

В.А. ЗОЗУЛЯ  
Державний торговельно-економічний університет  
С.І. ОСАДЧИЙ  
Льотна академія Національного авіаційного університету

## МОДЕЛЮВАННЯ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ ТА МОРСЬКОГО ХВИЛЮВАННЯ ПЛАТФОРМОЮ СТЮАРТА

*У статті розглянуто можливості моделювання різного роду збурень авіаційних, морських та наземних для формування керуючих або збурюючих впливів системи керування переміщенням центру обертання робочої поверхні платформи Стюарта. Показано вплив чинників навколишнього середовища на різні види технологічних завдань, що виконують механізми на основі платформи Стюарта.*

*Зроблено огляд існуючих ідеалізованих моделей атмосферної турбулентності та морського хвилювання. Для математичного опису спектра морського хвилювання запропоновано декілька спектрів Ю.М. Крилова, А.І. Вознесенського – Ю.А. Нецветаєва, Г.А. Фірсова, Пірсона – Московіц, Неймана, Бретшнайдера та Хассельмана (спектр JONSWAP), для опису атмосферної турбулентності запропоновано спектри на основі функції Давенпорта, Кармана і Кеймала. Обидва ці явища за певних припущень можна розглядати у вигляді однорідного та випадкового ізотропного векторного поля з гаусовим розподілом компонентів та нульовим математичним очікуванням. Показано можливість їх використання у дробово-раціональній формі під час створення формуючого фільтру, та побудовано їх спектральні щільності. Наведено приклади спектральних щільностей випадкових збурень, що діють на гелікоптер або морське судно, які отримані під час проведення натурального експерименту. Аналіз цих спектральних щільностей дає підстави стверджувати: щоб сформувавши вимоги до розроблення системи автоматичного керування рухом робочої поверхні платформи Стюарта, необхідно мати апріорну інформацію про те, які коливання вона повинна відтворювати.*

*Приведено умови розроблення багатовимірної формуючого фільтру для формування керуючих або збурюючих впливів системи керування переміщенням центру обертання робочої поверхні платформи Стюарта. Для цієї задачі обґрунтовано використання формуючого фільтру на основі стандартної моделі Драйдена. Спектральні щільності сигналів моделі Драйдена мають діапазон пропускання порівняно з іншими спектральними щільностями не менше, а в деяких випадках на порядок більше, що дає змогу повністю без пошкоджень відтворити сигнал.*

*Ключові слова: спектральна щільність, повітряний потік, морське хвилювання, модель Драйдена, платформа Стюарта.*

V.A. ZOZULIA  
State University of Trade and Economics  
S.I. OSADCHY  
Flight Academy of the National Aviation University

## AIR FLOW AND SEA SWELL MODELING BY THE STEWART PLATFORM

*The article considers the possibilities of modeling various kinds of aviation, marine, and ground disturbances to form control or disturbing influences of the control system for moving the centre of rotation of the working surface of the Stewart platform. The influence of environmental factors on various types of technological tasks performed by mechanisms based on the Stewart platform is shown.*

*An overview of existing idealized models of atmospheric turbulence and sea waves is given. For the mathematical description of the sea wave spectrum, several spectra of Y.M. Krylov, A.I. Voznesensky – Y.A. Netsvetayev, G.A. Firsov, Pearson-Moskovitz, Neumann, Brettschneider, and Hasselman (JONSWAP spectrum) are proposed, and for the description of atmospheric turbulence, spectra based on the Davenport, Carman, and Keymal functions are proposed. Both of these phenomena, under certain assumptions, can be considered as a homogeneous and random isotropic vector field with a Gaussian distribution of components and zero mathematical expectation. The possibility of their use in a fractional rational form in the creation of a shaping filter is shown, and their spectral densities are constructed. Examples of spectral densities of random disturbances acting on a helicopter or a sea vessel obtained during a full-scale experiment are given. The analysis of these spectral densities suggests that to formulate requirements for the development of a system for automatic control of the movement of the working surface of the Stewart platform, it is necessary to have prior information about the oscillations it should reproduce.*

*The conditions for the development of a multidimensional shaping filter for the formation of control or disturbing influences of the control system for moving the centre of rotation of the working surface of the Stewart platform are*

presented. For this task, the use of a shaping filter based on the standard Dryden model is substantiated. The spectral densities of the Dryden model signals have a transmission range that is not less than, and in some cases an order of magnitude greater than, other spectral densities, which makes it possible to reproduce the signal completely without damage.

*Key words: spectral density, air flow, sea agitation, Dryden model, Stewart platform.*

### Постановка проблеми

Сьогодні у багатьох сферах науки і техніки активно створюються системи керування положенням платформи Стюарта, яка має шість однотипних кінематичних ланцюгів (штанг) [1]. Програмно регулюючи довжину штанг платформи Стюарта, можна управляти положенням вихідної ланки (рухомої платформи), переміщати її у вертикальному і горизонтальному напрямках, повертати в трьох площинах. Платформа Стюарта має шість ступенів свободи: три поступальні ступені рухливості (зміщення характерної точки вздовж осей нерухомої системи координат, пов'язаної з нерухомим основою) і три обертальні ступені рухливості (поворот рухомої платформи щодо власних осей рухомої системи координат, пов'язаної з рухомою платформою).

