

УДК 629.113

ШУКЛИНОВ С.Н., д.т.н., доцент,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТОРМОЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ С АДАПТИВНЫМ ЧАСТИЧНО АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ТОРМОЗНЫМ ПРИВОДОМ

Предложена имитационная модель процесса торможения автомобиля с адаптивной автоматизированной системой управления в случае частично автоматизированного тормозного привода. Представлены структурные схемы модели вакуумного усилителя тормозов с исполнительным устройством адаптивной системы управления, блоков формирования корректирующего воздействия и исполнительного устройства адаптивной системы управления с блоком управления электромагнитом впускного и выпускного клапанов.

Ключевые слова: моделирование, гидравлический тормозной привод, адаптивная система управления, вакуумный усилитель тормозов, корректирующее воздействие, алгоритм.

Введение

В исследованиях безопасности движения автомобилей на дорогах значительная часть работ посвящена проблемам динамики торможения и процессам управления торможением. Для повышения качества управления торможением автомобиля предлагается ряд автоматических и автоматизированных агрегатов и систем. В частности, адаптивные системы тормозного управления в случае качения колеса в доэкстремальном режиме, позволяют сформировать инвариантное тормозное управление. При этом повышается качество управления торможением автомобиля и эргономические параметры управления торможением, что способствует уменьшению утомления водителя и, как следствие, повышению безопасности движения. Управление торможением автомобиля с адаптивным частично автоматизированным гидравлическим тормозным приводом имеет ряд существенных особенностей. Исследования адаптивного управления процессом торможения рационально выполнять с помощью имитационной модели.

Анализ последних публикаций

В работе [1] авторами предложен закон адаптивного тормозного управления колесных машин, позволяющий в доэкстремальном режиме качения тормозных колес обеспечить инвариантный режим управления тормозами. Оценка устойчивости адаптивной системы управления тормозами автомобиля выполнена как для случая автоматизированного, так и для случая, частично автоматизированного тормозного привода [2]. Авторами работ [3, 4] предложена схема электропневматического привода тормозов с адаптивным управлением и выполнено математическое описание, и имитационное моделирование динамики торможения колесной машины с таким приводом тормозов. Вопросы моделирования рабочих процессов частично автоматизированного тормозного привода в достаточной степени рассмотрены авторами работ [5].

Следует отметить, что вопросы моделирования динамики торможения автомобиля с адаптивным управлением в доэкстремальном режиме качения тормозных колес, в случае частично автоматизированного гидравлического тормозного привода практически не изучены.

Цель и постановка задачи

Целью данной работы является разработка имитационной модели динамики торможения автомобиля с адаптивным частично автоматизированным гидравлическим тормозным приво-

дом. Настоящая работа является развитием вопросов моделирования адаптивного управления торможением изложенных в статье [4].

Схема гидравлической тормозной системы автомобиля

Тормозная система с частично автоматизированным тормозным приводом позволяет реализовать адаптивное управление (рис. 1). При этом исполнительное устройство адаптивной автоматизированной системы может быть сформировано в вакуумном усилителе тормозного привода.

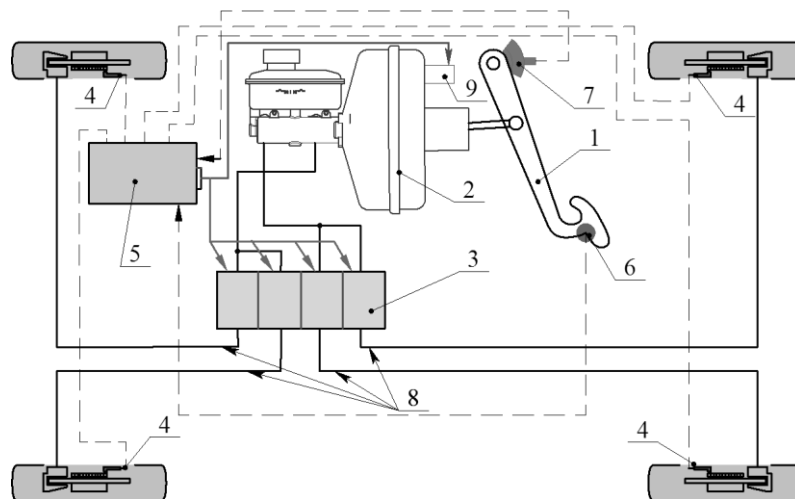


Рис. 1. Схема тормозного управления с частично автоматизированным приводом:

- 1 – педальный привод; 2 – главный тормозной цилиндр с вакуумным усилителем тормозов; 3 – модулятор ABS; 4 – датчики частоты вращения колес; 5 – блок управления; 6 – датчик усилия на педали тормоза; 7 – датчик перемещения педали тормоза; 8 – трубопроводы; 9 – электромагнит управления клапанами исполнительного устройства адаптивной системы.*

Кроме изменения конструкции вакуумного усилителя в систему необходимо дополнить датчиками усилия на педали тормоза 6 (рис. 1) и ее перемещения 7. Блок управления 5 выполняет расчет необходимого корректирующего воздействия в соответствии с алгоритмом управления в доэкстремальном режиме качения колес и управление электромагнитом впускного и выпускного клапанов 9. Корректирующее воздействие формируется на поршне исполнительного устройства и подводится к поршню управления вакуумным усилителем 2. Если качение колеса переходит в критический режим, то в блоке управления реализуется алгоритм управления ABS, при этом адаптивная система сохраняет постоянной величину коэффициента эффективности тормозного привода.

Имитационная модель процесса торможения

Структурно имитационная модель процесса торможения автомобиля с адаптивной автоматизированной системой управления в случае частично автоматизированного тормозного привода (реализованная в приложении Simulink программного продукта Matlab) представляет собой функциональные блоки с соответствующими связями (см. рис. 2).

Режим торможения автомобиля задает водитель, воздействуя на орган управления – педальный привод. Усилие толкателя педального привода прикладывается к поршню управления вакуумного усилителя тормозов. В блоке VacUsil, структура которого представлена на рисунке 3, решаются уравнения движения управляющего поршня, поршня и штока вакуумного усилителя, моделируются следящее устройство, газодинамические процессы и динамическое сос-

тояние вакуумного и атмосферного клапанов. Перемещение X_s и скорость X'_s определяют перемещение и скорость движения первичного поршня главного тормозного цилиндра и соответствующее давление жидкости p_1, p_2 в тормозных контурах. Рабочие процессы главного тормозного цилиндра и гидравлического тормозного привода моделируются в блоке *GTC_Privod*. Давление жидкости в тормозных контурах формируют приводное усилие на тормозных колодках и соответствующий тормозной момент на тормозных колесах автомобиля в блоке *КМ*.

