

Бузников С.Е., Тамбулатов П.В.

Моделирование системы динамической стабилизации скорости автомобиля с расширенным вектором управляющих воздействий

Одним из наиболее перспективных направлений решения проблемы безопасности движения автомобильного транспорта является создание систем активной безопасности и оснащение ими действующего парка автомобилей.

Современные автомобили ведущих зарубежных производителей оснащаются антиблокировочными (ABS) и противобуксовочными (ASR) системами, системами стабилизации скорости и дистанции, а также системами стабилизации курсовой устойчивости (ESP, VCS).

В общем случае задача предотвращения типовых столкновений сводится к задаче динамической стабилизации вектора состояния управляемого объекта в условиях неопределенности некоторых границ вектора состояния [1]. К числу недостатков зарубежных систем [2] круиз-контроля относятся:

- значительные ошибки стабилизации скорости на спусках и подъемах;
- возникновение колебательных режимов при движении на пониженных передачах;
- пробуксовки и блокировки колес на скользких покрытиях;
- отсутствие ограничений скоростей заноса задних колес, сноса передних колес, опрокидывания автомобиля на вираже;
- отсутствие ограничений скоростей, обусловленных состоянием шин;

Задача оптимального управления на временном интервале $(t_2 \div t_1)$ формулируется, как минимизация квадратичного функционала вида:

$$Q_2(t_2) = C_0 \int_{t_1}^{t_2} |E(\tau)|^2 d\tau + \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^4 C_{1i} [S_i(\tau) - S^*]^2 d\tau + \\ + \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^r C_{2i} [V_m(\tau) - V_{грi}(\tau)]^2 d\tau + \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^3 C_{3i} U_i^2(\tau) d\tau \Rightarrow \min$$

при $U_1 \in U_{1доп}$, $U_2 \in U_{2доп}$, $U_3 \in U_{3доп}$, где U_1, U_2, U_3 - управляющие воздействия на КПП, акселератор и тормоза.

Уравнение продольного движения объекта приводится к виду:

$$\dot{V}_m = a_{dT}(U) - k_x m_0^{-1} V_m^2 - k_{TP} g - \tilde{\alpha}_T g;$$

где $a_{dT}(U) = [a_d(U_1, U_2) - a_T(U_3)]$ - тягово-тормозное ускорение,

$$\tilde{\alpha}_T = \alpha_T + g^{-1} [V_T(2V_m + V_T)] k_x m_0^{-1} + g^{-1} a_{доп},$$

Уравнения тягового и тормозного ускорений $a_d(U_1, U_2)$ и $a_T(U_3)$:

$$a_d(U_1, U_2) = \begin{cases} A_{10}(U_1) \cdot U_2, & \text{если } V_m \leq V_m^*(U_1) \cdot U_2 \text{ и } U_1 \neq 0; \\ [A_{11} V_m^{-1} U_2^2 - A_{12} U_2], & \text{если } V_m > V_m^*(U_1) \cdot U_2 \text{ и } U_1 \neq 0; \\ 0, & \text{если } U_1 = 0; \end{cases}$$

$$a_T(U_3) = m_0^{-1} \sum_{i=1}^4 k_{3i} \cdot U_3.$$

Тягово-тормозное ускорение, обеспечивающее минимизацию ошибки $|E|$ или выполнение неравенств $V_m \leq V_{грi}$, $1 \leq i \leq r$, за один шаг следует из уравнения продольного движения центра масс:

$$a_{dT}(k) = E^*(k) \Delta T^{-1} + k_x m_0^{-1} V_m^2(k) + k_{TP} g + \hat{\alpha}_T(k) g, \text{ где}$$

$$E^*(k) = \begin{cases} [V_{mz} - V_m(k)], & \text{если } V_{mz} \leq V_{гр3}; \\ [V_{гр3} - V_m(k)], & \text{если } V_{mz} > V_{гр3}; \end{cases}$$

$$\hat{\alpha}_T(k) = g^{-1} [\alpha_d(k-1) - \alpha_m(k-1) - k_x m_0^{-1} V_m^2(k-1)] - k_{TP};$$

$$V_{гр3} - \text{экстраполированное значение } V_{гр} = \min\{V_{гр1}, V_{гр2}, V_{гр3}, \dots, V_{грr}\};$$

Результирующее тягово-тормозное ускорение $a_{dT}^*(U)$ ограничено сверху и снизу за счет сил трения скольжения при $|S_i| \leq S^*$ уровнями $a_S^B(S^*)$ и $a_S^H(S^*)$, идентифицируемыми на конкретных поверхностях.

Управляющие воздействия $U_1(k)$, $U_2(k)$, $U_3(k)$ определяются в виде:

$$U_1(k) = \begin{cases} \max[U_1 \in U_{1доп}], & \text{если } U_{1доп} \text{ не пусто;} \\ U_1(k-1), & \text{если } U_{1доп} \text{ пусто.} \end{cases}$$