На підставі проведеного аналізу [2] використання механізму паралельної структури на основі платформи Стюарта для вирішення різних завдань можна побачити, що існують технологічні завдання, за яких платформа Стюарта здійснює рух, точно слідуючи бажаній траєкторії і орієнтації у певному часовому інтервалі за значного збурюючого впливу з боку навколишнього середовища (стабілізаційна платформа). Також існують технологічні завдання за незначного збурюючого впливу відтворення бажаної траєкторії та орієнтації у вигляді явищ навколишнього середовища з метою динамічної атестації різного роду обладнання.

Для моделювання різного роду збурень (авіаційних, морських та наземних) необхідно мати математичну реалізацію цих збурень. Найкраща реалізація збурень у вигляді спектральних щільностей. Нині відомі дві групи експоненційно і дрібно-раціональних спектрів. Дрібно-раціональні спектри мають певні переваги, оскільки їх моделювання здійснюється більш простими апаратними або програмними засобами. Дрібно-раціональний вираз спектральної щільності випадкового процесу дає змогу дати математичний опис цього процесу у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь і тим самим безпосередньо отримувати тимчасові характеристики [3].

Отже, актуальним є виконання дослідження, спрямованого на обґрунтування динаміки вхідних сигналів системи керування платформою Стюарта в разі її використання для моделювання хвилювання моря та повітряного потоку як збурювального або керувального впливу на різні рухомі об'єкти.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Системи стабілізації положення на базі платформи Стюарта використовуються для забезпечення вертикального зльоту та посадки літального апарату з палуби судна у відкритому морі [4]. Також відомі розробки, де платформа Стюарта використовується для забезпечення стабілізації положення під час переміщення вантажу з корабля на корабель чи з корабля на стаціонарну платформу [6] або використовуються, наприклад ROBOCRANE [7], у вантажопідіймальних кранах під час проведення будівельних робіт, обслуговування портових терміналів і накопичувальних майданчиків, рятувальних робот, для маневреності персоналу/обладнання у повітрі, прокладання/видалення підводних труб. Різні модифікації механізму Стюарта застосовуються для забезпечення стабілізації несучої конструкції опорно-поворотного пристрою антенної системи [7].

Механізми з паралельною структурою на основі платформи Стюарта застосовуються для побудови тренажерів-симуляторів, їхнім основним призначенням є імітація руху різних транспортних засобів. Для підготовки пілотів використовують авіаційні тренажери на основі

платформи Стюарта, який є основним механізмом для здійснення руху, наприклад конструкції авіаційного тренажера літального апарату A320 [8], комплексного пілотажного тренажера гелікоптера Mi-17-1V рівня D, згідно з JAR FSTD (H) [9]. Платформу Стюарта можливо використовувати як симулятор рухомої палуби корабля [4]. Застосування подібних механізмів дає змогу моделювати різні режими зовнішніх збурюючих дій на рухливу основу, викликаних хвилюванням моря, зміною курсу, крену або диферента судна, а також їх поєднанням за значних коливань сили та напрямку вітру.

На всі ці види технологічних завдань можуть серйозно вплинути несприятливі погодні умови або навколишні умови біля антенних систем, установок, морських судів або різних майданчиків, такі недетерміновані зовнішні збурення та чинники, як повітряний потік (атмосферна турбулентність), морська хитавиця (морське хвилювання). Дія зазначених чинників викликає зменшення точності систем стабілізації [10].

Відзначено також, що одним із головних і складних аспектів створення рухомих багатовимірних тренажерів-симуляторів, комплексів напівнатурного і натурного моделювання руху є забезпечення близькості керуючих дій, що імітуються, або імітуючих збурених дій до реальних умов функціонування [3].

Для математичного опису спектра морського хвилювання запропоновано велику кількість формул, які тією чи іншою мірою узгоджуються з результатами натурних досліджень. Вони називаються ідеалізованими хвильовими спектрами, тому що відображають тільки загальні риси, властиві хвилюванню всіх морських глибоководних акваторій. За кількістю параметрів, що визначають ці функції, спектри хвилювання бувають одно-, дво- і багатопараметричними. Можна назвати спектри Ю.М. Крилова, А.І. Вознесенського – Ю.А. Нецветаєва, Г.А. Фірсова, Пірсона – Московіц, Неймана, Бретшнайдера, Хассельмана (спектр JONSWAP) [11].

Для моделювання повітряного потоку в надземній частині на середніх та значних висотах згідно з міжнародним стандартом ІЕС 61400-1:2005 [12] статистичний опис турбулентного складника швидкості вітру рекомендовано використовувати емпіричні моделі спектральної щільності, найбільш відомими з яких є функції Давенпорта, Кармана і Кеймала.

### Мета дослідження

**Мета дослідження** – запропонувати універсальний інструмент формування стохастичних зовнішніх збурень, таких як морське хвилювання та повітряний потік, для створення програмного сигналу для системи керування платформи Стюарта під час виконання завдань моделювання рухів об'єкта, що знаходиться у повітрі або водному середовищі.

### Виклад основного матеріалу дослідження

*Моделювання повітряного потоку.* У роботі [13] встановлено, що турбулентність має негаусівський характер, тому функція щільності розподілу швидкості поривів відрізняється від нормального закону розподілу. Припущення про ізотропність поля атмосферної турбулентності справедливе тільки на великих висотах, де не позначається вплив земної поверхні. Поле атмосферної турбулентності стає ізотропним на висотах, що перевищують  $1000h_0^{0,18}$  м, де  $h_0$  – коефіцієнт шорсткості підстильної поверхні. Цю умову необхідно використовувати під час моделювання збурюючого впливу на літальні апарати [14].

