

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Ляпа Микола Миколайович

УДК 681.513.3

СИНТЕЗ КВАЗІОПТИМАЛЬНИХ ЗА ШВИДКОДІЄЮ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ДЛЯ ЗАСОБІВ КУТОВОГО СУПРОВОДЖЕННЯ

05.13.03 – системи і процеси керування

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Харків - 2001

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському військовому Двічі Орденів Червоного Прапора інституті артилерії імені Богдана Хмельницького Міністерства оборони України при Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент
Кобяков Олександр Миколайович,
Сумський військовий інститут артилерії
при Сумському державному університеті,
старший викладач кафедри будови та експлуатації
ракетно – артилерійського озброєння.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Путятін Євгеній Петрович, Харківський Національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри інформатики;
доктор технічних наук, професор Стенін Олександр Африканович, Національний технічний університет України “КПІ”, професор кафедри технічної кібернетики.

Провідна установа:

Національний аерокосмічний університет імені М.С.Жуковського “ХАІ”, кафедра систем управління літальними апаратами, Міністерство освіти і науки України, м. Харків.

Захист відбудеться “ 22 ” січня 2002 р. о 13⁰⁰ годині
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.02 у
Харківському

Національному університеті радіоелектроніки за адресою:
61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці університету за адресою:
61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий “ 17 ” грудня 2001 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Безкоровайний В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Аналіз та синтез ефективних та високоякісних систем автоматичного керування, що працюють у широкому діапазоні задаючих дій, пов'язаний з розв'язуванням багатомірної поліекстремумної задачі оптимізації на основі сучасних методів теоретико – множинного опису динаміки цих систем. При цьому поєднання традиційного підходу до аналізу динамічних властивостей систем в цілому з обов'язковим використанням сучасного методу простору стану при синтезі регуляторів дає позитивні результати. Саме це поєднання традиційних і сучасних методів дослідження динамічних об'єктів відновлює дещо позабуту останніми часами перспективу ефективного впровадження в теорію автоматичного управління принципу багатоканальності і інваріантності, а в практику побудови і експлуатації автоматичних систем – створення високоточних швидкодійних слідкуючих приводів.

У дисертаційній роботі також робиться акцент на універсальність застосування розроблених структур і методик, що дозволяє авторові запропонувати їх як у військовій справі, так і в промисловості та галузі наукових досліджень.

Актуальність теми. Позитивні зміни, що відбулися в останні роки у світі, в цілому привели до суттєвого зниження глобальної ядерної воєнної загрози. Але з огляду на загрозу тероризму у світовому масштабі в останній час в військовій науці та техніці пріоритет віддається насамперед розвитку ефективності звичайних комплексів озброєння.

Аналіз виконання вогневих завдань підрозділами ракетних військ і артилерії Збройних Сил України показує, що вони виконують завдання в середньому вдвічі довше, а ймовірність влучення в ціль нижча, ніж у підрозділів провідних держав світу. Це зумовлено недосконалістю систем автоматичного управління вогнем та виконувальних механізмів, як найбільш інерційних ланок наземних систем. До того ж швидкісні та маневрові можливості об'єктів ураження значно збільшилися, що додатково підвищує вимоги до артилерійських підрозділів.

Дані дослідження охоплюють не тільки військовий аспект, але й сприяють розв'язуванню наукових задач в галузі фізичних досліджень, а саме в установках ядерного мікроаналізу. Тенденції розвитку останніх здебільшого пов'язані з підвищенням розрізняювальної здатності скануючих систем і удосконаленням систем збору та обробки даних. Однак дотепер не приділялось належної уваги удосконаленню систем автоматичного управління переміщенням дослідного зразку, які безпосередньо впливають на технічні показники ядерного мікрозонду, оскільки дія іонного пучка на зразок повинна бути жорстко обмежена в часі, і, крім того, пучок має малі розміри та можливість сканувати тільки на 1 мм^2 . Якщо не витримати часове обмеження дії пучка на зразок, це може призвести до руйнування структури останнього. По суті задача управління наближається за своїм змістом до задачі оптимального управління за швидкодією, при цьому необхідно отримати високу точність дії іонного пучка на дослідний зразок.

В зв'язку з цими проблемами висувуються наступні найважливіші вимоги до засобів кутового супроводження:

- висока динамічна точність слідкуючих систем при відпрацюванні складних задаючих дій;
- широкий діапазон регулювання кутових швидкостей навантаження;
- підвищена швидкодія при відпрацюванні зовнішньої задаючої дії.

Застосування в цих слідкуючих системах однодвигунових приводів не дозволяє одночасно досягти перших двох вимог і є технічно складною задачею.

Це викликає необхідність проведення досліджень, спрямованих на створення двоканальних слідкуючих систем з корегуючими регуляторами для артилерійського озброєння та в галузі фізичних досліджень.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота пов'язана з виконанням держбюджетних тем: "Оцінка доцільності комплектування перспективних артилерійських систем балістичною станцією, супутниковою системою навігації та бортовою ЕОМ" (шифр "Установка"), де здобувачем обґрунтована необхідність застосування і синтезовані структури корегуючих регуляторів з метою підвищення швидкодії систем; "Використання потужних іонних пучків та плазмодетонаційної технології для покращення службових характеристик виробів з металів, сплавів і кераміки" згідно наказу міністерства освіти та науки від 21.06.2000 № 236, згідно Протоколу третьої сесії Україно-Китайської Комісії з науково-технічного співробітництва від 16.05.2000р. (номер державної реєстрації 2М / 76-2000), де здобувачем розроблена структура безредукторної двоканальної слідкуючої системи з поканальним дискретним керуванням переміщенням дослідного зразку; "Дифузійні процеси в системах плівка / плівка, і плівка / масивний матеріал" (номер державної реєстрації 68.01.01.00-02), де здобувачем запропоновані ряд варіантів структурного включення корегуючих регуляторів у контури систем управління виконувальними механізмами.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є синтез двоканальних слідкуючих систем автоматичного управління для засобів кутового супроводження артилерійського озброєння та установок для проведення фізичних досліджень в інтересах підвищення швидкодії з одночасним забезпеченням високої динамічної точності

