

ЧИСЕЛЬНИЙ МЕТОД ОБЧИСЛЕННЯ МОМЕНТІВ ПЕРЕКЛЮЧЕННЯ РЕЛЕЙНОГО УПРАВЛІННЯ В ЗАДАЧАХ МАКСИМАЛЬНОЇ ШВИДКОДІЇ

Динамічні якості типових слідкуючих систем, що використовуються для управління положенням стовбура зброї, антен РЛС, пускових установок і т. ін., описуються диференційними рівняннями високого порядку. Відома в теорії автоматичного керування теорема про n -інтервали, доказана О. А. Фельдбаумом, вимагає здійснювати n керуючих діянь, що призводить до підвищеного зносу релейних перемикаючих пристроїв і потребує достатньо довгого часу на розрахунок моментів оптимального релейного управління. У зв'язку з цим виникають обмеження застосування оптимального управління малоінерційними системами. Це означає, що при технічній реалізації швидкого автоматичного цілевказання потрібно реалізувати оптимальний за швидкодією перехідний процес у системі автоматичного управління з великою кількістю переключень керуючого діяння. На практиці є небажаним робота приводу з частими переключеннями. Це призводить до великого навантаження, знижує його надійність та спричиняє швидкий знос його елементів. Це, в свою чергу, призводить до зниження надійності приводу та до зниження коефіцієнту бойової готовності зброї. В цьому випадку є доцільним перейти від оптимального управління до квазіоптимального шляхом зниження порядку диференційного рівняння до третього. Оптимізація в цьому випадку реалізується трьома переключеннями інтервалів керуючого діяння і достатньо повно досліджена в роботах багатьох авторів.

Розширити діапазон використання систем оптимального управління в класі малоінерційних об'єктів регулювання можна, якщо заздалегідь розрахувати моменти переключення в оптимальній та квазіоптимальній системах і визначити значення параметру в ці моменти, а потім керувати переключеннями або за програмним (часовим) законом, або по відхиленню фактичного значення параметру від розрахованого в момент переключення.

Задача синтезу оптимальної за швидкодією системи управління зводиться до синтезу такого пристрою управління системою швидкодії, яка б забезпечувала переведення вектору стану керованого об'єкта з початкової точки в кінцеву.

У статті пропонується методика розрахунку моментів переключення керуючого діяння, що створює можливість раціонального переходу від теоретично оптимального до практично реалізованого квазіоптимального управління, збільшуючи швидкодію системи наведення. Величина швидкодії зростає зі зростанням швидкості цілі та зменшенням відстані до неї. Проводи наведення засобів ураження повинні забезпечувати максимальну швидкодію для того, щоб збільшити можливість знищення цілей, які летять з великою швидкістю. Оптимальний за швидкодією процес описується диференційним рівнянням високого порядку. Кількість моментів переключення керуючого діяння дорівнює порядку диференційного рівняння. Це відомо під назвою теореми про n -інтервалів. Отже, задача визначення оптимального управління зводиться до задачі визначення моментів зміни знаку управління і кінцевого значення часу при переведенні об'єкту з однієї точки фазового простору в іншу. В роботі надається методика обчислення моментів часу чисельним методом безпосередньо з рівняння системи. В цьому випадку рішення задачі спрощується та практично не ускладнюється при збільшенні порядку диференційного рівняння та при наявності обмежень на фазові координати об'єкта або у випадку змінної структури об'єкта. Метод також не залежить від виду коренів характеристичного рівняння. Цільова функція мінімізується також чисельним способом. Для її мінімізації використовується метод Нелдера-Міда. Проведений чисельний експеримент підтверджує можливість представлення системи управління n -го порядку еквівалентною системою більш низького порядку.

Ключові слова: моменти переключення, керуюче діяння, система управління, чисельний метод, оптимальне управління, квазіоптимальне управління, швидкодія, перехідний процес.

