

УДК 629.11-52

Александров Е.Е., Александрова Т.Е., Галушка Ю.В., Костяник И.В., Олиарник Б.А.,
Слюсаренко Ю.А.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ СО СТУПЕНЧАТОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

Постановка задачи. В гусеничных машинах с бортовыми коробками передач поворот машины в соответствующую сторону осуществляется путем перехода на смежную пониженную передачу по отстающему борту. В процессе движения машины по пересеченной местности водителю приходится непрерывно манипулировать рычагами переключения передач, устанавливая необходимые номера передач в бортовых коробках. Такие манипуляции приводят к повышенным психофизическим нагрузкам на водителя и его быстрой утомляемости. В этой связи на машину предлагается устанавливать полуавтоматическую систему управления поворотом, содержащую вместо рычагов переключения передач штурвал управления поворотом, являющийся задатчиком направления движения, а переключение передач в бортовых коробках передач осуществляется автоматически в соответствии с выбранным алгоритмом. Настоящая работа посвящена выбору констант алгоритма управления движением.

Алгоритм управления движением. В работе [1] разработана имитационная модель криволинейного движения гусеничной машины со ступенчатой коробкой передач. Эта модель определяет с помощью кинематических соотношений (22), (23) и (24) скорость движения центра масс машины $V(t)$, угловую скорость поворота корпуса $\dot{\psi}(t)$ и скорость бокового смещения центра масс корпуса $\dot{y}(t)$ при движении машины по пересеченной местности. Не ограничивая общности, рассмотрим управление заданным направлением движения гусеничной машины. Предположим, что алгоритм управления реализуется с помощью бортовой цифровой вычислительной машины с периодом квантования T_0 , а управляющая функция формируется в виде

$$\sigma[nT_0] = k_{\psi}\dot{\psi}[nT_0] + k_y\dot{y}[nT_0]. \quad (1)$$

Управляющее $\delta^j[nT_0]$ формируется в соответствии со статической характеристикой, приведенной на рис. 1.

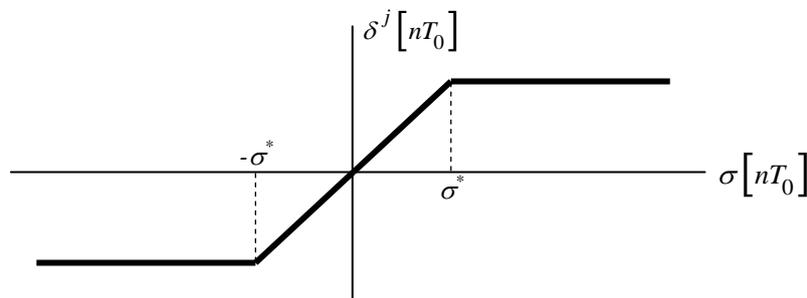


Рисунок 1 – Статическая характеристика зависимости управляющего воздействия от управляющей ретчатой функции

Если $|\sigma[nT_0]| \geq \sigma^*$, то алгоритм управления ступенчатой трансмиссией гусеничной машины записывается в виде:

$$\begin{aligned} \sigma[nT_0] \geq \sigma^*, & \quad \delta^j[nT_0] = i_F^j - i_E^{j-1}; \\ \sigma[nT_0] \leq -\sigma^*, & \quad \delta^j[nT_0] = i_F^{j-1} - i_E^j, \end{aligned} \quad (2)$$

где i_F^j, i_E^j – передаточные отношения бортовых коробок передач гусеничной машины по правому и левому бортам при включенной j -той передаче.

Если $|\sigma[nT_0]| < \sigma^*$, то алгоритм управления ступенчатой трансмиссией строится по принципу широтно-импульсной модуляции. Выбирается период модуляции T , связанный с периодом квантования T_0 соотношением

$$T = NT_0,$$

а также определяется скважность импульса управления

$$\gamma = \frac{|\sigma[nT_0]|}{\sigma^*}.$$

Алгоритм управления при этом записывается в виде

$$\begin{aligned} \sigma[nT_0] \geq 0, & \quad \delta^j[sT_0] = \begin{cases} i_F^j - i_E^{j-1} & \text{if } \sum_{s=0}^n sT_0 < \gamma T; \\ 0 & \text{if } \sum_{s=0}^n sT_0 \geq \gamma T; \end{cases} \\ \sigma[nT_0] < 0, & \quad \delta^j[sT_0] = \begin{cases} i_F^{j-1} - i_E^j & \text{if } \sum_{s=0}^n sT_0 < \gamma T; \\ 0 & \text{if } \sum_{s=0}^n sT_0 \geq \gamma T. \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

Логические зависимости (2) и (3) образуют единый алгоритм управления движением гусеничной машины с помощью перехода на пониженную передачу по отстающему борту машины.