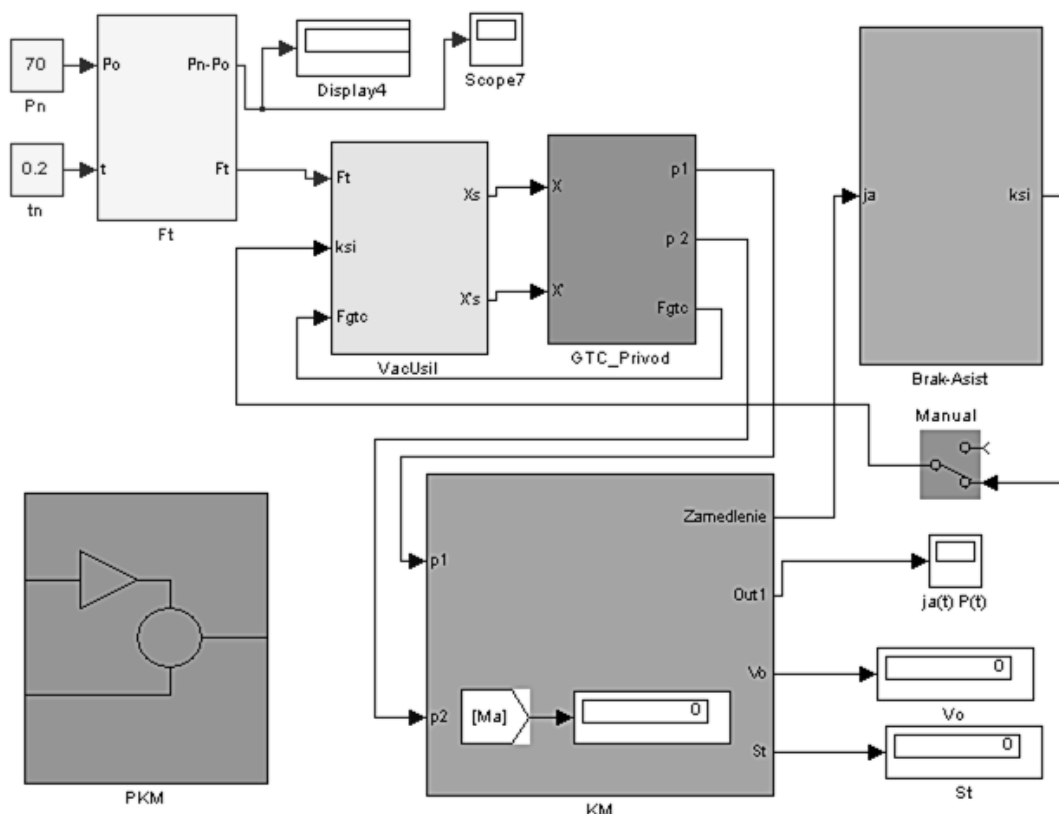


Рис. 2. Структура имитационной модели для исследования процесса торможения автомобиля с адаптивным частично автоматизированным тормозным приводом:

Ft – имитационная модель формирования задающего воздействия; *PKM* – блок задания и вычисления параметров автомобиля; *КМ* – блок решения уравнения движения автомобиля; *VacUsil* – имитационная модель вакуумного усилителя тормозного привода; *GTC_Privod* – имитационная модель гидравлического тормозного привода с главным тормозным цилиндром; *Brake-Assist* – имитационная модель вычисления корректирующего воздействия; *Manual* – блок ручного переключения режима корректирующего воздействия.

В блоке *Brake-Assist* проверяется соответствие характеристики тормозного управления заданной, и, в случае отклонения, вычисляется значение необходимого корректирующего воздействия ksi . Исполнительное устройство адаптивной системы, сформированное в блоке *VacUsil*, подводит корректирующее воздействие к поршню управления вакуумного усилителя. При имитационном моделировании динамики торможения автомобиля задающее воздействие формируется в виде закона изменения усилия на педали и соответствующего усилия на толкателе и на поршне управления вакуумного усилителя.