Однак у переважній більшості робіт, присвячених розробленню методів моделювання атмосферної турбулентності, вона розглядається у вигляді однорідного та випадкового ізотропного векторного поля з гаусовим розподілом компонентів та нульовим математичним очікуванням, оскільки це призводить до значного спрощення алгоритмів моделювання. Гаусове векторне випадкове поле визначається матричною спектральною щільністю [13–15].

Згідно з [12], функції Давенпорта, Кармана та Кеймала є ірраціональними функціями, тому генерування випадкового процесу турбулентності, як правило, ускладнене. Якщо для цих

спектральних щільностей побудувати апроксимації у вигляді парних невід'ємних дрібно-раціональних функцій, то відкривається можливість наближеного моделювання атмосферної турбулентності за допомогою випадкового процесу, що легко генерується, з раціональною спектральною щільністю. Так, у роботі [14] дослідниками з *NASA Glenn Research Center Cleveland* для статистичного опису турбулентного руху повітряних мас вибрана модель Кармана зі спектральною щільністю поздовжнього і поперечного складників турбулентних пульсацій. У цій статті проведено апроксимацію та показано можливість наближеного моделювання турбулентності Кармана. Спрощена модель атмосферної турбулентності отримана для проєктування систем керування з урахуванням найгіршого випадку атмосферної турбулентності, не погіршуючи продуктивність за нормальних атмосферних умов. Ця модель може використовуватися для проєктування систем керування силовими установками аерокосмічних апаратів або системами керування польотом надзвукових літальних апаратів, а також для вивчення рушійної дії на наземні установки, такі як космічний радіотелескоп.

Відхилення компонент вектору швидкості турбулентного вітру (від їхніх установлених значень), які є основним джерелом стохастичних зовнішніх збурень, можна аналітично представити моделлю Драйдена, котру широко використовують для досліджень поведінки літаків в умовах турбулентності [15]. Відповідно до неї, турбулентний вітер може бути представлений як стохастичний процес, що залежить від швидкості, і може бути розділений на три складники: поздовжній, поперечний та вертикальний. Оскільки в спектральних характеристиках атмосферної турбулентності є невизначеність, то її опис у вигляді фільтра Драйдена може не відповідати реальній ситуації. Тому стосовно моделі вітру робиться припущення, що ці збурення обмежені за модулем. Тобто для отримання наближеного рішення, коли спектральна щільність апроксимується сумою дробово-раціональних функцій  $S_V(\omega) \approx \sum_1^N S_{VK}(\omega)$ , досягається підбором декількох частотних характеристик  $W_k(i\omega)$  ( $k=1 \dots N$ ), що забезпечують виконання наближеної рівності  $S_V(\omega) \approx \sum_1^N |W_k(i\omega)|^2$ .

За результатами експерименту ідентифікуються моделі динаміки рухомих об'єктів включно з матрицями спектральних і взаємних спектральних щільностей неконтрольованого під час експерименту вектору збурень (перешкод), які діють у рухомому об'єкті під час його функціонування в динамічних умовах. Так, у роботі [16] отримано моделі динаміки гелікоптера Мі-8МТВ і моделей збурень, що діють на нього, для використання під час розроблення систем автоматичної стабілізації центру мас і кутової орієнтації різних модифікацій гелікоптерів класу Мі-8 (Мі-17). Для оцінювання моделей динаміки неконтрольованих випадкових збурень використовують матрицю спектральних і взаємних спектральних щільностей неконтрольованих випадкових збурень, приведених до виходу системи, що ідентифікується. Аналіз нормованих коефіцієнтів кореляції між складниками вектору неконтрольованих збурень, що діють на стабілізований гелікоптер у режимі висіння, показує, що збурення слабо корельовані, а збурення, які діють вздовж поздовжньої та поперечної осей гелікоптера, насправді практично ортогональні між собою.

*Моделювання морського хвилювання.* Нерегулярність і хаотичність морських хвиль змушують використовувати для його опису складні математичні методи і моделі. Сьогодні найбільше визнання отримали стохастична і спектральна теорії вітрового хвилювання. У рамках стохастичної теорії хвилі розглядаються як випадковий процес, підлеглий якомусь імовірнісному закону, на основі якого можна оцінити статистичні характеристики хвиль. Основна ідея спектрального методу полягає у тому, що морська поверхня ідеалізується і представляється як суперпозиція плоских регулярних хвиль (спектральних складників) із різними періодами і напрямками поширення. У спектральній теорії використовуються два допущення. По-перше, передбачається, що процес хвилювання є стаціонарним. По-друге, вважається, що енергія

хвиль, що визначається за даними однієї реалізації, вимірної у заданому місці акваторії, дорівнює енергії хвиль у різних точках акваторії, охопленої дією вітру тієї ж сили і напрямку [11].

Опрацювання численних записів хвилювання, зроблених у різних морях, підтверджує той факт, що ординати нерегулярного розвиненого хвилювання розподілені за нормальним законом із нульовим математичним очікуванням, отже, хвилювання можна вважати гаусовським процесом. Використання цього висновку дало змогу теоретичним шляхом установити закони розподілу різних функції видимих хвиль, які називаються ідеалізованими хвильовими спектрами [11].

