

УДК 629.3.017.5: 004.451.25

АДАПТИВНОЕ ТОРМОЗНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОЛЕСНЫХ МАШИН

А.Н. Туренко, д.т.н., профессор, С.Н. Шуклинов, к.т.н., доцент / Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

ВВЕДЕНИЕ

Процесс управления торможением колесных машин может протекать в двух режимах:

- режим экстремального управления тормозами колесных машин реализуется при качении колеса на грани юза. Эффективность торможения при этом определяется коэффициентом сцепления колеса с опорной поверхностью и качеством рабочего процесса антиблокировочной системы, обеспечивающей адаптацию управляющего воздействия условиям качения колеса;
- режим до экстремального управления тормозами колесных машин реализуется при качении колеса при условии, что тормозная сила на колесе меньше силы сцепления колеса с опорной поверхностью. Эффективность торможения при этом определяется управляющим воздействием водителя, эффективностью тормозной системы и качеством рабочего процесса регулятора тормозных сил.

Вопросы адаптивного управления в режиме экстремального управления колесными машинами освещены достаточно глубоко [1, 2, 3] и др. Режим до экстремального управления тормозами колесных машин исследовался, в основном, в плане распределения тормозных усилий [4]. Вопросы адаптации тормозного привода, направленные на стабилизацию эргономических параметров управления тормозами, исследованы не достаточно [4].

Режим до экстремального управления тормозами колесных машин характеризуется нестабильностью эргономических параметров управления. Указанная нестабильность обуславливается многими факторами:

- нестабильностью параметров и характеристик при производстве колес, аппаратов тормозного привода, тормозных механизмов;
- изменением при эксплуатации массы колесной машины, коэффициентов эффективности тормоз-

ных механизмов, эффективности тормозного привода (отказ одного из контуров, отказ усилителя, нестабильность характеристики усилителя).

Вследствие этого водителю необходимо адаптироваться к меняющимся характеристикам тормозного управления. Причем некоторые возмущающие параметры водитель может заранее оценить с определенной достоверностью (например, изменение массы машины после загрузки). Влияние других параметров или их сочетание водитель оценивает по замедлению машины только во время процесса торможения. В этом случае у водителя остается очень мало времени на адаптацию к изменившимся характеристикам тормозного управления.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С целью повышения качества и эффективности до экстремального режима торможения требуется разработать автоматическую систему управления, которая позволит переложить функции адаптации с человека (водителя) на тормозное управление колесной машины. Заметим, что в этом случае тормозное управление выполняет функции регулятора в нестационарной системе управления объектом — колесной машиной, а водитель выполняет функции звена, определяющего параметры состояния колесной машины.

ЗАКОН ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Если к ведущим колесам машины не подводится крутящий момент от трансмиссии, ее движение начинает замедляться за счет сил сопротивления дороги и силы сопротивления воздуха. Процесс торможения колесной машины начинается после соз-

дания на колесах искусственного сопротивления их вращению.

В этом случае на колесах появляется тормозная сила, которую можно характеризовать как управляющее воздействие для объекта управления – колесной машины. Процесс торможения колесной машины в общем случае можно определить как нестационарный процесс. Движение колесной машины в процессе торможения характеризуется уравнением силового баланса [5]:

$$P_j - P_\sigma - P_\psi = P_T \quad (1)$$

где P_j – сила инерции колесной машины, $P_j = m_\alpha \cdot \delta_{\text{сп}} \cdot (dV_\alpha / dt)$;

P_σ – сила сопротивления движению колесной машины со стороны воздуха, $P_\sigma = k_\sigma \cdot F_\alpha \cdot V_\alpha^2$;

P_ψ – сила дорожного сопротивления движению колесной машины, $P_\psi = m_\alpha \cdot g \cdot \psi$;

P_T – тормозная сила, формируемая в пятне контакта тормозных колес, $P_T = pK_{\text{ТК}}$.

С учетом выписанных обозначений, уравнение (1) примет вид:

$$m_\alpha \cdot \delta_{\text{сп}} \cdot (dV_\alpha / dt) - k_\sigma \cdot F_\alpha \cdot V_\alpha^2 - m_\alpha \cdot g \cdot \psi = pK_{\text{ТК}}, \quad (2)$$

где m_α – масса колесной машины;

$\delta_{\text{сп}}$ – коэффициент учета вращающихся масс колесной машины;

V_α – скорость движения колесной машины;

t – независимая переменная; $t \in [t_0, t_m]$ (t_0 – время начала процесса, t_m – время торможения колесной машины);

k_σ, F_α – коэффициент обтекаемости и лобовая площадь машины;

g – ускорение свободного падения;

ψ – коэффициент сопротивления дороги;

$p(t)$ – управляющее воздействие тормозного привода, подведенное к тормозным колесам машины;

$K_{\text{ТК}}$ – коэффициент эффективности тормозных колес машины.

