

*Є.Є. АЛЕКСАНДРОВ, В.І. КЛИМЕНКО, Д.М. ЛЕОНТЬЄВ, М.О. ТЕРНОВИЙ*

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ КУРСОВОЇ СТІЙКОСТІ АВТОМОБІЛЯ**

В роботі проведений огляд науково-технічної літератури з розробки електронних систем курсової стійкості з функцією розподілу гальмових зусиль, який дозволив зробити висновок, що для всюдихідних колісних машин такі системи повинні будуватись із застосуванням датчиків інерційної навігації – гіроскопічних приладів і акселераторів. Запропонована функціональна схема системи курсової стійкості з функцією розподілу гальмового зусилля побудована із застосуванням принципів безплатформних інерційних систем, в яких орієнтація корпусу автомобіля відносно вісей інерційної системи координат здійснюється за допомогою обчислення в бортовій цифровій обчислювальній машині кватерніону, компонентами якого являються параметри Родріга-Гамільтона, що на відміну від кутів Ейлера можуть бути обчислені з необхідним ступенем точності за допомогою достатньо простого алгоритму. Розроблені алгоритми оцінювання поточних параметрів збуреного руху корпусу колісної машини в процесі термінового її гальмування, а саме, куту відхилення подовженої вісі корпусу від заданого напрямку руху, кутової швидкості обертання корпусу та бічного зсуву центру тяжіння корпусу відносно заданої траєкторії руху транспортного засобу. На основі поточної оцінки перелічених параметрів сформований алгоритм стабілізації корпусу колісної машини в режимі термінового її гальмування.

**Ключові слова:** автоматична система, електронна система, система курсової стійкості, моделювання систем, курсова стійкість, система контролю стабільності транспортного засобу, безплатформна інерційна система; параметри Родріга-Гамільтона; низькочастотні фільтри Баттеруорта і Ланцоша

*Е.Е. АЛЕКСАНДРОВ, В.И. КЛИМЕНКО, Д.Н. ЛЕОНТЬЕВ, Н.А. ТЕРНОВОЙ*

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ КУРСОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМОБИЛЯ**

В работе проведен обзор научно-технической литературы по разработке электронных систем курсовой устойчивости с функцией распределения тормозных усилий, который позволил сделать вывод о том, что для вездеходных колесных машин такие системы должны строиться с применением датчиков инерционной навигации – гироскопических приборов и акселераторов. Предложенная функциональная схема системы курсовой устойчивости с функцией распределения тормозного усилия, построена с применением принципов бесплатформенных инерционных систем, в которых ориентация корпуса автомобиля относительно координат осей инерционной системы осуществляется с помощью вычисления в бортовой цифровой вычислительной машине кватерниона, компонентами которой являются параметры Родрига-Гамельтона, которые отличаются от углов Эйлера и могут быть вычислены с необходимой степенью точности при помощи простого алгоритма. Разработаны алгоритмы оценки текущих параметров возмущенного движения корпуса колесной машины в процессе экстренного ее торможения, а именно угла отклонения продольной оси корпуса от заданного направления движения, угловой скорости вращения корпуса и бокового смещения центра тяжести корпуса относительно заданной траектории движения транспортного средства. На основе текущей оценки перечисленных параметров сформирован алгоритм стабилизации корпуса колесной машины в режиме экстренного ее торможения.

**Ключевые слова:** автоматическая система, электронная система, система курсовой устойчивости, моделирование систем, курсовая устойчивость, система контроля устойчивости транспортного средства, бесплатформенная инерционная система; параметры Родрига-Гамельтона; цифровые низкочастотные фильтры Баттеруорта и Ланцоша

*YE. ALEKSANDROV, V. KLYMENKO, D. LEONTIEV, M. TERNOVYI*

## **MATHEMATICAL MODELING OF THE VEHICLE STABILITY CONTROL OF THE VEHICLE**

The paper reviews the scientific and technical literature on the development of electronic stability systems with brake force distribution, which led to the conclusion that for all-terrain wheeled vehicles such systems should be built using inertial navigation sensors - gyroscopes and accelerators. The proposed functional scheme of the stability system with

brake force distribution is built using the principles of platformless inertial systems, in which the orientation of the car body relative to the axes of the inertial coordinate system is carried out by calculating in the onboard digital computer quaternion in contrast to Euler angles can be calculated with the required degree of accuracy using a fairly simple algorithm. Algorithms for estimating the current parameters of perturbed motion of the wheel body in the process of its urgent braking, namely, the angle of deviation of the elongated axis of the body from a given direction, angular velocity and lateral displacement of the center of gravity relative to a given trajectory. On the basis of the current estimation of the listed parameters the algorithm of stabilization of the case of the wheeled car in the mode of its urgent braking is formed.

