

УДК 621.317

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ НЕПРЯМОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ ПІД ЧАС РУХУ ПЕРЕСІЧЕНОЮ МІСЦЕВІСТЮ*Вознюк А. І.**Державне підприємство Науково-дослідний інститут Радіолокаційних систем
«Квант-Радіолокація», м. Київ, Україна
E-mail: ai_voznyk@ukr.net*

Виконується моделювання руху наземного гусеничного об'єкту пересіченою місцевістю з подальшим використанням отриманих даних для моделювання в програмі Simulink системи стабілізації обладнання, встановленому на даному об'єкті. Використовуючи програмний комплекс «Універсальний механізм» проводиться формування нерівностей для трьох типів доріг з різними значеннями величини нерівностей, після чого моделюється рух об'єкту з різними швидкостями по сформованим нерівностям. Отримані значення куткового положення місця встановлення обладнання використовуються для визначення параметрів стабілізації для двохосної системи непрямой стабілізації. Проводиться моделювання роботи системи стабілізації з отриманими параметрами і визначаються похибки відпрацювання заданих сигналів для кутів горизонтального та вертикального наведення обладнання. На основі отриманих результатів робиться висновок про допустимість застосування запропонованої системи стабілізації для використання на наземних гусеничних об'єктах з подальшими можливими вдосконаленнями.

Ключові слова: система стабілізації, нерівності, динамічні характеристики, рухомий об'єкт.

Вступ

Створення систем стабілізації та наведення з високими показниками якості керування для обладнання, що розміщується на наземних рухомих об'єктах, на сьогодні є актуальним завданням приладобудування. До характерних особливостей експлуатації наземних рухомих об'єктів відносяться зовнішні збурення, зумовлені середовищем використання, а також динамікою руху об'єкта. Для покращення експлуатаційних характеристик систем стабілізації та наведення обладнання на таких об'єктах необхідно врахування динамічних характеристик об'єктів та профілю місцевості з нерівностями, які у сукупності можуть розглядатись як джерело неконтрольованих збурень.

Аналіз останніх публікацій

При проектуванні систем стабілізації та наведення необхідно враховувати зовнішні збурення, що діють на систему. Для обладнання, розміщеного на наземних рухомих об'єктах, така дія визначається нерівностями доріг, які, в свою чергу, визначаються їх рельєфом. Розглядаючи рельєф дороги як сукупність реалізацій випадкових поверхонь для твердої ділянки дороги, визначимо характеристики дорожніх нерівностей. Профіль дороги – перетин рельєфу в напрямку руху транспорту. Перетин поверхні конкретної ділянки дороги є реалізацією профілю, а сукупність таких реалізацій є профіль дороги як випадковий процес. Профіль дороги ділиться на три складові: макропрофіль, мікропрофіль і шороховатості, що обумовлено різним впливом їх на транспортний засіб. У роботах [1-3] розглядаються методи моделювання

мікропрофілю дороги, зокрема, визначаються спектральні характеристики мікропрофілю та встановлюється зв'язок між їх значеннями та типами доріг. Після цього розраховуються динамічні характеристики рухомого об'єкта при русі певними типами нерівностей. У роботах [4-7] наведено моделювання зовнішніх збурень, що діють на гусеничний об'єкт при різних швидкостях руху і різних статистичних характеристиках поверхні руху. Отримано значення випадкових величин, які відображають процеси коливань підресореної частини об'єкта.

Постановка задачі

Метою даної роботи є дослідження впливу нерівностей доріг на параметри двохосної системи непрямой стабілізації обладнання, що розміщується на гусеничних наземних об'єктах під час руху. Для цього необхідно визначити залежності динамічних характеристик рухомих об'єктів, від збурень, що створюються зовнішнім середовищем, зокрема профілем місцевості та проаналізувати, яким чином зміна факторів зовнішніх збурень впливає на динаміку руху об'єктів стабілізації та параметри системи стабілізації.