Для уравнения (2) следует записать начальные условия в виде:

$$V_\alpha(t_0) = V_0$$

где V_0 – скорость машины в начальный момент формирования тормозной силы на колесах в начальный момент времени t_0 .

Разрешим уравнение (2) относительно старшей производной и, введя обозначения $a = (k_\sigma F_\alpha) / (m_\alpha \delta_{\text{сп}})$, $c = (g\psi) / \delta_{\text{сп}}$, $b = K_{\text{ТК}} / (m_\alpha \delta_{\text{сп}})$, $u(t) = p(t)$, $x(t_0) = V_0$, получим:

$$x(t) = ax^2(t) + c + bu(t); x(t_0) = V_0 \quad (3)$$

где $x(t) = (dV_\alpha) / (dt)$ – замедление колесной машины в момент времени t ; $t \in [t_0, t_m]$.

Процесс торможения колесной машины определяется ее замедлением $x(t)$, а также величиной управляющего воздействия $u(t)$ и темпом его форми-

рования. Нестационарный процесс управления замедлением колесной машины описывается системой уравнений состояния, представленной в нормальной форме Коши [6]. В качестве параметра оценки состояния колесной машины примем ее замедление $x(t)$. Система уравнений состояния объекта состоит из уравнения, определяющего параметр оценки состояния (3) и уравнения, определяющего изменение этого параметра во времени. Уравнение изменения замедления колесной машины получим дифференцированием (3), и после введения обозначений $\dot{x} = x_1$ и $u_1(t) = (du(t)) / (dt)$ можно систему уравнений состояния объекта представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{x} = x_1 \\ \dot{x}_1 = a_1 x_1 + bu_1, \end{cases} \quad (4)$$

где \dot{x}_1 – скорость изменения замедления колесной машины;

$a_1 = 2ax$ – коэффициент, характеризующий нестационарность процесса;

$u_1(t)$ – скорость изменения управляющего воздействия $u(t)$ на входе в тормозящие колеса.

Тормозное управление, не обладающее свойствами адаптации, можно представить в виде структурной схемы, представленной на рис. 1. Водитель в соответствии с задачей управления A создает задающее воздействие (усилие на педали) P_n . Устройство управления (УУ) (тормозной привод) формирует $u(t)$ – управляющее воздействие, передаваемое на исполнительные устройства (тормозящие колеса) – объекта управления (ОУ). При этом объект управления приобретает замедление $x_1(t)$. Если на объект управления действуют возмущающие параметры $w(t)$, то водителю приходится адаптироваться к изменившимся условиям и корректировать усилие на педали для сохранения желаемого значения $x_1(t)$.

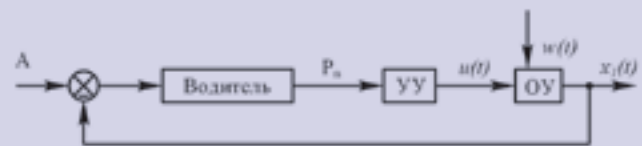


Рисунок 1. Схема разомкнутой системы управления

Адаптивные системы управления имеют различные схемы построения [6, 7, 8]. Для адаптивного тормозного управления колесной машины в режиме до экстремального управления, предлагается использовать автоматическую систему с эталонной моделью [6] (см. рис. 2). Эталонная модель M описывает желаемые свойства реальной системы. Она строится в форме стационарного устройства на основе предварительных расчетов эффективности торможения. При этом параметры торможения модели соответствуют установившемуся торможению ко-

лесной машины для снаряженного состояния, а коэффициенты тормозящих колес $K_{ТКМ}$ остаются постоянными. Реализуемое замедление $x_1(t)$ колесной машины сравнивается с желаемым замедлением $z_1(t)$, и оценивается ошибка $\varepsilon(t)$ управления. В соответствии с ошибкой управления цепи самонастройки (ЦС) изменяют передаточную функцию устройства управления (УУ) для коррекции управляющего воздействия $u(t)$.

