

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ КУРСОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМОБИЛЯ

Александров Е. Е.¹, Александрова Т. Е.², Костяник И. В.², Моргун Я. Ю.²

¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

²Национальный технический университет «Харьковский
политехнический институт»

Аннотация. Рассматривается задача выбора варьируемых параметров алгоритма управления, реализуемого цифровым электронным блоком системы курсовой устойчивости автомобиля и обеспечивающего максимальный запас устойчивости и максимальное быстродействие стабилизируемого процесса при торможении автомобиля.

Ключевые слова: система курсовой устойчивости автомобиля, параметры Родрига-Гамильтона, решетчатая функция, низкочастотные цифровые фильтры, варьируемые параметры системы.

Введение

Автоматическое управление тормозной системой автомобиля обычно осуществляется тремя параллельно работающими системами: антиблокировочной системой ABS, предупреждающей блокировку колес при резком нажатии на педаль тормозов, противобуксовочной системы TRC, предупреждающей пробуксовывание колес при резком нажатии на педаль управления подачей топлива, и системы курсовой устойчивости VSC, поддерживающей управляемость автомобиля в случае утраты сцепления с дорогой передних или задних колес обоих бортов.

В боевых действиях на Донбассе широкое использование получили колесный бронетранспортер БТР-4 с автоматической 30-мм пушкой и колесная разведывательно-дозорная машина «Дозор-Б» с 12,7-мм танковым зенитным пулеметом «Утес». В условиях разрушенных дорог, а точнее, полного бездорожья вести прицельный огонь с ходу из таких машин практически не возможно, поэтому задача оснащения их современной системой курсовой устойчивости является неотложной технической задачей.

Анализ публикаций

В работе [1] рассмотрена задача выбора варьируемых параметров системы автоматического управления курсовой устойчивостью автомобиля VSC. Система содержит ставший традиционным на зарубежных автомобилях

представительского класса комплекс командных приборов, состоящий из трех гироскопических датчиков угловых скоростей, оси чувствительности которых совпадают по направлению с главными центральными осями инерции корпуса автомобиля, а выходные сигналы поданы на бортовой вычислитель с периодом дискретности T , реализующий алгоритмы бесплатформенной инерциальной системы (БИНС), с помощью которых с высокой точностью может быть оценен угол рассогласования $\psi[nT]$ собственной продольной оси корпуса автомобиля от заданного направления движения [2]. Преобразованный в непрерывную функцию времени $\psi(t)$ сигнал с выхода бортового вычислителя поступает в аналоговый стабилизатор, формирующий функцию управления:

$$u(t) = k_{\psi}\psi(t) + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi}(t), \quad (1)$$

а с выхода стабилизатора сигнал (1) поступает на вход электрогидравлического усилителя, устанавливающего давление тормозной жидкости в тормозных магистралях правого и левого бортов автомобиля. Таким образом, в системе VSC, рассмотренной в статье [1], функция бортового вычислителя заключается в вычислении угла $\psi(t)$. Собственно, стабилизатор положения корпуса является аналоговым.

В работах [3, 4] изложены теоретические основы построения БИНС, с высокой

точностью оценивающих значение угла рассогласования $\psi[nT]$. Вместе с тем, практически отсутствуют работы в области параметрического синтеза систем курсовой устойчивости автомобиля, в которых рассматривается проблема выбора варьируемых констант алгоритма управления, реализуемого цифровой системой курсовой устойчивости автомобиля.

Цель и постановка задачи

Целью настоящей работы является решение задачи параметрического синтеза цифровой системы автоматического управления курсовой устойчивостью автомобиля, в которой бортовой вычислитель не только оценивает угол рассогласования $\psi[nT]$, но также формирует релаксационную функцию управления в виде:

$$u[nT] = k_\psi \psi[nT] + k_{\dot{\psi}} \dot{\psi}[nT], \quad (2)$$

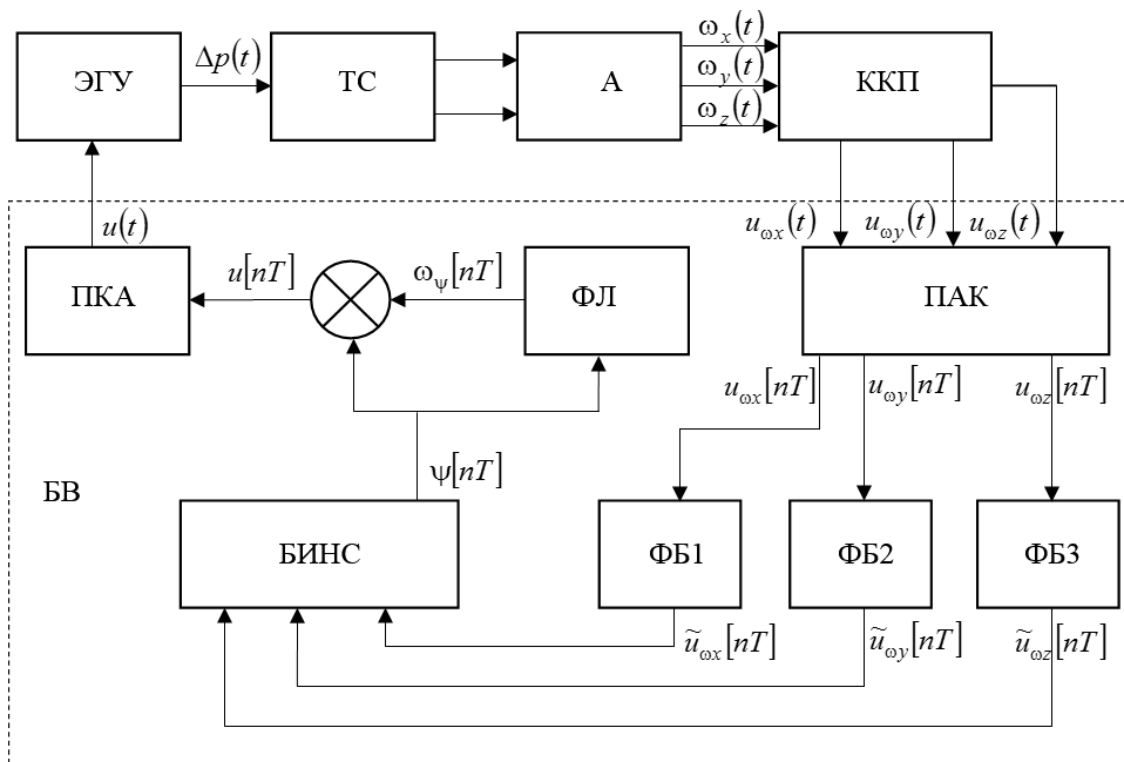


Рис. 1. Структурная схема замкнутой цифровой САУ курсовой устойчивостью автомобиля

Дискретная часть системы представляет собой бортовой вычислитель БВ, содержащий преобразователи «аналог-код» ПАК и «код-аналог» ПКА, цифровые низкочастотные фильтры Баттеруорта [3] ФБ1, ФБ2 и ФБ3, фильтрующие высокочастотные помехи дискретных

где k_ψ и $k_{\dot{\psi}}$ – варьируемые константы алгоритма (2), подлежащие выбору, значения которых должны обеспечивать максимальный запас устойчивости и максимальное быстродействие замкнутой цифровой системы управления курсовой устойчивостью автомобиля.

Характеристическое уравнение замкнутой системы

Структурная схема замкнутой цифровой САУ курсовой устойчивостью автомобиля приведена на рис. 1.

Непрерывная часть системы содержит объект управления (автомобиль А с гидравлической тормозной системой ТС), комплекс командных приборов ККП и исполнительный орган (электрогидравлический усилитель ЭГУ).

сигналов $u_{ox}[nT]$, $u_{oy}[nT]$ и $u_{oz}[nT]$, представляющих собою релаксационные функции, соответствующие выходным сигналам гироскопических датчиков угловых скоростей $u_{ox}(t)$, $u_{oy}(t)$ и $u_{oz}(t)$, блок алгоритмов БИНС, с помощью которого

осуществляется вычисление угла рассогласования $\psi[nT]$, цифровой низкочастотный фильтр Ланцоша ФЛ, с помощью которого вычисляется угловая скорость поворота корпуса автомобиля $\omega_\psi[nT]$, а также суммирующее устройство, формирующее дискретный сигнал управления в виде решетчатой функции (2).