Моделювання профілю місцевості

Профіль дорожнього покриття можна розглядати як стаціонарну випадкову функцію типу «білого шуму». Для описання такої функції необхідно використовувати характеристики, які найбільш повно характеризують даний процес. Такими характеристиками є кореляційна функція (1) та спектральна щільність (2). Зокрема, моделювання нері-

вностей доцільно проводити за допомогою спектральної щільності потужності (3), що є функцією просторової частоти або циклічної просторової частоти.

$$K(\tau) = 2 \int_0^{\infty} S(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega, \quad (1)$$

$$S(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} K(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau, \quad (2)$$

$$S(n) = \begin{cases} S_0 (n/n_0)^{w_1}, & n < n_0 \\ S_0 (n/n_0)^{w_2}, & n > n_0 \end{cases}, \quad (3)$$

де n – число коливань на метр, S_0 – рівень нерівностей, n_0 , w_1 та w_2 – константи.

Використання даної характеристики дає можливість отримати значення висоти нерівностей окремо для лівої та правої колії транспортного засобу. Для цього використовують алгоритм, заснований на розкладанні Райса-Пірсона (4):

$$z(s_k) = \sum \sqrt{2S(n_i) 2\pi\Delta n \cos(2\pi n_i s_k + \varphi_i)},$$

$$s_k = k\Delta s, \quad n_i = n_0 + i\Delta n, \quad (4)$$

де Δs – крок нерівності, м; N – число гармонік; $S(n)$ – спектральна щільність нерівності шляху, м²/цикл/м; Δn – крок по частоті; n_0 – мінімальна частота, φ_i – випадкова фаза, розподілена рівномірно в інтервалі $[-\pi, \pi]$.

Існує декілька різних типів спектральної щільності потужності (СЩП), зокрема, задавати параметри n_0 , w_1 та w_2 СЩП можна відповідно до ISO 8608 (рис. 1), за Вонгом та Діксоном.

Визначивши клас дороги, а також параметри n_0 , w_1 та w_2 , отримуємо значення рівня нерівностей.

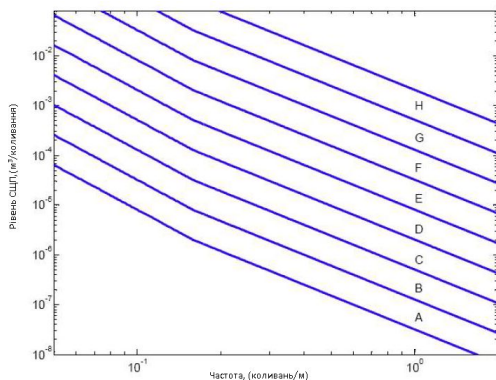


Рис. 1. Спектральна щільність потужності у відповідності до ISO 8608

Методика вивчення впливу нерівностей на динаміку гусеничних транспортних засобів

Моделювання руху проводиться за допомогою програмного комплексу «Універсальний механізм» (УМ) [8]. Програмний комплекс призначений для автоматизації процесу дослідження механічних об'єктів, які можуть бути представлені системою абсолютно твердих або пружних тіл, зв'язаних за допомогою кінематичних і силових елементів.

Параметр S_0 характеризує рівень нерівностей відповідно до табл. 1.

Таблиця 1. Рівень нерівностей у відповідності до ISO 8608.

Клас дороги	Рівень нерівності S_0 , ($\times 10^{-6}$ м ³ /коливання)
A(дуже добра)	<8
B(добра)	8-32
C(задовільна)	32-128
D(погана)	128-512
E(дуже погана)	512-2048
F	2048-8192
G	8192-32768
H	>32768

Фактично, можливості комплексу поширюються на більшу частину систем, які є об'єктом застосування методів теоретичної і прикладної механіки. З використанням УМ вирішуються прямі і зворотні задачі кінематики, динаміки і управління.

Завдяки вбудованим модулям УМ має можливість експорту або імпорту моделей до або з інших програмних продуктів. Зокрема, конструктивні елементи моделей (деталі, збірки та ін.) можуть імпортуватися з різних CAD програм (Pro/ENGINEER, SolidWorks, КОМПАС та ін.). Окремий модуль дозволяє передавати дані до Matlab/Simulink, що значно спрощує моделювання систем керування в останньому. Також результати моделювання можуть бути представлені як файли даних із записаними значеннями досліджуваних величин, які можуть використовуватися іншими програмами.

Дослідження проводиться для створеної та вбудованої в УМ моделі гусеничного транспортного тягача ГТ-СМ (рис. 2). Завантаживши модель в робочий простір УМ, необхідно провести початкові виставки та тести, відповідно до інструкції з моделювання гусеничних об'єктів.

