

УДК 629.113

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТОРМОЖЕНИЯ РЕКОРДНО-ГОНОЧНОГО АВТОМОБИЛЯ С КОМБИНИРОВАННОЙ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМОЙ

С.Н. Шуклинов, проф., д.т.н., М.Ю. Залогин, ассист., М.Р. Лысенко, студ.,
Н.В. Самойлов, студент, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Описана имитационная модель процесса торможения рекордно-гоночного автомобиля с комбинированной тормозной системой. Управление тормозным парашютом и фрикционными тормозными механизмами с электрогидравлическим приводом выполняется адаптивной системой управления. Эффективность действия фрикционных тормозных механизмов изменяется в зависимости от эффективности тормозного парашюта.

Ключевые слова: автомобиль, система, адаптивное тормозное управление, эффективность, электрогидравлический тормозной привод, тормозной парашют.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГАЛЬМУВАННЯ РЕКОРДНО-ГОНОЧНОГО АВТОМОБІЛЯ З КОМБІНОВАНОЮ ГАЛЬМІВНОЮ СИСТЕМОЮ

С.М. Шуклінов, проф., д.т.н., М.Ю. Залогин, асист., М.Р. Лысенко, студ.,
М.В. Самойлов, студент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Описано імітаційну модель процесу гальмування рекордно-гоночного автомобіля з комбінованою гальмівною системою. Керування гальмівним парашютом та фрикційними гальмівними механізмами з електрогидравлічним приводом виконується адаптивною системою керування. Ефективність дії фрикційних гальмівних механізмів змінюється залежно від ефективності гальмівного парашюта.

Ключові слова: автомобіль, система, адаптивне гальмівне керування, ефективність, електрогидравлічний гальмівний привід, гальмівний парашют.

BRAKING PROCESS MODELING RECORD-RACING CAR WITH A COMBINED BRAKE SYSTEM

S. Shuklinov, Prof., D. Sc. (Eng.), M. Zalogin, T. Asst.,
M. Lysenko, St., N. Samoylov, St.,
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. A simulation model of the brake process of the record-race car with a combined brake system is described in the given article. Control of the brake parachute as well as friction brake mechanisms with electrohydraulic drive is performed by an adaptive control system. The effectiveness of the friction brake mechanisms operation varies, depending on the efficiency of the brake parachute.

Key words: car, system, adaptive brake control, efficiency, electro-hydraulic brake drive, brake parachute.

Введение

Максимальная скорость автомобиля, достигнутая на трассе, зависит не только от баланса

мощности, подводимой к ведущим колесам, мощности сил сопротивления движению и сил сцепления ведущих колес с опорной поверхностью, но и от тормозных свойств. Пи-

лот рекордно-гоночного автомобиля не всегда имеет возможность на заданной трассе достигнуть технически возможную максимальную скорость автомобиля, поскольку требуется еще значительное расстояние на остановку автомобиля. Данная работа посвящена моделированию процесса торможения рекордно-гоночного автомобиля с комбинированной тормозной системой и теоретической оценке тормозных свойств.

Анализ публикаций

В работе [1] автор раскрывает особенности конструкции тормозных устройств гоночных автомобилей. В рекордно-гоночных автомобилях с реактивной тягой для повышения эффективности торможения применяется реверс тягового двигателя и тормозной парашют. На автомобилях с приводом на ведущие колеса также применяется пневматический тормоз – различного рода щипки или тормозной парашют.

Следует заметить, что тормозную систему рекордно-гоночного автомобиля целесообразно выполнять в виде комбинированной тормозной системы, включающей как фрикционные тормоза, так и пневматические (тормозной парашют). Общеизвестно, что эффективность торможения с максимальным использованием сцепных свойств колес с опорной поверхностью при увеличении скорости снижается. Поэтому привод фрикционных тормозов следует выполнить электрогидравлическим с адаптивной системой управления их эффективностью.

Предложенный авторами [2] закон формирования управляющего воздействия для адаптивного тормозного управления колесной машины построен на сравнении оценки возмущенного состояния колесной машины с состоянием эталонной модели. В качестве параметра для оценки состояния системы адаптивного тормозного управления предложено использовать замедление автомобиля [3]. В работах [4, 5] описано моделирование процесса торможения автомобилей с адаптивным частично автоматизированным гидравлическим тормозным приводом и адаптивным электропневматическим приводом тормозов.