Алгоритм отыскания угла отклонения гусеничной машины от заданного направления и величины бокового увода центра масс. Для отыскания угла отклонения связанной с объектом продольной оси относительно заданного направления движения обычно используется гироскопический датчик угла. Однако использование такого датчика в системах управления движением вездеходных гусеничных машин весьма проблематично вследствие:

- высокой стоимости гироскопических датчиков углов на основе трехстепенного гироскопа;
- длительной работы датчика на качающемся основании, представляющем собой подрессоренную часть корпуса гусеничной машины, в условиях вибраций, что приводит к снижению точности измерения.

Развитие вычислительной техники и систем управления с бортовыми вычислительными машинами привело к созданию платформенных инерциальных систем, содержащих в качестве чувствительных элементов гироскопические датчики угловой скорости, измеряющие угловые скорости подрессоренной части корпуса относительно связанных осей: $\omega_x(t)$ – относительно продольной оси OX ; $\omega_y(t)$ – относительно поперечной оси OY ; $\omega_z(t)$ – относительно вертикальной оси OZ . Тогда угол отклонения продольной оси машины относительно заданного направления может быть вычислен по формуле [2]

$$\psi[nT_0] = \operatorname{arctg} \frac{2\{\lambda_0[nT_0]\lambda_3[nT_0] + \lambda_1[nT_0]\lambda_2[nT_0]\}}{\lambda_0^2[nT_0] + 2\lambda_1^2[nT_0] - 1}, \quad (4)$$

где $\lambda_0[nT_0]$, $\lambda_1[nT_0]$, $\lambda_2[nT_0]$, $\lambda_3[nT_0]$ – параметры Родрига-Гамильтона, удовлетворяющие системе разностных уравнений

$$\begin{aligned} \lambda_0[(n+1)T_0] &= \lambda_0[nT_0] - \frac{T_0}{2} \{\omega_x[nT_0]\lambda_1[nT_0] + \omega_y[nT_0]\lambda_2[nT_0] + \omega_z[nT_0]\lambda_3[nT_0]\}; \\ \lambda_1[(n+1)T_0] &= \lambda_1[nT_0] + \frac{T_0}{2} \{\omega_x[nT_0]\lambda_0[nT_0] - \omega_y[nT_0]\lambda_3[nT_0] + \omega_z[nT_0]\lambda_2[nT_0]\}; \\ \lambda_2[(n+1)T_0] &= \lambda_2[nT_0] + \frac{T_0}{2} \{\omega_x[nT_0]\lambda_3[nT_0] + \omega_y[nT_0]\lambda_0[nT_0] - \omega_z[nT_0]\lambda_1[nT_0]\}; \\ \lambda_3[(n+1)T_0] &= \lambda_3[nT_0] + \frac{T_0}{2} \{-\omega_x[nT_0]\lambda_2[nT_0] + \omega_y[nT_0]\lambda_1[nT_0] + \omega_z[nT_0]\lambda_0[nT_0]\} \end{aligned} \quad (5)$$

с начальными условиями $\lambda_0[0] = 1$; $\lambda_1[0] = \lambda_2[0] = \lambda_3[0] = 0$.

Перейдем к рассмотрению алгоритма вычисления бокового смещения центра масс гусеничной машины от заданного направления движения. В качестве датчиков на машине установим акселерометры, оси чувствительности которых направлены по собственным осям машины. Акселерометры предоставляют информацию о кажущейся скорости по собственным осям машины $\Delta V_x[nT_0]$, $\Delta V_y[nT_0]$ и $\Delta V_z[nT_0]$. Тогда, в соответствии с работой [2], алгоритм вычисления проекции скорости бокового увода центра масс машины на ось OY неподвижной системы координат записывается в виде

$$\begin{aligned} W_y[(n+1)T_0] &= W_y[nT_0] + \{\lambda_0^2[nT_0] - 1\} \Delta V_y[nT_0] + \\ &+ 2\lambda_0[nT_0] \{\lambda_3[nT_0] \Delta V_x[nT_0] - \lambda_1[nT_0] \Delta V_y[nT_0]\} + \\ &+ 2\lambda_2[nT_0] \{\lambda_1[nT_0] \Delta V_x[nT_0] + \lambda_2[nT_0] \Delta V_y[nT_0] + \lambda_3[nT_0] \Delta V_z[nT_0]\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Величина бокового увода центра масс машины определяется суммированием решетчатой функции $W_y[nT_0]$:

$$y[nT_0] = \sum_{k=0}^n W_y[kT_0]. \quad (7)$$

Параметрический синтез алгоритма управления движением. Задачу параметрического синтеза алгоритма управления движением гусеничной машины сформируем следующим образом: требуется отыскать значения констант k_ψ и k_y управляющей функции (1) таких, чтобы на движениях имитационной модели криволинейного движения гусеничной машины, приведенной в [1], при реализации алгоритмов (1)-(7) достигал минимума интегральный квадратичный функционал

$$I = \int_0^T [\bar{\beta}_1^2 \psi^2(t) + \bar{\beta}_2^2 y^2(t)] dt, \quad (8)$$

где $\bar{\beta}_1^2$, $\bar{\beta}_2^2$ – весовые коэффициенты, подлежащие выбору.

Введем обозначения

$$\bar{I}_1(k) = \int_0^T [\psi^2(t)] dt; \quad \bar{I}_2(k) = \int_0^T [y^2(t)] dt, \quad (9)$$

где $k = [k_\psi, k_y]^T$ – вектор варьируемых констант алгоритма управления. Тогда функционал (8) представим в виде

$$I(k, \bar{\beta}) = \bar{\beta}_1^2 \bar{I}_1(k) + \bar{\beta}_2^2 \bar{I}_2(k), \quad (10)$$

где $\bar{\beta} = [\bar{\beta}_1, \bar{\beta}_2]^T$ – вектор весовых коэффициентов.

Каждый из функционалов (9) имеет собственную размерность, следовательно и весовые коэффициенты $\bar{\beta}_1$ и $\bar{\beta}_2$ должны иметь собственные размерности. Положим

$$\bar{\beta}_1 = \frac{\beta_1}{\Psi_{\max}}; \quad \bar{\beta}_2 = \frac{\beta_2}{y_{\max}},$$

где Ψ_{\max} , y_{\max} – максимально допустимые значения соответствующих переменных. Тогда, с учетом обозначений

$$I_1(k) = \frac{\bar{I}_1(k)}{\Psi_{\max}^2}; \quad I_2(k) = \frac{\bar{I}_2(k)}{y_{\max}^2},$$

функционал (10) принимает вид

$$I(k, \beta) = \beta_1^2 I_1(k) + \beta_2^2 I_2(k). \quad (11)$$

В соотношении (11) величины $I(k, \beta)$, β_i , $I_1(k)$, $I_2(k)$ безразмерны.

Минимизация функционала (11) по параметрам k_ψ и k_y при заданных значениях весовых коэффициентов β_1 и β_2 не вызывает затруднений. В то же время попытка минимизации функционала (11) по векторам k и β без ограничений на компоненты вектора β приводит к тривиальному решению $\beta_1 = \beta_2 = 0$, при котором функционал (11) обращается в нуль. В этой связи на компоненты вектора β наложены ограничения [3]

$$\beta_1 + \beta_2 = 1. \quad (12)$$

Обозначим через I_1^* и I_2^* минимальные значения функционалов $I_1(k)$ и $I_2(k)$, которые получаются при минимизации только одного из функционалов. Тогда при фиксированном векторе β минимально возможное значение функционала (11) составляет

$$I(\beta) = \beta_1^2 I_1^* + \beta_2^2 I_2^*. \quad (13)$$

Отыщем минимум функционала (13) при ограничении (12). Для решения этой задачи на условный экстремум составим функцию Лагранжа

$$F(\beta) = \beta_1^2 I_1^* + \beta_2^2 I_2^* + \lambda \cdot (1 - \beta_1 - \beta_2) \quad (14)$$

и запишем условия минимума функции (14)

$$\frac{\partial F(\beta)}{\partial \beta_1} = 2\beta_1 I_1^* - \lambda = 0; \quad (15)$$

$$\frac{\partial F(\beta)}{\partial \beta_2} = 2\beta_2 I_2^* - \lambda = 0. \quad (16)$$

Из уравнений (15) и (16) получим

$$\beta_1 = \frac{\lambda}{2I_1^*}; \quad \beta_2 = \frac{\lambda}{2I_2^*}. \quad (17)$$

Вектор β с компонентами (17) доставляет минимум функции (14), поскольку гессиан

$$\frac{\partial^2 F(\beta)}{\partial \beta \partial \beta} = 2 \begin{bmatrix} I_1^* & 0 \\ 0 & I_2^* \end{bmatrix}$$

является положительно определенной матрицей.