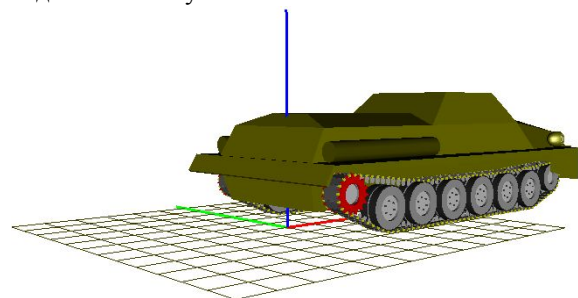


Рис. 2. Модель гусеничного тягача в робочому середовищі УМ

Формування нерівностей здійснюється завдяки вбудованому в УМ інструменту «Редактор нерівностей». Даний інструмент забезпечує можливість створення файлів нерівностей з заданими параметрами окремо для лівої та правої колії. Для

генерації нерівностей необхідно обрати клас дороги (відповідно до таблиці 1), тип нерівності та їх мінімальну і максимальну довжину, число складових в реалізації, ширину колії (рис. 3).

Оцінка будь-яких характеристик досліджуваного об'єкта в УМ передбачає можливість отримання та графічного відображення змінних, які показують, наприклад, лінійні або кутові переміщення, прискорення вибраної точки тощо. За допомогою інструменту «Мастер переменных» визначається список змінних, які показують зміну динамічних характеристик об'єктів від профілю місцевості. Обрані змінні додаються в інструмент «Графическое окно» для графічного відображення.

Оцінка отриманих часових реалізацій процесів моделювання здійснюється з використанням інструменту «Статистика», який надає можливість визначити, зокрема, СЦП та кореляційну функцію.

Результати моделювання

Використовуючи «Генератор неровностей», сформуємо фази нерівностей для трьох типів доріг (D, E та F), що відповідають пересіченій місцевості з максимальними перепадами $\pm 0,2-0,6$ м та числом складових в реалізації в діапазоні $N=1000...3000$. Мінімальна та максимальна довжина нерівності – $L_{min}=1$ м та $L_{max}=100$ м. Ширина колії – 2,1 м.

Моделювання проводиться для різних значень швидкості об'єкта та різних значеннях кількості гармонік нерівностей N . Результатами моделювання руху гусеничного транспортного засобу отриманими нерівностями є проєкції кутових положень корпусу об'єкта відносно землі на осі X та Y (Ψ та Θ_k), що відповідає кутам кильової та бортової хитавиці (рис. 4).

