000, 735 p. (in Russian).
- Solnechniy E. M. Invariance and astatism in systems without disturbance measurement, *Automation and telemekhanics*, 2008, Iss. 12, pp. 76–85. (in Russian).
- Utkin V. A. () Invariance and autonomy in systems with shared motions, *Automation and telemekhanics*, 2001, Iss. 11, pp. 73–94. (in Russian).
- Teoriya upravleniya, *Terminologiya*. Moscow, Nauka, 1988 Vol. 107, 56 p. (in Russian).
- Davison E. J. () The output control of linear time-invariant systems with unmeasurable arbitrary disturbances, *IEEE Trans.*, 1972, Vol. 17, Iss. 5, pp. 621–630. (in English).
- Boyd S., Ghaoui L., Feron E. and Balakrishnan V. Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. Philadelphia, STAM, 1994, 193 p. (in English).
- Zhiming Chen, Zhouhuai Luo, Yunhua Wu, Wei Xue, Wenxing Li Research on High-Precision Attitude Control of Joint Actuator of Three-Axis Air-Bearing Test Bed. *Journal of Control Science and Engineering*, 2021, Vol. 1, P. 11. (in India). [doi.org/10.1155/2021/5582541](https://doi.org/10.1155/2021/5582541).
- Wang Y., Niu B., Wang H. et al. Neural network-based adaptive tracking control for switched nonlinear systems with prescribed performance: an average dwell time switching approach. *Neurocomputing*, 2021, Vol. 435, pp. 295–306. (in China). [doi.org/10.1016/j.neucom.2020.10.023](https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.10.023).
- Ma L., Xu N., Zhao X., Zong G., and Huo X. (2020) Small-gain technique-based adaptive neural output-feedback fault-tolerant control of switched nonlinear systems with unmodeled dynamics, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol. 49, pp. 1–12. (international). [doi.org: 10.1109/TSMC.2020.2964822](https://doi.org/10.1109/TSMC.2020.2964822).
- Xiong J., Chang X., Park J. H. et al. () Nonfragile fault-tolerant control of suspension systems subject to input quantization and actuator fault, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2020, Vol. 30, pp. 6720–6743. (international). [doi.org/10.1002/rnc.5135](https://doi.org/10.1002/rnc.5135).
- Yuan W., Gao G., and Li J. Adaptive backstepping sliding mode control of the hybrid conveying mechanism with mismatched disturbances via nonlinear disturbance observ-

- ers. *Journal of Control Science and Engineering*, 2020, Vol. 2020, 13 pages, Article ID 7376503. (in India). doi.org/10.1155/2020/7376503.
26. Jin X., Zhao X., Yu J., Wu X., Chi J. Adaptive fault-tolerant consensus for a class of leader-following systems using neural network learning strategy, *Neural Netw*, 2020, Vol. 121. pp. 474–483. (international). doi.org/10.1016/j.neunet.2019.09.028.
27. Yao X., Wu L., Guo L. (2020) Disturbance-observer-based fault tolerant control of high-speed trains: a Markovian jump system model approach. *IEEE Trans Syst Man Cybernet Syst*. Vol. 50 (4). pp. 1476–1485. doi.org/10.1109/TSMC.2018.2866618.38.
28. Mechaliab Omar, Xu Limei, Huang Ya, Shi Mengji, Xie Xiaomei Observer-based fixed-time continuous nonsingular terminal sliding mode control of quadrotor aircraft under uncertainties and disturbances for robust trajectory tracking: Theory and experiment, *Control Engineering Practice*. 2021, Vol. 111. article 104806. (international IFAC) doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104806.
29. Sharma Manmohan, Indrani Kar Control of a quadrotor with network induced time delay, *ISA Transactions*, 2021, Vol. 111, pp. 132–143. (in USA). doi.org/10.1016/j.isatra.2020.11.008.
30. Benjamin Kuo C. *Automatic Control Systems*. Published by PHI LEARNING PVT LTD: Technology and Engineering, 928 p. ISBN: 9788120309685, 9788120309685. (in China).
31. Richard C. Dorf, Robert H. Bishop *Modern Control Systems*, Global Edition. 13th Edition. Pearson (Intl), 2019, 1032 p. (in USA).
32. Ageev S. A., Privalov A. A., Butsanets A. A. An Adaptive Method for Assessing Traffic Characteristics in High-Speed Multiservice Communication Networks Based on a Fuzzy Control Procedure. *Intellectual control systems*, 2021, Vol. 82, pp. 1222–1232. (in Russian). doi.org/10.1134/S0005117921070067.
33. Bazhenov S. G., Kozyaichev A. N., Korolev V. S. () Stability Analysis of an Airplane with MIMO Control System Based on Frequency Methods, *Control sciences*, 2021, Vol. 82, pp. 1271–1280. (in Russian). doi.org/10.1134/S0005117921070109.
34. Alexandrov V. A., Zybin E. Yu., Khlebnikov M. V. (2021) Optimization of the Altitude and Speed Profile of the Aircraft Cruise with Fixed Arrival Time. *Automation and Remote Control*. Vol. 82. pp. 1169–1182. (in Russian). doi.org/10.1134/S0005117921070031.
35. Hien N. van, Truong V.-T. and Bui N.-T. An object-oriented systems engineering point of view to develop controllers of quadrotor unmanned aerial vehicles. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2020, Vol. 2020. Article ID 8862864. 17 p. (international). doi.org/10.1155/2020/8862864.