Из анализа публикаций следует, что исследования адаптивного управления торможением актуальны, так как направлены на фор-

мирование заданных характеристик тормозного управления. При этом следует отметить, что выполненные исследования не отражают особенности моделирования процесса торможения автомобиля с комбинированной тормозной системой, состоящей из электрогидравлического тормозного привода тормозных механизмов колес и тормозного парашюта.

Цель и постановка задачи

Целью работы является теоретическая оценка тормозной эффективности рекордно-гоночного автомобиля с комбинированной тормозной системой на имитационной модели процесса торможения.

Имитационная модель должна отражать решение уравнения движения автомобиля при торможении, рабочие процессы комбинированной тормозной системы и алгоритм управления торможением. Комбинированная тормозная система должна состоять из электрогидравлического тормозного привода тормозных механизмов колес и тормозного парашюта. Управление процессом торможения должно выполняться автоматизированной системой с адаптивным регулятором.

Моделирование процесса торможения

На кафедре автомобилей ХНАДУ разработана модель процесса торможения автомобиля. Уравнение движения автомобиля при торможении записывается в виде

$$m_a \left(-\frac{dV_a}{dt} \right) + P_n + P_{t1} + P_{t2} + P_f + P_w = 0, \quad (1)$$

где m_a – масса автомобиля; V_a – скорость движения автомобиля; t – независимая переменная; $t \in [t_0, t_T]$ (t_0 – время начала процесса, t_T – время торможения автомобиля); $P_n, P_{t1}, P_{t2}, P_f, P_w$ – тормозные силы парашюта, передней и задней осей, силы сопротивления качению колес и сопротивления воздуха.

Тормозная сила парашюта и сила сопротивления воздуха соответственно определяются по формулам

$$P_n = \kappa_{вп} \cdot F_n \cdot V_a^2; \quad (2)$$

$$P_w = \kappa_b \cdot F_a \cdot V_a^2, \quad (3)$$

где $\kappa_{вп}, F_{п}$ – коэффициент обтекаемости и лобовая площадь парашюта [6]; $\kappa_{в}, F_{а}$ – коэффициент обтекаемости и лобовая площадь автомобиля.

Тормозные силы передней и задней осей определяются конструкцией тормозных механизмов и величиной управляющего воздействия

$$P_{т1,т2} = [p \cdot t - p_0] K_{тк1,тк2}, \quad (4)$$

где p – управляющее воздействие тормозного привода, подведенное к тормозным колесам автомобиля; p_0 – нечувствительность тормозных механизмов; $K_{тк1}, K_{тк2}$ – коэффициент эффективности тормозных колес передней и задней осей автомобиля.

Сила сопротивления качению колес

$$P_f = m_a \cdot g \cdot f, \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения; f – коэффициент сопротивления качению.

Решение уравнения (1) представлено в виде отрицательного ускорения автомобиля

$$-\frac{dV_a}{dt} = \frac{-P_{п} - P_{т1} - P_{т2} - P_f - P_w}{m_a}, \quad (6)$$

с начальным условием в виде

$$V_a(t_0) = V_0,$$

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

Структурно имитационная модель процесса торможения автомобиля с комбинированной автоматизированной системой управления в случае автоматизированного электрогидравлического тормозного привода, реализованная в приложении Simulink программного продукта MATLAB, представляет собой функциональные блоки с соответствующими связями (рис. 1). В блоке Subsystem2 вычисляются тормозные силы парашюта и тормозные силы на колесах передней и задней осей. Силы сопротивления качению и воздуха

определяются соответственно в блоках P_f и P_w . На выходе интегратора Skorost формируется величина снижения скорости автомобиля при торможении. С учетом начальной скорости торможения V_0 в сумматоре определяется текущее значение скорости движения автомобиля при торможении. Результат интегрирования в блоке Puti – тормозной путь автомобиля. Блок Subsystem импортирует результаты моделирования в таблицы Excel. Моделирование процесса торможения происходит до скорости движения автомобиля 0,005 м/с; после этого блок STOP автоматически прекращает процесс имитации.