Більшість ідеалізованих спектрів хвилювання належить до частотних розподілів, що описуються експоненціальною моделлю. Для таких спектрів можна побудувати апроксимації у вигляді парних невід'ємних дробово-раціональних функцій. Так, у роботі [17] запропоновано апроксимацію ідеалізованих хвильових спектрів, де зазначається, що вони мало різняться між собою і результати розрахунків їхнього впливу на різні об'єкти близькі.

Практичні розрахунки показують, що дробово-раціональні спектри зміщені щодо експоненціальних в область нижчих частот. Частотні властивості морських рухомих об'єктів такі, що смуга пропускання розташовується саме в низькочастотній області. Тому застосування розрахункових спектрів морського хвилювання у дрібно-раціональній формі, які в області низьких частот є менш точними, під час аналізу руху морських рухомих об'єктів призводить до завищеного рівня збурювальних впливів [17].

Також у роботі [18] за результатами експерименту були отримані осцилограми вхідних сигналів платформи стенду-імітатора «важкого» корабля (ПКІК «Юрій Гагарін») під час хвилювання океану (моря), що характеризується еліптичним циклічним рухом частинок води і вихідних сигналів вимірника в досліджуваній системі. На основі наведених осцилограм за допомогою методу узагальнених логарифмічних характеристик були отримані аналітичні моделі, спектральних і взаємних спектральних щільностей. На підставі цього була складена тривимірна модель динаміки стохастичних кутових рухів корабля в крейсерському русі. Також було зазначено, що складник морської хитавиці приблизно 0,1 Гц, а частотні смуги пропуску каналів стенда-імітатора на порядок вищі, вхідні сигнали до стенда-імітатора формували спеціально змодельованим послідовним багатовимірним формувальним фільтром безпосередньо з комп'ютерного псевдобілого шуму.

*Формуючий фільтр розрахункових спектрів морського хвилювання та атмосферної турбулентності.* У теорії випадкових процесів функції часу зі змінними залежно від частоти (спектральними характеристиками), до яких відносяться розрахункові спектри морського хвилювання, атмосферної турбулентності, називають кольоровими шумами на відміну від випадкової функції типу білий шум зі спектральною характеристикою, рівномірно розподіленою в усьому діапазоні частот. Під час моделювання кольорових шумів вважають, що вони є результатом перетворення білого шуму з одиничною інтенсивністю формуючим фільтром. У цього фільтра за будь-якого значення кутової частоти квадрат ординати амплітудної частотної характеристики має дорівнювати значенню зазначеної спектральної щільності за цієї частоти.

Зазвичай використовують рекурсивні фільтри, передавальні функції яких відповідають системі звичайних диференціальних рівнянь. При цьому квадрат модуля частотної передавальної функції (модульна функція) є дробово-раціональною функцією від квадрата кутової частоти. Такий підхід можливий за умови, що спектральна щільність є раціональною парною функцією кутової частоти та не має дійсних нулів і полюсів, розташованих у правій півплощині. Тобто для формуючого фільтра, необхідно вибирати стійку передавальну функцію, полюси якої мають від'ємну дійсну частину. Із цієї умови випливає інша обов'язкова умова, що знаменник передавальної функції має розкладатися на поліноми першого або другого ступеня, а всі коефіцієнти цих співмножників мають бути додатними. В іншому разі генерування випадкової цифрової послідовності призводить до процесу, що розходиться. Усім цим умовам відповідає багатовимірний формуючий фільтр на основі стандартної моделі Драйдена.

Виконаємо співставлення зазначених вище спектральних щільностей атмосферної турбулентності та морського хвилювання, які є основним джерелом збурень, що діють на повітряні судна під час польоту, або на морські рухомі об'єкти та спектральні щільності сигналів, що генерує стандартна модель Драйдена. Для цього за допомогою стандартної бібліотеки *MATLAB/SIMULINK 6.5* моделі Драйдена (рис. 1), було згенеровано вектор програмного сигналу  $r_0$ , системи керування рухом робочої поверхні платформи Стюарта (рис. 2).

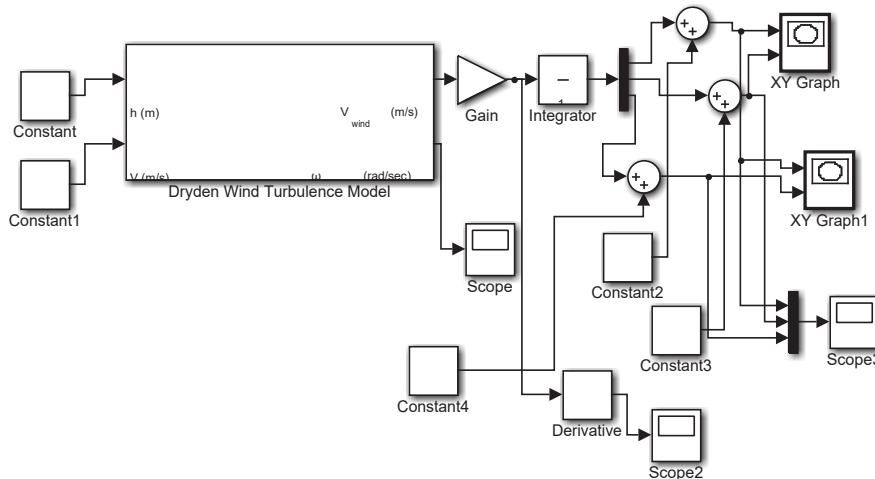


Рис. 1. Модель Драйдена, реалізована в *MATLAB/SIMULINK 6.5*

Вектор програмного сигналу  $r_0$ , якій задає траєкторію руху робочої поверхні платформи Стюарта дорівнює:

$$r_0 = [\xi_0 \quad \eta_0 \quad \zeta_0],$$

де  $\xi_0, \eta_0, \zeta_0$  – задані координати центру обертання робочої платформи (точка  $O$ ) відносно системи координат, пов'язаної з основою платформи Стюарта  $O_0\Theta HZ$  [1].