**Keywords:** automatic system, electronic system, stability system, system modeling, stability, vehicle stability control system, platformless inertial system; Rodrigo-Hamilton parameters; low-pass Butterworth and Lancos filters

**Вступ.** Сучасні автомобілі представницького класу, як правило, оснащені системами автоматичного керування гальмами, які складаються принаймні з трьох паралельно функціонуючих систем: анти блокувальної системи (*Anti-lock Braking System - ABS*), що запобігає блокуванню коліс при різкому натисканні на педаль гальма; протибуксувальної систем (*Traction Control System – TCS*), що запобігає буксуванню ведучих коліс транспортного засобу при надмірному натисканні на педаль керування подачею палива; системи курсової стійкості автомобіля (*Vehicle Stability Control – VSC*), яка забезпечує необхідні показники стійкості руху автомобіля в процесі його розгону або гальмування.

**Аналіз основних досягнень і публікацій.** З початку XXI сторіччя спостерігається широке застосування систем *VSC* автомобільними корпораціями США, Японії, Південної Кореї та Євросоюзу. Паралельно з практичними розробками в цих країнах проводяться глибокі наукові дослідження систем *VSC* з метою їх удосконалення [1-3], регулярно проводяться міжнародні науково-технічні конференції, де обговорюються результати покращення цих систем шляхом включення в алгоритми їх роботи не тільки функції *ABS*, *TCS*, а й функції електронних систем розподілу гальмових зусиль (*Electronic Brake Distribution – EBD*) [4-11]. Функція системи *EBD* в системі *VSC* виконуються в комплексі з функціями системами *ABS* і дозволяють більш ефективно розподілити гальмові зусилля на колесах транспортного засобу та підвищити керованість і стійкість руху автомобіля в процесі термінового його гальмування. Критичний огляд літературних джерел [1-11] дозволяє визначити типову структуру систем *VSC*, зокрема й тих, що включають функції *EBD*, які застосовуються в сучасних легкових автомобілях представницького класу, що експлуатуються в умовах автобанів та автомобільних шляхів з високоякісним дорожнім покриттям. Зазначені системи в якості чутливих елементів, як правило, застосовують електронні датчики кутових швидкостей коліс автомобіля, датчики положення рульового колеса та педалі керування подачею палива, а також доплерівський датчик поточної швидкості руху автомобіля. Але така структура жодним чином не може бути застосована у всюдихідних автомобілях військового призначення, які експлуатуються в умовах зруйнованих доріг і бездоріжжя, коли явища юзу і буксування ведучих коліс не дозволяють з потрібним рівнем точності обчислити відхилення корпусу автомобіля від заданого напрямку його руху та поточну швидкість автомобіля. Тому в таких автомобілях системи *VSC*, з функціями *EBD*, повинні будуватись із застосуванням датчиків інерційної навігації, а саме, гіроскопічних приладів і акселераторів, наприклад, як це зроблено в роботах [12-15]. В цих роботах пропонується застосування в системі курсової стійкості автомобіля безплатформної інерційної системи (БІНС), яка містить три гіроскопічних датчика кутової швидкості корпусу автомобіля та три акселерометри, вісі яких співпадають за напрямком із власними центральними осями інерції корпусу транспортного засобу, а також бортову цифрову обчислювальну машину (БЦОМ), що реалізує алгоритми БІНС.

**Мета та постановка задачі.** Метою даної роботи є побудова функціональної схеми цифрової системи курсової стійкості автомобіля та алгоритмів, що реалізується бортовою цифровою обчислювальною машиною, що формує сигнал керування для гальмової системи автомобіля.

### Побудова функціональної схеми цифрової системи VSC з функцією EBD.

Функціональна схема цифрової системи EBD, розробленої за участі авторів статті для сучасного колісного транспортера, приведена на рис. 1.