Тормозные силы на осях автомобиля $P_{т1}$ и $P_{т2}$ определяются в зависимости от усилия на педали $P_{п}$ и достигнутого замедления (отрицательного ускорения) автомобиля (рис. 2). Если торможение начинается со скорости, превышающей 200 км/ч, то при нажатии на педаль тормозного управления приводится в действие пневматический тормоз – парашют. При этом давление в тормозных контурах электрогидравлического привода формирует адаптивный регулятор (блок Brake-Assist на рис. 2). Вследствие снижения скорости движения уменьшается эффективность торможения парашютом.

При ускорении автомобиля 10 м/с² блок Brake-Assist автоматически увеличивает заданное давление управления pA для поддержания эффективности торможения на этом уровне. Вычисление заданного давления pA в блоке Brake-Assist выполняется по зависимости

$$pA = \frac{b_m}{b} \cdot q + \varepsilon \cdot \frac{1}{\lambda \cdot b}, \quad (7)$$

где b, b_m – коэффициенты эффективности тормозного управления автомобиля и эталонной модели [2, 3]; q – задающее воздействие (для электрогидропривода – давление жидкости пропорциональное усилию на педали тормоза); ε – ошибка управления; λ – постоянный коэффициент [7].

Коэффициенты b, b_m рассчитываются в блоке Brake-Assist (рис. 3). Индексом «м» отмечены коэффициенты и параметры эталонной модели.

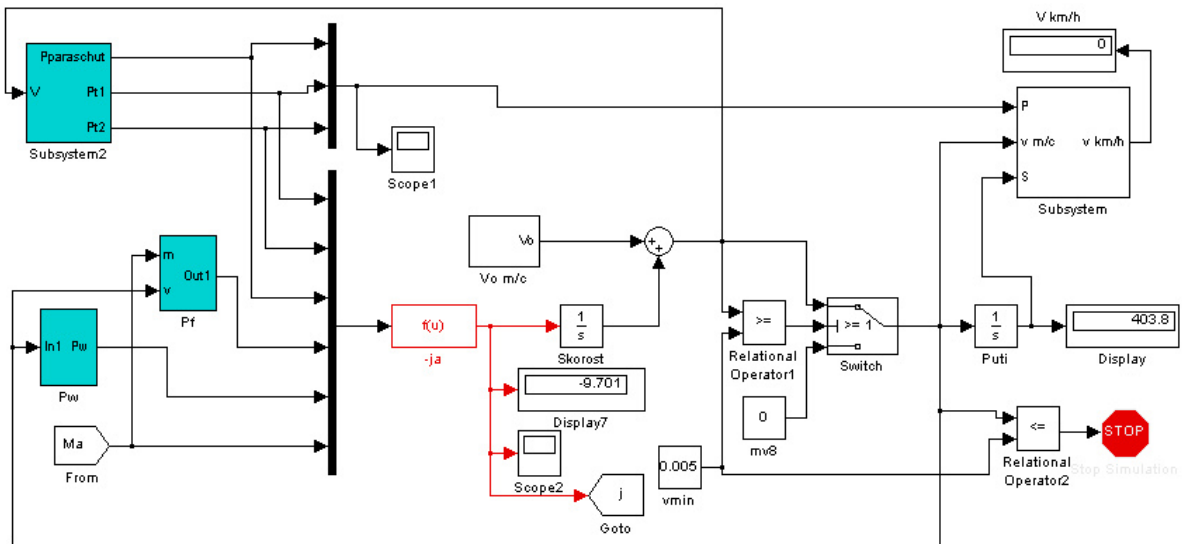


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели процесса торможения автомобиля