Подставим соотношения (17) в формулу (12) и получим выражение для множителя Лагранжа

$$\lambda = \frac{2}{\frac{1}{I_1^*} + \frac{1}{I_2^*}} = \frac{2I_1^* I_2^*}{I_1^* + I_2^*}. \quad (18)$$

Подставляя (18) в (17), получаем

$$\beta_1 = \frac{I_2^*}{I_1^* + I_2^*}; \quad \beta_2 = \frac{I_1^*}{I_1^* + I_2^*}. \quad (19)$$

Решая задачу поиска минимума функционалов $I_1(k)$ и $I_2(k)$ с помощью метода факторного эксперимента [4], получаем

$$I_1^* = 9,46; \quad I_2^* = 32,24.$$

Подставим полученные минимальные значения функционалов в формула (19). В результате получим

$$\beta_1 = 0,78; \quad \beta_2 = 0,22.$$

Положим $\psi_{\max} = 0,5$ рад; $y_{\max} = 35$ м. Тогда $\bar{\beta}_1 = 1,56$ рад⁻¹; $\bar{\beta}_2 = 0,0063$ м⁻¹.

В результате функционал (8) принимает вид

$$I(k) = \int_0^T [2,44\psi^2(t) + 0,00004y^2(t)] dt. \quad (20)$$

Для отыскания минимума функционала (20) построим область допустимых значений в плоскости параметров k_ψ, k_y , воспользовавшись результатами работы [5]. Эта область приведена на рис.2.

Для отыскания минимума функционала (20) на решениях замкнутой системы управления движением гусеничной машины воспользуемся методом факторного эксперимента. В результате получим оптимальные значения параметров алгоритма (1):

$k_\psi^* = -2500$ рад⁻¹; $k_y^* = 10$ м⁻¹. Минимальное значение функционала (20) при этом состав-

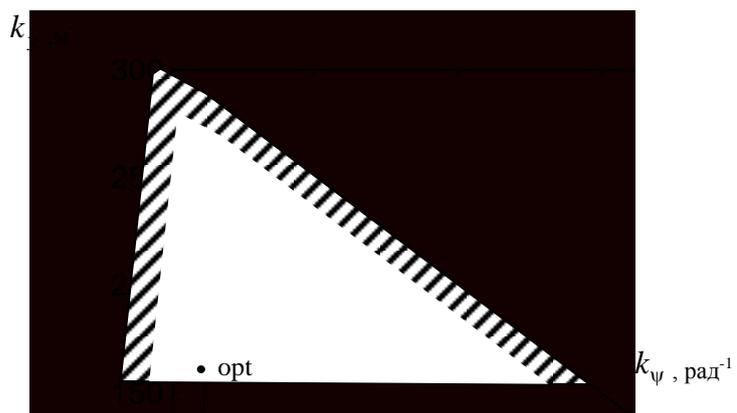


Рисунок 2 – Область допустимых значений параметров k_ψ, k_y

ляет $I(k^*)=9,1879$. Для сравнения укажем значения функционала (20) в некоторых точках области допустимых значений, приведенные в таблице.

Переходные процессы в замкнутой системе приведены на рис. 3.

