УДК 681.5.075

Р.О. Бєляков, Г.Д. Радзівілов

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації ДУТ, Київ

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ДІАГРАМОЮ НАПРАВЛЕНОСТІ АКТИВНОЇ ФАЗОВАНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ

У статті продемонстровано результати моделювання системи автоматичного керування діаграмою направленості активної фазованої антенної решітки. В результаті встановлено тотожність отриманих результатів розрахунковим значенням показників якості САК. Автори підкреслюють, що побудова систем автоматичного керування діаграмою направленості активних фазованих антенних решіток у відповідності до запропонованих методів дозволяє істотно підвищити швидкодію та динамічну точність цих систем.

***Ключові слова**: активна фазована антенна решітка, діаграма направленості.*

Вступ

Відомо, що показники якості радіоелектронних систем в значній мірі залежать від властивості конструктивно-електричних параметрів антенно-фідерних пристроїв [1]. Останнім часом набуває все більшої актуальності використання в перспективних радіотехнічних комплексах різного призначення (повітряні сили, військово-морські сили) складних систем активних фазованих антенних решіток (АФАР), формуючих задану діаграму направленості при швидкому скануванні одночасно в широкому спектрі частот.

В роботах [2 – 4] пропонуються шляхи покращення показників якості перехідних процесів систем автоматичного керування. Запропоновано синтез розімкнутого зв’язку комбінованої системи та синтез диференціального зв’язку, що виконані у відповідності з умовами зменшення динамічної, середньоквадратичної помилки та підвищення швидкодії системи автоматичного керування. Результати досліджень можуть бути використані для оцінки показників під час побудови АФАР. У [5] показано метод оцінки показників якості системи автоматичного керування (САК) діаграмою направленості (ДН) АФАР. За допомогою [5,6] було отримано розрахункові значення параметрів САК ДН АФАР, тому справедливо підтвердити результати розрахунків у інтерактивному середовищі MATHLAB.

Мета роботи. Необхідно провести оцінку показників якості (динамічної точності та швидкодії) систем автоматичного керування (САК) ДН АФАР, дослідити стійкість системи, визначити динамічні, середньоквадратичні помилки (СКП), та показники якості перехідних процесів побудованої імітаційної моделі у відповідності до [5,6] з метою підтвердження висновків про можливість підвищення швидкодії САК ДН АФАР за допомогою одного диференціального зв'язку середньоквадратичних, динамічних помилок, покращення показників якості перехідних процесів системи, що викликаються як задаючою, так і збурюючою дією, прикладеною до різних точок системи, виконано моделювання вихідної системи та системи із диференційним зв'язком.

Можливість мінімізації СКП залежить від властивостей передаточної функції системи, яка в свою чергу залежить від принципу керування, у відповідності з яким побудована ця система.

Моделювання САК ДН АФАР по напряму на ретранслятор

На рис. 1 зображена вихідна змодельована САК ДН АФАР, що містить структурні схеми вихідної системи з принципом керування по відхиленню і системи з диференційним зв'язком, на входи яких поступає паралельно задаюча дія $\beta_p(t)$.

Параметри цих систем рівні параметрам систем, розглянутим вище. За допомогою диференційного зв'язку в систему подана перша і друга похідні задаючого дії. Перша похідна (параметр τ_1) синтезована відповідно до умови підвищення порядку астатизму системи з першої до другої (умовою мінімізації СКП), друга похідна (параметр τ_2) – відповідно до умови мінімізації квадратичної інтегральної оцінки перехідної функції системи, що викликається задаючою дією $\beta_p(t)$ [7]. При замкнутому ключі К1 на входи систем паралельно поступає нестаціонарна випадкова задаюча дія, спектральна щільність похідної якої, сформована із білого шуму за допомогою аперіодичної та інтегруючої ланок. Для якісної оцінки впливу диференціального зв'язку на помилку відтворення випадкової задаючої дії на осцилограф Scope 1 подані, зображення помилки $\theta_\beta(t)$ (рис. 2, а) вихідної САК і помилка системи з диференційним зв'язком (рис. 2, б). Із порівняння кривих $\theta_\beta(t)$ і $\theta_{\beta д}(t)$ спостерігаємо, що за допомогою диференційного зв'язку вдається істотно зменшити помилку відтворення випадкової задаючої дії – азимута $\beta_p(t)$ на ретранслятор зв'язку.