В соответствии с работой [1] математическая модель возмущенного движения непрерывной части системы записывается в виде системы линейных дифференциальных уравнений:

$$L_0 \frac{di(t)}{dt} + r_0 i(t) = u(t); \quad (3)$$

$$I_k \frac{d^2\gamma(t)}{dt^2} + f_k \frac{d\gamma(t)}{dt} + c_k \gamma(t) = k_e i(t); \quad (4)$$

$$I_a \frac{d^2\psi(t)}{dt^2} = k_a \Delta p(t), \quad (5)$$

где $i(t)$ – электрический ток в обмотке электромагнита ЭГУ;

$\gamma(t)$ – угол поворота коромысла электромагнита;

$\psi(t)$ – текущий угол поворота корпуса автомобиля;

$\Delta p(t)$ – разность давлений рабочей жидкости в тормозных магистралях правого и левого бортов автомобиля, определяемая соотношением:

$$\Delta p(t) = k_\Gamma \gamma(t), \quad (6)$$

где L_0 – индуктивность обмотки электромагнита ЭГУ;

r_0 – сопротивление обмотки;

I_k – момент инерции коромысла электромагнита относительно оси поворота;

f_k – коэффициент гидравлического трения в оси вращения коромысла;

c_k – коэффициент жесткости фиксирующей пружины коромысла;

k_e , k_a – коэффициенты пропорциональности;

I_a – момент инерции корпуса автомобиля относительно собственной вертикальной оси.

Подставим соотношение (6) в правую часть уравнения (5) и запишем математическую модель возмущенного

движения непрерывной части системы в нормальной форме Коши, вводя вектор состояния непрерывной части системы:

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \\ x_5(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(t) \\ \gamma(t) \\ \dot{\gamma}(t) \\ \psi(t) \\ \dot{\psi}(t) \end{bmatrix}.$$

В результате имеем:

$$\dot{X}(t) = A \cdot X(t) + B \cdot u(t), \quad (7)$$

где собственная матрица A и матрица управления B записываются:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{r_0}{L_0} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{k_e}{I_k} & -\frac{c_k}{I_k} & -\frac{f_k}{I_k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{k_a k_\Gamma}{I_a} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_0} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Запишем разностное уравнение, связывающее начальное состояние непрерывной части системы (7) $X[kT]$ с ее конечным состоянием $X[(k+1)T]$ на каждом периоде дискретности:

$$X[(k+1)T] = \Phi \cdot X[kT] + H \cdot u[kT], \quad (8)$$

где Φ и H – матрицы, которые определяются формулами [4]:

$$\Phi = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i!} A^i T^i; \quad H = \sum_{i=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(i+1)!} A^i T^{i+1} \right] B. \quad (9)$$

Количество учитываемых членов матричных рядов (9) зависит от величины периода квантования T . Обычно в современных бортовых вычислителях с

малым периодом квантования с достаточной степенью точности полагают:

$$\Phi = E + A \cdot T; H = B \cdot T. \quad (10)$$

Алгоритм (2) в векторно-матричной форме записывается:

$$u[kT] = K \cdot X[kT], \quad (11)$$

где K – матрица, имеет следующий вид:

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & k_\psi & k_{\dot{\psi}} \end{bmatrix}.$$

Подставим соотношение (11) в разностное уравнение (8). В результате получаем разностное уравнение замкнутой дискретной системы:

$$X[(k+1)T] = [\Phi + H \cdot K] \cdot X[kT], \quad (12)$$

а характеристическое уравнение замкнутой дискретной системы запишем в виде:

$$\det[\Phi + H \cdot K - E \cdot z] = 0, \quad (13)$$

где E – единичная матрица;

z – комплексная переменная

Z – преобразования.