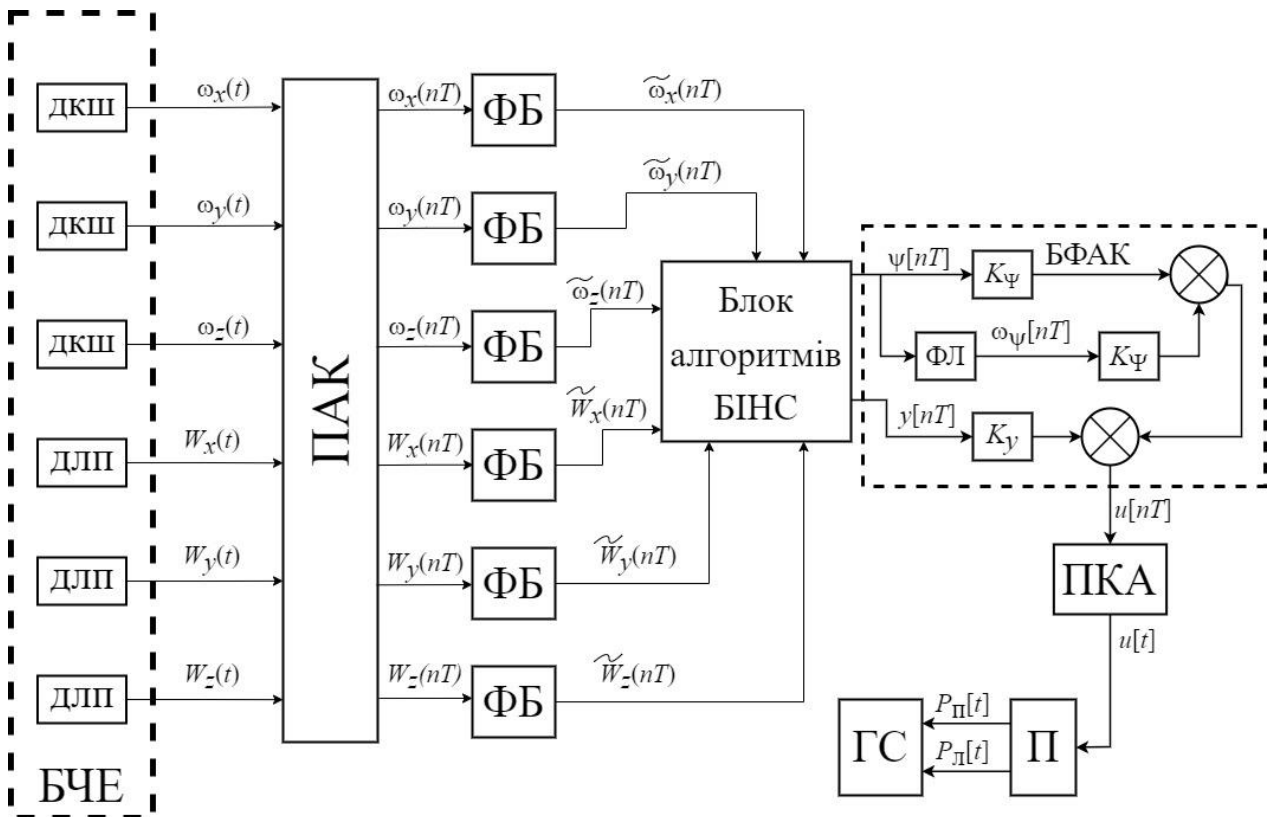


Рис. 1 – Функціональна схема системи VSC з функцією EBD всюдихідного транспортного засобу

Блок чутливих елементів БЧЕ містить три датчики кутових швидкостей ДКШ, вісі чутливості яких спрямовані уздовж власних центральних вісей інерції автомобіля: поздовжньої вісі  $OX$ ; поперечної вісі  $OY$  і вертикальної вісі  $OZ$ . БЧЕ містить також три акселератори (датчики лінійних прискорень ДЛП), вісі чутливості яких також спрямовані уздовж власних центр обіжних вісей інерції автомобіля.

Вихідні сигнали датчиків надходять до перетворювача «аналог - код» (ПАК) БЦОМ, з виходу якого решітчасті функції  $\omega_x[nT]$ ,  $\omega_y[nT]$ ,  $\omega_z[nT]$ ,  $W_x[nT]$ ,  $W_y[nT]$  і  $W_z[nT]$  надходять до цифрових низькочастотних фільтрів Баттеруорта [12, 13], які відфільтровують високочастотні заводи зазначених решітчастих функцій, що пов'язані із власною динамікою датчиків і високочастотними вібраціями основи, на якій встановлені датчики. Відфільтровані решітчасті функції  $\tilde{\omega}_x[nT]$ ,  $\tilde{\omega}_y[nT]$ ,  $\tilde{\omega}_z[nT]$ ,  $\tilde{W}_x[nT]$ ,  $\tilde{W}_y[nT]$  і  $\tilde{W}_z[nT]$  поступають до входів блоку алгоритмів БІНС, а на виході блоку мають місце решітчасті функції  $\psi[nT]$  і  $y[nT]$ , що характеризують збурений рух об'єкту керування, а саме, кут відхилення подовженої вісі автомобіля та баковий зсув центру мас корпусу відносно заданої траєкторії руху відповідно (рис. 2).

Функції  $\psi[nT]$  і  $y[nT]$  подаються до входу блока формування алгоритму керування (БФАК), який містить цифровий низькочастотний фільтр Ланцоша [17] і два суматора, які формують решітчасту функцію  $u[nT]$ .