супроводження в широкому діапазоні регулювання кутових швидкостей. Мета дисертаційної роботи досягається розв'язуванням наступних взаємопов'язаних задач:

- аналіз способів побудови та класифікація двоканальних слідкуючих систем з точки зору забезпечення двох позитивних властивостей двоканальності – широкого діапазону швидкостей навантаження та високої динамічної точності;
- дослідження динамічного взаємовпливу каналів двоканальної слідкуючої системи автоматичного управління в перехідному режимі та обґрунтування необхідності корекції динамічних властивостей двоканальних слідкуючих систем засобів кутового автосупроводження артилерійського озброєння та установок для фізичних досліджень в перехідному режимі при відпрацюванні задаючого сигналу;
- синтез структур квазіоптимальних корегуючих регуляторів, які забезпечують дискретну корекцію в неперервних системах як для лінійного режиму роботи системи, так і для об'єктів з насиченням;
- дослідження особливостей дискретної корекції динамічних об'єктів, передаточні функції яких мають у своєму складі невірроджений поліном у чисельнику та розрахунок регуляторів для таких об'єктів;
- структурний синтез двоканальних слідкуючих систем із загальним та поканальним управлінням за допомогою корегуючого регулятора з урахуванням динамічного взаємовпливу каналів, а також дослідження перехідних характеристик таких систем шляхом моделювання.

Об'єкт дослідження – двоканальні слідкуючі системи автоматичного управління.

Предмет дослідження – показники якості перехідних процесів двоканальних слідкуючих систем автоматичного управління.

Методи дослідження – класичні, з використанням передаточних функцій та частотних характеристик, визначених на лінійному просторі, в якому діють пряме й обернене перетворення Лапласа і Фур'є, що покладені в основу синтезу двоканальних слідкуючих систем; сучасні, які мають в основі метод простору стану, що дозволили синтезувати нові структури регуляторів; імітаційне моделювання, що підтвердило вірогідність отриманих теоретичних результатів.

Наукова новизна одержаних результатів:

- дістало подальшого розвитку розв'язування основної суперечності динамічних систем: між досягненням високих показників якості в перехідному та усталеному режимах, що дозволяє синтезувати двоканальні системи водночас високої швидкодії і точності;
- дістав подальшого розвитку структурний синтез двоканальних слідкуючих систем з корегуючими регуляторами, який відрізняється тим, що дозволяє забезпечити просту апаратну реалізацію принципу системи зі змінною структурою;
- удосконалено структурно-функціональні схеми корегуючих регуляторів з фіксованими інтервалами управління та з варіацією інтервалів для підвищення швидкодії двоканальних слідкуючих систем та зменшення перерегулювання перехідних процесів при відпрацюванні ступінчатої вхідної дії;
- удосконалено регулятор для об'єктів, які мають в своєму складі форсуючу ланку, що розширює функціональні можливості керування і клас керованих об'єктів, щодо яких воно застосовується.

Практичне значення одержаних результатів. Запропонований один із способів вирішення основної суперечності динамічних систем: між досягненням високих показників якості в перехідному та усталеному режимах. Також запропоновані способи синтезу квазіоптимальних за швидкодією корегуючих регуляторів з фіксованими інтервалами управління та з варіацією тривалості інтервалів в неперервних системах автоматичного управління. Розроблені рекомендації по проектуванню безредукторної двоканальної слідкуючої системи з корегуючими регуляторами для приводу засобів автосупроводження ракетних військ і артилерії та в установках для проведення фізичних

досліджень, які дозволяють створити систему супроводження з високими точнісними властивостями в режимі стеження та високою швидкістю в режимі захвату. Практичне значення роботи підтверджується актами впровадження в Головному управлінні Ракетних Військ і Артилерії Сухопутних Військ Збройних Сил України, Сумському інституті модифікації поверхні, а також у навчальному процесі як Сумського військового інституту артилерії так і фізико – технічного факультету Сумського державного університету.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Роботи [1-6, 13-15] є результатом самостійно проведених наукових та експериментальних досліджень, виконаних автором. У роботах, написаних у співавторстві, здобувачу належить: у роботі [7] – здійснив комп'ютерне моделювання перехідних процесів в інваріантних системах управління, а також зробив висновки, щодо застосування інваріантних систем управління; [8] – показав переваги двоканальних слідкуючих систем порівняно з одноканальними щодо підвищення точності відпрацювання задаючої дії в усталеному режимі та розширення діапазону регулювання кутових швидкостей навантаження; [9] – обґрунтував переваги методу простору стану в порівнянні з класичними методами, які базуються на передаточних функціях та частотних характеристиках, для синтезу корегуючих регуляторів; [10] – показав, що загальне управління двоканальною слідкуючою системою за допомогою одного корегуючого регулятора завжди забезпечує перехідний процес з перерегулюванням, величина якого залежить від запасу стійкості початкової, нескорегованої системи; [11] – аргументовано показав необхідність застосування безредукторних виконувальних механізмів в імплантатах; [12] – синтезував дискретний регулятор для неперервної системи управління.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались й обговорювалися на 3-ій Міжнародній науковій конференції “MPSL' 99” (Суми, 1999), на міжвузівській науково-методичній конференції “Машиновикористання в землеробстві та тваринництві” (Суми, 1999), 2 –й науковій конференції Наукового центру артилерії Сумського військового інституту артилерії “Проблеми бойового застосування підрозділів та частин ракетних військ і артилерії при їх оснащенні перспективними зразками озброєння та техніки” (Суми, 1999), науковій конференції Сумського військового інституту артилерії “Шляхи удосконалення озброєння ракетних військ і артилерії та ефективності його використання під час бою і операції” (Суми, 1999), науково – теоретичній конференції Сумського інституту артилерії “Напрямки і шляхи подальшого удосконалення та розвитку правил стрільби і управління вогнем та курсу підготовки артилерії на основі їх практичного застосування в бойовій підготовці артилерійських частин і підрозділів, а також у навчальному процесі військового інституту артилерії при Сумському державному університеті” (Суми, 2000), 4 –й науково - технічній конференції Наукового центру артилерії Сумського військового інституту артилерії “Проблеми прогнозування розвитку та бойового використання нових зразків артилерійського озброєння Сухопутних Військ Збройних Сил України” (Суми, 2000), на щорічних науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фізико-технічного факультету Сумського державного університету (Суми, 1998, 1999, 2000, 2001).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано в 15 друкованих працях, у тому числі 10 статей у виданнях, що входять до переліку ВАК України, і 5 публікацій у працях конференцій.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та трьох додатків. Повний обсяг дисертації становить 186 сторінок, 94 рисунки, 5 таблиць, 7 окремих сторінок займають рисунки, 3 додатки на 8 сторінках, список використаних джерел, що включає 126 найменування та займає 12

сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність завдання, сформульовано мету та задачі дослідження, розкрито наукову та практичну цінність отриманих результатів.

Перший розділ охоплює питання аналізу вимог, що висуваються до слідкуючих систем автосупроводження і постановку задачі дослідження. Виведений закон руху об'єкту

супроводження $\alpha_y(t)$ у вигляді поліному 3-го порядку, на основі якого визначається усталена похибка слідкуючої системи супроводження при задаючій дії $\alpha_y(t)$ за формулою:

$$\theta_{уст}(t) = C_0 \alpha_y(t) + C_1 \frac{d\alpha_y(t)}{dt} + \frac{1}{2!} C_2 \frac{d^2 \alpha_y(t)}{dt^2} + \frac{1}{3!} C_3 \frac{d^3 \alpha_y(t)}{dt^3}.$$

(1)

В правій частині (1) доданки являють собою похибки за положенням, швидкістю, прискоренням і т.п., сталі C_0, C_1, C_2, C_3 – відповідні коефіцієнти похибок. Із виразу (1) випливає, що умовою високоточного слідкування за ціллю є компенсація позиційної та швидкісної складових похибки

($C_0=0, C_1=0$), тому що друга похідна (прискорення) функції $\alpha_y(t)$ вже не вносить суттєвої зміни в динамічну похибку системи. Для усунення складових похибки за рахунок цих похідних необхідно, щоб слідкуюча система супроводження мала нульові позиційну та швидкісну складові передаточної функції по похибці, тобто мала астатизм другого порядку.

При супроводженні цілі від моменту захвату до траверзу швидкість виконувальних механізмів слідкуючих систем супроводження повинна збільшуватися, а після переходу ціллю точки траверзу – зменшуватися, при цьому на малих відстанях до об'єкта супроводження виникають кутові прискорення, що приводить до збільшення динамічного запізнення при управлінні виконувальними механізмами. Тому при управлінні такими механізмами вони повинні обертатися не тільки з низькою кутовою швидкістю, яка дорівнює сталій складовій кутової швидкості цілі, але й мати достатньо широкий діапазон її зміни

$$\Delta\omega_a = \omega_{a_{\max}} - \omega_{a_{\min}} = \frac{V_y}{D_y} - \omega_y \mp \frac{\theta_0}{MT_n},$$

(2)

де $\omega_{a_{\max}}$ – максимальна кутова швидкість обертання виконувальних механізмів слідкуючих систем супроводження;

$\omega_{a_{\min}}$ – мінімальна кутова швидкість обертання виконувальних механізмів слідкуючих систем супроводження;

ω_y – кутова швидкість об'єкта супроводження;

D_y – дальність до об'єкта супроводження;

V_y – лінійна швидкість об'єкта супроводження;

θ_0 – кут між рівносигнальним напрямком та центром діаграми моноімпульсної антени (точкою сканування іонного пучка);

T_n – період повторення зондуючих імпульсів;

M – число імпульсів в пачці.

Швидкодія виконувальних механізмів слідкуючих систем супроводження за кутовими координатами є найважливішим параметром для засобів кутового супроводження як протитанкових керованих ракет так і установок для проведення фізичних досліджень. Проблема захоплення швидкісного об'єкту засобом супроводження з вузьким променем є досить складною задачею, тому що час захоплення обмежений часовим інтервалом, під час якого кут на об'єкт з моменту його виявлення повинен змінитися на величину, яка не перевищує ширину діаграми спрямованості пеленгаційного пристрою. Час захоплення визначається за формулою:

$$t_{зах} = t_{цв} + t_p \leq \frac{2\theta_0 D_u}{V_u |\sin \gamma|},$$

(3)

де $t_{цв}$ – час видачі цілевказання;

t_p – час відпрацювання установкою супроводження цілевказання;

γ – кут між вектором V_u та напрямком осі діаграми спрямованості.

З аналізу (1 – 3) впливає необхідність одночасного забезпечення слідкуючими системами наступних вимог:

- високої динамічної точності відтворення складних задаючих дій;
- широкого діапазону зміни кутових швидкостей навантаження;
- високої швидкодії при монотонному характері перехідних процесів в режимі відпрацювання цілевказання засобів кутового супроводження.