Подставляя в уравнение (13) соответствующие матрицы, получаем:

$$(1-z)^5 - (1-z)^4 a_4 + (1-z)^3 a_3 - (1-z)^2 a_2 + (1-z) a_1 k_\psi - a_0 k_\psi = 0, \quad (14)$$

где соответствующие коэффициенты равны:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{k_e k_a k_\Gamma}{I_a I_k L_0} T^5; \\ a_1 &= \frac{k_e k_a k_\Gamma}{I_a I_k L_0} T^4; \\ a_2 &= \frac{r_0}{L_0} \cdot \frac{c_k}{I_k} T^3; \\ a_3 &= \left(\frac{c_k}{I_k} + \frac{r_0}{L_0} \cdot \frac{f_k}{I_k} \right) T^2; \\ a_4 &= \left(\frac{f_k}{I_k} + \frac{r_0}{L_0} \right) T. \end{aligned}$$

В характеристическом уравнении (14) произведем замену [5]:

$$z = \frac{1+w}{1-w}. \quad (15)$$

В результате получаем новое характеристическое уравнение относительно комплексной переменной w :

$$\begin{aligned} &(A_0 - 2a_1 k_\psi + a_0 k_\psi) w^5 + \\ &+ (A_1 + 8a_1 k_\psi - 5a_0 k_\psi) w^4 + \\ &+ (A_2 - 12a_1 k_\psi + 10a_0 k_\psi) w^3 + \\ &+ (-4a_2 + 8a_1 k_\psi - 10a_0 k_\psi) w^2 + \\ &+ (-2a_1 k_\psi + 5a_0 k_\psi) w - a_0 k_\psi = 0, \end{aligned} \quad (16)$$

где $A_0 = -32 + 16a_4 - 8a_3 + 4a_2$;

$$A_1 = -16a_4 + 16a_3 - 12a_2;$$

$$A_2 = -8a_3 + 12a_2.$$

Решение задачи параметрического синтеза

В характеристическом уравнении (16) произведём замену [6]:

$$w = \alpha + j\omega,$$

выделим в полученном соотношении действительную и мнимую часть и приравняем их нулю. В результате получаем систему двух алгебраических уравнений с двумя неизвестными варьируемыми параметрами системы $k_\psi(\alpha, \omega)$ и $k_{\dot{\psi}}(\alpha, \omega)$:

$$\begin{aligned} &k_\psi(\alpha, \omega) a_0 \{ \alpha(\alpha^4 - 10\alpha^2 \omega^2 + 5\omega^4) - \\ &- 5(\alpha^4 - 6\alpha^2 \omega^2 + \omega^4) + 10\alpha(\alpha^2 - 3\omega^2) - \\ &- 10(\alpha^2 - \omega^2) + 5\alpha - 1 \} + \\ &+ k_{\dot{\psi}}(\alpha, \omega) a_1 \{ -2\alpha(\alpha^4 - 10\alpha^2 \omega^2 + 5\omega^4) + \\ &+ 8(\alpha^4 - 6\alpha^2 \omega^2 + \omega^4) - \\ &- 12\alpha(\alpha^2 - 3\omega^2) + \\ &+ 8(\alpha^2 - \omega^2) - 2\alpha \} = \\ &= -A_0 \alpha(\alpha^4 - 10\alpha^2 \omega^2 + 5\omega^4) - \\ &- A_1 (\alpha^4 - 6\alpha^2 \omega^2 + \omega^4) - A_2 \alpha(\alpha^2 - \\ &- 3\omega^2) + 4a_2 (\alpha^2 - \omega^2); \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
& \kappa_{\psi}(\alpha, \omega) a_0 \{5\alpha^4 - 10\alpha^2 \omega^2 + \omega^4 - \\
& - 20\alpha(\alpha^2 - \omega^2) + 10(3\alpha^2 - \omega^2) - \\
& - 20\alpha + 5\} + \\
& + \kappa_{\psi}(\alpha, \omega) a_1 \{-2(5\alpha^4 - 10\alpha^2 \omega^2 + \omega^4) + \\
& + 32\alpha(\alpha^2 - \omega^2) - 12(3\alpha^2 - \omega^2) + \\
& + 16\alpha - 2\} = -A_0(5\alpha^4 - 10\alpha^2 \omega^2 + \omega^4) - \\
& - 4A_1\alpha(\alpha^2 - \omega^2) - A_2(3\alpha^2 - \omega^2) + 8a_2\alpha;
\end{aligned} \quad (18)$$