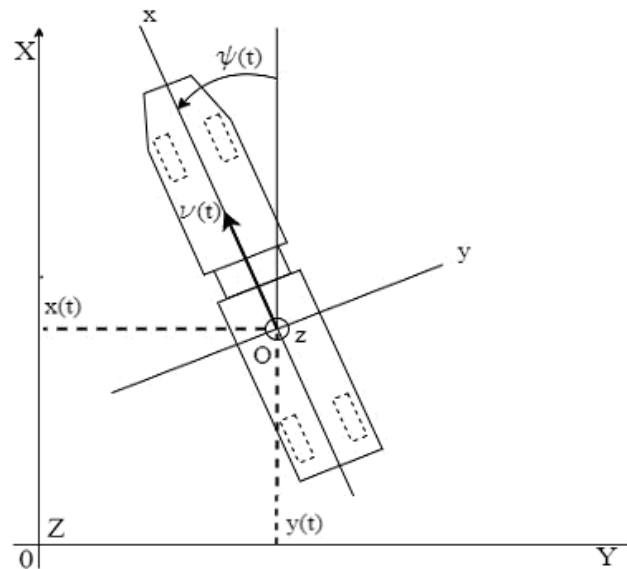


Рис. 2 – Системи координат:  $OXYZ$  – інерційні;  $oxuz$  – пов'язані з центром тяжіння транспортного засобу

З виходу БФАК сигнал керування у вигляді решітчастої функції  $u[nT]$  надходить до перетворювача «код-аналог», з виходу якого аналоговий сигнал  $u(t)$  подається до входу електрогідравлічного, або електропневматичного підсилювача П, який формує тиск робочого тіла (гальмівної рідини, або повітря)  $P_p(t)$  і  $P_l(t)$  у гальмівних магістралях правого і лівого бортів автомобіля.

**Алгоритми, що реалізуються бортової цифрової обчислювальної машини.**

Передавальна функція фільтра Баттеруорта другого порядку записується у вигляді

$$W_A(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}} \quad (1)$$

де  $z$  – комплексна змінна  $Z$  – перетворення решітчастої функції [18].

У відповідності до (1) алгоритми фільтрації решітчастих функцій  $\omega_x[nT]$ ,  $\omega_y[nT]$ ,  $\omega_z[nT]$ ,  $W_x[nT]$ ,  $W_x[nT]$  і  $W_x[nT]$  мають наступний вигляд:

$$\begin{cases} \tilde{\omega}_x[nT] = \frac{1}{b_0} \{a_0 \omega_x[nT] + a_1 \omega_x[(n-1)T] + a_2 \omega_x[(n-2)T] - b_1 \tilde{\omega}_x[(n-1)T] - b_2 \tilde{\omega}_x[(n-2)T]\}; \\ \tilde{\omega}_y[nT] = \frac{1}{b_0} \{a_0 \omega_y[nT] + a_1 \omega_y[(n-1)T] + a_2 \omega_y[(n-2)T] - b_1 \tilde{\omega}_y[(n-1)T] - b_2 \tilde{\omega}_y[(n-2)T]\}; \\ \tilde{\omega}_z[nT] = \frac{1}{b_0} \{a_0 \omega_z[nT] + a_1 \omega_z[(n-1)T] + a_2 \omega_z[(n-2)T] - b_1 \tilde{\omega}_z[(n-1)T] - b_2 \tilde{\omega}_z[(n-2)T]\}, \\ \tilde{W}_x[nT] = \frac{1}{b_0} \{a_0 W_x[nT] + a_1 W_x[(n-1)T] + a_2 W_x[(n-2)T] - b_1 \tilde{W}_x[(n-1)T] - b_2 \tilde{W}_x[(n-2)T]\}; \\ \tilde{W}_y[nT] = \frac{1}{b_0} \{a_0 W_y[nT] + a_1 W_y[(n-1)T] + a_2 W_y[(n-2)T] - b_1 \tilde{W}_y[(n-1)T] - b_2 \tilde{W}_y[(n-2)T]\}; \\ \tilde{W}_z[nT] = \frac{1}{b_0} \{a_0 W_z[nT] + a_1 W_z[(n-1)T] + a_2 W_z[(n-2)T] - b_1 \tilde{W}_z[(n-1)T] - b_2 \tilde{W}_z[(n-2)T]\}. \end{cases} \quad (2)$$

Для завдання орієнтації корпусу автомобіля відносно вісєй інерціальної системи координат вводиться нормований кватеріон  $\Lambda(t)$ , який містить чотири параметри

$$\Lambda(t) = \begin{bmatrix} \lambda_0(t) \\ \lambda_1(t) \\ \lambda_2(t) \\ \lambda_3(t) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

пов'язані умовою нормування

$$\lambda_0^2(t) + \lambda_1^2(t) + \lambda_2^2(t) + \lambda_3^2(t) = 1. \quad (5)$$

Компоненти вектору  $\Lambda(t)$  називаються параметрами Родріга-Гамільтона, які пов'язані з кутовими швидкостями  $\omega_x(t)$ ,  $\omega_y(t)$  та  $\omega_z(t)$  кінематичними диференціальними рівняннями [19, 20]:

$$\begin{cases} \dot{\lambda}_0(t) = -0,5[\omega_x(t)\lambda_1(t) + \omega_y(t)\lambda_2(t) + \omega_z(t)\lambda_3(t)]; \\ \dot{\lambda}_1(t) = 0,5[\omega_x(t)\lambda_0(t) + \omega_z(t)\lambda_2(t) - \omega_y(t)\lambda_3(t)]; \\ \dot{\lambda}_2(t) = 0,5[\omega_y(t)\lambda_0(t) + \omega_x(t)\lambda_3(t) - \omega_z(t)\lambda_1(t)]; \\ \dot{\lambda}_3(t) = 0,5[\omega_z(t)\lambda_0(t) + \omega_y(t)\lambda_1(t) - \omega_x(t)\lambda_2(t)]. \end{cases} \quad (6)$$