В другому розділі розглядаються двоканальні слідкуючі системи як різновид комбінованих систем, з тою різницею, що в них одночасно виконуються необхідна (двоканальність) та достатня (розгалуженість силової частини) умови інваріантності. Проводиться типологія двоканальних слідкуючих систем, які задовільняють першим двом вимогам. Розглядаються позиційні двоканальні слідкуючі системи, які забезпечують другий порядок астатизму

$$K_{Рекв}(p) = \frac{(K_G T_T + K_T T_G) p^2 + (K_G + K_T) p + K_G K_T}{(T_G p + 1)(T_T p + 1) p^2}$$

та більш широкий діапазон регулювання швидкостей навантаження в порівнянні з одноканальними

$$D_{\dot{\beta}} = D_{\dot{\beta}_G} \times D_{\dot{\beta}_T},$$

при $\dot{\beta}_{G_{\min}} = \dot{\beta}_{T_{\max}}$,

де $\dot{\beta}_{G_{\min}}$ і $\dot{\beta}_{T_{\max}}$ – відповідно мінімальна кутова швидкість грубого і максимальна

точного каналу.

Розглядаються поряд з тим двоканальні слідкуючі системи зі швидкісними каналами, що забезпечують другий порядок астатизму

$$K_p(p) = \frac{K_1 K_2 (T_3 p + 1)}{(1 + K_2 K_{зз}) i_1 T_3 (T_1 p + 1) (T_{2прив} p + 1) p^2},$$

а також дозволяють отримати нульову активну швидкість і розширити вдвічі діапазон швидкостей в порівнянні з одноканальними

$$\omega_H = \omega_{осн} - \omega_{он} = \omega_{осн} - (\omega_{max} + \omega_{min} - \omega_{осн}) = 2\omega_{осн} - (\omega_{max} + \omega_{min}).$$

Особливу увагу приділено безпосередньо конструкції безредукторного диференційного виконувального механізму, який представлений на рис. 1.

Рис. 1. Безредукторний диференційний виконувальний механізм

В цьому механізмі дугові статори 1 двигуна першого ступеня закріплені нерухомо, короткозамкнутий ротор 2 цього двигуна має дискову конструкцію та обертається в підшипнику 7. Дугові статори 4 двигуна другого ступеня, установлені на платформі 3, жорстко закріплені на роторі 2, що обертається. Ротор 5 двигуна другого ступеня аналогічний ротору 2 і обертається в підшипнику 8, та безпосередньо зв'язаний з об'єктом керування 6.

Доведено, що двоканальна слідкуюча система на базі безредукторного диференційного виконувального механізму має другий порядок астатизму

$$K_{ep}(p) = \frac{K_{ep} (\tau_1 p + 1)}{(\tau_2 p + 1) p^2},$$

$$\text{де } \tau_1 = \frac{2K_2}{K_1} T_1;$$

$$\tau_2 = \frac{2T_1 T_2}{2T_1 + T_2};$$

$$K_{ep} = \frac{K_1}{2T_1 + T_2}$$

та належить до класу систем з нульовою активною швидкістю

$$\omega'_{c2} = \omega_1 + \omega_{c2} = -K'_2 U_{on} + K'_2 U_{on} = 0,$$

де ω_1 – кутова швидкість першого каналу;

ω_{c2} – синхронна кутова швидкість магнітного поля індукторів другого каналу;

ω'_{c2} – кутова швидкість ротора (навантаження) другого каналу.

З аналізу властивостей двоканальної слідкуючої системи з безредукторним диференціальним виконувальним механізмом зроблений висновок, що використання в розгалуженій силовій частині двоканальної системи безредукторного диференціального виконувального механізму дозволяє розв'язати суперечність між умовами досягнення високої динамічної і статичної точності, властиву редукторним системам, тобто дозволяє побудувати високоточну систему без використання механічних контактних елементів. Показані переваги безредукторних диференціальних виконувальних механізмів. Аналізується динамічний взаємовплив каналів в перехідному режимі. На прикладі замкнутої двоканальної системи з передаточною функцією

$$K_3(p) = \frac{D(p)}{F(p) + D(p)} = \frac{Q_1(p)[D_1(p)F_2(p) + D_1(p)D_2(p)p]}{F_1(p)F_2(p)Q_1(p) + D_1(p)D_2(p)V_1(p)p + Q_1(p)[D_1(p)F_2(p) + D_1(p)D_2(p)p]} \quad (4)$$

$$B_1(p) = \frac{V_1(p)}{Q_1(p)}$$

показано, яким чином зв'язок $B_1(p)$ впливає на стійкість системи в цілому.

Чисельник $V_1(p)$ і знаменник $Q_1(p)$ передаточної функції зв'язку $B_1(p)$ входять до характеристичного полінома $F(p) + D(p)$ замкнутої двоканальної слідкуючої системи в вигляді доданків, тобто не є загальними співмножниками знаменника (4). Це приведе до зміни розміщення коренів характеристичного рівняння на комплексній площині, що в свою чергу, впливає на стійкість двоканальної слідкуючої системи. Встановлено теоретично та підтверджено за допомогою комп'ютерного моделювання, що коли канали двоканальної слідкуючої системи неавтономні, паразитні зв'язки ($B_1(p) \neq 0$) затягують перехідний процес, приводять до збільшення його коливальності, про що свідчать графіки перехідних процесів, які представлені на рис. 2.

Рис. 2. Графіки перехідних процесів двоканальної слідкуючої системи

Обґрунтовується необхідність корекції динамічних властивостей системи для

забезпечення третьої вимоги до двоканальних слідкуючих систем автосупроводження за кутом.