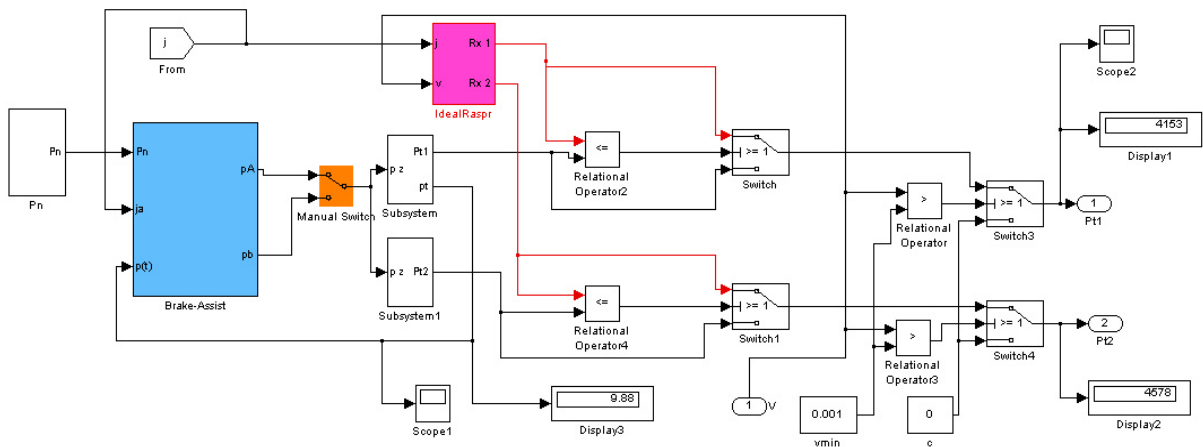


Рис. 2. Структурная схема имитационной модели адаптивного тормозного привода автомобиля

При имитационном моделировании динамики торможения автомобиля в качестве эталонной модели определены параметры автомобиля при торможении без парашюта. Перед началом решения системы уравнения (7) выполняется проверка условия

$$p_{т.ц} \geq \Delta p_{т.ц}, \quad (8)$$

где $p_{т.ц}$ – давление в тормозных камерах; $\Delta p_{т.ц}$ – нечувствительность тормозных механизмов.

Если условие (8) не выполняется, то в уравнении (7) принимается, что $b = b_m$ (рис. 3 – блок switch).

Тормозные силы на осях автомобиля вычисляются в соответствии с зависимостью (4) в

блоках Subsystem и Subsystem1 (рис. 2). Если тормозные силы достигают максимального значения по сцеплению колес с опорной поверхностью, то им присваиваются значения R_{x1}, R_{x2} , соответствующие значениям при идеальном распределении тормозных сил. При скорости движения меньше 0,001 м/с результаты вычисления тормозных сил обнуляются.

Давление жидкости в электрогидравлических контурах определяется на основе баланса расхода жидкости через впускной и выпускной электроклапаны в блоке Davlenie1 (рис. 4). Модель электронного блока управления клапанами на основе сравнения значений заданного блоком Brake-Assist и измеренного в контуре формирует управляющие сигналы на электроклапаны.