Если в уравнениях (17) и (18) положить $\alpha = 0$, то они вырождаются в уравнения для построения области устойчивости замкнутой дискретной системы в плоскости варьируемых констант алгоритма (2):

$$\begin{aligned}
& k_{\psi}(\omega) a_0 \{-5\omega^4 + 10\omega^2 - 1\} + \\
& + k_{\psi}(\omega) a_1 \{8\omega^4 - 8\omega^2\} = -A_1\omega^4 - 4a_2\omega^2;
\end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
& k_{\psi}(\omega) a_0 \{\omega^4 - 10\omega^2 + 5\} + \\
& + k_{\psi}(\omega) a_1 \{-2\omega^4 + 12\omega^2 - 2\} = \\
& = -A_0\omega^4 + A_2\omega^2.
\end{aligned} \quad (20)$$

На рис. 2 приведены границы областей устойчивости замкнутых цифровых систем автоматического управления курсовой устойчивостью автомобиля при различных значениях периода квантования T , построенные в плоскости варьируемых констант алгоритма (2) с помощью соотношений (19) и (20). Анализ построенных областей устойчивости позволяет сделать вывод о том, что уменьшение значения периода квантования бортового вычислителя приводит к расширению области устойчивости замкнутой системы, которая при $T \rightarrow 0$ неограниченно приближается к области устойчивости непрерывной системы с функцией управления (1).

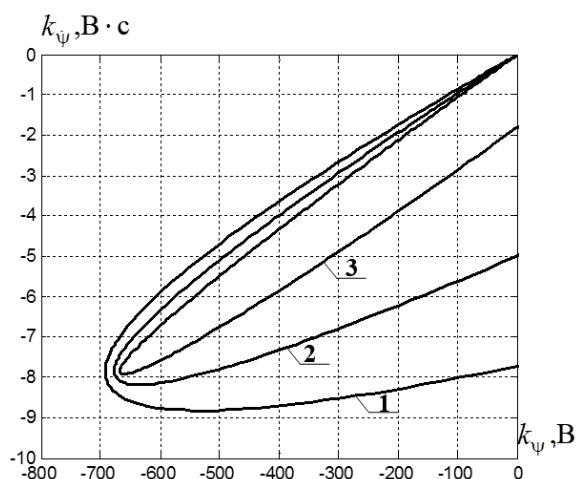


Рис. 2. Границы областей устойчивости замкнутых цифровых САУ: 1 – $T = 0,003$ с; 2 – $T = 0,004$ с; 3 – $T = 0,005$ с

Значения параметров математической модели возмущённого движения автомобиля при этом принимались равными:

$$\begin{aligned}
L_0 &= 10^{-3} \text{ ГГ}; \\
r_0 &= 30 \text{ Ом}; \\
I_k &= 0,98 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2; \\
f_k &= 0,55 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}; \\
c_k &= 1,01 \cdot 10^2 \text{ Н} \cdot \text{м}; \\
k_e &= 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{А}^{-1}; \\
k_a &= -0,5 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{Па}^{-1}; \\
k_{\Gamma} &= 3,5 \cdot 10^8 \text{ ПП}; \\
I_a &= 1750 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2.
\end{aligned}$$

На рис. 3 приведены линии равной степени устойчивости, построенные с помощью соотношений (17) и (18) при различных значениях величины $\alpha < 0$, и представляющие собой комфортные отображения линий, параллельных оси ординат комплексной плоскости корней характеристического уравнения (16) и сдвинутых относительно неё влево на величину $\alpha < 0$.

Каждая из линий равной степени устойчивости при $\alpha < 0$ ограничивает область возможных значений варьируемых констант алгоритма (2), которые обеспечивают запас устойчивости цифровой замкнутой САУ не менее $|\alpha|$.