Вступ та аналіз останніх досліджень. Для забезпечення своєчасного наведення бойових засобів ППО під час знищення високошвидкісних повітряних цілей приводи наведення цих засобів повинні мати високу швидкість. Серед великої кількості оптимальних систем системи, оптимальні за швидкістю займають значне місце. В процесі синтезу оптимальних систем після визначення критерія оптимального управління необхідно обрати принцип і закон управління об'єктом, визначити структурну схему системи регулювання та її елементну базу, розрахувати криву перехідного процесу в системі, визначити моменти зміни знаку і амплітуди керуючого діяння. Теорема про n інтервалів вимагає здійснювати n переключень керуючого діяння, що призводить до швидкого зносу релейних перемикаючих пристроїв і потребує достатньо довгого часу на розрахунок моментів переключення оптимального управління. У зв'язку з цим виникають обмеження застосування оптимального управління малоінерційними системами. В цьому випадку доцільно перейти від оптимального управління до квазіоптимального, знижуючи порядок диференційного рівняння до третього. Це дозволяє реалізувати оптимізацію трьома переключеннями керуючого діяння.

Для вирішення задачі оптимізації необхідно після визначеного критерія оптимальності обрати змінну координату її обмеження та визначити можливість її виміру, траєкторії руху, моменти переключення керуючого діяння і синтезувати систему управління.

Відомо, що оптимальний перехідний процес, що описується лінійним диференціальним рівнянням у випадку максимальної швидкості складається з n інтервалів. Реалізація оптимальної швидкості перехідного процесу стикається з низкою технічних труднощів. Труднощі викликані необхідністю розрахунку кількості інтервалів знакозмінного керуючого діяння. В цій статті показана розробка методики переходу від теоретично оптимального до практично реалізуемого квазіоптимального управління швидкістю перехідного процесу в системах, що описуються диференціальними рівняннями високого порядку. В кожному з інтервалів керуюче діяння змінюється стрибком та приймає постійне значення. При чому знаки керуючого діяння чергуються на сусідніх інтервалах часу. Наприклад спочатку $U = 1$, а потім $U = -1$. Цей факт відомий під назвою теореми про n інтервалів [2].

У статті надається чисельне моделювання процесів для забезпечення вибраного критерія оптимальності – швидкості. При цьому знаходяться моменти переключення керуючого діяння і траєкторії оптимального і квазіоптимального процесу. Управління процесом передбачається вести по програмному принципу, здійснюючи n або 3 переключення керуючого діяння відповідно в системі n – го порядку та в еквівалентній системі. Зменшення кількості переключень дозволить спростити функції мікропроцесора та збільшити надійність системи управління.

Запропонований в статті чисельний метод обчислення моментів переключення використовується у подальшому для синтезу оптимальних і квазіоптимальних по швидкості систем 4-го і 3-го порядку.

Проектування систем управління неможливо здійснити, якщо не вирішена задача ідентифікації об'єкта. Тому варто звернути увагу на дослідження задач ідентифікації при рішенні задач синтезу оптимальних за швидкістю систем.

Теорія оптимальних систем висвітлює шляхи удосконалення систем автоматичного управління. До опанування цієї проблеми було повернуто увагу низки вчених. Питання квазіоптимального управління висвітлюють у своїх роботах: Садового О. В., Дерещ О.Л. Дерещ Г. О. [4,5], Кривонос І.Ю. [8].

Питання удосконалення автоматизованих систем управління у зразках озброєння та військової техніки висвітлені у роботах С. О. Бобрикова, С. А. Бобрикова [3], Кучеренко Ю.Ф.[6], Маслюка Л., Гавалко В., Джигномона С.[7], Голованя В, Голованя А., Герасимова В., Малишкіна О. [11], Андрухова С. [12], Богача А. С., Чегана Ю.А., Марченко Я. В., Ликова В.В [10].

Метою цього дослідження є надання методики розрахунку моментів переключення системи більш низького порядку, еквівалентної системі високого порядку.

Основні результати досліджень. Серед численних оптимальних систем значне місце займають ті, які характеризуються високою швидкістю. До них належать не лише системи, що описують переміщення об'єкта у просторі, але й системи, які забезпечують оптимальну

тривалість навантаження типових двигунів, прогрівання опальних установок охолодження вантажів і т. ін.