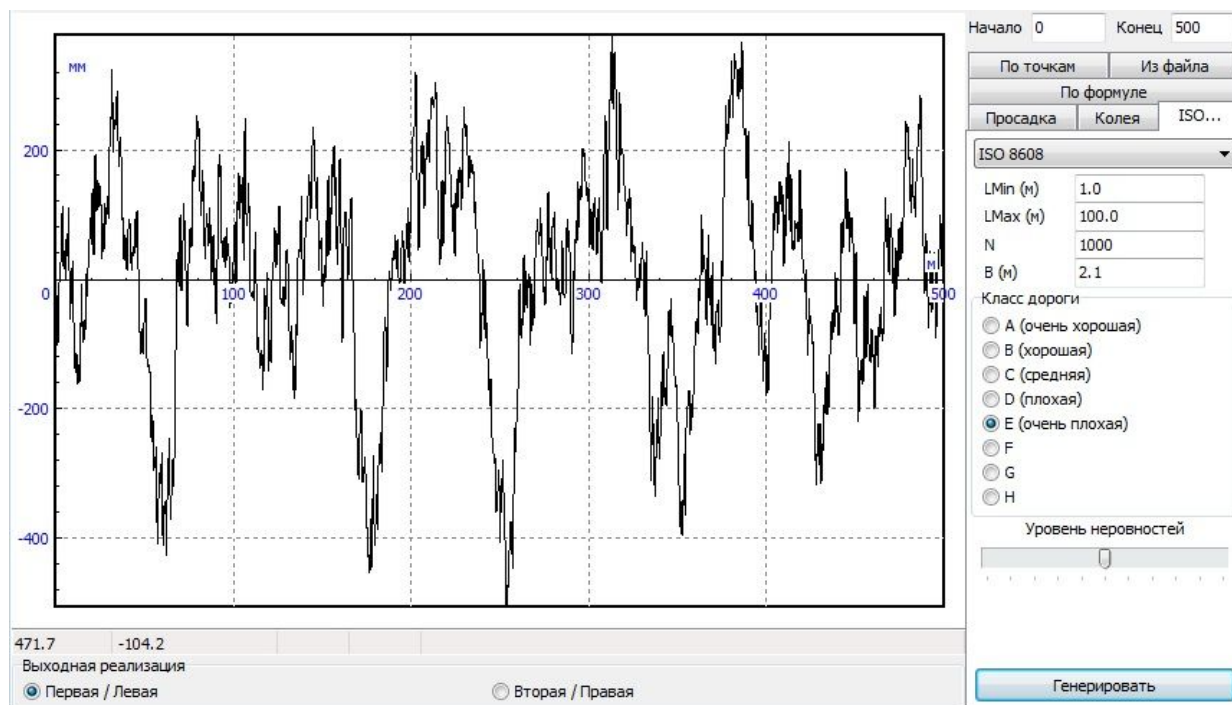


Рис. 3. Параметры для генерування нерівностей

Визначення впливу динамічних параметрів на систему стабілізації

Визначимо, яким чином різні типи нерівностей, в поєднанні з різними швидкостями руху об'єкта, впливають на параметри системи стабілізації. Для цього розглянемо двохосну систему непрямої стабілізації [9] на прикладі антени РЛС. Оскільки, визначення параметрів стабілізації таких систем потребує використання перетворювача координат, а також кутів крену і диференту об'єкта, використаємо отримані значення хитавиці і метод перетворення координат, що базується на використанні кватерніонів [9]. Припустимо, що напрямок

на орієнтир знаходиться в площині горизонту і збігається з напрямком руху об'єкта. Моделювання будемо здійснювати для системи стабілізації обладнання, запропонованої в [10]. Контур керування системи складається з ПІ-регулятора, корегуючого пристрою, підсилювача, виконавчого двигуна, редуктора.

За даними, отриманими від AHRS, знаходимо параметр стабілізації для кожного каналу, а отримані значення вводимо в контур керування відповідного каналу. Визначимо параметри стабілізації для каналу кута місця, використовуючи дані, наведені на рис. 4.

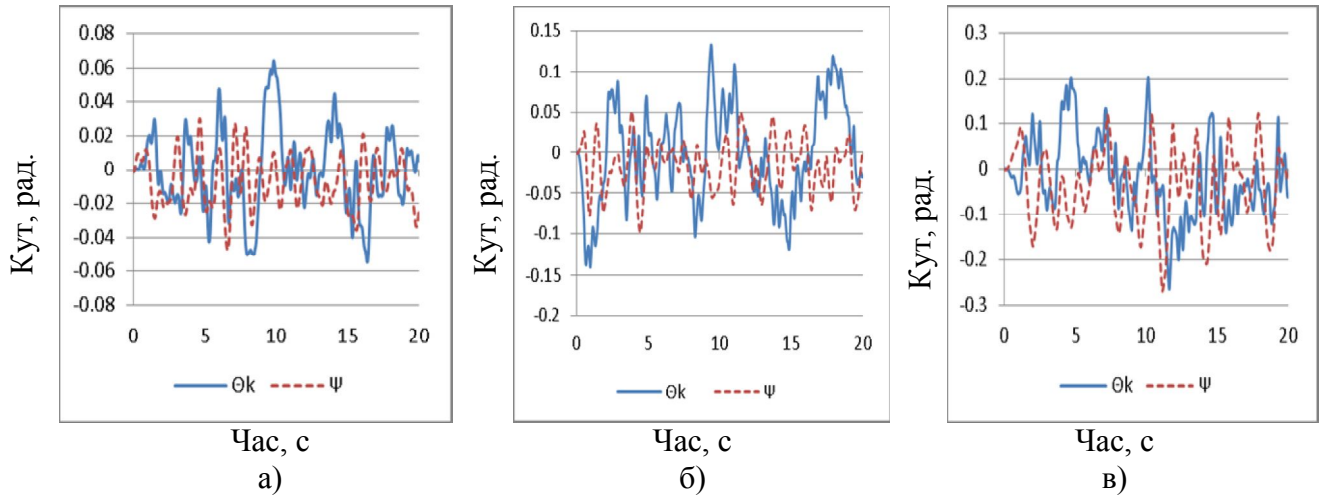


Рис. 4. Значення кутових положень корпусу: а) тип дороги D, N=1000, швидкість об'єкта V=10м/с; б) тип дороги E=1000, швидкість об'єкта V=10м/с; в) тип дороги F, N=1000 швидкість об'єкта V=6м/с