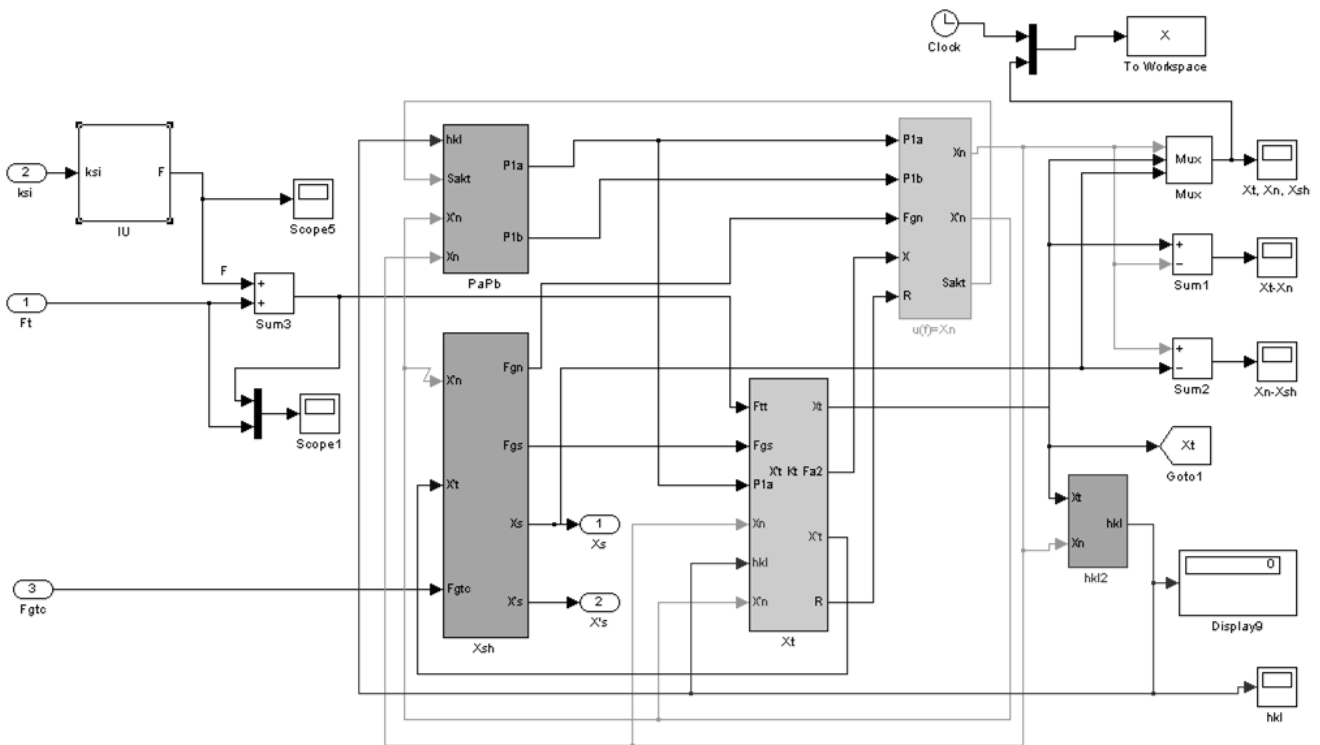


Рис. 3. Имитационная модель вакуумного усилителя тормозов с исполнительным устройством адаптивной системы управления:

Xt – блок имитационной модели движения толкателя; $u(f)=Xn$ – блок имитационной модели движения поршня усилителя; *Xsh* – блок имитационной модели движения штока; *hkl2* – блок имитационной модели клапанов; *IU* – исполнительное устройство адаптивной системы управления с блоком управления

Характеристики задающего воздействия определяются в соответствии с целью исследования. Имитационная модель частично автоматизированного привода тормозов с блоком формирования задающего воздействия описана в [5]. При моделировании динамики торможения автомобиля приняты следующие допущения:

- скорость автомобиля вычислялась при решении уравнения движения, а не при моделировании рабочего процесса датчиков частоты вращения колес;
- функцию регулятора тормозных сил на осях автомобиля модель не поддерживает;
- модель работы АБС обеспечивает идеальное использование сцепления колес с опорной поверхностью.

В блоке КМ вначале определяются силы сопротивления движению автомобиля (1) при заданных начальных условиях:

V_0 – начальная скорость торможения;

m_a – масса автомобиля (это значение используется только при решении уравнения движения);

$\delta_{вр}$ – коэффициент учета вращающихся масс автомобиля;

ψ – коэффициент сопротивления дороги;

$$\begin{cases} P_B = K_B \cdot F_a \cdot [V_a(t)]^2, \\ P_\psi = m_a \cdot g \cdot \psi, \\ P_T = [p(x,t) - p_0] \cdot K_{T.K}, \end{cases} \quad (1)$$

где K_B, F_a – коэффициент обтекаемости и лобовая площадь автомобиля; $V_a(t)$ – скорость движения автомобиля; t – независимая переменная; $t \in [t_0, t_T]$ (t_0 – время начала процесса, t_T – время торможения автомобиля); g – ускорение свободного падения; $p(x,t)$ – управляющее воздействие тормозного привода, подведенное к тормозным механизмам автомобиля (x – задающее воздействие); p_0 – нечувствительность тормозных механизмов; $K_{T.K} = \sum_{i=1}^4 K_{zi} \frac{r_b}{r_d}$ – коэффициент эффективности тормозных колес машины (K_{zi} – коэффициенты эффективности тормозных механизмов; r_b, r_d – радиусы соответственно тормозного барабана и колеса).

Значение замедления движения автомобиля в моменты времени t определяется в виде

$$j_T(t) = \{P_B + P_\psi + P_T\} \frac{1}{m_a \delta_{вп}}, \quad (2)$$

где $j_T(t) = -\frac{dV_a(t)}{dt}$ – замедление (отрицательное ускорение) движения автомобиля.

Замедление автомобиля $j_T(t)$ дважды интегрируется и вычисляется скорость его движения V_a и тормозной путь S_T в зависимости от параметра управления – давления в тормозных контурах $p(t)$.

При движении автомобиля накатом, когда выполняется условие $P_T = 0$, значение замедления $j_3(t)$ дифференцируется и определяется расчетная масса автомобиля mm в соответствии с:

$$mm = -\frac{2 \cdot K_B \cdot F_a \cdot V_a(t) \cdot j_3(t)}{\delta_{вп} \cdot \frac{dj_3(t)}{dt}}, \quad (3)$$

где $j_3(t), \frac{dj_3(t)}{dt}$ – замедление и скорость изменения замедления автомобиля при движении накатом.

Далее это рассчитанное значение массы используется в расчете корректирующего воздействия адаптивного регулятора системы управления.

Начальные условия и конструктивные параметры автомобиля занесены в блок РКМ, структурная схема которого приведена в работе [4].