© Р.О. Бєляков, Г.Д. Радзівілов

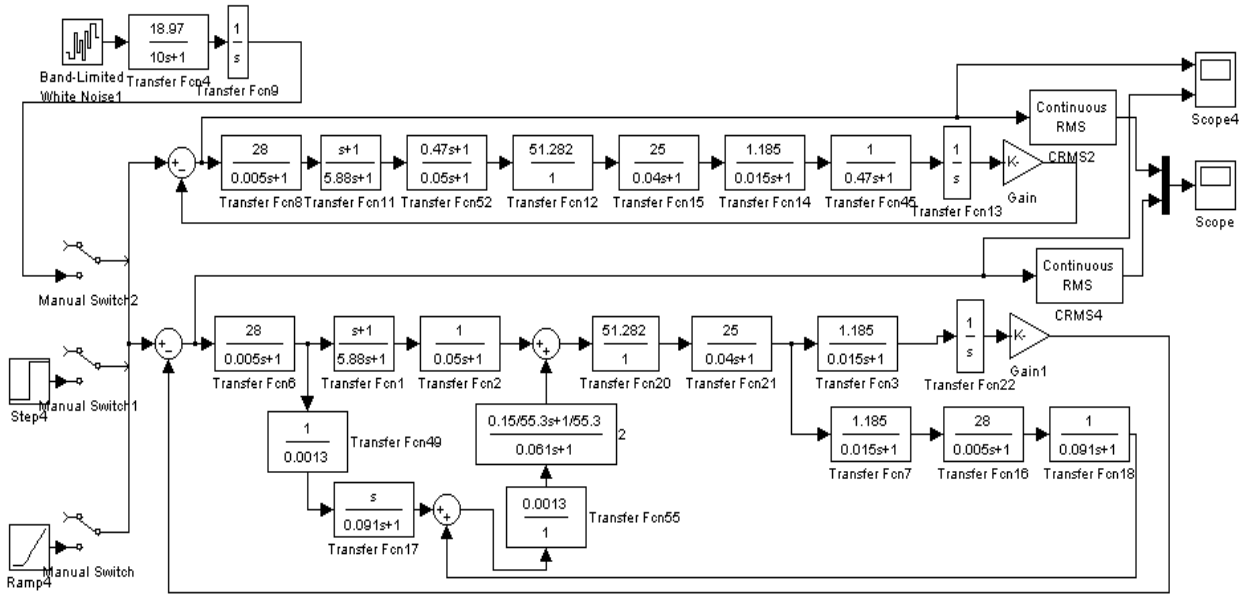

Рис.1. Імітаційна модель системи автоматичного керування
діаграмою направленості АФАР з диференційним зв'язком