У процесі синтезу оптимальних систем після визначення критерія оптимального управління потрібно обрати принцип і закон управління об'єктом, розрахувати криву перехідного процесу в системі, визначити моменти зміни знаку та амплітуди керуючого діяння. Відома в теорії автоматичного керування теорема Фельдбаума про n -інтервали вимагала виробляти n -перемикаючих впливів, що призводило до завищеного зносу релейних перемикаючих пристроїв і потребувало достатньо часу на розрахунок моментів переключення оптимального релейного управління. У зв'язку з цим виникали обмеження використання оптимального управління малоінерційними системами.

Розширити діапазон використання систем оптимального управління в класі малоінерційних об'єктів можна, якщо заздалегідь розрахувати моменти переключення в оптимальній та квазіоптимальній системі. Отже, при вирішенні задачі оптимізації процесу швидкодії необхідно після визначення критерію оптимальності обрати змінну координату та межі її зміни, визначити моменти переключення керуючого діяння та синтезувати систему управління. У деяких випадках реалізація оптимального за швидкодією процесу потребує доведення значення керуючого діяння до максимально можливого. Це необхідно для запобігання зниженню регульованого параметру в початковий момент часу після дії різкозміненого збурення та використання форсування керуючого діяння.

Рух об'єкта описується лінійним диференціальним рівнянням:

$$a_0 y^n + a_1 y^{n-1} + \dots + a_n y = U(t), \quad (1)$$

де $y(t)$, $y'(t)$, ..., $y^{n-1}(t)$ – координати об'єкта, які складають фазовий простір, $U(t)$ – управління.

Відомо, що оптимальний за швидкодією перехідний процес $y(t)$ складається з n часових інтервалів [10.50]. Процес у кожному з цих інтервалів описується рівнянням:

$$a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_n y = M, \quad (2)$$

де M позитивна константа, що обмежує величину управління, тобто $M = \max |Y(t)|$ постійна на кожному інтервалі часу.

Знаки чергуються на сусідніх інтервалах. Іншими словами, оптимальне управління $U(t)$ повинно бути релейним, змінювати знак на межах сусідніх інтервалів часу і приймати за абсолютною величиною максимальне з припустимих значень, тобто оптимальний за швидкодією процес $y(t)$ на j -тому інтервалі ($j = 1, 2, \dots, n$) описується рівнянням:

$$a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_n y = -(-1)^{j+1} \operatorname{sgn} U_1 M, \quad (3)$$

де $\operatorname{sgn} U_1 M$ – знак управління $U(t)$ на першому часовому інтервалі. Цей результат відомий під назвою теореми про n -інтервалів.

Отже, задача визначення оптимального управління $U(t)$ зводиться до задачі визначення моментів зміни знаку управління t_1, t_2, \dots, t_n і кінцевого часу t_n при переводі об'єкта з однієї точки фазового простору в іншу. Обчислення моментів t_1, t_2, \dots, t_n доцільно проводити чисельним методом без складання системи трансцендентних рівнянь відносно цих невідомих, безпосередньо з рівняння системи (3). В цьому випадку рішення задачі спрощується: не потрібно програмування системи трансцендентних рівнянь (яка навіть для випадку n менше буває досить громіздкою); вирішення задачі практично не ускладнюється при збільшенні порядку диференціального рівняння (3) і при наявності обмежень на фазові координати об'єкту або у випадку змінної структури об'єкту. Метод вирішення задачі не залежить від виду коренів характеристичного рівняння, тобто він гідний і для випадку комплексних коренів цього рівняння.

Припустимо, що потрібно перевести об'єкт, рух якого описується рівнянням (3) з точки

$$y(0) = y_0; y'(0) = y'_0; \dots; y^{(n-1)}(0) = y_0^{(n-1)}, \quad (4)$$

в точку:

$$y(t_n) = y_k; y'(t_n) = y'_k; \dots y^{(n-1)}(t_n) = y_k^{(n-1)}, \quad (5)$$

за найменший час.

Задача Коши (3) – (5) вирішується чисельним методом Рунге-Кутта. Задача переведу об'єкта з точки (4) в точку (5) за мінімальний час $t = t_n$ еквівалентна задачі пошуку мінімуму наступної цільової функції:

$$Z(t_1, t_2, \dots, t_n) = t_n + j^2 \sum_{i=0}^{n-1} [y^i(t_n) - y_k^i]^2, \quad (6)$$

де j^2 – позитивний ваговий коефіцієнт; $y^i(t_n)$ – фазова координата об'єкта в кінцевий момент часу $t = t_n$.