Корректирующее воздействие адаптивного регулятора вычисляется в блоке Brake-Assist, выход с которого поступает на вход блока Manual. Блок Manual позволяет в соответствии с задачей исследования подключить или отключить адаптивный регулятор. При подключенном адаптивном регуляторе вычисленное значение корректирующего воздействия k_{si} формирует в

исполнительном устройстве (блок IU рис. 3) усилие F , которое суммируется с усилием Ft на поршне управления вакуумного усилителя, созданным водителем.

При моделировании задающего воздействия принят линейный закон изменения, который реализует схема, подробно описанная авторами в монографии [5]. При этом текущее значение задающего воздействия – усилия на толкателе Ft определяется как функция времени t

$$Ft = \begin{cases} P_{п} \cdot \frac{t}{\tau_{н}} \cdot i, & \text{если } t < \tau_{н}; \\ P_{п} \cdot i, & \text{если } \tau_{н} \leq t \leq \tau_{н} + \tau_1; \\ P_{п} \cdot \frac{t - \tau_{н} - \tau_1}{\tau_{паст}} \cdot i, & \text{если } \tau_{н} + \tau_1 < t \leq \tau_{н} + \tau_1 + \tau_{паст}; \\ P_{п. \min} \cdot i, & \text{если } t > \tau_{н} + \tau_1 + \tau_{паст}. \end{cases} \quad (4)$$

где t – независимая переменная – время; $\tau_{н}$ – время нарастания усилия на педали тормоза; i – передаточное число педального привода; τ_1 – время выдержки усилия на педали при значении $P_{п}$; $\tau_{паст}$ – время снижения значения усилия $P_{п}$ на педали тормоза до минимального значения; $P_{п. \min}$ – минимальное значение усилия на педали тормоза.

Следует заметить, что введение в (4) минимального значения усилия на педали в конце торможения необходимо, чтобы исключить при моделировании деление на нуль.

В блоке Brake-Assist, структурная схема которого представлена на рис. 4, вычисляется корректирующее воздействие адаптивного регулятора в соответствии с алгоритмом (5).