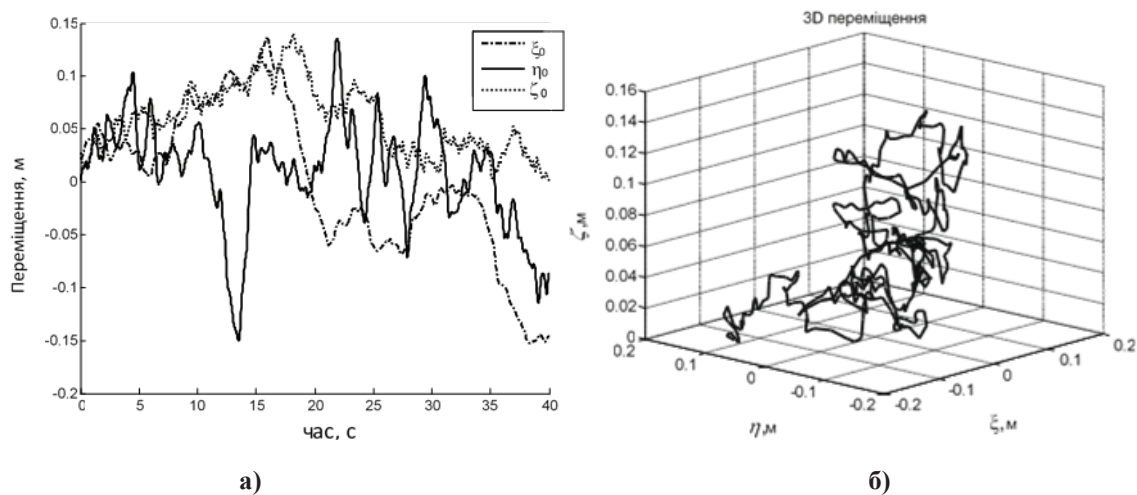
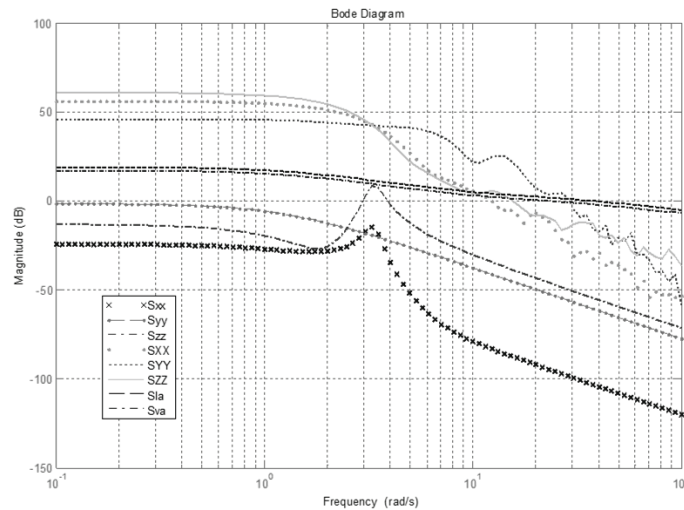


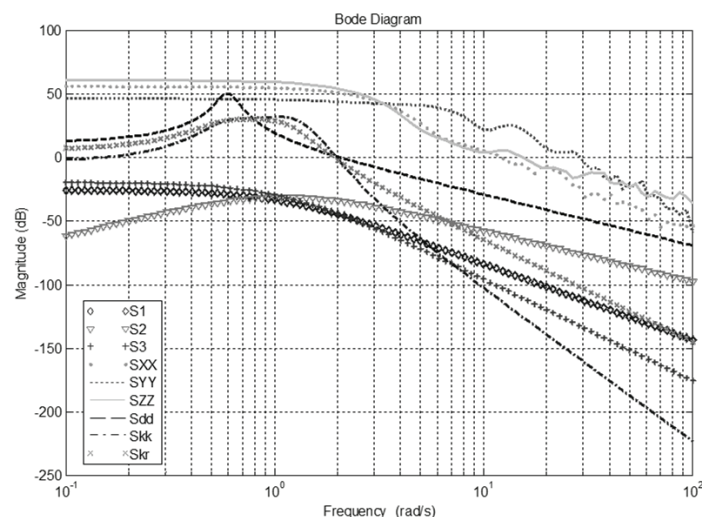
Рис. 2. Значення вхідного сигналу  $r_0$ , а) двовимірній та б) тривимірній системі координат;  $\xi$  – проєкція точки  $O$  на вісь абсцис  $O_0\Theta$ ;  $\eta$  – проєкція точки  $O$  на вісь ординат  $O_0H$ ;  $\zeta$  – проєкція точки  $O$  на вісь аплікват  $O_0Z$

Отримано та побудовано на діаграмі Боді спектральні щільності сигналів моделі Драйдена та для порівняння, з роботи [16] – спектральні щільності неконтрольованих випадкових збурень, які діють уздовж поздовжньої та поперечної осей стабілізованого гелікоптера Мі-8МТВ у режимі висіння, з роботи [14] – спектральні щільності атмосферної турбулентності за швидкості розсіювання вихорів  $8.6 \cdot 10^{-5} \text{ (м}^2/\text{с}^3\text{)}$  та відстані від землі 762 м за моделлю Карман (рис. 3).