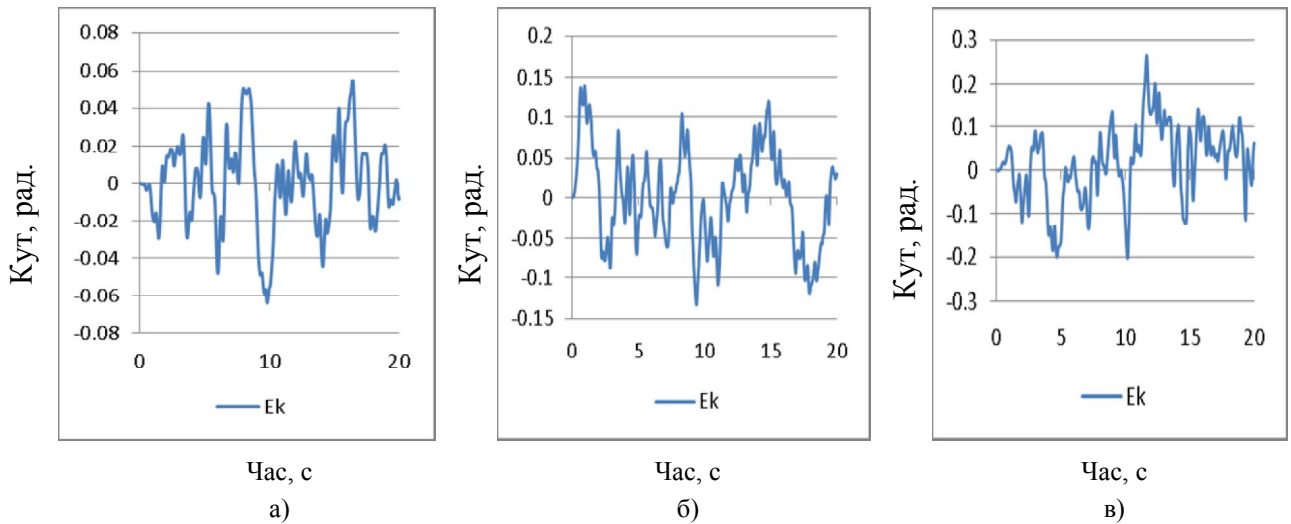


Рис. 5. Параметри стабілізації для вертикального каналу: а) тип дороги D, N=1000, швидкість об'єкта V=10м/с; б) тип дороги E=1000, швидкість об'єкта V=10м/с; в) тип дороги F, N=1000 швидкість об'єкта V=6м/с

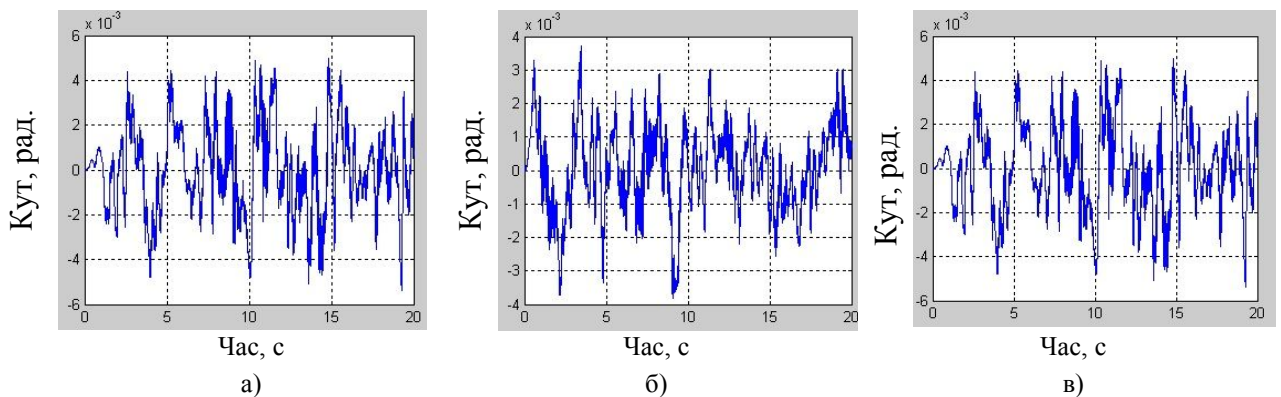


Рис. 6. Значення похибки відпрацьованих сигналів для вертикального каналу: а) тип дороги D, N=1000, швидкість об'єкта V=10м/с; б) тип дороги E=1000, швидкість об'єкта V=10м/с; в) тип дороги F, N=1000 швидкість об'єкта V=6м/с