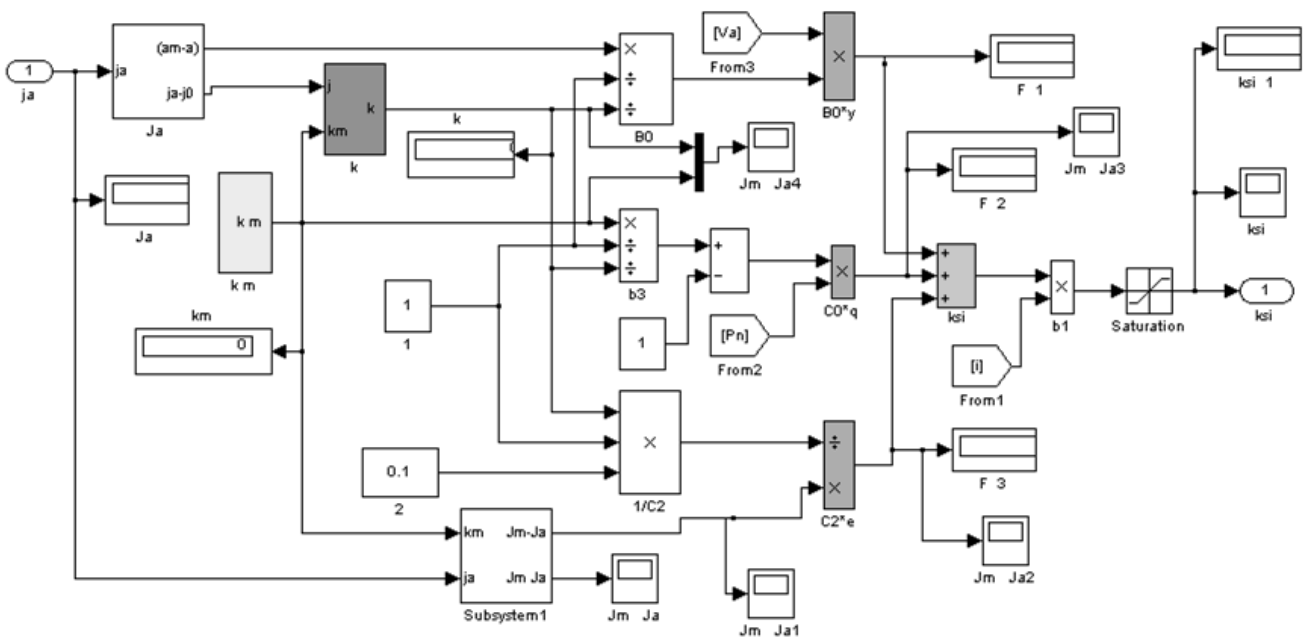


Рис. 4. Структурная схема блока Brake-Assist

$$\begin{aligned} \text{если } \dot{F}t > \frac{k_M}{k} \cdot \dot{q} - \frac{(a_{1M} - a_1)}{k} \cdot j_T(t), \text{ то } \xi < B_0 \cdot V_a(t) + B_1 \cdot j_T(t) + C_0 \cdot \delta + C_2 \cdot \dot{\varepsilon}, \\ \text{если } \dot{F}t = \frac{k_M}{k} \cdot \dot{q} - \frac{(a_{1M} - a_1)}{k} \cdot j_T(t), \text{ то } \xi = B_0 \cdot V_a(t) + B_1 \cdot j_T(t) + C_0 \cdot \delta + C_2 \cdot \dot{\varepsilon}, \\ \text{если } \dot{F}t < \frac{k_M}{k} \cdot \dot{q} - \frac{(a_{1M} - a_1)}{k} \cdot j_T(t), \text{ то } \xi > B_0 \cdot V_a(t) + B_1 \cdot j_T(t) + C_0 \cdot \delta + C_2 \cdot \dot{\varepsilon}. \end{aligned} \quad (5)$$

где $\dot{F}t$ – функция скорости изменения управляющего воздействия (усилие на поршне управления вакуумного усилителя тормозов формируемое водителем); k, k_M – коэффициенты эффективности тормозного управления автомобиля и эталонной модели автомобиля; q, \dot{q} – управляющее воздействие эталонной модели и скорость его изменения; a_1, a_{1M} – коэффициенты, характеризующие нестационарность процесса; ξ – корректирующее воздействие, приведенное к поршню управления вакуумного усилителя тормозов; $B_0 = \frac{a_M - a}{k \cdot \eta(x)}$; $B_1 = \frac{k_M}{k^2 \cdot \eta(x)}$; $C_0 = \frac{k_M}{k \cdot \eta(x)} - 1$; $C_2 = \frac{1}{\lambda \cdot k \cdot \eta(x)}$ – коэффициенты (λ – коэффициент, определяющий чувствительность адаптивного регулятора, $\eta(x)$ – коэффициент передачи тормозного привода (коэффициент пропорциональности между входом и выходом); $\dot{\varepsilon}$ – отклонение замедления автомобиля от эталонного значения при действии возмущений.

Коэффициент эффективности тормозного управления модели вычисляется в соответствии со схемой и параметрами тормозной системы для автомобиля в снаряженном состоянии в блоке km (рис. 4). Для тормозного управления с гидравлическим частично автоматизированным приводом коэффициент эффективности тормозного управления модели, $\frac{M/c^2}{H}$, определяет выражение

$$k_M = \frac{K_{т.к} \cdot K_y \cdot i_{п}}{m_{a.н} \cdot \delta_{вр} \cdot S_{гтц}} \left(1 - \frac{P_0}{P_{п}} \right), \quad (6)$$

где $K_{т.к}$ – коэффициент эффективности тормозных колес; K_y – коэффициент усиления вакуумного усилителя; $m_{a.н}$ – масса снаряженного автомобиля с водителем; $S_{гтц}$ – площадь поршня главного тормозного цилиндра; P_0 – нечувствительность тормозного управления.

Коэффициент эффективности тормозных колес $K_{т.к}$, $\frac{H}{\text{МПа}}$, в формуле (6) вычисляется по зависимости

$$K_{т.к} = (2 \cdot K_{\text{з1}} \cdot r_1 + 2 \cdot K_{\text{з2}} \cdot r_2) \cdot \frac{1}{r_d}, \quad (7)$$

где $K_{\text{з1}}, K_{\text{з2}}$ – коэффициенты эффективности тормозных механизмов соответственно на передней и задней осях, мм^2 (определялись с учетом методики изложенной в работе [6]); r_1, r_2 – активный радиус тормозного механизма на передней и задней осях (для барабанных тормозных механизмов – это радиус барабана, для дисковых тормозных механизмов – средний радиус трения); r_d – динамический радиус автомобиля, принят одинаковым для всех колес и равным статическому радиусу.

Коэффициент эффективности тормозного управления автомобиля вычисляется в блоке k (рис. 4) в соответствии с параметрами ее движения по зависимости

$$k = \begin{cases} \frac{j_T - j_3}{P_n - P_0}, & \text{если } j_T - j_3 > 0,1 \text{ м/с}^2, \\ k_m \cdot \frac{m_{a.n.}}{mm}, & \text{если } j_T - j_3 \leq 0,1 \text{ м/с}^2, \end{cases} \quad (8)$$

где mm – масса колесной машины, вычисленная при движении накатом в соответствии с формулой (3).