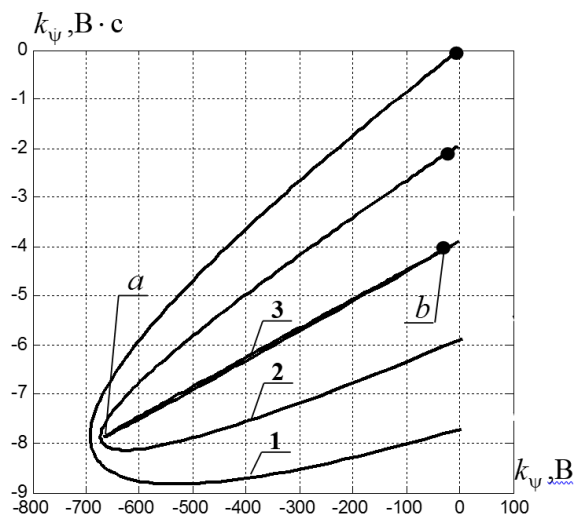


Рис. 3. Линии равной степени устойчивости цифровой САУ: 1 – $\alpha=0$; 2 – $\alpha < 0$

При некотором значении $\alpha = -\alpha^*$ такая область вырождается в отрезок ab . Значения варьируемых констант k_ψ и $k_{\dot{\psi}}$, выбранные на отрезке ab , обеспечивают максимальный запас устойчивости замкнутой цифровой САУ, равный $|\alpha^*|$. Если значения варьируемых констант алгоритма (2) соответствуют точке b отрезка ab , то они обеспечивают не только максимальный запас устойчивости замкнутой цифровой системы, но и апериодический характер процессов стабилизации корпуса автомобиля в процессе торможения.

Из анализа рис. 3 следует вывод, что оптимальные значения варьируемых констант алгоритма (2) составляют $k_\psi = -13,485 \text{ В}$; $k_{\dot{\psi}} = -3,976 \text{ В} \cdot \text{с}$.

Выводы

Предложена методика выбора значений варьируемых констант алгоритма управления, реализуемого цифровой системой автоматического управления курсовой устойчивостью автомобиля, обеспечивающих максимальный запас устойчивости и максимальное быстродействие замкнутой системы, а также апериодический характер процессов стабилизации корпуса автомобиля относительно заданного направления.

Выбор требуемых значений констант алгоритма управления осуществляется путём отыскания характеристического уравнения замкнутой цифровой системы управления с последующим использованием процедуры W -преобразования, позволяющей привести

характеристическое уравнение к виду, удобному для использования критериев устойчивости и качества для непрерывных систем автоматического управления.

Анализ построенных областей устойчивости замкнутой цифровой системы курсовой устойчивости автомобиля позволил выбрать допустимое значение периода квантования системы, которое составляет $T=(0,001\dots 0,004) \text{ с}$, а анализ построенных линий равной степени устойчивости позволил выбрать оптимальные значения варьируемых констант алгоритма управления $k_\psi = -13,48 \text{ В}$ и $k_{\dot{\psi}} = -3,976 \text{ В} \cdot \text{с}$, обеспечивающих максимальный запас устойчивости и максимальное быстродействие замкнутой цифровой системы.

Литература

- Aleksandrov Ye., Aleksandrova T., Morhun Ya. Parametric synthesis of the electronic control unit of the course stability system of the car. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 6(102). P. 39–45.
- Александров Е. Е., Волков В. П., Волонцевич Д. О., Подригало М. А. Повышение устойчивости и управляемости колёсных машин в тормозных режимах. НТУ "ХПИ", Харьков, 2007. 320 с.
- Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных систем. М: Наука, 1992. 280 с.
- Панов А.П. Математические основы теории инерциальной ориентации. К: Наукова думка, 1995. 279 с.
- 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.
- Васильев С. К., Захаров В. Н., Прохоров Ю. Ф. Кибернетика в системах военного назначения. Воениздат, Москва, 1979. 293 с.
- Александров С. С. Основы автомобильной автоматики. ХНАДУ, Харьков, 2010. 172 с.
- Огурк И. А. Новые методы синтеза линейных и некоторых нелинейных динамических систем. Наука, Москва–Ленинград, 1965. 207 с.