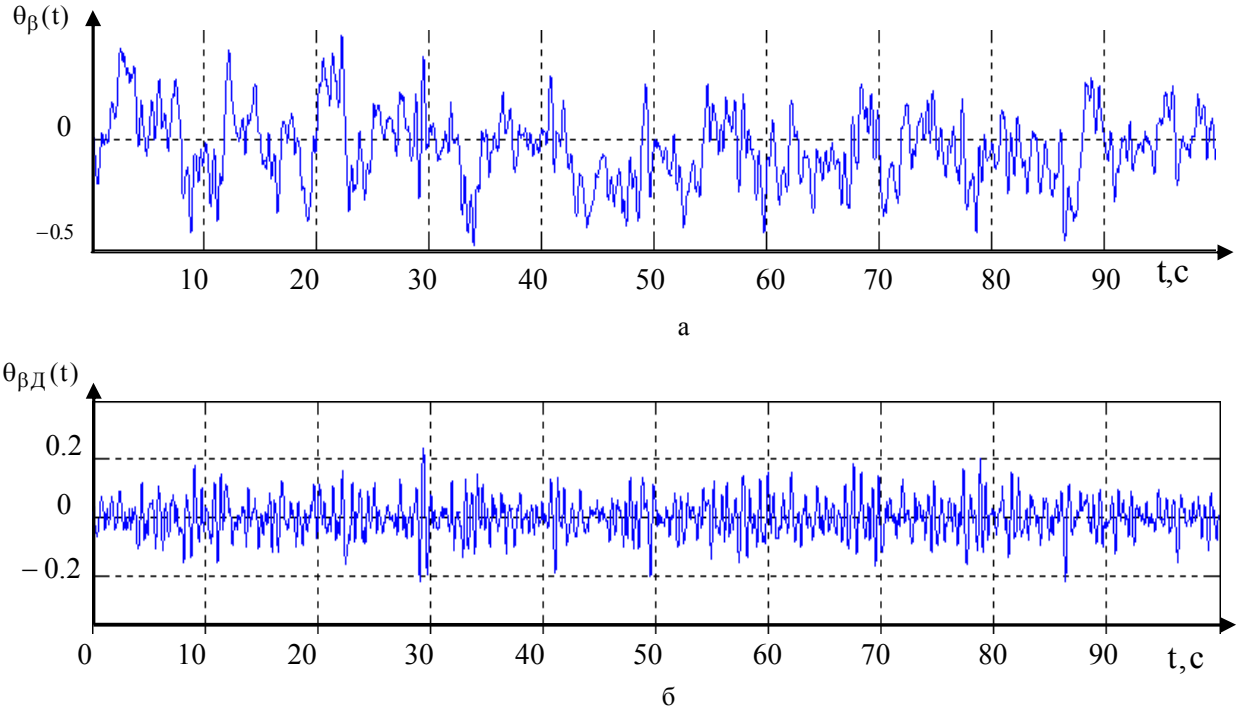

Рис. 2. Функції помилок системи автоматичного керування
а – вихідної системи,
б – системи з диференційним зв'язком

Для кількісної оцінки впливу диференціального зв'язку на СКП обох систем через обчислювальні пристрої 1 і 2, що визначають СКП відповідно до формули $\varepsilon_\beta = \sqrt{\overline{\theta_\beta}^2}$, подаються на осцилограф Scope2. Крива $\varepsilon_\beta(t)$ (рис. 3) відповідає середньоквадратичному значенню помилки вихідної системи, крива $\varepsilon_{\beta Д}(t)$ – середньоквадратичній помилці системи з диференційним зв'язком.

У табл. 1 приведені розрахункові значення СКП вихідної системи ε_β, системи з диференційним зв'язком $\varepsilon_{\beta Д}$ та їх значення, одержані в результаті моделювання. Згідно табл. 1 розрахункові значення середньоквадратичних помилок, що викликаються випадковою задаючою дією, вихідної САК ДН і системи САК ДН з диференційним зв'язком з великим ступенем точності співпадають за їх значеннями, одержаними в результаті моделювання.