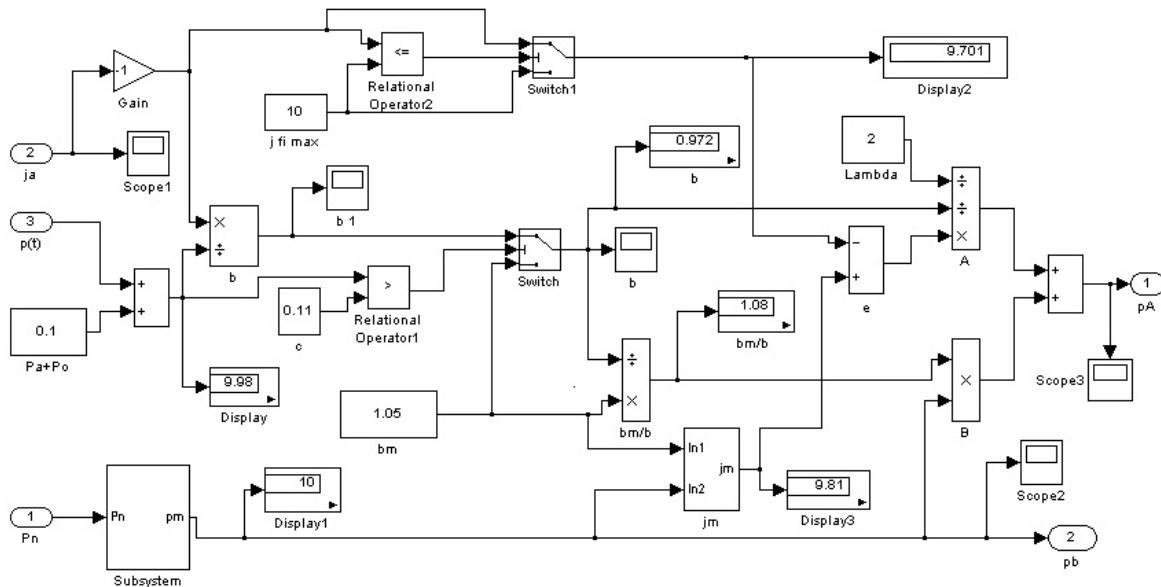


Рис. 3. Структурная схема блока Brake-Assist

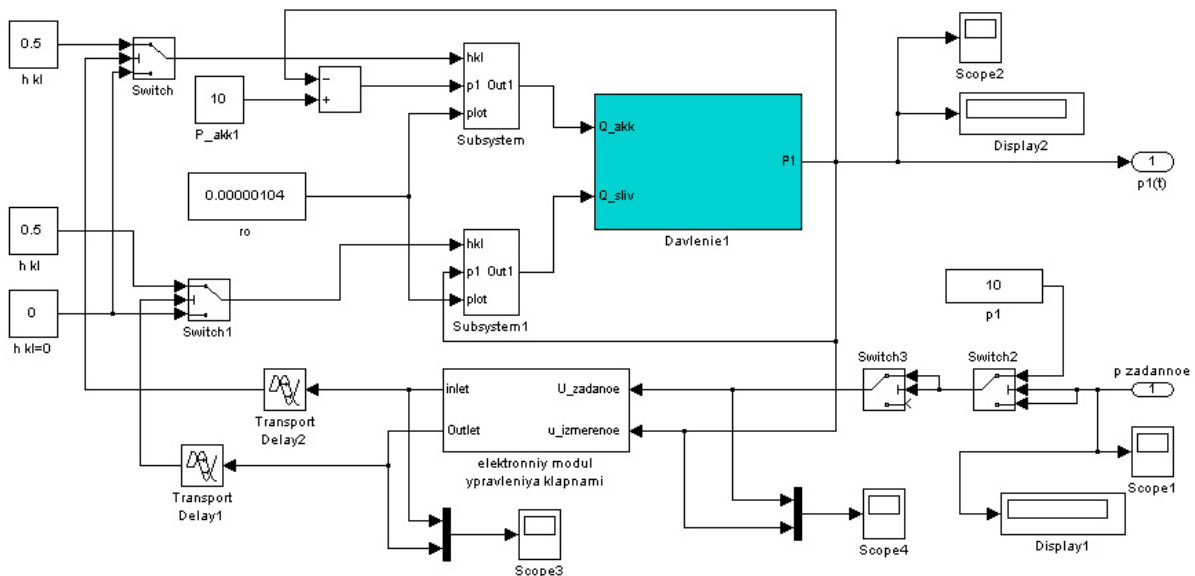


Рис. 4. Структурная схема имитационной модели контура электрогидравлического тормозного привода автомобиля

В модели контура электрогидравлического тормозного привода приняты допущения:

- давление жидкости в гидроаккумуляторе не изменяется;
- затвор клапана перемещается мгновенно, но с задержкой по времени, формируемой блоками Transport Delay1 и Transport Delay2.

Анализ результатов моделирования и теоретическая оценка тормозной эффективности

На кафедре автомобилей ХНАДУ было выполнено имитационное моделирование ди-

намики торможения рекордно-гоночного автомобиля с адаптивным управлением комбинированной тормозной системой. Массогабаритные параметры автомобиля соответствуют параметрам рекордно-гоночного автомобиля ХАДИ-7. Формирование управляющего воздействия в блоке адаптивного регулятора происходит на основе сравнения реализуемого замедления и желаемого. Блок электрогидравлического привода тормозов управляет работой клапанов и обрабатывает наполнение и опоражнивание тормозных цилиндров. Моделировались экстренное торможение с одинаковым значением усилия на

педали и темпом его приложения для различных начальных скоростей движения.

Анализ результатов моделирования и теоретическая оценка тормозной эффективности рекордно-гоночного автомобиля с комбинированной тормозной системой выполнялись по тормозным диаграммам. Торможение со скорости менее 200 км/ч выполняется фрикционными тормозными механизмами с элек-

трогидравлическим приводом. Если скорость автомобиля перед торможением больше 200 км/ч, то при нажатии на педаль тормоза подается команда на раскрытие тормозного парашюта. Давление в гидравлических тормозных контурах при этом зависит от замедления автомобиля. Одна из тормозных диаграмм, соответствующая торможению со скорости 388 км/ч, представлена на рис. 5.