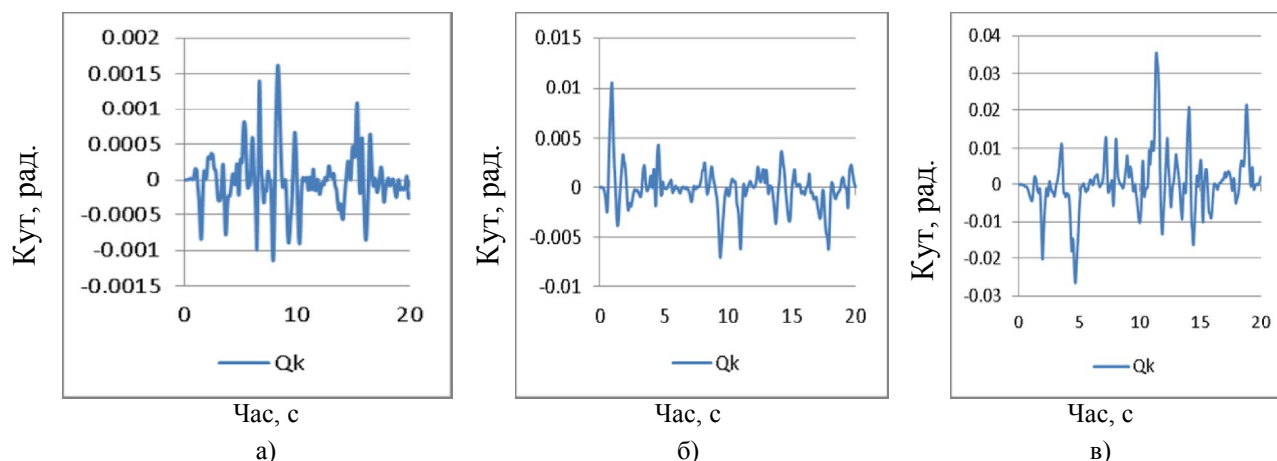


Рис. 7. Параметри стабілізації для вертикального каналу: а) тип дороги D, $N=1000$, швидкість об'єкта $V=10\text{м/с}$; б) тип дороги E=1000, швидкість об'єкта $V=10\text{м/с}$; в) тип дороги F, $N=1000$ швидкість об'єкта $V=6\text{м/с}$

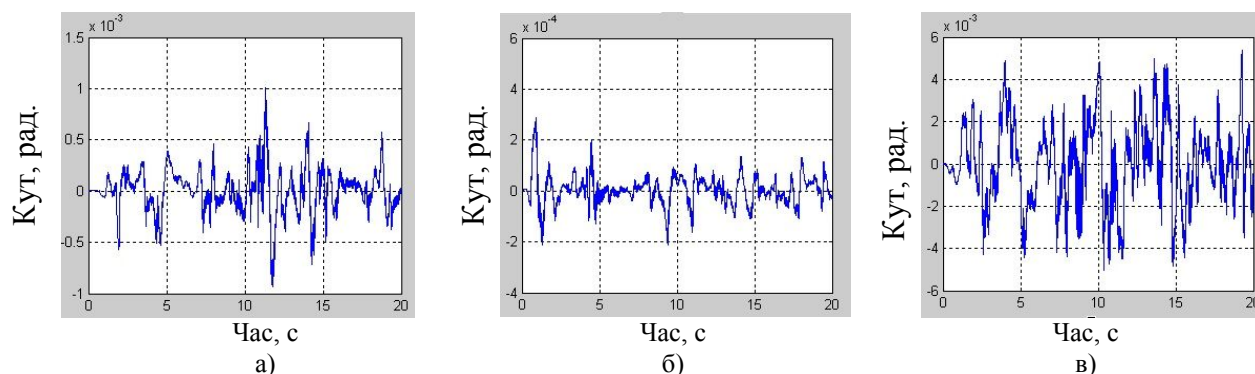


Рис. 8. Значення похибки відпрацьованих сигналів для вертикального каналу: а) тип дороги D, $N=1000$, швидкість об'єкта $V=10\text{м/с}$; б) тип дороги E=1000, швидкість об'єкта $V=10\text{м/с}$; в) тип дороги F, $N=1000$ швидкість об'єкта $V=6\text{м/с}$