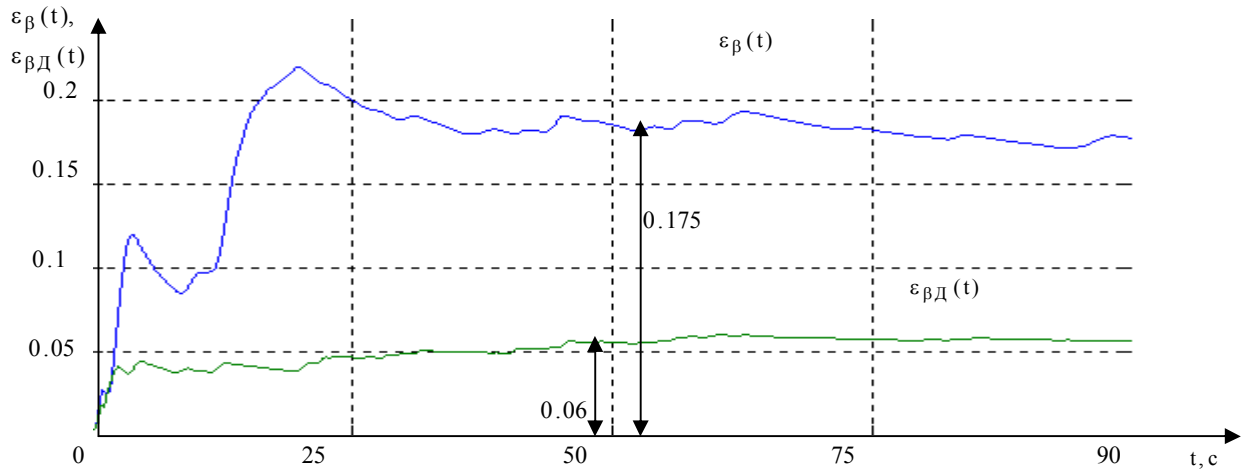

Рис. 3. Функції СКП вихідної системи $\varepsilon_\beta(t)$ та системи із диференційним зв'язком $\varepsilon_{\beta Д}(t)$

Таблиця 1

Порівняння
розрахункових значень СКП
із отриманими в результаті моделювання

СКП систем та їх відношення	Розрахункові значення	Результати моделювання
ε_β	0.17	0.175
$\varepsilon_{\beta Д}$	0.059	0.06
$\varepsilon_\beta/\varepsilon_{\beta Д}$	2.881	2,91
ε_X	$4{,}781\ 10^{-5}$	$5{,}5\ 10^{-5}$
$\varepsilon_{XД}$	$9{,}581\ 10^{-6}$	$1\ 10^{-5}$
$\varepsilon_X/\varepsilon_{XД}$	4,99	5,5

При замкнутому ключі К2 (рис. 1) на входи обох систем подається одинична ступінчаста задаюча дія $\beta_p(t)$.

Перехідні процеси початкової вихідної системи $\theta_{П\beta}(t)$ і системи з диференційним зв'язком $\theta_{П\beta Д}(t)$ подаються на осцилограф Scope 1, зображені на рис. 4. Отримуємо, що показники якості перехідного процесу в системі з диференційним зв'язком значно вище, ніж у вихідній системі. Зокрема, час встановлення перехідного процесу зменшився в 1,84 рази. Перехідні функції систем автоматичного керування діаграмою направленості АФАР, одержані в результаті моделювання співпадають з розрахунковими.

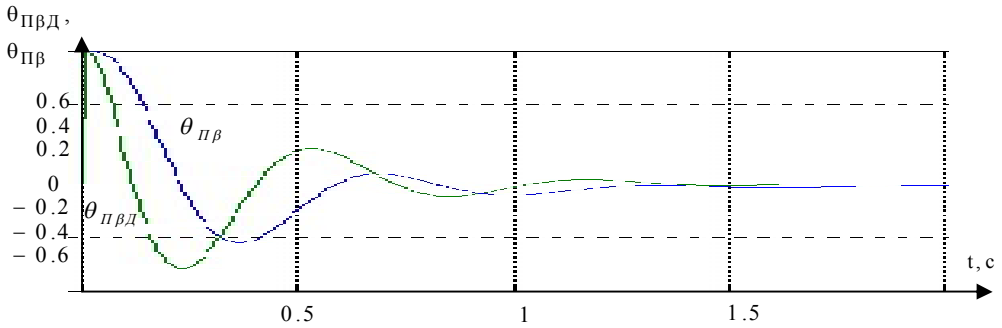

Рис. 4. Функції перехідних процесів вихідної системи та системи з диференційним зв'язком при одиночній ступінчатій задаючій дії $\beta_p(t)$

Сталі помилки обох систем рівні нулю, що відповідає їх розрахунковим значенням.

При замкнутому ключі К3 на входи систем поступає задаюча дія, що змінюється по лінійному закону.

Перехідні процеси вихідної системи $\theta_{П\beta}(t)$ і системи з диференційним зв'язком подаються на осцилограф Scope 1.