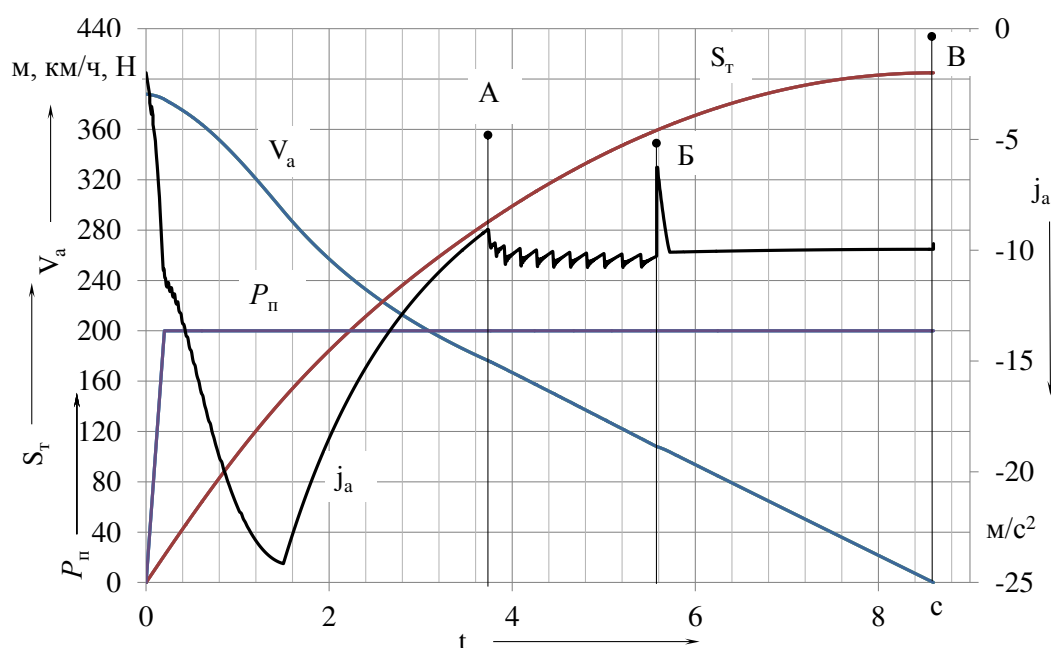


Рис. 5. Тормозная диаграмма рекордно-гоночного автомобиля: P_n — усилие на педали тормоза; S_r — тормозной путь автомобиля; V_a — скорость автомобиля; t — время торможения; j_a — ускорение автомобиля; А — начало коррекции эффективности торможения; Б — отсоединение парашюта; В — остановка автомобиля

После нажатия на педаль тормоза раскрывается тормозной парашют. Время его полного раскрытия при моделировании принято 1,5 с, в соответствии с данными работы [6]. Снижение скорости движения уменьшает эффективность тормозного парашюта, и при формировании замедления автомобиля меньше $10 m/c^2$ адаптивный регулятор автоматически увеличивает давление в гидравлических тормозных контурах, что вызывает соответствующее увеличение тормозных сил на осях автомобиля (рис. 6). После этого замедление автомобиля создается тормозным парашютом и колесными фрикционными тормозными механизмами. При снижении скорости движения автомобиля эффективность тормозного парашюта резко падает. В этом случае появляется вероятность его складывания и возможность наматывания строп на оси колес автомобиля. С целью повышения безопасности движения автомобиля при торможении целесообразно

тормозной парашют отсоединить, а последующее замедление автомобиля обеспечить колесными фрикционными тормозными механизмами. Отсоединение парашюта при моделировании торможения автомобиля выполняется в случае снижения скорости движения до $30 m/c$ ($108 km/h$). В результате отсоединения тормозного парашюта резко снижается замедление автомобиля и адаптивный регулятор автоматически увеличивает давление в гидравлических тормозных контурах колесных механизмов. Тормозные силы на осях автомобиля возрастают до максимально возможных по сцеплению значений за $0,07$ с. При заданных начальных условиях тормозной путь автомобиля составляет $405 m$, а время торможения — $8,6$ с. Максимальное замедление автомобиля обеспечивает тормозной парашют. При площади тормозного парашюта $2 m^2$ и начальной скорости торможения $388 km/h$ это значение равно $24,15 m/c^2$.