Виходячи з отриманих даних значень похибки відпрацювання параметрів стабілізації кожним з каналів (рис. 5 – рис. 8), можна стверджувати, що досліджувана система є достатньо ефективною для виконання завдань стабілізації обладнання на рухомих гусеничних об'єктах.

Висновки

В роботі розглянуто, яким чином зміна факторів зовнішніх збурень в сукупності з різними параметрами роботи гусеничних транспортних засобів впливає на динаміку руху об'єктів стабілізації та параметри системи стабілізації. Зокрема, приведені методи моделювання профілю місцевості в програмному продукті «Універсальний механізм» за допомогою спектральної щільності потужності. Виконано моделювання руху об'єктів отриманими нерівностями і отримано кутові положення корпусу об'єкта відносно нерухокої системи координат, які в подальшому використані для перетворювача координат і знаходження параметрів стабілізації для горизонтального та вертикального каналів наведення. Проведено моделювання відпрацювання визначених параметрів стабілізації

в програмі Simulink. Отримані максимальні значення похибок відпрацьованих сигналів не перевищують 5,5 мрад, що є прийнятним, враховуючи рівень нерівностей та швидкість об'єкта.

Отримані результати можуть використовуватися для подальшого вдосконалення цифрових систем стабілізації обладнання на рухомих об'єктах шляхом адаптації алгоритму керування системою.

Література

1. Динамика системы «дорога–шина–автомобиль–водитель». Под ред. А. А. Хачатурова. – М.: Машиностроение, 1976. – 535 с.
2. Кочетков А. В. Цифровое моделирование геометрических и макрошероховатых параметров автомобильной дороги / А. В. Кочетков, А. В. Чванов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2012. – Т. 4, № 4. – С. 837 – 844.
3. Мазманишвили А. С. Построение случайных поверхностей движения объектов бронетанковой техники / А. С. Мазманишвили, Т. Е. Александрова // Системы озброєння і військова техніка. – 2012. – № 1(29). – С. 68 – 71.

4. Madsen J., Heyn T., Negrut D. Methods for Tracked Vehicle System Modeling and Simulation. Technical Report 2010-01. University of Wisconsin, 2010. 56 p.
5. Rubinstein D., Hitron R. A detailed multi-body model for dynamic simulation of off-road tracked vehicle. Journal of Terramechanics, 2004, Vol. 41, iss. 2-3. pp. 163-173.
6. Динамика транспортно-тяговых колесных и гусеничных машин / Е. Е. Александров, Д. О. Волонцевич, В. А. Карпенко, А. Т. Лебедев, В. А. Перегон, В. Б. Самородов, А. Н. Туренко. – Харьков: Издательство ХГАДТУ (ХАДИ), 2001. – 642 с.
7. Александрова Т. Е. Имитационное моделирование внешних возмущений, действующих на танковую пушку / Т. Е. Александрова, И. Е. Александрова, С. Н. Беляев // Механіка та машинобудування, 2011, № 1, с. 43-50.
8. Погорелов Д. Ю. Программный комплекс «Универсальный механизм.» [Электронный ресурс] / Погорелов Д.Ю. Режим доступа: <http://www.universalmechanism.com/pages/index.php?id=3>
9. Бурау Н. І. Система стабілізації та наведення для наземних рухомих об'єктів на базі АНRS / Н. І. Бурау, А. І. Вознюк, В. В. Цісарж. // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2016. - Кіровоград: КНТУ. – вип. 29. – С. 155 – 160.
10. Бурау Н. І. Аналіз систем стабілізації обладнання на рухомих об'єктах / Н. І. Бурау, А. І. Вознюк, А. В. Осовцев // Інтегровані інтелектуальні робото технічні комплекси (ІРТК-2016): тези допов. 9 міжнародної науково-практичної конференції. К.:НАУ, 2016. – С. 220 – 222.