З розгляду осцилограм, зображених на рис. 5, робимо висновок, що при лінійній зміні азимута ретранслятора зв'язку у вихідній системі виникає стала динамічна помилка, що відповідає розрахунковому значенню. Показники якості перехідного процесу в системі з диференційним зв'язком істотно покращилась. У системі з диференційним зв'язком стала помилка рівна нулю, що відповідає теоретичним розрахункам.

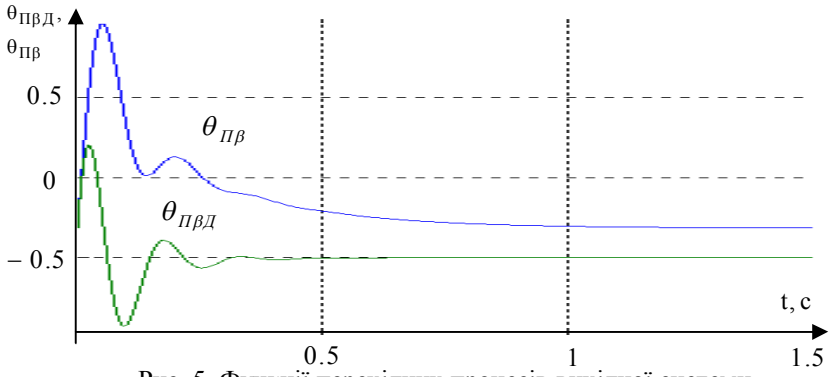

Рис. 5. Функції перехідних процесів вихідної системи
та системи з диференційним зв'язком при лінійній зміні $\beta_p(t)$

Модель САК ДН АФАР по випадковій задаючій (азимут на ретранслятор) і збурюючій (випадкове положення АФАР) діях

На рис. 6 зображено змодельовану САК ДН АФАР з диференційним зв'язком, на яку паралельно поступає збурююча дія – зміна положення АФАР.

За допомогою диференційного зв'язку в систему введено сигнал, пропорційний збурюючій дії, синтезованої відповідно до умови перетворення статичної системи відносно X(t) в астатичну з астатизмом першого порядку (умовою мінімізації СКП), і перша похідна цієї дії, синтезована відповідно до умови мінімізації квадратичної інтегральної оцінки (параметр τ_2).