Вычисленное значение корректирующего воздействия ksi подается в блок IU, в котором формируется корректирующее усилие F , прикладываемое к поршню управления (рис. 3). В блоке IU (рис. 5) моделируется работа блока управления электромагнитом впускного и выпускного клапанов и рабочие процессы вакуумной камеры. Впускной клапан моделирует переключатель Switch1, а выпускной – Switch2.

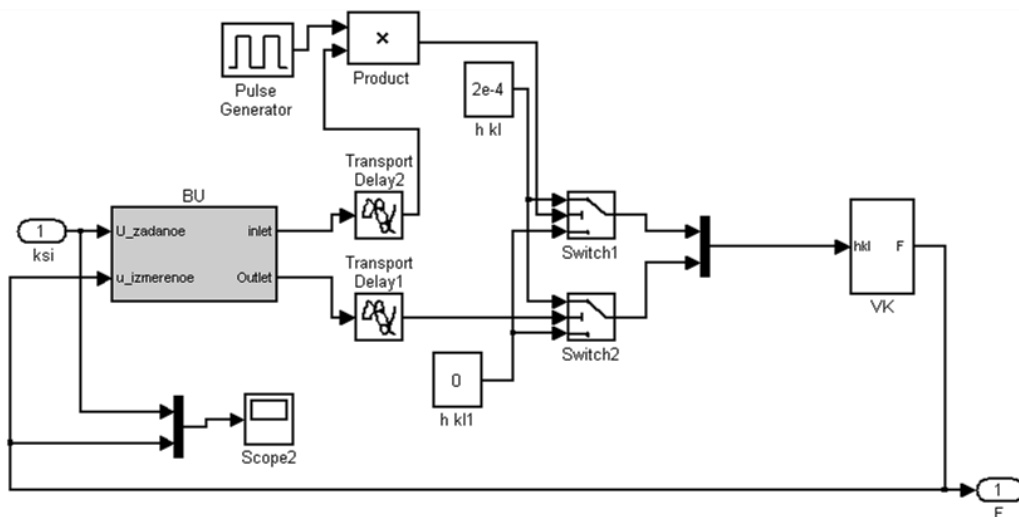


Рис. 5. Схема блока IU (исполнительное устройство адаптивной системы управления с блоком управления):

BU – блок управления электромагнитом впускного и выпускного клапанов;
VK – модель вакуумной камеры

Время срабатывания электромагнита управления клапанами моделируется блоками **Transport Delay**. Сигнал управления впускным клапаном подвергается широтно-импульсному модулированию блоком **Pulse Generator**.

В блоке управления **BU** (рис. 6) заданное значение корректирующего воздействия ksi сравнивается с его значением, которое реализовано (измерено) на поршне управления. По ошибке управления **PID Controller** вырабатывает сигнал управления электромагнитом управления клапанами.