УДК 621.317

А. І. Вознюк*Государственное предприятие Научно-исследовательский институт радиолокационных систем «Квант-Радиолокация», г. Киев, Украина***АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ КОСВЕННОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ПЕРЕСЕЧЕННОЙ МЕСТНОСТИ**

В статье исследуется влияние неровностей дорог на динамические характеристики наземного подвижного объекта и на параметры системы стабилизации оборудования, размещенного на данном объекте. Предыдущие исследования рассматривают методы моделирования внешних возмущений, а также влияние, которое осуществляют возмущения на характеристики наземных объектов. В данной работе выполняется моделирование движения наземного гусеничного объекта по пересеченной местности, после чего полученные данные используются для моделирования в программе Simulink системы стабилизации оборудования, установленном на данном объекте. Приводится методика моделирования неровностей, основанный на использовании корреляционной функции и спектральной плотности мощности, а также алгоритм, основанный на разложении Райса-Пирсона. Рассматриваются три типа дорог, уровень неровностей которых задается в соответствии с ISO 8608. Используя программный комплекс «Универсальный механизм» проводится формирование неровностей поочередно для левой и правой колеи транспортного средства. Результаты сохраняются в файл, который используется для дальнейшего моделирования движения транспортного средства. После этого производится настройка модели гусеничного объекта и проводится моделирование движения объекта по сложившимся неровностям. Результатами моделирования будут угловые положения места установки оборудования относительно земной поверхности. Полученные данные используются для определения параметров двухосных системы косвенной стабилизации. Для этого проводится преобразование координат, основанное на использовании кватернионов и теории конечных поворотов твердого тела. В результате полученные значения для углов горизонтального и вертикального наведения оборудования, являются параметрами стабилизации. После этого моделируется работа системы стабилизации, и определяются погрешности обработки заданных сигналов для трех типов дорог. Максимальные погрешности обработки параметров стабилизации для каждого канала всех типов дорог не превышают 5,5мрад, что является приемлемым, учитывая уровень неровностей и скорость объекта. На основе полученных результатов делается вывод о допустимости применения предложенной системы стабилизации для использования на наземных гусеничных объектах с последующими возможными усовершенствованиями.

Ключевые слова: система стабилизации, неровности, динамические характеристики, движущийся объект.**A. Vozniuk***State Enterprise Scientific Research Institute of Radar Systems "Kvant-Radiolocation", Kiev, Ukraine***ANALYSIS OF THE INDIRECT STABILIZATION SYSTEM'S PARAMETERS OF MOVABLE OBJECTS DURING THE MOVEMENT ON THE RUGGED TERRAIN**

The article investigates the influence of road irregularities on the dynamic characteristics of the ground moving object and on the stabilization system's parameters for equipment placed on this object. Previous studies examine the methods of modeling external disturbance, as well as the effect of perturbing the characteristics of ground objects. In this paper, the simulation of the caterpillar object movement on the ground with irregularities is performed, after which the obtained data is used to simulate in the Simulink program the stabilization system for the equipment installed on this object. An inequality modeling technique based on the use of correlation function and spectral power density is presented, as well as an algorithm based on the Rice-Pearson expansion. Three types of roads are considered, the level of irregularities is determined in accordance with ISO 8608. Using the software complex "Universal Mechanism", formation of irregularities turns in turn for the left and right tracks of the caterpillar. The results are stored in a file that is used to further simulate the caterpillar's movement. After that, the model of the caterpillar object is set up and the modeling of the object movement is done on the formed irregularities. The simulation's results will be the angular position of the equipment's installation place relative to the earth's surface. The obtained data are used to determine the parameters of the biaxial system of indirect stabilization. To do this, a coordinate transformation based on the theory of finite rotations of a rigid body and quaternions is performed. As a result, the values obtained for the equipment's angles of horizontal and vertical guidance, which are the parameters of stabilization. After that, the stabilization system is modeled and the errors of working out the given signals for three types of roads are determined. The maximum errors of working out the stabilization parameters for each channel for all types of roads do not exceed 5.5 mrad, which is acceptable, taking into account the irregularities level and the object's speed. On the basis of the obtained results the conclusion about the admissibility of the proposed stabilization system for use on land tracked objects with further possible improvements is made.

Keywords: stabilization system, irregularities, dynamic characteristics, moving object.

*Надійшла до редакції
06 листопада 2017 року*

*Рецензовано
20 листопада 2017 року*

© Вознюк А. І., 2017