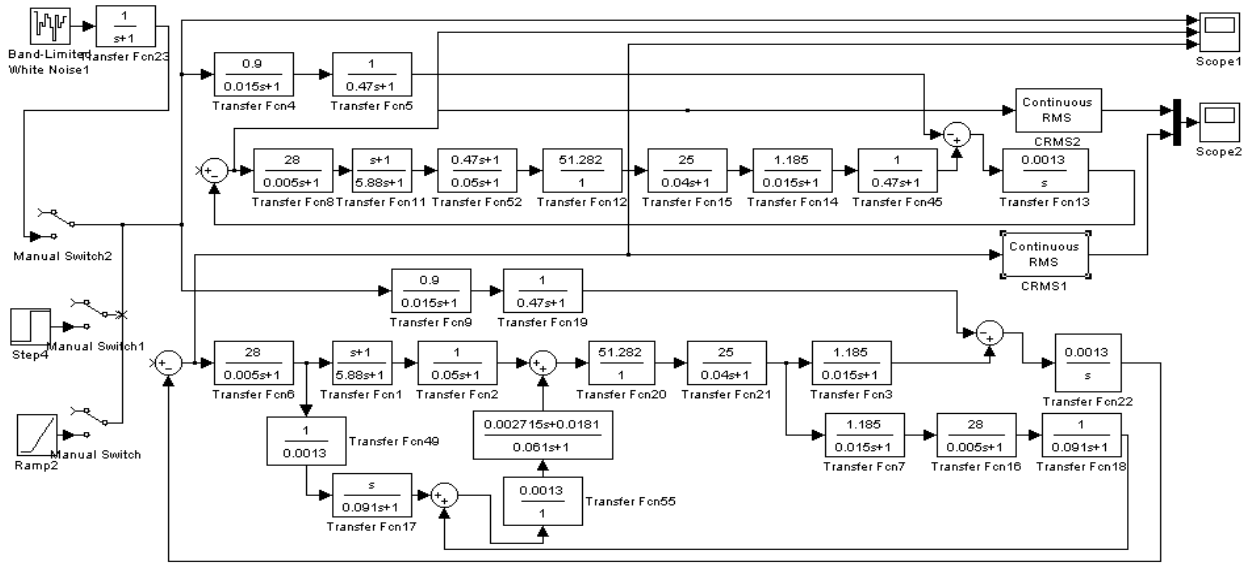

Рис. 6. Імітаційна модель системи автоматичного керування діаграмою направленості АФАР з диференційним зв'язком для дослідження збурюючого впливу X(t)

При замкнутому ключі К1 в САК вводимо випадкову збурюючу дію із спектральною щільністю $S_X(\omega) = 1/(\beta^2 + \omega^2)$, що формується із білого шуму за допомогою аперіодичної ланки 1/(s + 1). За допомогою Scope 1 можливо спостерігати осцилограми збурюючої дії X(t), помилки вихідної САК ДН $\theta_X(t)$ і помилки $\theta_{XД}(t)$ системи з диференційним зв'язком, що викликаються збурюючою дією. З порівняння осцилограм помилок випливає, що за допомогою диференційного зв'язку вдається істотно зменшити помилку, що викликається збурюючим впливом X(t).

Для кількісної оцінки впливу використовуються обчислювальні пристрої CRMS1 і CRMS2, що визначають СКП, подаються на осцилограф Scope2 (рис.7). При замкнутому ключі К2 (рис.6) ступінчаста збурююча дія подається на вихідну САК систему з диференційним зв'язком. Перехідні процеси вихідної системи САК ДН АФАР $\theta_{ПX}(t)$ і системи з диференційним зв'язком $\theta_{ПXД}(t)$ подаються на осцилограф Scope 1, функції яких зображені на рис. 8.

При замиканні ключа К3 збурююча дія, що змінюється по лінійному закону подається на обидві системи автоматичного керування. З осцилограм перехідних процесів на виході Scope 1 (рис. 9) випливає, що у вихідній системі помилка зростає в часі.

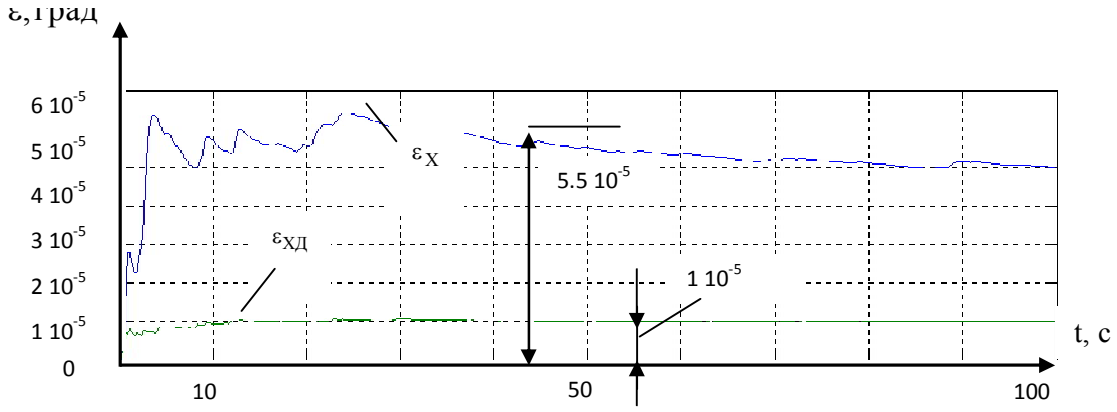

Рис. 7. Перехідні функції вихідної САК
і з диференційним зв'язком при одиничній ступінчастій дії X(t)