Найменше значення першого доданку цільової функції Z відповідає мінімуму часу переведу об'єкта з точки (4) в точку (5), а найменше значення другого доданку у правій частині рівності (6) відповідає співвідношенню поточних фазових координат в момент часу $t = t_i$ з точкою (5).

Отже, задача обчислення моментів t_1, t_2, \dots, t_n зводиться до пошуку найменшого значення цільової функції (6). Оскільки цільова функція (6) обчислюється чисельним методом, то і мінімізувати її необхідно чисельним методом. Для мінімізації цільової функції (6) пропонується використовувати метод Нелдера-Міда [1]. Програма обчислення цільової функції (6) потребує введення кількості диференціальних рівнянь нормальної системи, що відповідає диференційному рівнянню (3). Також необхідно ввести фазові координати початкової (4) та кінцевої (5) точки початкового значення параметрів t_1, t_2, \dots, t_n . При будь-яких початкових значення параметрів t_1, t_2, \dots, t_n обчислювальний процес призводить їх до справжніх значень. Оскільки права частина (3) є розривною функцією, то для чисельного рішення цього рівняння шаг інтегрування повинен бути достатньо малим. Чисельні експерименти показують, що для цього достатньо обрати шаг інтегрування приблизно рівний одному відсотку значення t .

Задачами чисельного моделювання в оптимальних та квазіоптимальних за швидкістю системах 5-го та 4-го порядків є:

1. Визначення відмінності в характері протікання процесів в оптимальних системах високого порядку та еквівалентних їм системах 3-го порядку.
2. Визначення моментів переключення керуючого діяння в системах високого порядку та в еквівалентних їм системах 3-го порядку.
3. Визначення впливу амплітуди керуючого сигналу на час перемикання, характер та тривалість оптимального перехідного процесу.
4. Визначення впливу початкових умов на характер перехідного процесу після порівняння переходу з 1 в 0 і з 0 в 1.
5. Визначити правомірність заміни системи високого (4-го) порядку еквівалентною системою більш низького порядку.

Чисельне моделювання необхідно проводити для забезпечення вибраного критерія оптимальності. В нашому випадку це швидкодія: при цьому знаходяться моменти переключення і траєкторії оптимального і квазіоптимального процесу. Управління процесом має бути по програмному принципу. Здійснювати необхідно n або 3 переключення керуючого діяння відповідно в системі n -го порядку та еквівалентній системі.

Приклад.

Відомий вигляд диференційного рівняння 4-го порядку

$$y^4 = U - 4y''' - 6y'' - 4y' - 1$$

Та вигляд еквівалентного йому диференційного рівняння 3-го порядку

$$y''' = U - 1,550295y'' - 2,29125y' - y$$

Величина управління дорівнює $U = 1,5$

Необхідно знайти параметри переключення керуючого діяння для системи управління, що описується даним диференціальним рівнянням 4-го порядку та параметри керуючого діяння для системи управління що описується еквівалентним рівнянням 3-го порядку. Такі самі параметри необхідно знайти за умови $U=2$ та $U=3$.

Рішення цієї задачі включає визначення параметрів керуючого діяння при досягненні мінімального значення цільової функції (6).

Після обчислення мінімізації функції отримано наступний результат. Параметри переключення керуючого діяння дорівнюють: для системи, що описується диференціальним рівнянням 4-го порядку:

$$\begin{aligned} t_1 &= 0,06797063 \\ t_2 &= 0,2380186 \\ t_3 &= 0,2857342 \\ t_4 &= 0,3107794 \end{aligned}$$

Для еквівалентної системи, що описується диференціальним рівнянням 3-го порядку:

$$\begin{aligned} t_1 &= 0,1404903 \\ t_2 &= 0,3759539 \\ t_3 &= 0,4847066 \end{aligned}$$

Цей результат отриманий, коли крок інтегрування складає 0,5 % часу перехідного процесу. Приблизно за 15 хвилин часу розрахунку отриманий результат. Аналогічним чином отримані результати для $U = 2$ та $U = 3$.