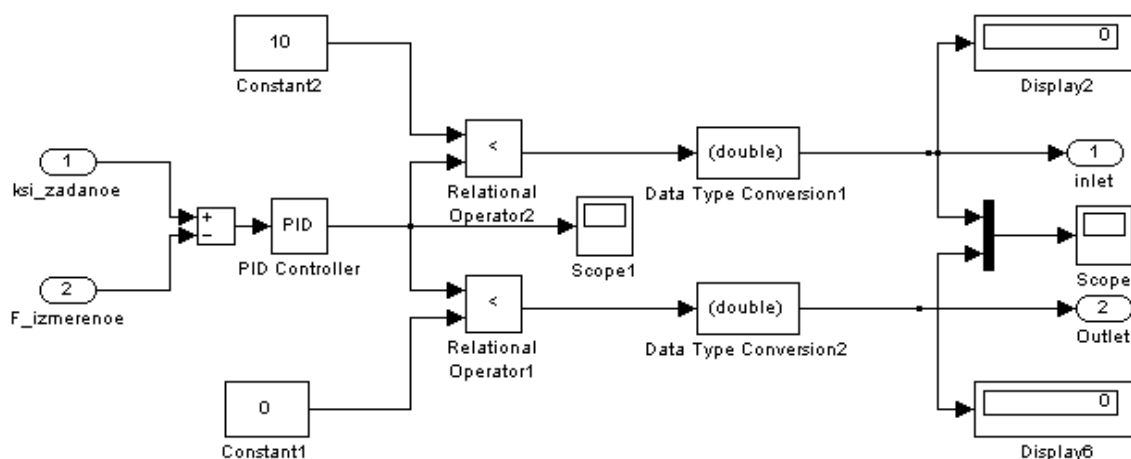


Рис. 6. Схема блока ВУ

Если уровень сигнала превышает верхнюю границу зоны нечувствительности, определяемой блоком Constant2, то вырабатывается сигнал 1 на выходе inlet и впускной клапан открывается, в обратном случае на выходе inlet формируется сигнал 0 и впускной клапан закрывается. Если уровень сигнала опускается ниже нижней границы зоны нечувствительности, определяемой блоком Constant1, то вырабатывается сигнал 1 на выходе outlet и выпускной клапан открывается, в обратном случае на выходе outlet формируется сигнал 0 и выпускной клапан закрывается. Если уровень сигнала находится в зоне нечувствительности на выходах inlet и outlet формируется сигнал 0 и оба клапана закрыты, что обеспечивает выдержку давления в вакуумной камере исполнительного устройства адаптивной системы управления.

Выводы

Предложенная модель позволяет имитировать рабочие процессы гидравлического тормозного привода с вакуумным усилителем, обеспечивающим функцию адаптации при действии возмущающих факторов и оценить влияние параметров адаптивной системы управления и тормозного привода на динамику торможения автомобиля.

Список литературы

1. Туренко А.Н. Адаптивное тормозное управление колесных машин / А.Н. Туренко, С.Н. Шуклинов // Журнал автомобильных инженеров. – 2010. – №5 (64). – С. 18 – 21.
2. Туренко А.Н. Оценка устойчивости системы адаптивного управления тормозами / А.Н. Туренко, С.Н. Шуклинов, В.И. Вербицкий // Сб. науч. тр. ХНАДУ «Автомобильный транспорт». – Вып. 28. – Х., 2011. – С. 7 – 11.
3. Туренко А.Н. Электропневматический привод тормозов с адаптивным управлением / А.Н. Туренко, С.Н. Шуклинов, Н.Г. Михалевич // Изв. ВолгГТУ. Серия «Наземные транспортные системы», Вып. 4: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 12(85). – С. 51 – 53.
4. Туренко А. Н. Моделирование динамики колесной машины с адаптивным электропневматическим приводом тормозов / Туренко А. Н., Шуклинов С.Н. Михалевич Н.Г. // Вестник ХНАДУ. – 2012. – Вып. 56. – С. 66 – 74.
5. Туренко А.Н. Теоретическое и экспериментальное исследование вакуумного усилителя тормозного привода автомобилей: моногр. / А.Н. Туренко, С.Н. Шуклинов. – Х.: ХНАДУ, 2012. – 220 с.
6. Туренко А.Н. Функциональный расчет тормозной системы автомобиля с барабанными тормозами: учеб. пособие / А.Н. Туренко, В.А. Богомолов, В.И. Клименко; под ред. А.Н. Туренко. – К.: УМК ВО, 1990. – 140 с.

Шуклінов С.М. Моделювання процесу гальмування автомобіля з адаптивним частково автоматизованим гідравлічним гальмівним приводом.

Анотація. Запропоновано імітаційну модель процесу гальмування автомобіля з адаптивною системою керування у випадку частково автоматизованого гальмівного приводу. Представлено структурні схеми моделі вакуумного підсилювача гальм з виконавчим пристроєм адаптивної системи керування, блоків формування дії, яка коректує, та виконавчого пристрою адаптивної системи керування зі блоком керування електромагнітом впускного і випускного клапанів.

Ключові слова: моделювання, гідравлічний гальмівний привод, адаптивна система керування, вакуумний підсилювач гальм, корегуюча дія, алгоритм

Shuklinov S.M. Simulation of Vehicle Braking Equipped with Adaptive Automotive Hydraulic Braking Drive

Abstract. There was offered a simulation model of vehicle braking equipped with adaptive automotive steering system in case of a partially automatized braking drive. There were presented structural schemes of the brake vacuum booster model with the drive device of the adaptive control system, the units of corrective action formation and the drive devise of the adaptive control system with the control block the inlet and outlet valve electromagnet.

Keywords: simulation, hydraulic brake drive, adaptive control system, brake booster, corrective action, algorithm.

Стаття надійшла до редакції 29.11.2013 р.