References

- Aleksandrov Ye., Aleksandrova T., Morhun Ya. (2019). Parametric synthesis of the electronic control unit of the course stability system of the car. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 6 (102). 39–45.

2. Aleksandrov Ye. Ye., Volkov V. P., Volontsevich D. O., Podrigalo M. A. (2007). Povyshenie ustoychivosti i upravlyaemosti kolyosnykh mashin v tormoznykh rezhimakh [Improving the stability and controllability of wheeled vehicles in braking conditions] NTU «KhPI», Kharkiv.
3. Branets V. N., Shmyglevskiy I. P. (1992) Vvedeniye v teoriyu besplatformennykh inertial'nykh sistem [Introduction to the theory of strapdown inertial systems] Nauka, Moskva.
4. Panov A. P. (1995) Matematicheskiye osnovy teorii inertial'noy oriyentatsii [Mathematical foundations of the theory of inertial orientation], Naukova dumka, Kyiv.
5. Aleksandrova T. Ye., Aleksandrova I. Ye., Lazarenko A. A. (2014), "Tsifrovyye filtry v sistemakh avtomobilnoy avtomatiki" [Digital filters in automotive automation systems], *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 1(37). 25–28 [in Russian].
6. Vasilev S. K., Zaharov V. N., Prohorov Yu. F. (1979). Kibernetika v sistemakh voennogo naznacheniya [Cybernetics in military systems]. Voenizdat, Moskva.
7. Alesandrov Ye. Ye. (2010). Osnovy avtomobilnoy avtomatiki [Automotive Fundamentals]. KhNADU, Kharkiv.
8. Orurk I. A. (1965). Novyye metody sinteza lineynykh i nekotorykh nelineynykh dinamicheskikh sistem [New methods for the synthesis of linear and some nonlinear dynamical systems]. Nauka, Moskov–Leningrad.

Александров Евгений Евгеньевич¹, д.т.н., проф. каф. автомобилей, тел. +38 050-625-68-40, alexandrov.ye.ye@gmail.com,

Александрова Татьяна Евгеньевна², д.т.н., проф. каф. системного анализа и информационно-аналитических технологий, тел. +38 099-089-90-50, alexandrova.t.ye@gmail.com,

Костяник Ирина Витальевна², к.т.н., доц. каф. информационных технологий и систем колесных и гусеничных машин им. А.А. Морозова, тел. +38 066-988-66-60, kostyanik-irina@ukr.net,

Моргун Ярослав Юрьевич², аспирант каф. системного анализа и информационно-аналитических технологий, тел. 066-960-66-36, yarki95@gmail.com,

¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Украина, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.

²Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 61002, Украина, г. Харьков, ул. Кирпичева, 2.

Параметрический синтез цифровой системы курсовой устойчивости автомобиля

Анотація. Розглядається задача вибору варіюваних параметрів алгоритму керування, що реалізується цифровим електронним блоком

системи курсової стійкості автомобіля і забезпечує максимальний запас стійкості і максимальну швидкість процесу стабілізації при гальмуванні автомобіля. Вважається, що в якості чутливих елементів системи застосовуються датчики кутових швидкостей корпусу автомобіля, осі чутливості яких співпадають за напрямком з головними центральними осями інерції корпусу, а кутове відхилення подовжньої осі корпусу від заданого напрямку обчислюється цифровим електронним блоком за допомогою алгоритмів безплатформених інерціальних систем (БІНС) у вигляді решітчастої функції. Інформація про кутову швидкість повороту корпусу являє собою решітчасту функцію на виході цифрового низькочастотного фільтру Ланцоша, на вхід якого подана решітчаста функція кутового відхилення корпусу від заданого напрямку руху автомобіля, а решітчаста функція керування представляє собою зважену суму цих функцій, вагові коефіцієнти яких є варіюваними параметрами цифрової системи курсової стійкості автомобіля, що підлягають вибору. Збурений рух безперервної частини замкненої системи описується звичайними диференціальними рівняннями, робота дискретної частини описується співвідношеннями у кінцевих різницях. Шляхом спеціальних перетворень математична модель збуреного руху замкненої системи керування подається у вигляді системи різницевих рівнянь, із застосуванням якої побудовано характеристичне рівняння замкненої дискретної системи курсової стійкості автомобіля. За допомогою білінійного *W*-перетворення характеристичне рівняння приводиться до вигляду, зручного для побудови ліній рівного ступеня стійкості в площині варіюваних параметрів цифрового електронного блоку керування, з подальшим визначенням оптимальних значень його варіюваних параметрів, а також оцінкою впливу обраного значення періоду квантування цифрового електронного блоку на область стійкості замкненої цифрової системи курсової стійкості автомобіля.