Результати обробки даних чисельного експерименту зведені в табл. 1.

Таблиця 1

Моменти переключення керуючого діяння для систем 4-го і 3-го порядку

Порядок рівняння	Моменти переключення керуючого діяння											
	$U=1,5$				$U=2$				$U=3$			
4-й	t_1	t_2	t_3	t_4	t_1	t_2	t_3	t_4	t_1	t_2	t_3	t_4
	0,07	0,23	0,29	0,31	0,61	0,19	0,28	0,30	0,05	0,18	0,26	0,27
3й еквівалентний 4-му	t_1	t_2	t_3	t_1	t_2	t_3	t_1	t_2	t_3			
	0,14	0,38	0,48	0,13	0,35	0,45	0,11	0,31	0,41			

З аналізу таблиці можна зробити наступні висновки: В результаті чисельного експерименту підтверджується можливість зменшення кількості переключень керуючого діяння об'єктом управління. Розроблена методика дозволяє знаходити моменти переключення керуючого діяння в оптимальній і квазіоптимальній по швидкодії системах. Амплітуда керуючого діяння зменшує тривалість перехідного процесу (переходу з 0 в 1). При збільшенні амплітуди (U) керуючого діяння в 2 рази тривалість перехідного процесу зменшується. Запропонований чисельний метод, алгоритм і програма обчислення моментів переключення можна використовувати для синтезу оптимальних і квазіоптимальних за швидкодією систем управління.

Висновки. Обчислення аналітичним методом моментів переключення релейного керування об'єктами високого порядку в задачах швидкодії є складним завданням. Тому пропонується чисельний метод оптимізації за швидкодією системи n -го порядку. Цей метод значно спрощує вирішення задачі обчислення моментів переключення під час управління об'єктами будь-якого порядку. Метод придатний і у випадку наявності обмежень на координати об'єкта. Запропонований в роботі розрахунок моментів переключення керуючого діяння створює можливість раціонального переходу від теоретично оптимального до практично реалізованого квазіоптимального управління, збільшуючи швидкість системи наведення. Проведений чисельний експеримент дозволив рекомендувати розширити використання оптимальних за швидкодією систем на діапазон малоінерційних об'єктів регулювання, де час розрахунку моментів переключення керуючого діяння перевищує

тривалість процесу переходу з вихідного стану в потрібне. Заздалегідь розрахувавши моменти переключення, можна керувати формування керуючого діяння системою програмного управління або системою по відхиленню координати руху від розрахункової. В результаті чисельного експерименту підтверджується можливість змінення кількості переключень керуючого діяння об'єктом управління. Отже, покращення швидкодії розширює бойові можливості засобів протиповітряної оборони Сухопутних військ Збройних Сил України по обстрілу повітряних цілей, які летять з різними швидкостями.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ладієва Л. Р. Методи оптимізації та основи пошуку оптимальних рішень [навч. посіб.] – К.: КПІ ім. І. Сікорського. 2023. – 73 с.
2. Штіфзон О. Й., Новіков П. В., Бунь В. П. . Теорія автоматичного управління. [навч. посіб.] – К.: КПІ ім. І. Сікорського. 2020. – 144 с.
3. Бобриков С.О., Бобриков.С. А. Синтез та моделювання оптимальної за швидкістю слідкуючої системи // Науковий журнал «Інформатика та математичні методи в моделюванні». № 13. 2023. С.17 – 33.
4. Дерещ О. Л. , Садовой О.В., Дерещ Г.О. Алгоритм синтезу квазіоптимальних за швидкістю систем третього порядку із аперіодичним ковзним режимом.// Збірник наукових праць дніпровського державного технічного університету (технічні науки). № 1.(38). 2021. С. 45 – 48.
5. Дерещ О.Л., Дерещ Г. О. , Садовой О. В. Дослідження систем 3-го порядку , синтезованих із використанням алгоритму забезпечення аперіодичного ковзного режиму. // збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). № 1 (40). С. 106 – 114. 2022.
6. Кучеренко Ю.Ф. Концептуальні аспекти створення автоматизованої системи управління протиповітряною та протиракетною обороною держави. // Науково-технічний журнал «Системи озброєння і військова техніка». Харків. Харківський Національний університет імені Івана Кожедуба. № 3 (75). С. 78 – 84. 2023.
7. Маслюк Л., Гавалко В., Джигомон С. Основні проблемні питання та шляхи їх вирішення при створенні автоматичних систем управління ракетних військ і артилерії.//Науковий журнал «Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки і оборони». Київ. Науковий інститут оборони України. № 45 (3). С. 63 – 68. 2022
8. Кривонос І.Ю. Про задачі оптимізації процесу спостереження.// Міжнародний науково-технічний журнал «Проблеми керування та інформатики». Київ. Інститут кібернетики ім. В .М. Глушкова НАК України. № 1. С. № 30 – 41. 2023
9. Семчак О.Б. Богданова О. Г. Проблеми та перспективи розвитку автоматизованих систем управління цілевказання // Збірник наукових праць військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Випуск № 82. Київ. 2024.
10. Богач А. С., Чаган Ю. А., Марченко Я. В., Ликов В. В. Щодо питання збільшення дальності та точності стрільби ствольних комплексів озброєння / Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції “Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ” Львів. 14-15 травня. Національна академія Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного. 2020. С. 12.
11. Головань В., Головань А., Герасимов В., Малишкін О. Перспективні напрямки розвитку радіолокаційних засобів ракетних і артилерії. Збірник тез доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції “Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та шляхи вирішення в умовах воєнного стану”. Одеса. Військова академія. 20.10.2023. С. 35-36.
12. Андрухов С. Основні чинники, що мають найбільший вплив на ефективність функціонування систем управління артилерією. Збірник тез доповідей V міжнародної науково-практичної конференції «Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави, проблеми та шляхи вирішення в умовах воєнного стану». Одеса. Військова академія. 20.10.23. С. 15-16.