Відхилення подовжньої вісі автомобіля від заданого напрямку руху в процесі термінового гальмування визначається формулою [15]

$$\Psi(t) = 2\lambda_0(t)\lambda_3(t). \quad (7)$$

З урахуванням співвідношень (5) – (7) та з використанням результатів робіт [21, 22] запишемо алгоритм обчислення решітчастої функції  $\Psi[nT]$ . На непарному кроці роботи цифрової системи значення параметрів Родріга-Гамільтона обчислюється за допомогою алгоритму:

$$\begin{aligned} \lambda_1[nT] &= \lambda_1[(n-1)T] + 0,5T \{ \tilde{\omega}_x[nT]\lambda_0[(n-1)T] + \tilde{\omega}_z[nT]\lambda_2[(n-1)T] - \tilde{\omega}_y[nT]\lambda_3[(n-1)T] \}; \\ \lambda_2[nT] &= \lambda_2[(n-1)T] + 0,5T \{ \tilde{\omega}_x[nT]\lambda_3[(n-1)T] + \tilde{\omega}_y[nT]\lambda_0[(n-1)T] - \tilde{\omega}_z[nT]\lambda_1[(n-1)T] \}; \\ \lambda_3[nT] &= \lambda_3[(n-1)T] + 0,5T \{ \tilde{\omega}_y[nT]\lambda_1[(n-1)T] + \tilde{\omega}_z[nT]\lambda_0[(n-1)T] - \tilde{\omega}_x[nT]\lambda_2[(n-1)T] \}; \\ \lambda_0[nT] &= \sqrt{1 - \lambda_1^2[nT] - \lambda_2^2[nT] - \lambda_3^2[nT]}. \end{aligned}$$

На парному кроці роботи системи значення параметрів Родріга-Гамільтона обчислюється у зворотному порядку за допомогою алгоритму:

$$\begin{aligned} \lambda_3[nT] &= \lambda_3[(n-1)T] + 0,5T \{ \tilde{\omega}_y[nT]\lambda_1[(n-1)T] + \tilde{\omega}_z[nT]\lambda_0[(n-1)T] - \tilde{\omega}_x[nT]\lambda_2[(n-1)T] \}; \\ \lambda_2[nT] &= \lambda_2[(n-1)T] + 0,5T \{ \tilde{\omega}_x[nT]\lambda_3[(n-1)T] + \tilde{\omega}_y[nT]\lambda_0[(n-1)T] - \tilde{\omega}_z[nT]\lambda_1[(n-1)T] \}; \\ \lambda_1[nT] &= \lambda_1[(n-1)T] + 0,5T \{ \tilde{\omega}_x[nT]\lambda_0[(n-1)T] + \tilde{\omega}_z[nT]\lambda_2[(n-1)T] - \tilde{\omega}_y[nT]\lambda_3[(n-1)T] \}; \\ \lambda_0[nT] &= \sqrt{1 - \lambda_1^2[nT] - \lambda_2^2[nT] - \lambda_3^2[nT]}. \end{aligned}$$

Решітчаста функція  $\Psi[nT]$  на будь якому кроці алгоритму обчислюється за формулою

$$\Psi[nT] = 2\lambda_0[nT]\lambda_3[nT]. \quad (8)$$

Складові лінійної швидкості переміщення центру мас автомобіля вздовж часових центральних вісей інерції автомобіля оцінюються співвідношеннями

$$\begin{cases} V_x[nT] = V_x[(n-1)T] + 0,5T \{ \tilde{W}_x[nT] + \tilde{W}_x[(n-1)T] \}; \\ V_y[nT] = V_y[(n-1)T] + 0,5T \{ \tilde{W}_y[nT] + \tilde{W}_y[(n-1)T] \}; \\ V_z[nT] = V_z[(n-1)T] + 0,5T \{ \tilde{W}_z[nT] + \tilde{W}_z[(n-1)T] \}, \end{cases} \quad (9)$$