$U_1 \in U_{1доп}$, если выполняется система неравенств:

$$\begin{cases} a_{min}^*(U_1) \leq a_{dT}^*(k) \leq A_{10}(U_1); \\ V_{min}(U_1) \leq V_m(k) \leq V_m(U_1), \text{ где} \end{cases}$$

$$a_{\min}^*(U_1) = -0.25A_{12}^2 A_{11}^{-1}(U_1)V_m; \quad V_{\min}(U_1) = 2A_{11}(U_1)A_{12}^{-1}U_{2\min};$$

$$U_2(k) = \begin{cases} a_{dT}^*(k)A_{10}^{-1}(U_1), & \text{если } a_{dT}^*(k) \geq a_{гр}; \\ 0.5A_{12}A_{10}^{-1}V_m + \sqrt{D}, & \text{если } a_{dT}^*(k) < a_{гр} \text{ и } D \geq 0; \\ U_{2\min}, & \text{если } a_{dT}^*(k) < a_{гр}, D < 0, V_m < V_{\min}(U_1), \end{cases}$$

$$\text{где } a_{гр} = A_{10}(U_1)V_m[V_m^*(U_1)]^{-1}.$$

$$U_3(k) = \begin{cases} a_T^* m_0 \left[\sum_{i=1}^4 k_{3i} \right]^{-1}, & \text{если } a_S^H \leq a_{dT}^*(k) < a_d(U_1, U_2); \\ 0, & \text{если } a_{dT}^* \geq a_{dT}(U_1, U_2) \end{cases}$$

Границы области стабилизации скоростей V_{mz} для каждой из прямых передач U_1 при условии $a_S^H(S^*) \leq a_d(U_1, U_2) \leq a_S^B(S^*)$ определяется из уравнения продольного движения центра масс и границ устойчивого функционирования двигателя:

$$\begin{cases} \alpha_{гр}^B = [A_{10}(U_1) - k_x m_0^{-1} V_m^2] g^{-1} - k_{тр}; \\ \alpha_{гр}^H = [A_{11} V_m^{-1} U_{2\min}^2 - A_{12}(U_1) U_{2\min} - k_x m_0^{-1} V_m^2] g^{-1} - k_{тр}; \\ V_{mгр}^B = V_m^*(U_1); \\ V_{mгр}^H = V_m^* \cdot \gamma_E, \quad \text{где } \gamma_E = N_{дв}^H / N_{дв}^* \end{cases}$$

На рис.1 приведены области стабилизируемых скоростей для автомобиля Мерседес-Бенц E240T массой $m_0 = 1600$ кг на прямых передачах $U_1 = 2, 3, 4, 5$. Анализ приведенных областей стабилизации позволяет сделать вывод о том, что при движении на относительно малых скоростях порядка 15 – 30 м/с на передаче $U_1 = 5$ преодолеваются подъемы с $\alpha_T > 0.08$ и на $U_1 = 4$, соответственно, с $\alpha_T > 0.12$. На спусках при $\alpha_T = -0.07$ скорость стабилизируется при $U_1 = 4$ на уровне $V_m \approx 22$ м/с, а при $\alpha_T = -0.12$ на уровне $V_m \approx 18$ м/с лишь на передаче $U_1 = 3$.

Отмеченные режимы стабилизации скоростей подтверждаются экспериментальными результатами, полученными на испытуемом автомобиле, оснащенном автоматической трансмиссией и штатной системой круиз-контроля с ПИ-регулятором.

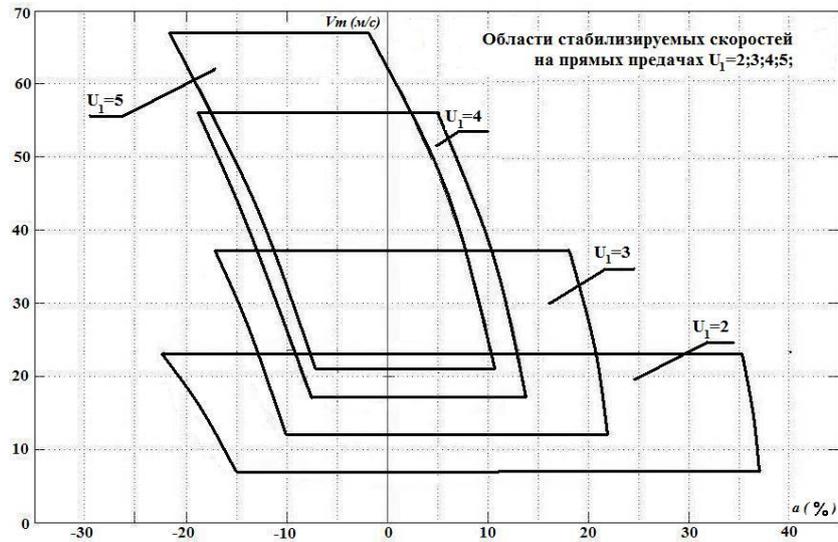


Рис.1 Области стабилизируемых скоростей

Результаты проведенных исследований позволяют сформулировать следующие выводы:

- применение алгоритма одношагового регулятора с расширенным вектором управляющих воздействий позволяет устранить недостатки, свойственные системам стабилизации скорости с ПИ-регулятором;
- введение ограничений на тяговые и тормозные ускорения позволяет стабилизировать скольжения колес без ABS и ASR;
- введение ограничений по скорости заноса, сноса, опрокидывания и состояния шин позволяет стабилизировать курсовую устойчивость без использования средств ESP и VCS.

Литература:

1. Бузников С.Е. Принципы построения рекордных автомобильных систем активной безопасности. Труды XIV Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» - М.: Изд-во РГГУ, 2006. – С. 506 –507.
2. Бишоп Р., Дорф Р. Современные системы управления. Пер.с англ. Копылова Б.И. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002 – 832 с.