**Рис. 3.** Спектральні щільності неконтрольованих випадкових збурень, які діють на гелікоптер Мі-8МТВ:  $S_{xx}$ ,  $S_{zz}$ ,  $S_{yy}$  – поперечна, поздовжня та вертикальна осі; атмосферної турбулентності за моделлю Карман:  $S_{la}$ ,  $S_{va}$  – поперечна та поздовжня осі; сигналів за моделлю Драйдена:  $S_{XX}$ ,  $S_{YY}$ ,  $S_{ZZ}$  – поперечна, поздовжня та вертикальна осі

Отримано та побудовано на діаграмі Боді спектральні щільності сигналів моделі Драйдена та для порівняння, з роботи [17] – спектральні щільності нерегулярного морського хвилювання для розрахунку хитавиці судна при хвилюванні 4 бали за моделлю JONSWAP, з роботи [18] – спектральні щільності морського хвилювання, які отримані за результатами напівнатурного експерименту на стенді – імітаторі корабля (ПКІК «Юрій Гагарін») (рис. 4).



**Рис. 4.** Спектральні щільності нерегулярного морського хвилювання для розрахунку хитавиці судна для хвилювання 4 бали за моделлю JONSWAP:  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  – поперечна, поздовжня та вертикальна осі; морського хвилювання за результатами експерименту на стенді – імітаторі корабля «Юрій Гагарін»:  $S_{dd}$ ,  $S_{kk}$ ,  $S_{kr}$  – диферент, курс та крен осі; сигналів за моделлю Драйдена:  $S_{XX}$ ,  $S_{YY}$ ,  $S_{ZZ}$  – поперечна, поздовжня та вертикальна осі

Порівнюючи спектральні щільності, представлені на рис. 3 і 4, можна помітити, що характер поведінки сигналів однаковий, відповідає гаусовому процесу. Для моделювання впливів, які діють на об'єкт (гелікоптер, морське судно тощо) з боку навколишнього середовища, потрібно використовувати ідеалізовані моделі морського хвилювання, атмосферної турбулентності. Для відтворення середовища, у якому функціонують різні датчики, встановлені на об'єкті (гелікоптер, морське судно тощо), то необхідно моделювати за допомогою спектрів, які отримано шляхом натурного експерименту в результаті впливу на об'єкт.

Спектральні щільності сигналів ідеалізованих моделей атмосферної турбулентності перебувають у діапазоні від 0 до 17 рад/с. Спектральні щільності випадкових збурень, що діють на гелікоптер Мі-8МТВ, мають одну характерну частоту 3,3 рад/с у поперечній і поздовжній осях, що характеризує власні коливання гелікоптера Мі-8МТВ. Також ці спектральні щільності знаходяться у діапазоні від 0 до 6 рад/с.

Спектральні щільності сигналів ідеалізованих моделей морського хвилювання знаходяться у діапазоні від 0 до 4 рад/с. Спектральні щільності збурюючого впливу на стенд – імітатор корабля «Юрій Гагарін» перебувають у діапазоні від 0 до 2 рад/с, також вони мають характерні частоти, що відповідають власній частоті коливання стенда-імітатора відповідно за осями диференту 0,6 рад/с, курсу та крену 1,1 рад/с.

Спектральні щільності сигналів моделі Драйдена перебувають у діапазоні для поперечної від 0 до 12 рад/с, поздовжньої 29,3 рад/с і вертикальної 15,3 рад/с осей. Основна потужність коливання сигналів при цьому була на рівні 4 рад/с, потім зменшується.

### Висновки

Під час вирішення різних технологічних завдань платформою Стюарта існують різного роду збурення, такі як атмосферна турбулентність та морське хвилювання. Обидва ці явища, за певних припущень, можна розглядати у вигляді однорідного та випадкового ізотропного векторного поля з гаусовим розподілом компонентів та нульовим математичним очікуванням. Динаміку цих явищ можна описати матрицями дробово-раціональних спектральних щільностей, що дає змогу легко їх відтворювати за допомогою формуючого фільтру.

З аналізу спектральних щільностей на рис. 3 і 4 можна зробити висновок: щоб сформулювати вимоги до розроблення системи автоматичного керування рухом робочої поверхні платформи Стюарта, необхідно мати апріорну інформацію про те, які коливання вона повинна відтворювати. При цьому спектральні щільності сигналів моделі Драйдена мають діапазон пропускання порівняно з іншими спектральними щільностями не менше, а в деяких випадках на порядок більше, що дає змогу повністю без спотворень відтворити сигнал.

Таким чином, для проведення активного експерименту формування вектору програмних сигналів переміщення центру обертання робочої поверхні платформи Стюарта можливе багатомірним фільтром на основі стандартної моделі Драйдена як універсального інструменту формування стохастичного зовнішнього впливу. При цьому необхідно враховувати апріорну інформацію про частотні властивості потоку повітря або морського хвилювання.