а проекція швидкості бічного зсуву центру мас на вісь  $OY$  визначається за формулою

$$V_y[nT] = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} & 2 \left( \begin{array}{l} \lambda_0[nT]\lambda_3[nT] + \lambda_1[nT]\lambda_2[nT] + \\ + \lambda_0[(n-1)T]\lambda_3[(n-1)T] + \\ + \lambda_1[(n-1)T]\lambda_2[(n-1)T] \end{array} \right) V_x[nT] + \\ & \left( \begin{array}{l} \lambda_0^2[nT] + \lambda_2^2[nT] - \lambda_1^2[nT] - \lambda_3^2[nT] + \\ + \lambda_0^2[(n-1)T] + \lambda_2^2[(n-1)T] - \\ - \lambda_1^2[(n-1)T] - \lambda_3^2[(n-1)T] \end{array} \right) V_y[nT] + \\ & + 2 \left( \begin{array}{l} \lambda_3[nT]\lambda_2[nT] - \lambda_0[nT]\lambda_1[nT] - \\ - \lambda_0[(n-1)T]\lambda_1[(n-1)T] + \\ + \lambda_3[(n-1)T]\lambda_2[(n-1)T] \end{array} \right) V_z[nT] \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Бічний зсув центру тяжіння транспортного засобу обчислюється БЦОМ за допомогою різницевого рівняння

$$y[nT] = y[(n-1)T] + \frac{T}{2} \{ V_y[nT] + V_y[(n-1)T] \}. \quad (11)$$

У відповідності з рис. 1 решітчаста функція (8) подається до входу ФЛ (фільтра Ланцоша) з передавальною функцією

$$W_\Lambda(z) = c_0 + c_1 z^{-1} - c_1 z^{-3} - c_0 z^{-4},$$

що відповідає алгоритму формування решітчастої функції  $\omega_\psi[nT]$  у наступному вигляді

$$\omega_\psi[nT] = c_0 \psi[nT] + c_1 \psi[(n-1)T] - c_1 \psi[(n-3)T] - c_0 \psi[(n-4)T]. \quad (12)$$

І, нарешті, блок формування алгоритму керування (БФАК) формує алгоритм керування у вигляді решітчастої функції

$$u[nT] = K_\psi \psi[nT] + K_\psi \omega_\psi[nT] + K_y y[nT], \quad (13)$$

де  $K_\psi$ ,  $K_\psi$  та  $K_y$  – варійовані параметри алгоритму керування, вибір яких рекомендується здійснювати у відповідності з роботами [23, 24].

Решітчаста функція (13) подається до входу перетворювача «код-аналог» (ПКА), вихідний сигнал якого  $u(t)$  подається до входу електрогідравлічного або електропневматичного підсилювача П з виходу якого робоче тіло гальмової системи (гальмова рідина, або повітря) під тиском  $P_i(t)$  та  $P_e(t)$  подається до гальмових магістралей правого та лівого борту автомобіля.

**Висновки.** Побудову цифрової системи курсової стійкості всюдихідного транспортного засобу в режимі екстреного гальмування, який здійснює рух в умовах зруйнованих доріг, або повного бездоріжжя, пропонується за рахунок застосування принципів безплатформних інерційних систем. Застосування параметрів Родріга-Гамільтона дозволило розробити досить

прості алгоритми визначення параметрів збуреного руху транспортного засобу, що без проблем реалізується бортовою цифровою обчислювальною машиною з метою формування алгоритму стабілізації корпусу автомобіля відносно заданої траєкторії його руху.