Ключові слова: система курсової стійкості автомобіля, параметри Родріга-Гамільтона, решітчаста функція, низькочастотні цифрові фільтри, варіювані параметри системи.

Александров Євген Євгенович¹, д.т.н., проф. каф. автомобілів, тел. +38 050-625-68-40, alexandrov.ye.ye@gmail.com,

Александрова Тетяна Євгенівна², д.т.н., проф. каф. системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій, тел. +38 099-089-90-50, alexandrova.t.ye@gmail.com,

Костяник Ірина Віталіївна², к.т.н., доц. каф. інформаційних технологій і систем колісних та гусеничних машин імені О. О. Морозова, тел.

+38 066-988-66-60, kostyanik-irina@ukr.net,
Моргун Ярослав Юрійович², аспірант каф.
 системного аналізу та інформаційно-аналітичних
 технологій, тел. +38 066-960-66-36,
 yarki95@gmail.com,

¹Харківський національний автомобільно-
 дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків,
 вул. Ярослава Мудрого, 25.

²Національний технічний університет
 «Харківський політехнічний інститут», 61002,
 Україна, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Parametric synthesis of the digital system of the course stability of a car

Abstract. *The problem of choosing the variable parameters of a control algorithm, implemented by a digital electronic unit of the system of the course stability of a car and providing the maximum stability margin and the maximum speed of the stabilized process during car braking is considered. It is believed that the angular velocity sensors of the car body are used as the sensitive elements of the system, whose sensitivity axes coincide in direction with the main central axes of the body inertia, and the angular deviation of the longitudinal axis of the body from a given direction is calculated by a digital electronic unit using algorithms of platformless inertial systems (PINS) in the form of a lattice function. Information about the angular velocity of a body rotation is a lattice function at the output of the Lanczos digital low-pass filter, whose input is supplied with the lattice function of the angular deviation of the body from a given direction of the car movement. The lattice control function is a weighted sum of these functions, the weight coefficients of which are variable digital parameters of the Vehicle Stability Controls that are to be selected. The perturbed motion of the continuous part of the closed system is described by ordinary differential equations, the work of the discrete part is described by relations in finite differences. By means of special transformations, the*

mathematical model of the perturbed motion of the closed-loop control system is represented in the form of a system of difference equations, using which the characteristic equation of the closed discrete system of the course stability of the car is constructed. Using the bilinear W-transformation, the characteristic equation is reduced to a form convenient for constructing the lines of equal degree of stability in the plane of the variable parameters of the digital electronic control unit, followed by determining the optimal values of its variable parameters, as well as assessing the effect of the selected value of the quantization period of the digital electronic unit on the area of stability of the closed digital system of the course stability of a car.

Key words: *system of the course stability of a car, Rodrigue Hamilton parameters, lattice function, low-frequency digital filters, variable system parameters.*

Aleksandrov Eugen¹, professor, Doct. of Science, Department of automobiles, tel. +38 050-625-68-40, aleksandrov.ye.ye@gmail.com,

Aleksandrova Tetiana², professor, Doct. of Science, Department of Systems Analysis and Information-Analytical Technologies, tel. +38 099-089-90-50, aleksandrova.t.ye@gmail.com,

Kostianyk Iryna², Ph.D., Assoc. Prof. Department of Information Technologies and Systems of Wheel and Track Machines named after Morozov, tel. +38 066-988-66-60, kostyanik-irina@ukr.net,

Morgun Yaroslav², graduate student, Department of Systems Analysis and Information-Analytical Technologies, tel. +38 066-960-66-36, yarki95@gmail.com,

¹Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kirpicheva str., Kharkiv, 61002, Ukraine.