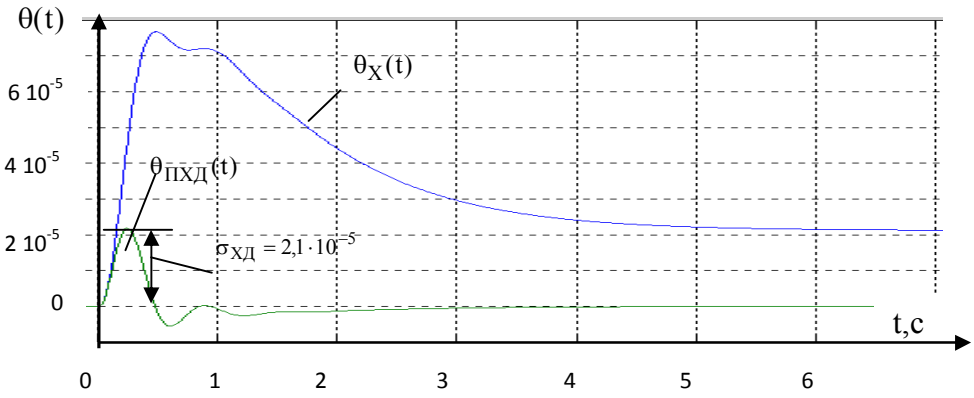

Рис. 8. Функції перехідних процесів САК ДН АФАР,
що викликаються збурюючою дією із спектральною щільністю $S_X(\omega)$

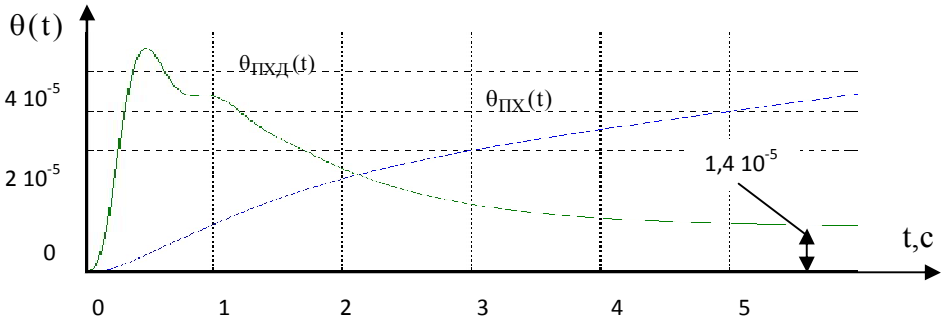

Рис. 9. Функції перехідних процесів САК ДН АФАР,
що викликаються лінійною зміною X(t)

У системі з диференційним зв'язком помилка обмежена скінченним значенням, що відповідає розрахункам

Висновки

У статті продемонстровано імітаційну модель системи автоматичного керування діаграмою направленості активної фазованої антенної решітки. Моделювання здійснено у відповідності із методами мінімізації середньоквадратичних помилок, квадратичних інтегральних оцінок, та методу оцінки показників якості систем автоматичного керування. За допомогою імітаційної моделі, побудованої у середовищі MATLAB, спостерігаємо відповідність отриманих значень показників якості систем автоматичного керування розрахованим заздалегідь, що підтверджує можливість підвищення швидкості та динамічної точності систем автоматичного керування діаграмою направленості активних фазованих антенних решіток. Запропонована імітаційна модель

виконана із диференційним зв'язком (параметри якої обрані згідно умови підвищення порядку астатизму системи САК ДН).

Проведено моделювання вихідної системи САК ДН АФАР з принципом керування по відхиленню та системи з диференційним зв'язком, на входи яких подається паралельно задаюча дія, а також системи з диференційним зв'язком, на який паралельно подається збурююча дія викликана випадковим положенням полотна АФАР.

Результати моделювання на ПЕВМ системи керування з високою достовірністю підтвердили справедливість отриманих теоретичних розрахунків і переконали в можливості суттєвого підвищення показників якості системи автоматичного керування.