### Список використаної літератури

1. Зозуля В.А., Осадчий С.І. Огляд методів побудови систем керування механізмом паралельної кінематичної структури на основі платформи Стюарта (гексапод). *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2019. Т. 11. № 3. С. 23–31.
2. Зозуля В.А., Осадчий С.І., Беляєв Ю., Pawłowski P. Класифікація завдань і принципів управління механізмом паралельної кінематичної структури для вирішення різних завдань. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2018. Т. 10. № 2. С. 18–29.
3. Блохин Л.Н., Буриченко М.Ю. Статистична динаміка систем управління : підручник. Київ : НАУ, 2003. 208 с.



4. Alexandre Campos, Jacqueline Quintero, Roque Salta' en, Manuel Ferre and Rafael Aracil. An Active Helideck Testbed for Floating Structures based on a Stewart-Gough Platform: Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Acropolis Convention Center Nice, France, 22–26 Sept, 2008. P. 3705–3710.
5. Cai Y., Zheng S., Liu W., Qu Z., Han J. Model Analysis and Modified Control Method of Ship-Mounted Stewart Platforms for Wave Compensation. in IEEE Access, 2021. Vol. 9. P. 4505–4517.
6. Albus, J., Bostelman, R., Dagalakis, N. The NIST robocrane. Journal of Robotic Systems. 1993. № 10(5). P. 709–724.
7. Palamar M., Pasternak Yu., Pasternak V., Mashtalyar S., Shevchuk S. Analysis of accuracy control improvement methods of antenna system mechanisms based on stewart platform. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, Ternopil, Ukraine. 2020. Vol. 100. № 4. P. 55–61.
8. Saudi Pilot Simulator Training Center Holds Airbus A320 Full Flight Simulator Acceptance, URL: <https://afm.aero/saudi-pilot-simulator-training-center-holds-airbus-a320-full-flight-simulator-acceptance/> (дата звернення: 16.02.2024).
9. Комплексні пілотажні тренажери вертольотів Мі-8МТВ, Мі-171. URL: <http://avia-ts.ua/production/8-kompleksnyu-trenazher-vertoletov-mi-8mtv-i-mi-171.html> (дата звернення: 02.05.2023).
10. Зозуля В.А., Осадчий С.І., Мельніченко М.М. Аналіз характеристики точності відтворення еталонної траєкторії платформою Гауфа – Стюарта із системою управління для різних видів завдань. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. Вип. 1(32). С. 19–27.
11. Hauser D., et al (eds). Measuring and analysing the directional spectra of ocean waves. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities. 2005. 485 p.
12. IEC 61400-1: 2005 Wind Turbines – Part 1: Design requirements.
13. Durbin P.A., Reif B.A.P. Statical theory and modeling for turbulent flows. – John Wiley and Sons. West Sussex. United Kingdom. 2011. 357 p.
14. Kopasakis George. Atmospheric turbulence modeling for aero vehicles: fractional order fits. No. GRC-E-DAA-TN23727. 2015. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20110002734/downloads/20110002734.pdf> (дата звернення: 16.02.2024).
15. Antonova A., Kulyk M., Lastivka I. Modeling of an Airplane Wing Moments Induced by Atmospheric Turbulence. *Proceedings of National Aviation University*. 2014. № 59(2). P. 68–72.
16. Блохін Л.М., Вовк В.Г., Безкоровайний Ю.М. Завдання ідентифікації параметрів руху гелікоптера Мі-8 із вантажною підвіскою в режимі висіння. *Проблеми інформатизації та управління*. 2004. Вип. 10. С. 127–131.
17. Yu Y., Pei H., Xu C. Parameter identification of JONSWAP spectrum acquired by airborne LIDAR. *J. Ocean Univ. China*. 2017, pp. 998–1002.
18. Вовк В.Г., Страшко В.А., Тимошенко Н.А. Тривимірний динамічний стохастичний кутів рухів корабля в крейсерському русі. *VI міжнародна науково-технічна конференція гіротехнології, навігації, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки* : збірник доповідей. Ч. II. Київ, 2007. С. 14–19.

### References

1. Zozulia, V.A., & Osadchyi, S.I. (2019). Ohliad metodiv pobudovy system keruvannia mekhanizmom paralelnoi kinematychnoi struktury na osnovi platformy Stiuarda (heksapod) [Review of methods for building control systems for a mechanism of a parallel kinematic structure based on the Stewart platform (hexapod)]. *Mizhnarodnyi naukovo-vyrobnychiy zhurnal «Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh i biznes-protsesiv» – Automation of technological and business processes*. T.11 №3. S. 23–31 [in Ukrainian].