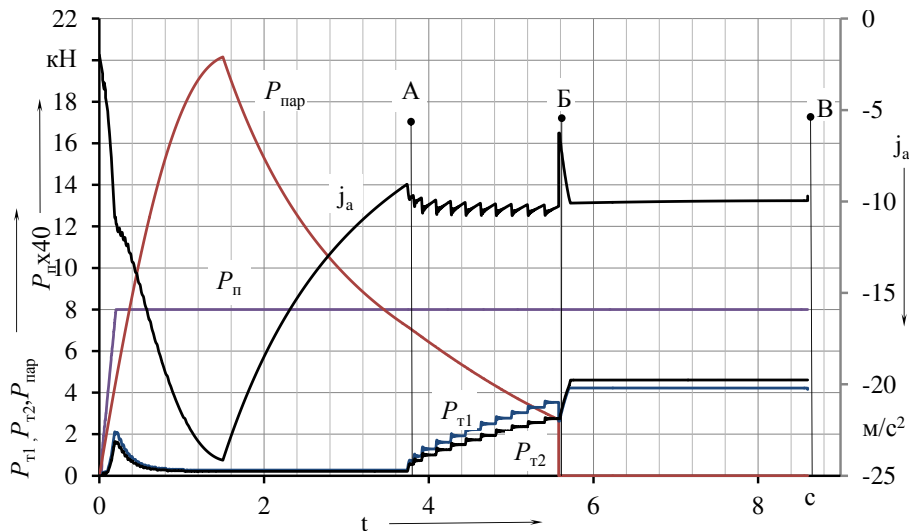


Рис. 6. Параметры торможения рекордно-гоночного автомобиля: $P_{т1}$, $P_{т2}$, $P_{пар}$ – тормозная сила на передней, задней осях и парашюта; остальное (рис. 5)

Для повышения тормозной динамики площадь парашюта можно увеличить, но при этом максимальное замедление не должно вызывать значительные перегрузки у пилота.

Выводы

Разработанная имитационная модель отражает решение уравнения движения автомобиля при торможении, рабочие процессы комбинированной тормозной системы и алгоритм управления торможением. Результаты моделирования процесса торможения позволяют:

- оценить эффективность торможения автомобиля с электрогидравлическим тормозным приводом тормозных механизмов колес и тормозного парашюта;
- оценить эффективность настройки адаптивного регулятора;
- оценить влияние на эффективность торможения параметров комбинированной тормозной системы;
- определить рациональные параметры тормозного парашюта.

Литература

1. Бекман В.В. Гоночные автомобили. – 3-е изд., перепр. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1980. – 320 с.
2. Туренко А.Н. Адаптивное тормозное управление колесных машин / А.Н. Туренко, С.Н. Шуклинов // Журнал автомобильных инженеров. – 2010. – №5 (64). – С. 18–21.

3. Туренко А.Н. Замедление колесной машины как параметр оценки состояния системы адаптивного тормозного управления / А. Н. Туренко, С.Н. Шуклинов, В.И. Вербицкий // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2012. – Вып. 31. – С. 7–12.
4. Шуклинов С.Н. Моделирование процесса торможения автомобиля с адаптивным частично автоматизированным гидравлическим тормозным приводом / С.Н. Шуклинов // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – 2013. – №4. – С. 89–98.
5. Туренко А.Н. Моделирование динамики колесной машины с адаптивным электропневматическим приводом тормозов / А.Н. Туренко, С.Н. Шуклинов, Н.Г. Михалевич // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2012. – Вып. 56. – С. 66–74.
6. Стариков Ю.Н. Основы аэродинамики летательного аппарата : учеб. пособие / Ю.Н. Стариков, Е.Н. Коврижных. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2004. – 152 с.
7. Шуклинов С.Н. Анализ влияния конструктивных параметров автомобиля и параметров движения на область устойчивости адаптивной системы управления торможением / С.Н. Шуклинов // Вісник НГУ «ХІП». Серія: Автомобілетракторобудування. – 2014. – №10 (1053). – С. 40–47.

Рецензент: М.А. Подригало, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 13 июня 2016 г.