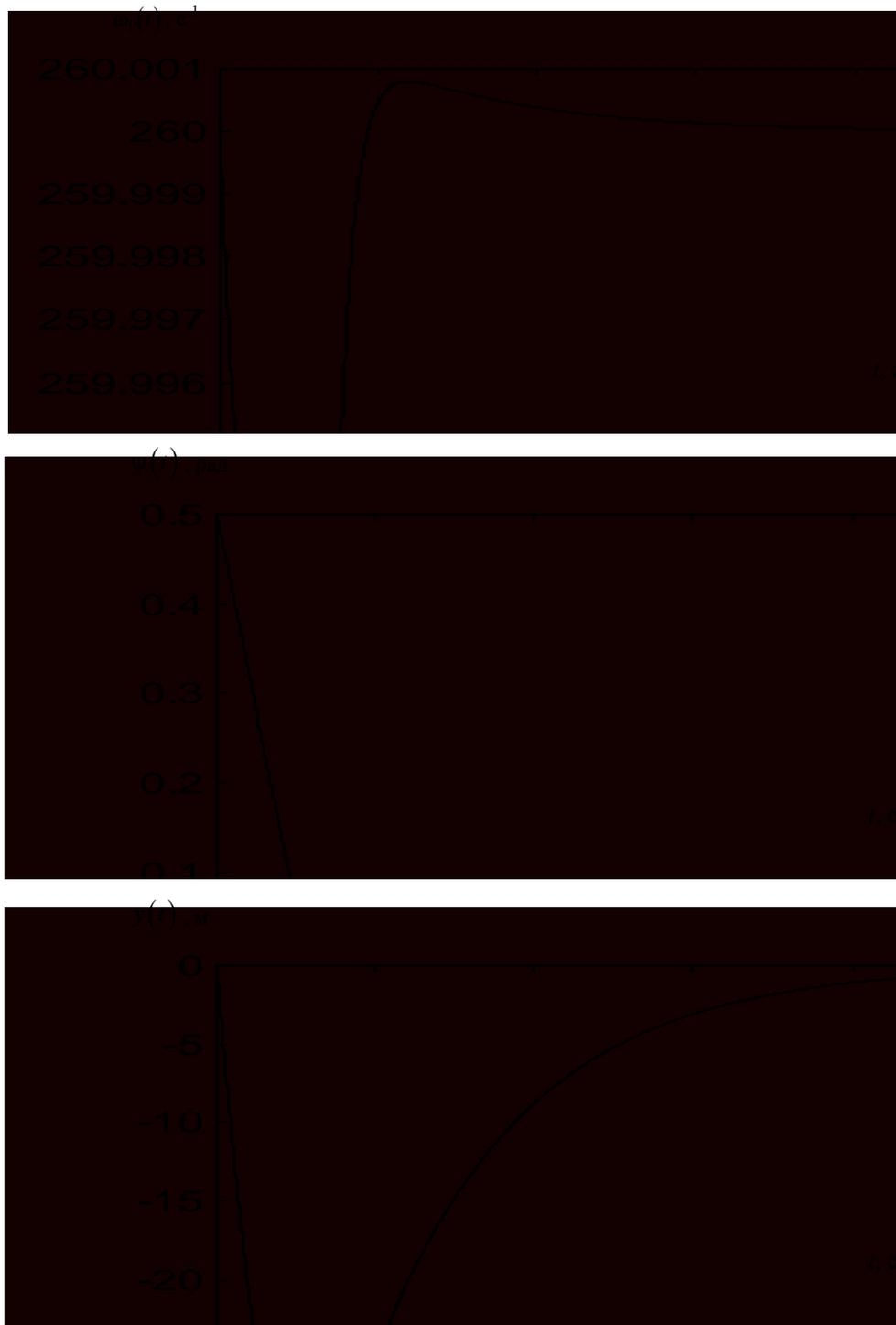


Рисунок 3 – Переходные процессы в замкнутой системе управления

Таблица – Значения функционала (20) в точках области допустимых значений

k_{ψ}	k_y	$I(k)$
-2500	50	11,5222
-2700	70	12,8120
-2300	30	10,3170
-2500	10	9,1879
-2600	20	9,5866
-2550	5	9,8189
-2500	15	9,3489

Литература

1. Александров Е.Е., Александрова Т.Е., Галушка Ю.В. и др. Имитационная модель криволинейного движения гусеничной машины со ступенчатой трансмиссией // Інтегровані технології та енергозбереження. – №2.– 2004.
2. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем. М.: Наука, 1992. – 280 с.
3. Александрова И.Е., Александрова Т.Е. О выборе весовых коэффициентов оптимизируемого функционала в теории аналитического конструирования оптимальных регуляторов // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2001. – №1. – С. 135-137.
4. Александрова И.Е. Имитационное моделирование. – Харьков: ХГПУ, 2000. – 92 с.
5. Александрова Т.Е., Костяник И.В. Построение областей устойчивости сложных систем в плоскости варьируемых параметров // Вісник НТУ "ХПІ". Колісні та гусеничні машини спеціального призначення. – Харків: НТУ "ХПІ", – 2003. –Вип.1

УДК 629.11-52

Александров Є.Є., Александрова Т.Є., Галушка Ю.В., Костяник І.В., Оліярник Б.О., Слюсаренко Ю.О.

ВИБІР ПАРАМЕТРІВ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ РУХОМ ГУСЕНИЧНОЇ МАШИНИ ІЗ СТУПІНЧАСТОЮ ТРАНСМІСІЄЮ

Розглядається задача вибору констант алгоритму керування рухом гусеничної машини із ступінчастою трансмісією, а також алгоритми обчислення куту відхилення машини від заданого напрямку, розроблений із застосуванням теорії бесплатформених інерціальних навігаційних систем. Вимоги до алгоритму керування формалізовані і подані у вигляді вимоги мінімуму інтегрального квадратичного функціоналу, а також запропонована методика вибору вагових коефіцієнтів адитивного функціоналу. За допомогою методу факторного експерименту вирішена задача параметричного синтезу алгоритму керування.