13. Сенькин В.С., Сюткина-Доронина С.В. До вибору методів, що використовуються при оптимізації проектних параметрів управління ракетним об'єктом. // Технічна механіка. 2019. № 1 . С. 38 – 52.

14. Клімович С.О., Пуштарик О.В. Варіант будови системи управління радіозасобами з широкосмуговими сигналами. Міжнародна науково-практична конференція "Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку". 15 березня 2023 р./ Збірник тез доповідей. - Харків. Національна академія Національної гвардії України. Харківський Національний університет радіоелектроніки. 2023. С.23-24.

15. Андрушко М.М., Аркушенко П.Л., Андрушко., А.М. Кузьміч О.Є. Впровадження систем автоматизованого збору і обробки інформації на дослідних зразках озброєння та військової техніки. Міжнародна науково-практична конференція "Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку". 15 березня 2023./ Збірник тез доповідей. - Харків. Національна академія Національної гвардії України. Харківський Національний університет радіоелектроніки. 2023. С. 31-32.

REFERENCES:

1. Ladiieva L. R.(2023), «Metody optymizatsii ta osnovy poshuku optimalnykh rishen» : Navch. Posib [Optimization methods and the basis of finding optimal solutions] K.: KPI im. I. Sikorskoho. – 73 s.

2. Shtifzon O. Y., Novikov P. V., Bun V. P. (2020), «Teoriia avtomatychnoho upravlinnia.» Navch. posib.[Theory of automatic control.]– K.: KPI im. I. Sikorskoho. – 144 s.

3. Bobrikov S.O., Bobrykov.S. A. (2023) «Syntez ta modeliuvannia optimalnoi za shvydkodiieiu slidkuiuchoi systemy».[Synthesis and modeling of the tracking system optimal in terms of speed]// Naukovyi zhurnal « Informatyka ta matematychni metody v modeliuvanni». № 13.S.17 – 33.

4. Derets O. L., Sadovoi O.V., Derets H.O. (2021) «Alhorytm syntezu kvazioptymalnykh za shvydkodiieiu system tretogo poriadku iz aperiodychnym kovznym rezhymom» [Algorithm for the synthesis of third-order quasi-optimal systems with an aperiodic sliding regime.]// Zbirnyk naukovykh prats dniprovs'koho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky). № 1.(38). S. 45 – 48.