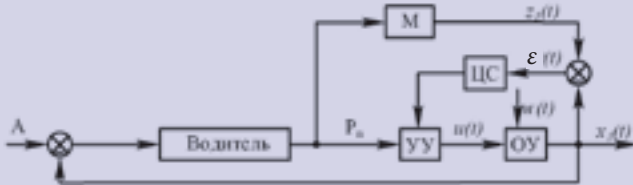


Рисунок 2. Структурная схема адаптивной системы тормозного управления с эталонной моделью

Система уравнений (4) описывает динамику изменения замедления колесной машины в зависимости от темпа формирования управляющего воздействия. При этом, поскольку (4) описывает состояние с учетом различного рода возмущений, то ее можно назвать системой уравнений реального состояния системы.

Аналогичный с (4) вид будет иметь система уравнений состояния эталонной модели:

$$\begin{cases} \dot{z} = z_1 \\ \dot{z}_1 = a_m z_1 + b_m u_{1m} \end{cases} \quad (5)$$

где z , z_1 , \dot{z}_1 – скорость, замедление и скорость изменения замедления эталонной модели колесной машины;

$a_m = 2az$ – коэффициент, характеризующий нестационарность процесса при эталонном движении;

$b_m = K_{ТКМ} / m_m$ – коэффициент (m_m – масса эталонной модели колесной машины, соответствует массе колесной машины в снаряженном состоянии);

u_{1m} – скорость изменения управляющего воздействия на входе тормозного привода.

Необходимо обеспечить такое управление $u(t)$, чтобы с течением времени состояние системы приближалось к эталонному, т.е.:

$$\lim_{t \rightarrow t_2} \varepsilon(t) = \lim_{t \rightarrow t_2} [z_1(t) - x_1(t)] = 0 \quad (6)$$

где $\varepsilon(t)$ – ошибка управления замедлением колесной машины, $t \in [t_0, t_2]$;

t_2 – нормативное время срабатывания тормозной системы.

Для определения закона формирования управляющего воздействия вычтем из системы уравнений (5) соответствующие уравнения системы (4):

$$\begin{cases} \dot{z}(t) - \dot{x}(t) = z_1(t) - x_1(t) \\ \dot{z}_1(t) - \dot{x}_1(t) - a_m z_1(t) = -a_1 x_1(t) + b_m u_{1m}(t) - bu_1(t) \end{cases} \quad (7)$$

Тогда после добавления $a_m x_1(t)$ к обеим частям второго уравнения системы (7), введения обозначений $\varepsilon(t) = z_1(t) - x_1(t)$, $\dot{\varepsilon}(t) = \dot{z}_1(t) - \dot{x}_1(t)$ и преобразований получим:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}(t) = z_1(t) - x_1(t) \\ \dot{\varepsilon}(t) - a_m \varepsilon(t) = (a_m - a_1) x_1(t) + b_m u_{1m}(t) - bu_1(t) \end{cases} \quad (8)$$

Анализ системы (8) позволяет сделать вывод, что при выполнении следующих условий

$$z_1(t) = x_1(t) \quad (9)$$

$$bu_1(t) = (a_m - a_1) x_1(t) + b_m u_{1m}(t) \quad (10)$$

получим $\varepsilon(t) = 0$ и $\dot{\varepsilon}(t) - a_m \varepsilon(t) = 0$. Таким образом, если система (4) описывает устойчивое состояние, то гарантируется выполнения требования (6). Разрешив уравнение (10) относительно $u_1(t)$, получим закон формирования управляющего воздействия, обеспечивающий стабильность параметров тормозного управления колесной машины при торможении в режиме до экстремального торможения:

$$u_1(t) = ((a_m - a_1) / b) x_1(t) + (b_m / b) u_{1m} \quad (11)$$

Если коэффициенты a_1 и b , характеризующие реальное состояние системы, отличаются от соответствующих коэффициентов эталонной модели a_m и b_m , то необходимо изменить параметры регулятора так, чтобы выполнялось равенство (11).

На кафедре автомобилей ХНАДУ было выполнено имитационное моделирование динамики торможения с адаптивным управлением на примере автобуса МАЗ-256. Модель содержит блоки: динамики движения автобуса, электропневмопривода и адаптивного регулятора. Формирование закона в блоке адаптивного регулятора происходит на основе сравнения реализуемого замедления и желаемого. Блок электропневмопривода управляет работой клапанов и обрабатывает наполнение и опоражнивание тормозных камер. Моделировалось служебное торможение с одинаковым значением и темпом приложения усилия на педали для различных состояний автобуса.

Оценка динамики торможения выполнялась по тормозным диаграммам (см. рис. 3).

Анализ результатов исследования динамики торможения автобуса показывает (см. таблицу ниже).