В третьому розділі на основі порівняльного аналізу методів підвищення швидкодії систем автоматичного управління вибирається метод змінного коефіцієнта підсилення як більш простий та прийнятний в інженерному відношенні, показана специфіка дії цього методу при синтезі дискретних регуляторів в неперервних системах. Запропонована структурна схема регулятора для динамічного об'єкта другого порядку з фіксованими інтервалами управління. Розрахований квазіоптимальний корегуючий регулятор з фіксованими інтервалами управління для об'єкта, у якого передаточна функція містить невідроджений поліном в чисельнику

$$(5) \quad G(p) = \frac{b_1 p^{n-1} + b_2 p^{n-2} + \dots + b_{n-1} p + b_n}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n},$$

де a, b – коефіцієнти, які залежать від параметру об'єкта при відпрацюванні системою ступінчатої та лінійно – змінної задаючих дій.

Отримано розширену матрицю переходу за допомогою якої знайдені вектори стану системи. Завдяки математичним перетворенням знайдені амплітуди керуючих дій в відповідних інтервалах управління:

– при надходженні на вхід задаючої дії в вигляді одиничного стрибка

$$m_1 = \frac{1}{\alpha Q d h^2} = \frac{b}{\alpha d h^2 (1 - e^{-bh})}, \quad m_2 = -m_1 (1 + H) = -m_1 (1 + e^{-bh}), \quad m_3 = m_1 H = m_1 e^{-bh};$$

– при надходженні на вхід лінійно-змінної задаючої дії

$$m_{1\sigma} = \frac{b}{\alpha d h^2 (1 - e^{-bh})} \left[1 + \sigma \left(3h - \frac{h}{1 - e^{-bh}} - \frac{h}{2} - \frac{1}{d} + \frac{1}{b} \right) \right];$$

$$m_{2\sigma} = -\frac{(1 + e^{-bh})b}{\alpha d h^2 (1 - e^{-bh})} \left[1 + \sigma \left(3h - \frac{h}{1 - e^{-bh}} - \frac{h}{2} - \frac{1}{d} + \frac{1}{b} - \frac{h}{1 + e^{-bh}} \right) \right];$$

$$m_{3\sigma} = \frac{b e^{-bh}}{\alpha d h^2 (1 - e^{-bh})} \left[1 + \sigma \left(3h - \frac{h}{1 - e^{-bh}} - \frac{3h}{2} - \frac{1}{d} + \frac{1}{b} \right) \right],$$

де σ – швидкість зміни задаючої дії.

Звернено увагу на те, що дискретне управління об'єктами з передаточною функцією (5) приводить до появи в перехідному процесі перерегулювання, величина якого залежить від співвідношення параметрів чисельника та знаменника передаточної функції, що відповідає результатам, отриманим для релейних систем, оптимальних за швидкодією. Розроблена методика дискретного управління динамічними об'єктами другого та більш високого порядку, які мають у своєму складі нелінійність типу “насичення”, в неперервних системах.

Розглянутий випадок управління, коли початкове розузгодження системи перевищує значення рівня обмеження задаючого сигналу. Для такого випадку розраховані корегуючі регулятори з варіацією тривалості інтервалів управління, адаптивні до величини вхідних ступінчатих дій, для об'єктів другого і третього порядків.

Здійснений структурний синтез таких регуляторів, які відрізняються від відомих дискретних регуляторів способом адаптації часу регулювання до амплітуди задаючої дії в режимі роботи об'єкту з насиченням. При цьому розглянута залежність інтервалу управління від обмеження сигналу по входу та величини розузгодження системи та показаний спосіб знаходження тривалості інтервалів управління (рис. 3).

Рис. 3. Графіки, які ілюструють спосіб знаходження тривалості інтервалів управління

Обґрунтовується більш проста апаратна реалізація визначення тривалості інтервалів управління за рахунок спрощення, якщо в трансцендентному рівнянні

$$e^{-bh} = 1 - \frac{b|\theta(0^+)|}{\alpha h U_m}$$

(6)

прийняти $\frac{b|\theta(0^+)|}{\alpha h U_m} \ll 1$ або, що те ж саме $\frac{U_m}{|\theta(0^+)|} h \gg \frac{b}{\alpha}$. В цьому випадку праву частину рівняння (6) можна представити як перші два члени, розкладені в ряд, і (6) можна буде записати

в вигляді: $e^{-bh} \approx e^{-\frac{b|\theta(0^+)|}{\alpha h U_m}}$ або

$$h^2 \approx \frac{|\theta(0^+)|}{\alpha U_m} = m|\theta(0^+)|$$

(7)

Позитивним коренем рівняння (7) буде шукана тривалість інтервалу управління.

Завдяки вищерозглянутому спрощенню отримано більш просту схему обчислення тривалості інтервалів управління (рис. 4.), яка входить до складу регулятора з варіацією інтервалів управління.

Рис. 4. Структурна схема знаходження тривалості інтервалів управління:

F – формуючий елемент;
ДЛ – диференціючий ланцюжок;
ГЛН – генератор лінійної напруги;
Комп. – компаратор;
ОМ – обчислювач модуля;
ПВЗ – пристрій вибірки та зберігання;
Кл. – ключ;
 \int – інтегратор;
& – схема збігу.

Запропоновані рекомендації, щодо застосування різних типів регуляторів.

В четвертому розділі проводиться синтез структурних схем двоканальних слідкуючих систем з корегуючим регулятором при загальному управлінні за допомогою одного корегуючого регулятора та досліджуються їх динамічні характеристики шляхом моделювання. Встановлено, що загальне управління двоканальною слідкуючою системою за допомогою одного регулятора завжди забезпечує перехідний процес з перерегулюванням, величина якого залежить від запасу стійкості початкової, нескорегованої системи (рис. 5). Це викликає необхідність компромісного вибору параметрів корегованої двоканальної системи, при яких таке перерегулювання в режимі відпрацювання цілевказання поєднувалося б з незначною коливальністю в режимі стеження. Для деяких систем, а саме при заздалегідь жорстко заданих параметрах двоканальної слідкуючої системи, ця задача розв'язується складно. Запропоновано використовувати ідею системи зі змінною структурою.