5. Derets O.L., Derets H. O., Sadovoi O. V. (2022) «Doslidzhennia system 3-ho poriadku ,syntezovanykh iz vykorystanniam alhorytmu zabezpechennia aperiodychnoho kovznoho rezhymu.» [Research of 3rd order systems synthesized using the algorithm for ensuring an aperiodic sliding regime.] // Zbirnyk naukovykh prats Dniprovs'koho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky). № 1 (40). S. 106 – 114.

6. Kucherenko Yu.F.(2023) «Kontseptualni aspekty stvorennia avtomatyzovanoi systemy upravlinnia protypovitrianoi ta protyraketnoi oboronoii derzhavy.» [Conceptual aspects of creating an automated control system for air and missile defense of the state.] // Naukovo-ekhnichniy zhurnal «Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika». Kharkiv. Kharkivskiy Natsionalnyi universytet imeni Ivana Kozheduba. № 3 (75). S. 78 – 84.

7. Masliuk L., Havalko V., Dzhyhomon S. (2022) «Osnovni problemni pytannia ta shliakhy yikh vyrishennia pry stvorenni avtomatychnykh system upravlinnia raketnykh viisk i artilerii» [Main problematic issues and ways to solve them in the creation of automatic control systems of missile forces and artillery.]//Naukovyi zhurnal «Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky i oborony». Kyiv. Naukovyi instytut oborony Ukrainy. № 45 (3). S. 63 – 68.

8. Kryvonos I.Iu. (2023) «Pro zadachi optymizatsii protsesu sposterezhennia»[On the tasks of optimizing the monitoring process.]// Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichniy zhurnal «Problemy keruvannia ta informatyky». Kyiv. Instytut kibernetiky im. V .M. Hlushkova NAK Ukrainy. № 1. S. № 30 – 41.

9. Semchak O.B. Bohdanova O. H.(2024) « Problemy ta perspektyvy rozvytku avtomatyzovanykh system upravlinnia tsilevkazannia»[Problems and prospects for the development of automated targeting control systems] // Zbirnyk naukovykh prats viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. . Kyiv. Vypusk № 82

10. Bohach A. S., Chahan Yu. A., Marchenko Ya. V., Lykov V. V. (2020) «Shchodo pytannia zbilshennia dalnosti ta tochnosti strilby stvolnykh kompleksiv ozbroiennia» [Regarding the issue of increasing the range and accuracy of firing of barreled weapons systems] . //Zbirnyk tez dopovidei Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii “Perspektyvy rozvytku ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki Sukhoputnykh viisk” – Lviv. 14-15 travnia. Natsionalna akademiia Sukhoputnykh viisk imeni hetmana Petra Sahaidachnoho. S. 12.

11. Holovan V., Holovan A., Herasymov V., Malyshkin O. (2023) «Perspektyvni napriamky rozvytku radiolokatsiinykh zasobiv raketnykh i artylerii» [Prospective directions of development of missile and artillery radar equipment] Zbirnyk tez dopovidei V Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Spilni dii viiskovykh formuvan i pravookhoronnykh orhaniv derzhavy: problemy ta shliakhy vyrishennia v umovakh voiennoho stanu». Odesa. Viiskova akademiia. 20.10.2023. S. 35-36.

12. Andrukhov S.(2023) «Osnovni chynnyky, shcho maiut naibilshyi vplyv na efektyvnist funktsionuvannia system upravlinnia artyleriieiu». [The main factors that have the greatest impact on the effectiveness of artillery control systems]. Zbirnyk tez dopovidei V mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Spilni dii viiskovykh formuvan i pravookhoronnykh orhaniv derzhavy, problemy ta shliakhy vyrishennia v umovakh voiennoho stanu». Odesa. Viiskova akademiia. 20.10.23. S. 15-16.

13.. Senkyn V.S., Siutkina-Doronyina S.V.(2019) «Do vyboru metodiv, shcho vykorystovuiutsia pry optymizatsii proektnykh parametriv upravlinnia raketnym ob'ektom». [To the selection of methods used in the optimization of design parameters of missile object management.]// Tekhnichna mekhanika. 2019. № 1 . S. 38 – 52.