Визначено, що побудова САК ДН активних фазованих антенних решіток згідно запропонованої моделі дозволить скоротити час реакції системи на випадкову зміну фази сигналу (від значення якої залежить напрям головного пелюстка ДН вцілому), про що свідчать отримані результати:

- зменшення середньоквадратичної помилки викликаної задаючою дією в 2,9 рази;
- зменшення середньоквадратичної помилки викликаної збурюючою дією (випадковим положенням полотна АФАР в 4,9 рази;
- зменшити час перехідних процесів, про що свідчить квадратична інтегральна оцінка, в 1,23 рази.

Напрямком подальших досліджень визначено розробку універсального алгоритму для побудови системи автоматичного керування діаграмою направленості активних фазованих антенних решіток, з урахуванням критеріїв мінімуму часу перехідних процесів та середньоквадратичної помилки системи.

Список літератури

1. Воскресенский Д.И. Активные фазированные антенне решетки / Д.И. Воскресенский. – М.: Радиотехника, 2004. – С. 24 – 31.

2. Минимизация среднеквадратических ошибок и квадратичных интегральных оценок следящих систем с помощью разомкнутых и дифференциальных связей / Г.Ф. Зайцев, В.Г. Кривуца, В.Л. Булгач, Г.Д. Радзивилов. – К.: ГУИКТ, 2006. – 185 с.

3. Зайцев Г.Ф. Противоречие между условиями минимизации СКО и квадратичной интегральной оценки в следящих системах с принципом управления по отклонению / Г.Ф. Зайцев, Г.Д. Радзивилов // Проблемы управления и информатики. – 2004. – № 1. – С. 48 – 59.

4. Повышение показателей качества корреляционных систем / Г.Ф. Зайцев, В.Л. Булгач, Н.В. Градобоева, А.В. Сайко // Матеріали VIII наук. конф. "Сучасні тенденції розвитку технологій в комунікаціях та освіті" (Київ, 24-25 листопада 2011 р.). – К.:ДУІКТ, 2011. – С. 226 – 231.

5. Бєляков Р.О. Метод оцінки показників якості системи автоматичного керування діаграмою направленості фазованої антенної решітки / Р.О. Бєляков, Г.Д. Радзівілов, О.І. Остапук [та ін.] // Збірник наукових праць ВІТІ ДУТ. – 2014.– № 1.– С. 6 – 12.

6. Зайцев Г.Ф. Минимизация среднеквадратических ошибок в следящих системах / Г.Ф. Зайцев, Г.Д. Радзівілов // Проблемы управления и информатики.– 2004.– № 6.– С. 62 – 72.

7. Кривуца В.Г. Синтез связи по задающему воздействию комбинированной следящей системы в соответствии с условиями минимизации СКО / В.Г. Кривуца, Г.Ф. Зайцев, Г.Д. Радзивилов // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2003. – Т. 1, № 1. – С. 9 – 17.

Надійшла до редколегії 10.3.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Толюпа, Навчально-науковий інститут захисту інформації Державного університету телекомунікацій, Київ.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Р.О. Беляков, Г.Д. Радзивилов

В статье продемонстрированы результаты моделирования системы автоматического управления диаграммой направленности активной фазированной антенной решетки. Подтверждено соответствие полученных результатов с расчетными показателями качества системы автоматического управления. Автор подчеркнул, что построение систем автоматического управления диаграммой направленности активных фазированных антенных решеток в соответствии с предложенными методами позволит существенно повысить быстродействие и динамическую точность этих систем.

Ключевые слова: *активная фазированная антенная решетка, диаграмма направленности.*

SIMULATION MODEL OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM BY ACTIVE PHASED ARRAY ORIENTATION DIAGRAM

R.O. Bieliakov, G.D. Radzivilov

In the article the results of design of automatic control system are shown by the diagram of orientation of active phased array. Accordance of the got results is confirmed with the calculation indexes of quality of automatic control system. An author underlined that construction of the automatic control system in accordance with the offered methods will allow the diagram of orientation of active phased arrays substantially to promote a fast-acting and dynamic exactness of these systems.

Keywords: *list of keywords. active phased array, diagram of orientation/.*