Рис. 5. Графіки перехідних процесів двоканальної слідкуючої системи без взаємовпливу каналів ($B_1(p) = 0$).

Такі системи відрізняються від традиційних оптимальних (квазіоптимальних) замкнутих систем тим, що регулятор у них включається не в замкнутий контур, а в розімкнений зв'язок по

задаючій дії або по похибці. В квазіоптимальних комбінованих системах це дозволяє усунути автоколивання в усталеному режимі. В двоканальних слідкуючих системах таке включення регулятора дозволяє найкращим чином поєднувати переваги дискретного управління в перехідному та високі точносні властивості і швидкісні можливості двоканальності в усталеному режимі. Робота цих систем полягає в чергуванні режиму відпрацювання команди цілевказання у вигляді ступінчатої функції значної амплітуди за час, не більше заданого, за допомогою корегуючого регулятора в розімкненому циклі та режиму високоточного стеження за рухомим об'єктом після закінчення перехідного процесу в замкнутому циклі.

Проведена оцінка підвищення швидкодії двоканальної слідкуючої системи з загальним управлінням за допомогою регулятора в порівнянні з початковою, нескорегованою системою, про що свідчать графіки перехідних процесів, які представлені на рис. 5. Швидкодія скорегованих систем зростає в 4-5 разів.

Розглянуті різні варіанти поканального управління двоканальною слідкуючою системою та показані переваги цього виду управління з точки зору забезпечення монотонності перехідних процесів, які не притаманні загальному управлінню, тобто дозволяють забезпечити монотонне відпрацювання цілевказання системою незалежно від запасу стійкості. Швидкодія з поканальним управлінням підвищується в порівнянні з початковою, нескорегованою системою близько в 3...5 разів, про що свідчать графіки перехідних процесів, що представлені на рис. 5. Але в двоканальній слідкуючій системі з паразитним взаємовпливом каналів ($B_1(p) \neq 0$) в перехідному режимі стає неможливим забезпечити поканальне управління без перерегулювання. В цьому випадку втрачається сенс поканального управління, основна перевага якого полягає в забезпеченні перехідних процесів двоканальних слідкуючих систем без перерегулювання. Тому для забезпечення монотонного перехідного процесу в двоканальних слідкуючих системах зі взаємовпливом каналів при поканальному управлінні необхідно скомпенсувати цей взаємовплив.

Запропоновано структурну схему двоканальної слідкуючої системи з позитивним компенсаційним зв'язком $M(p)$ (рис. 6).

Рис. 6. Структурна схема двоканальної слідкуючої системи з позитивним компенсаційним зв'язком

На цій схемі кожним каналом керує свій корегуючий регулятор. В перехідному режимі, під час роботи корегуючих регуляторів, канали двоканальних слідкуючих систем повністю розв'язані за допомогою логічних пристроїв ЛП 1 та ЛП 2 і компенсаційного позитивного зв'язку з

передаточною функцією $M(p) = T_1 p^2$. Наявність цього зв'язку необхідна для повної автономізації каналів в перехідному режимі, завдяки чому отримано монотонний перехідний процес, про що свідчать графіки перехідних процесів, що представлені на рис. 7.

Рис. 7. Графіки перехідних процесів двоканальних слідкуючих систем при поканальному управлінні зі взаємовпливом каналів ($B_1(p) \neq 0$)

Показані особливості дискретного управління грубим (інерційним) каналом позиційних двоканальних слідкуючих систем за допомогою одного регулятора при заблокованому точному (корегуючому) каналі.

П'ятий розділ присвячений методиці конструктивного розрахунку безредукторного диференційного виконувального механізму та підтвердженню теоретичних досліджень шляхом моделювання. В цьому ж розділі приведені рекомендації по застосуванню безредукторних двоканальних слідкуючих систем з корегуючими регуляторами в установках протитанкових керованих ракет та в установках для фізичних досліджень. Показано, що застосування вищеназваних пристроїв та систем в установках протитанкових керованих ракет підвищить ефективність застосування артилерійських підрозділів, а в установках для фізичних досліджень дозволить проводити дослідження структури дослідного зразку без її руйнування та зміни, що позитивно впливає на процес дослідження та технічні характеристики такої установки як ядерний мікрозонд та дозволить отримати більш якісну імплантовану поверхню зразку за допомогою іонного імплантатора.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язана актуальна науково – технічна задача синтезу двоканальних слідкуючих систем автоматичного управління для засобів кутового супроводження з квазіоптимальними корегуючими регуляторами, які дозволяють поєднувати підвищену швидкодію систем в перехідному режимі з високими динамічними та точнісними властивостями в режимі стеження. Проведені дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1. Проведений порівняльний аналіз двох основних класів двоканальних (дводвигунових) слідкуючих систем – позиційних та систем із швидкісними каналами. Показано, що з точки зору їх застосування в засобах кутового супроводження артилерійського озброєння найбільш придатними є позиційні двоканальні слідкуючі системи з ієрархічною структурою, та системи зі швидкісним опорним каналом, які забезпечують розширення діапазону плавно змінюваних швидкостей навантаження.
2. Результати дослідження динамічних властивостей редукторних та безредукторних двоканальних слідкуючих систем кутового автосупроводження засвідчують про те, що фактори, які знижують їх швидкодію в режимі відпрацювання цілевказання викликають необхідність квазіоптимального за швидкодією управління цими системами, яке дозволяє отримати перехідні процеси з малим показником коливальності та заданим часом регулювання.
3. Розраховані квазіоптимальні корегуючі регулятори для динамічного об'єкту з

передаточною функцією, яка має в своєму складі форсуючу ланку. Показано, що дискретне квазіоптимальне за швидкодією управління такими об'єктами приводить до появи в перехідному процесі перерегулювання, величина якого за лежить від співвідношення параметрів (сталих часу) чисельника та знаменника передаточної функції.