2. Zozulia, V.A., Osadchyi, S.I., Bieliaiev, Yu., & Pawłowski, P. (2018). Klasyfikatsiia zavdan i pryntsyv upravlinnia mekhanizmom paralelnoi kinematychnoi struktury dlia vyrishennia riznykh zavdan [Classification of tasks and principles of control of the parallel kinematic structure mechanism for solving various tasks]. *Mizhnarodnyi naukovo-vyrobnychiy zhurnal «Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh i biznes-protsesiv» – Automation of technological and business processes*. T. 10. № 2. S. 18–29 [in Ukrainian].
3. Blokhyn, L.N., & Burychenko, M.Iu. (2003). *Statystychna dynamika system upravlinnia: pidruchnyk. [Statistical dynamics of control systems: a textbook]*. K.: NAU. 208 s. [in Ukrainian].
4. Alexandre, Campos, Jacqueline, Quintero, Roque, Salta' en, Manuel, Ferre, & Rafael, Aracil (2008). An Active Helideck Testbed for Floating Structures based on a Stewart-Gough Platform: *Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Acropolis Convention Center Nice, France, 22–26 Sept*, pp. 3705–3710 [in English].
5. Cai, Y., Zheng, S., Liu, W., Qu, Z., & Han, J. (2021). Model Analysis and Modified Control Method of Ship-Mounted Stewart Platforms for Wave Compensation. in *IEEE Access*, 2021. vol. 9, pp. 4505–4517 [in English].
6. Albus, J., Bostelman, R., & Dagalakis, N. (1993). The NIST robocrane. *Journal of Robotic Systems*. 10 (5), pp. 709–724 [in English].
7. Palamar, M., Pasternak, Yu., Pasternak, V., Mashtalyar, S., & Shevchuk, S. (2020). Analysis of accuracy control improvement methods of antenna system mechanisms based on stewart platform. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University, Ternopil, Ukraine*. Vol 100, no 4, pp. 55–61 [in English].
8. Saudi Pilot Simulator Training Center Holds Airbus A320 Full Flight Simulator Acceptance, Retrieved from: <https://afm.aero/saudi-pilot-simulator-training-center-holds-airbus-a320-full-flight-simulator-acceptance/> [in English].
9. Kompleksni pilotazhni trenazhery vertolotiv Mi-8MTV, Mi-171 [Complex aerobatic simulators of Mi-8MTV, Mi-171 helicopters]. Retrieved from: <http://avia-ts.ua/production/8-kompleksnyy-trenazher-vertoletov-mi-8mtv-i-mi-171.html> (access date 02.05.2023) [in Ukrainian].
10. Zozulia, V.A., Osadchyi, S.I., & Melnichenko, M.M. (2019). Analiz kharakterystyky tochnosti vidtvorennia etalonoii traiektorii platformoiu Haufa-Stiuarta z systemoiu upravlinnia dlia riznykh vydiv zavdan [Analysis of the characteristics of the accuracy of reproduction of the reference trajectory by the Gauff-Stewart platform with a control system for various types of tasks]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu, Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*. Vyp. 1 (32), Kropyvnytskyi: TsNTU. S. 19–27 [in Ukrainian].
11. Hauser, D., et al (eds). (2005). *Measuring and analysing the directional spectra of ocean waves*. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities. 485 p. [in English].
12. IEC 61400-1: 2005 Wind Turbines. Part 1: Design requirements [in English].
13. Durbin, P.A., & Reif, B.A.P. (2011). *Statical theory and modeling for turbulent flows*. John Wiley and Sons. West Sussex. United Kingdom. 357 p. [in English].
14. Kopasakis, George(2015). Atmospheric turbulence modeling for aero vehicles: fractional order fits. No. GRC-E-DAA-TN23727. Retrieved from: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20110002734/downloads/20110002734.pdf> [in English].
15. Antonova, A., Kulyk, M., & Lastivka, I. (2014). Modeling of an Airplane Wing Moments Induced by Atmospheric Turbulence. *Proceedings of National Aviation University, K.* 59(2), pp. 68–72 [in English].
16. Blokhin, L.M., Vovk, V.H., & Bezkorovainyi, Yu.M. (2004). Zavdannia identyfikatsii parametriv rukhu helikoptera Mi-8 iz vantazhnoiu pidviskoiu v rezhymi vysinnia [The task of identifying the movement parameters of the Mi-8 helicopter with a cargo suspension in the hover mode].

*Problemy informatyzatsii ta upravlinnia: Zbirnyk naukovykh prats – Problems of informatization and management.* К.: НАУ. Вип. 10. С. 127–131 [in Ukrainian].

17. Yu, Y., Pei, H., & Xu, C. (2017). Parameter identification of JONSWAP spectrum acquired by airborne LIDAR. *J. Ocean Univ. China.* pp. 998–1002 [in English].
18. Vovk, V.H., Strashko, V.A., & Tymoshenko, N.A. (2007). Tryvymirna model dynamiky stokhastychnykh kutovykh rukhiv korablia v kreiserskomu rusi [A three-dimensional model of the dynamics of stochastic angular movements of a ship in cruising motion]. *VI mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia hirotekhnologii, navihatsiia, keruvannia rukhom ta konstruiuvannia aviatsiino-kosmichnoi tekhniky Zbirnyk dopovidei Chastyna II – VI international scientific and technical conference of gyrotechnology, navigation, motion control and design of aviation and space technology: a collection of reports. Part II.* Kyiv. S. 14–19 [in Ukrainian].

Зозуля Валерій Анатолійович – к.т.н., доцент кафедри цифрової економіки та системного аналізу Державного торговельно-економічного університету. E-mail: irish38@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3793-4686.

Осадчий Сергій Іванович – д.т.н., професор кафедри конструкції повітряних суден, авіадвигунів та підтримання льотної придатності Льотної академії Національного авіаційного університету. E-mail: srg2005@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1811-3594.

Zozulya Valeriy Anatoliiiovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Digital Economy and System Analysis of the State University of Trade and Economics. E-mail: irish38@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3793-4686.

Osadchy Sergei Ivanovych – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Aircraft Construction, Aircraft Engines, and Airworthiness Maintenance of the Flight Academy of the National Aviation University. E-mail: srg2005@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1811-3594.