14. Klimovych S.O., Pushtaryk O.V. (2023). «Variant budovy systemy upravlinnia radiozasobamy z shyrokosmuhovymy syhnalamy»[Variant of the structure of the control system of radio means with broadband signals.] Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia "Zastosuvannia informatsiinykh tekhnolohii u pidhotovtsi ta diialnosti syl okhorony pravoporiadku". 15 bereznia 2023 r./ Zbirnyk tez dopovidei. - Kharkiv. Natsionalna akademiia Natsionalnoi hvardii Ukrainy. Kharkivskiy Natsionalnyi unyversytet radioelektroniky. 2023. S.23-24.

15.Andrushko M.M., Arkushenko P.L., Andrushko A.M. Kuzmic O.Ie (2023). «Vprovadzhennia system avtomatyzovanoho zboru i obrobky informatsii na doslidnykh zrazkakh ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky». [Implementation of systems for automated collection and processing of information on experimental samples of weapons and military equipment.] Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia "Zastosuvannia informatsiinykh tekhnolohii u pidhotovtsi ta diialnosti syl okhorony pravoporiadku". 15 bereznia 2023./ Zbirnyk tez dopovidei. - Kharkiv. Natsionalna akademiia Natsionalnoi hvardii Ukrainy. Kharkivskiy Natsionalnyi unyversytet radioelektroniky. 2023. S. 31-32.

Ph.D. Bogdanova O.G.

NUMERSCFL METHOD OF CALCULATING SWITCHING MOMENT OF RELAY CONTROL IN TASRS OF MAXIMUM SPEED

The dynamic qualities of typical tracking systems used to control the position of weapon barrels, radar antennas, launchers, etc., are described by high-order differential equations. The theorem about n -intervals, well-known in the theory of automatic control, proved by O. A. Feldbaum, requires n (or $n-1$) control actions, which leads to increased wear of relay switching devices and requires a sufficiently long time to calculate the moments of optimal relay control. In this connection, there are limitations to the application of optimal control of low-inertia systems. This means that during the technical implementation of fast automatic targeting, it is necessary to implement a transition process that is optimal in terms of speed in the automatic control system with a large number of control action switches. In practice, it is undesirable to operate the drive with frequent switching. This leads to a large load, reduces its reliability and causes rapid wear of its elements. This, in turn, leads to a decrease in the reliability of the drive and to a decrease in the combat readiness ratio of the weapon. In this case, it is expedient to move from optimal control to quasi-optimal by reducing the order of the differential equation to the third [9]. Optimization in this case is implemented by three switching intervals of the control action and is sufficiently fully investigated in the works of many authors [6, 7].

It is possible to expand the range of use of optimal control systems in the class of low-inertia control objects if you calculate in advance the moments of switching in optimal and quasi-optimal systems and determine the value of the parameter at these moments, and then control the switching either according to the program (time) law or according to the deviation of the actual value parameter from the one calculated at the time of switching.

The task of synthesizing a speed-optimal control system is reduced to the synthesis of a high-speed system control device that would ensure the transfer of the state vector of the controlled object from the initial point to the final point.

The article proposes a method for calculating the switching moments of the control action, which creates the possibility of a rational transition from theoretically optimal to practically realized quasi-optimal control, increasing the speed of the guidance system. The rate of action increases as the speed of the target increases and the distance to it decreases. The guidance drives of the weapons must provide maximum speed in order to increase the possibility of destroying targets that fly at high speeds. The speed-optimal process is described by a high-order differential equation. The number of switching moments of the control action is equal to the order of the differential equation. This is known as the n-interval theorem. Thus, the task of determining the optimal control is reduced to the task of determining the moments of change of the control sign and the final value of time when the object is transferred from one point of the phase space to another. The work provides a method for calculating moments of time by a numerical method directly from the equation of the system. In this case, the solution of the problem is simplified and practically not complicated when the order of the differential equation increases and when there are restrictions on the phase coordinates of the object or in the case of a variable structure of the object. The method also does not depend on the type of roots of the characteristic equation. The objective function is also minimized numerically. The Nelder-Mead method is used to minimize it.[1] The conducted numerical experiment confirms the possibility of representing the control system of the nth order by an equivalent system of a lower order.

Keywords: switching moments, control action, control system, numerical method, optimal control, quasi-optimal control, speed, transient process.