4. Розроблені способи дискретного управління динамічним об'єктом другого та більш високого порядку, які мають нелінійність типу “насичення” в неперервних системах. Розраховані квазіоптимальні корегуючі регулятори з варіацією тривалості управління, адаптивні до величини вхідних ступінчатих дій, для об'єктів другого та третього порядків, здійснений структурний синтез таких регуляторів.

5. Здійснений структурний синтез редукторних і безредукторних двоканальних слідкуючих систем з розробленими корегуючими регуляторами. Аналіз управління двоканальних слідкуючих систем за допомогою квазіоптимальних корегуючих регуляторів показав, що найбільш успішно розв'язати задачу одночасного підвищення точності системи в перехідному та усталеному режимі дозволяє включення корегуючого регулятора в розімкнений зв'язок за задаючою дією або похибкою та використання його при відпрацюванні цілевказання, після чого в режимі стеження відновлюється початкова структура двоканальної системи. Таке ввімкнення регулятора забезпечує збереження динамічної точності в усталеному режимі.

6. Проведена порівняльна оцінка підвищення швидкодії двоканальної слідкуючої системи з загальним управлінням за допомогою корегуючого регулятора в порівнянні з початковою, нескорегованою системою. Запропоновані нові структури двоканальних слідкуючих систем з одним регулятором, який здійснює загальне управління системою. Вказані умови застосування двоканальних слідкуючих систем з загальним управлінням в засобах кутового автосупроводження артилерійського озброєння та установках для фізичних досліджень.

7. Запропоноване поканальне управління двоканальною системою за допомогою двох квазіоптимальних корегуючих регуляторів, що знижує недоліки, притаманні загальному управлінню, та дозволяє забезпечити монотонний характер відпрацювання системою цілевказання незалежно від запасу стійкості. Розроблені структурні схеми двоканальних слідкуючих систем з квазіоптимальними корегуючими регуляторами для випадку автономних каналів, при управлінні лінійною системою з перехресними природними зв'язками, а також при управлінні з компенсацією паразитних зв'язків між каналами через навантаження.

8. Розроблені рекомендації щодо управління позиційними системами за допомогою одного квазіоптимального корегуючого регулятора (управління грубим каналом при заблокованому точному) в перехідному режимі.

9. Наведені практичні рекомендації по проектуванню безредукторного диференційного виконувального механізму для двоканальних слідкуючих систем засобів кутового супроводження артилерійського озброєння та установок для проведення фізичних досліджень. Проведено дослідження двоканальної слідкуючої системи з квазіоптимальними корегуючими регуляторами шляхом моделювання.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Ляпа М.М. Забезпечення заданої швидкодії виконувальних механізмів за допомогою позиційних систем автоматичного управління // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - 1999. - №55. - С. 25-27.
2. Ляпа Н.Н. Анализ физических процессов в двухканальной управляющей системе с динамическим взаимовлиянием каналов // Вісник Сумського державного університету. - 1999. - №2 (13). - С. 128-131.
3. Ляпа М.М. Двоканальні слідкуючі системи з безредукторними виконувальними

- механізмами // Вісник Сумського державного аграрного університету. - 1999. - №4. - С. 98-102.
4. Ляпа М.М. Поканальне управління в двоканальній слідкуючій системі при переміщенні зразку в ядерному мікрозонді // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - 1999. - №75. - С. 27-30.
 5. Ляпа М.М. Аналіз динамічних властивостей двоканальної системи з розгалуженою силовою частиною // Вісник Сумського державного аграрного університету. - 2000. - №5. - С. 107-110.
 6. Ляпа М.М. Підвищення швидкодії систем автоматичного управління за допомогою регуляторів з варіацією інтервалів керування // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - 2000. - №78. - С. 14-16.
 7. Полонский А.Д., Ляпа Н.Н., Матушко Б.П. Метод синтеза инвариантных систем управления // Придніпровський науковий вісник. - 1998.- №63 (130). - С. 44-48.
 8. Кобяков А.Н., Ляпа Н.Н. Двухканальные следящие системы как разновидность комбинированных систем // Вісник Сумського державного університету. - 1999. - №1 (12). - С. 96-99.
 9. Ляпа Н.Н., Герасимив В.М. Исследование процессов в системах управления методом переходных состояния // Вісник Сумського державного університету. – 2000. - №16. – С. 25-29.
 10. Ляпа М.М., Ярошенко П.М. Порівняння динаміки двоканальної слідкуючої системи без корегуючого регулятора та з регулятором при загальному управлінні // Вісник Сумського державного аграрного університету. - 2001. - №6. - С. 109-113.
 11. Михалев А.Н., Ляпа Н.Н., Нагорный Д.А.. Применение безредукторных исполнительных механизмов в источниках высокодозной имплантации // Abstract Booklet of third international conference (MPSL'99). - Sumy: Sumy State University. - 1999. - С. 44-45.
 12. Кобяков А.Н., Ляпа Н.Н. Разработка квазиоптимальных дискретных регуляторов для систем управления с непрерывной силовой частью // Тезисы докладов научно – технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов физико - технического факультета Сумского государственного университета. - Сумы: Сум.ГУ. - 1998. - С. 47.
 13. Ляпа М.М. Поканальна корекція двоканальної слідкуючої системи з компенсацією взаємовпливу каналів // Тезисы докладов научно – технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов физико - технического факультета Сумского государственного университета. - Сумы: Сум.ГУ. - 1999. - С. 107-108.
 14. Ляпа М.М. Розрахунок квазіоптимального корегуючого регулятора для динамічного об'єкту з невиродженим поліномом в чисельнику передаточної функції // Тезисы докладов научно – технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов физико - технического факультета Сумского государственного университета. - Сумы: Сум.ГУ. - 2000. - С. 37-38.
 15. Ляпа М.М. Структурний синтез схеми для знаходження інтервалу управління в регуляторах з варіацією інтервалів управління // Тезисы докладов научно – технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов физико - технического факультета Сумского государственного университета. - Сумы: Сум.ГУ. - 2001. - С. 46-47.