- хорошую сходимость значений замедления и тормозного пути для различных состояний автобуса при адаптивном управлении;

- существенное изменение динамики торможения при постоянных параметрах тормозного управления.

Таблица. Результаты имитационного моделирования динамики торможения колесной машины

Параметры торможения автобуса	Неадаптивное тормозное управление				Адаптивное тормозное управление			
	$m_{\alpha \min}$		$m_{\alpha \max}$		$m_{\alpha \min}$		$m_{\alpha \max}$	
	Рабочая ТС*	Аварийная ТС	Рабочая ТС	Аварийная ТС	Рабочая ТС	Аварийная ТС	Рабочая ТС	Аварийная ТС
$dV_{\alpha} / dt, \text{ м/с}^2$	2,757	1,495	3,503	1,841	3,647	3,446	3,513	3,533
$S_m, \text{ м}$	16,62	26,87	14,02	22,64	13,7	14,29	14,01	13,97
$t_m, \text{ с}$	3,5	6,00	2,87	4,97	2,79	2,92	2,87	2,86
$p(t_m), \text{ МПа}$	0,3315	0,3341	0,3325	0,3316	0,3941	0,6086	0,3331	0,517

Примечания: $m_{\alpha \min}$, $m_{\alpha \max}$ — состояние загрузки автобуса, соответственно минимальная и максимальная масса; S_m — тормозной путь автобуса; * ТС — тормозная система автобуса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ревин А.А. Повышение эффективности, устойчивости и управляемости при торможении автотранспортных средств. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Волгоград, 1983.
2. Нефедьев Я.Н. Теория, разработка и исследование унифицированной системы автоматического управления антиблокировочным торможением грузовых транспортных средств. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 1987. 307 с.
3. Ахметшин А.М. Адаптивная антиблокировочная тормозная система колесных машин. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2003.
4. Богомолов В.А. Создание и исследование систем управления торможением автотранспортных средств. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Харьков, 2001. 537 с.
5. Литвинов А.С., Фаробин Я.Е. Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств: Учебник для вузов по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство». — М.: Машиностроение, 1989. — 240 с., ил.
6. Чураков Ф.П. Оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 256 с.
7. Адаптивные системы автоматического управления: Учеб. пособие / В.Н. Антонов, А.М. Пришвин, В.А. Терехов, А.Э. Янчевский / Под ред. проф. В.Б. Яковлева. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. 204 с.
8. Афанасьев В.Н. Динамические системы управления с неполной информацией: алгоритмическое конструирование. — М.: КомКнига, 2007. — 216 с.

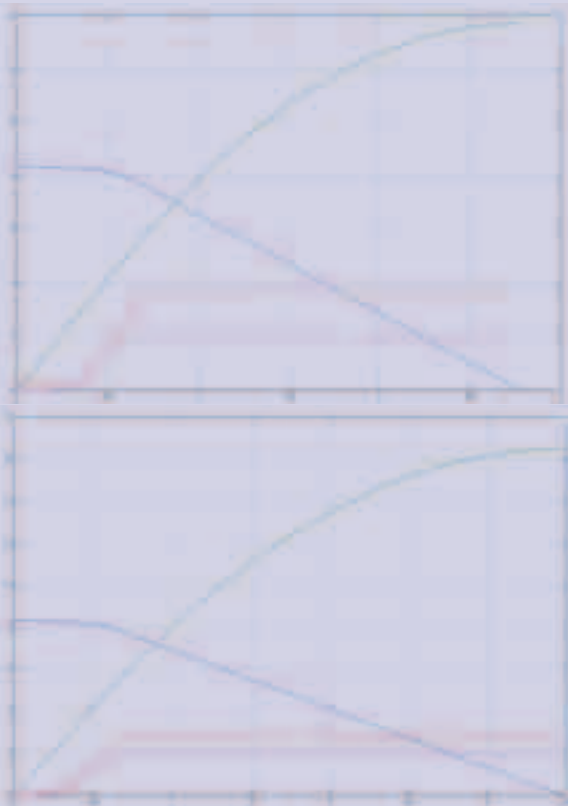


Рисунок 3. Тормозные диаграммы:
а) — с адаптивным управлением; б) — с неадаптивным управлением

ВЫВОД

Автоматическое формирование управляющего воздействия в соответствии с предложенным законом управления (11) позволит освободить водителя от функции адаптации в режиме до экстремального торможения колесной машины.

На следующем этапе исследований нестационарной системы тормозного управления необходимо произвести построение алгоритма оптимизации и выбор параметров регулятора, при которых будет выполняться определенный закон формирования управляющего воздействия (11) объекта управления.