#### Список літератури:

1. Tavernini D., Velenis E., Longo S. Distribution Control for Minimum Pitch. *Vehicle System Dynamics*. 2017. Vol. 55. № 6. pp. 902-923
2. Fujimoto H., Narada S. Model – Based Range Extension Control System for Electric Vehicles with Front and Rear Driving – Braking Force Distribution. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015. Vol. 62. №5. pp 3245-3254
3. Gong X., Qian L., Yan I. Research on Electronic Brake Force Distribution and Anti-Lock Brake of Vehicle Based on Direct Electro Hydraulic Actuator. *International Journal of Automotive Engineerind*. 2020. Vol. 11. № 2. pp 22-29
4. Tavernini D., Velenis E., Longo S. Model – Based Active Brake Force Distribution for Pitch Angle Minimization. *IEEE 54-th Conf. on Decision and Control*. December 15-18, 2015. Osaka, Japan. pp. 197-202
5. Nakamura E., Soga M., Sacai A., Otomo A., Kovayashi T. Development of Electronically Controlled Brake System for Hybrid Vehicle. *SAE 2002 World Congress*. Detroit, Michigan. March 4-7, 2002. Printed in USA. 6 p.
6. Park G., Coi S.B. Optimal Brake Distribution for Electronic Stability Control Using Weighted Least Square Allocation Method. 16-th Intern. Conf. “Automation and System” (ICCAS 2016). October 16-19, 2016 in HICO, Gyeongju, Korea
7. Xinyu Wu. Control Strategy and Algorithm Study on Light Vehicle Electronic Mechanical Braking System. 5-th Intern. Conf. on Electronic, Management, Information and Medicine (EMIM 2015). pp. 1453-1458
8. Her H., Cho W., Yi K. Vehicle Stability Control Using International Brake Force Based on Tire Force Information. 14-th Intern. IEEE Conf. of Intelligent Transportation Systems. Washington, USA. October 5-7, 2011. pp. 22-29
9. Ломака С.И., Рыжих Л.А., Красюк А.Н., Леонтьев Д.Н. Современные электронно-пневматические рабочие тормозные системы и их особенности. *Автомобильная промышленность*. № 5. – 2009. – С. 19-21.
10. Рыжих Л.А., Красюк А.Н., Леонтьев Д.Н., Быкадоров А.В. Системы контроля выходных параметров движения автотранспортного средства, *Вісник СевНТУ*. №143. – 2013. – С. 49-52
11. Леонтьев Д.Н., Рыжих Л.А., Ломака С.И. Алгоритмы функционирования регуляторов тормозных сил с электронным управлением. *Автомобильная промышленность*. № 11. – 2007. – С. 17-19.
12. Збруцький О.В., Богун Ю.В. Навігація наземного об'єкту за допомогою інтегрованої системи. *Космічна наука і технологія*. 2001. № 4. С. 45-50
13. Кононенко В.Ф. Разработка алгоритмов интегрированной навигационной системы вездеходной колесной машины. *Механіка та машинобудування*. 2007. № 1. С. 107-112.
14. Александров Е.Е., Кононенко В.А., Подригало М.А. Повышение устойчивости и управляемости колесных машин в тормозных режимах. Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. 320 с.
15. Хэмминг Р.В. Цифровые фильтры. – М.: Мир, 1984, 221 с.
16. Александрова Т.Е., Александрова И.Е., Лазаренко А.А. Цифровые фильтры в системах автомобильной автоматики. *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. 2014. № 1 (37). С. 25-28
17. Александрова Т.Е. Кононенко В.А., Лазаренко А.А. Сравнительный анализ цифровых ПД-стабилизаторов подвижных объектов с низкочастотными фильтрами Баттеруорта и Ланцоена. *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління*. 2011. № 2. С. 148-152
18. Александров Е.Е. Александрова Т.Е. Математическое моделирование, системный анализ и синтез динамических систем. Харьков: НТУ «ХПИ». 2014. 200 с.
19. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука, 1973. 320 с.
20. Бранец В.Н. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных систем. М.: Наука, 1992. 280 с.
21. Лебедев Д.В., Ткаченко А.И. Информационно-алгоритмические аспекты управления подвижными объектами. К.: Наукова думка. 2000. 216 с.
22. Панов А.П. Математические основы теории инерциальной ориентации. К.: Наукова думка. 1995. 279 с.

23. Aleksandrov Ye., Aleksandrova T., Kostianyk I., Morgun Ya. Parametric Synthesis of a Non-Stationary Automatic Control System of the Course Stability of a Car. *Advance on Information System*. 2020. Vol.4. №2. pp.51- 59
24. Yevgen Aleksandrov, Tetiana Aleksandrova, Yaroslav Morgun. About Stability of the Movement of the Refueling Vehicle Equipped With Digital System of Brake Forces Distribution During the Emergency Braking. *Advanced Information Systems*. 2021. Vol. 5. № 3. pp.59-65