АНОТАЦІЯ

Ляпа М.М. Синтез квазіоптимальних за швидкістю систем автоматичного управління для засобів кутового супроводження. – Рукопис.
Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю

05.13.03 – системи і процеси керування. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2001.

Синтезовані квазіоптимальні за швидкістю системи автоматичного управління, які завдяки своїй універсальності можуть використовуватися як у військовій сфері, так і в різних галузях народного господарства. Розглядаються двоканальні слідкуючі системи як з редукторними диференційними виконувальними механізмами, так і безредукторними. Синтезовані різні типи регуляторів та розроблені рекомендації, щодо їх застосування. Досліджені перехідні процеси в двоканальних слідкуючих системах з синтезованими регуляторами. Проведений конструктивний розрахунок безредукторного диференційного виконувального механізму.

Ключові слова: двоканальна слідкуюча система, корегуючий регулятор, безредукторний диференційний виконувальний механізм, інтервал управління, поканальне управління, гібридна система автоматичного управління, метод змінного коефіцієнта підсилення, система зі змінною структурою, регулятор з варіацією інтервалів управління.

АННОТАЦІЯ

Ляпа Н.Н. Синтез квазиоптимальных по быстродействию систем автоматического управления для средств углового сопровождения. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.03 – системы и процессы управления. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2001.

Проводится анализ требований, предъявляемых к средствам углового сопровождения на примере артиллерийского вооружения. На основе теории инвариантности рассматриваются двухканальные следящие системы как с редукторными дифференциальными исполнительными механизмами, так и с безредукторными, которые более полно удовлетворяют предъявленным требованиям по сравнению с одноканальными системами. Проводятся исследования переходных процессов в двухканальных системах путем моделирования. Показано влияние каналов друг на друга в переходном режиме и обоснована необходимость коррекции динамических свойств. Проведена типология и изучены показатели качества двухканальных следящих систем. На основании сравнительного анализа релейного управления, оптимального по быстродействию и управлению с помощью дискретных регуляторов, выбирается метод переменного коэффициента усиления как наиболее простой и удобный в инженерном отношении. Показана специфика действия этого метода при синтезе дискретных регуляторов в непрерывных системах и при расчёте регуляторов для динамических объектов, передаточные функции, которых содержат невырожденный полином в числителе.

Произведён структурный синтез квазиоптимальных корректирующих регуляторов с фиксированными интервалами, а также с вариацией интервалов управления, адаптивных к амплитуде входных воздействий, которые обеспечивают в непрерывных системах монотонный переходной процесс с заданным временем регулирования. Разработаны рекомендации по применению различных типов регуляторов.

Выполнен синтез структурных схем двухканальных следящих систем с корректирующими регуляторами при общем управлении с помощью одного регулятора и исследованы их динамические характеристики путём моделирования. Доказано, что общее управление с помощью одного регулятора всегда обеспечивает переходный процесс с перерегулированием, величина которого зависит от запаса устойчивости исходной системы. Это вызывает необходимость компромиссного выбора параметров корректируемой системы, при котором малое перерегулирование в режиме отработки целеуказания сочеталось бы с незначительной колебательностью в режиме слежения.

Рассмотрено поканальное управление двухканальной следящей системой посредством двух регуляторов, которое снимает недостатки, присущие общему управлению. Рассмотрены различные варианты поканального управления двухканальной следящей системой и показано преимущество этого вида управления с точки зрения обеспечения монотонности переходных процессов. Быстродействие двухканальной системы с поканальным управлением повышается, по сравнению с исходной, нескорректированной системой, в 3...5 раз.

Показано, что для позиционных двухканальных следящих систем наиболее целесообразным является управление грубым (инерционным) каналом посредством одного регулятора при заблокированном точном (корректирующем) канале.

Показана методика конструктивного расчёта безредукторного дифференциального исполнительного механизма.

Предложено применение синтезированных квазиоптимальных по быстродействию систем автоматического управления в установках противотанковых управляемых ракет, а также в области физических исследований, в таких установках как ядерный микрозонд и источниках высокодозной ионной имплантации.

Ключевые слова: двухканальные следящие системы, корректирующий регулятор, безредукторный дифференциальный исполнительный механизм, интервал управления, поканальное управление, гибридная система автоматического управления, метод переменного коэффициента усиления, система с переменной структурой, регулятор с вариацией интервалов управления.

ABSTRACT

Lyapa N.N. Synthesis quasi-optimum by quick-action of automatic control system for means of angle tracking. – Manuscript.

Dissertation for a candidate of technical science (Ph.D.) degree in speciality: 05.13.03 – control systems and processes. Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, 2001.

This work includes the researched results and the solution of the problem of structured synthesis of quasi-optimum by quick-action of automatic control system for means of angle tracking.

Consider was given of two-channel follow-up systems with reducer and non-reducer differential actuating mechanism. It's been synthesized different models of regulators and cited recommendations by application. Researched transient progresses in two-channel follow-up systems with synthesized regulators. Made rational design of non-reducer different actuating mechanism.

Key words: two-channel follow-up system, correction regulator, non-reducer differential actuating mechanism, interval of control, control by every channel, hybrid automatic control system, method of amplification factor variable, system with variable structure, regulator with variation of control intervals.