#### References (transliterated)

1. Tavernini D., Velenis E., Longo S. Distribution Control for Minimum Pitch. *Vehicle System Dynamics*. 2017. Vol. 55. № 6. pp. 902-923
2. Fujimoto H., Narada S. Model – Based Range Extension Control System for Electric Vehicles with Front and Rear Driving – Braking Force Distribution. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015. Vol. 62. №5. pp 3245-3254
3. Gong X., Qian L., Yan I. Research on Electronic Brake Force Distribution and Anti-Lock Brake of Vehicle Based on Direct Electro Hydraulic Actuator. *International Journal of Automotive Engineerind*. 2020. Vol. 11. № 2. pp 22-29
4. Tavernini D., Velenis E., Longo S. Model – Based Active Brake Force Distribution for Pitch Angle Minimization. *IEEE 54-th Conf. on Decision and Control*. December 15-18, 2015. Osaka, Japan. pp. 197-202
5. Nakamura E., Soga M., Sacai A., Otomo A., Kovayashi T. Development of Electronically Controlled Brake System for Hybrid Vehicle. *SAE 2002 World Congress*. Detroit, Michigan. March 4-7, 2002. Printed in USA. 6 p.
6. Park G., Coi S.B. Optimal Brake Distribution for Electronic Stability Control Using Weighted Least Square Allocation Method. *16-th Intern. Conf. “Automation and System” (ICCAS 2016)*. October 16-19, 2016 in HICO, Gyeongju, Korea
7. Xinyu Wu. Control Strategy and Algorithm Study on Light Vehicle Electronic Mechanical Braking System. *5-th Intern. Conf. on Electronic, Management, Information and Medicine (EMIM 2015)*. pp. 1453-1458
8. Her H., Cho W., Yi K. Vehicle Stability Control Using International Brake Force Based on Tire Force Information. *14-th Intern. IEEE Conf. of Intelligent Transportation Systems*. Washington, USA. October 5-7, 2011. pp. 22-29
9. Lomaka S.I., Ryzhih L.A., Krasnyuk A.N., Leont'ev D.N. Sovremennye elektronno-pnevmaticheskie rabochie tormoznye sistemy i ih osobennosti. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. № 5. – 2009. – S. 19-21.
10. Ryzhih L.A., Krasnyuk A.N., Leont'ev D.N., Bykadorov A.V. Sistemy kontrolya vyhodnyh parametrov dvizheniya avtotransportnogo sredstva, *Visnik SevNTU*. №143. – 2013. – S. 49-52
11. Leont'ev D.N., Ryzhih L.A., Lomaka S.I. Algoritmy funkcionirovaniya regulyatorov tormoznyh sil s elektronnyim upravleniem. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. № 11. – 2007. – S. 17-19.
12. Zbrutyskiy O.V., Bohun Yu.V. Navihatsiia nazemnoho ob'ektu za dopomohoiu intehrovanoi systemy. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia*. 2001. № 4. S. 45-50
13. Kononenko V.F. Razrabotka algoritmov integrirovanoj navigacionnoj systemy vezdekhodnoj kolesnoj mashiny. *Mekhanika ta mashinobuduvannya*. 2007. № 1. S. 107-112.
14. Aleksandrov E.E., Kononenko V.A., Podrigalo M.A. Povyshenie ustojchivosti i upravlyaemosti kolesnyh mashin v tormoznyh rezhimah. *Har'kov: NTU «HPI», 2007. 320 s.*
15. Hemming R.V. *Cifrovye fil'try*. – M.: Mir, 1984, 221 s.
16. Aleksandrova T.E., Aleksandrova I.E., Lazarenko A.A. Cifrovye fil'try v sistemah avtomobil'noj avtomatiki. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2014. № 1 (37). S. 25-28
17. Aleksandrova T.E. Kononenko V.A., Lazarenko A.A. Sravnitel'nyj analiz cifrovyyh PD-stabilizatorov podvizhnyh ob'ektov s nizkochastotnymi fil'trami Batteruorta i Lancoena. *Radioelektronika. Informatika. Upravlinnya*. 2011. № 2. S. 148-152
18. Aleksandrov E.E. Aleksandrova T.E. Matematicheskoe modelirovanie, sistemnyj analiz i sintez dinamicheskikh sistem. *Har'kov: NTU «HPI»*. 2014. 200 s.
19. Branec V.N., SHmyglevskij I.P. *Primenenie kvaternionov v zadachah orientacii tverdogo tela*. M.: Nauka, 1973. 320 s.
20. Branec V.N. *Vvedenie v teoriyu besplatformennyh inercial'nyh sistem*. M.: Nauka, 1992. 280 s.
21. Lebedev D.V., Tkachenko A.I. *Informacionno-algoritmicheskie aspekty upravleniya podvizhnymi ob'ektami*. K.: Naukova dumka. 2000. 216 s.



22. Panov A.P. Matematicheskie osnovy teorii inercial'noj orientacii. K.: Naukova dumka. 1995. 279 s.
23. Aleksandrov Ye., Aleksandrova T., Kostianyk I., Morgun Ya. Parametric Synthesis of a Non-Stationary Automatic Control System of the Course Stability of a Car. Advance on Information System. 2020. Vol.4. №2. pp.51- 59
24. Yevgen Aleksandrov, Tetiana Aleksandrova, Yaroslav Morgun. About Stability of the Movement of the Refueling Vehicle Equiped With Digital System of Brake Forces Distribution During the Emergency Braking. Advanced Information Systems. 2021. Vol. 5. № 3. pp.59-65

*Надійшла (received) 09.09.2021 р.*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Александров Євгеній Євгенійович (Александров Евгений Евгеньевич, Aleksandrov Yevhen)** – доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, професор кафедри автомобілів ім. А.Б.Гредескула, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7525-6383>; e-mail: [aleksandrov.ye.ye@gmail.com](mailto:aleksandrov.ye.ye@gmail.com)

**Клименко Валерій Іванович (Клименко Валерий Иванович, Klumenko Valerii)** – доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри автомобілів ім. А.Б.Гредескула, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7399-0397>; e-mail: [valeriy.klimenko@gmail.com](mailto:valeriy.klimenko@gmail.com)

**Леонтєв Дмитро Миколайович (Леонтєв Дмитрий Николаевич, Leontiev Dmytro)** – доктор технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, професор кафедри автомобілів ім. А.Б.Гредескула, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4255-6317>; e-mail: [leontiev@khadi.kharkov.ua](mailto:leontiev@khadi.kharkov.ua)

**Терновий Микита Олексійович (Терновой Никита Алексеевич, Ternovyi Mykyta)** – здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, студент групи АА-41-18, м. Харків, Україна.