

УДК 629.4-592

**А. І. БОНДАРЕНКО**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПІ»;  
**ХАССАН АЛЬ РАЖАБ**, магістрант НТУ «ХПІ»

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГАЛЬМУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З ПНЕВМАТИЧНИМ ГАЛЬМІВНИМ ПРИВОДОМ**

Проведено аналіз основних способів гальмування автотransпортних засобів, складена математична модель пневматичного гальмівного приводу автомобіля КраЗ-6510, змодельовано службове та екстрене гальмування даного автомобіля, досліджено можливості підвищення гальмівної ефективності, керованості та стійкості вантажних автомобілів у разі відсутності замкнутих систем автоматичного керування гальмуванням.

**Ключові слова:** динаміка, процес гальмування, гальмівна ефективність, керованість, стійкість.

**Вступ.** З метою підвищення керованості та стійкості сучасні автомобілі обладнуються електронними гальмівними системами або ж електронними системами стабілізації, до складу яких входить антиблокувальна система, тобто замкнутими системами автоматичного керування гальмуванням (ЗСАКГ). Нажаль, на даний момент не всі вантажні автомобілі обладнуються такими системами. Вибір способу гальмування за відсутності ЗСАКГ залишається актуальним питанням донині.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженню динаміки руху вантажних автомобілів присвячені численні праці Антонова Д.А., Біленького Ю.Г., Булгакова М.О., Волкова В.П., Генбома Б.Б., Гесслера Н.А., Гредескула А.Б., Грігоряна В.Г., Зімельова Г.В., Іларіонова В.О., Кльопіка М.К., Косолапова Г.М., Литвинова О.С., Машенка О.Ф., Павленка В.А., Павленка В.Н., Певзнера Я.М., Петрова В.А., Петрова М.А., Подригало М.А., Пчеліна І.К., Степанова В.Ю., Фалькевіча Б.С., Фаробіна Я.С., Фрумкіна А.К., Хачатурова А.А., Чудакова Є.О. та ін. [1 – 9].

Залежно від поставленої мети, можуть використовуватися декілька методів представлення математичних моделей динаміки багатомасового автомобіля: «плоска» модель автомобіля, багатомасова нелінійна модель.

Рішення окремих задач динаміки тривісного автомобіля засноване на застосуванні так званої «плоскої» моделі автомобіля, яка в більшості випадків дозволяє одержати аналітичні рішення. Доцільність такого підходу полягає в тому, що в цьому випадку трапляється нагода розкрити фізичну суть процесів і аналізом встановити вплив того або іншого чинника (конструктивного параметра) на динаміку автомобіля. Така модель дозволяє одержати достатньо точний якісний опис динаміки автомобіля за умови дії порівняно малих бічних сил [10].

Використання просторової [10] багатомасової нелінійної моделі автомобіля дозволяє досліджувати динаміку автомобіля з урахуванням крену кузова автомобіля, зміни розвалу коліс, впливу невіднесених мас і їх розташування, дії великих бічних сил, впливу трансмісії та інших чинників.

**Мета дослідження, постановка задачі.** Метою даної роботи є дослідження процесу гальмування транспортних засобів з пневматичним гальмівним приводом (ПП) на прикладі вантажного автомобіля КраЗ-6510 з використанням «плоскої» моделі.

Для досягнення поставленої мети необхідно провести аналіз існуючих способів гальмування автотransпортних засобів, скласти математичну модель ПП автомобіля

© А. І. Бондаренко, Хассан Аль Ражаб, 2013

КрАЗ-6510, змоделювати службове та екстрене гальмування даного автомобіля, дослідити можливості підвищення гальмівної ефективності, керованості та стійкості вантажних автомобілів у разі відсутності ЗСАКГ.

**Дослідження процесу гальмування транспортних засобів з ПГП.** Розрізняють службове, екстрене та аварійне гальмування.

Службове гальмування – гальмування, яке застосовують для плавного зменшення швидкості автотранспортного засобу або його зупинки в заданому місці. Воно проводиться з невеликою інтенсивністю, що не викликає неприємних відчуттів у водія і пасажирів. Уповільнення при службовому гальмуванні зазвичай не перевершує  $1...1,5 \text{ м/с}^2$ .

Екстрене гальмування – гальмування, яке проводиться з максимальною для даних умов інтенсивністю. Звичайна їх кількість не перевершує  $5...10 \%$  від загального числа гальмувань.

Аварійне гальмування – застосовується при виході з ладу або відмові робочої гальмівної системи і у всіх інших випадках, коли ця система не дозволяє добитися необхідного ефекту.

В більшості випадків застосування екстреного гальмування пов'язане з ефектом повного або часткового короточасного блокування коліс. Для екстреного гальмування, за відсутності замкнутих систем автоматичного управління гальмуванням, доцільно використовувати ступінчастий спосіб (рис. 1, б), який зовні нагадує переривчастий (рис. 1, а) (більш характерний для службового гальмування), проте на відміну від переривчастого не має пасивної фази, пов'язаної з повним припиненням дії гальмівних механізмів [10].

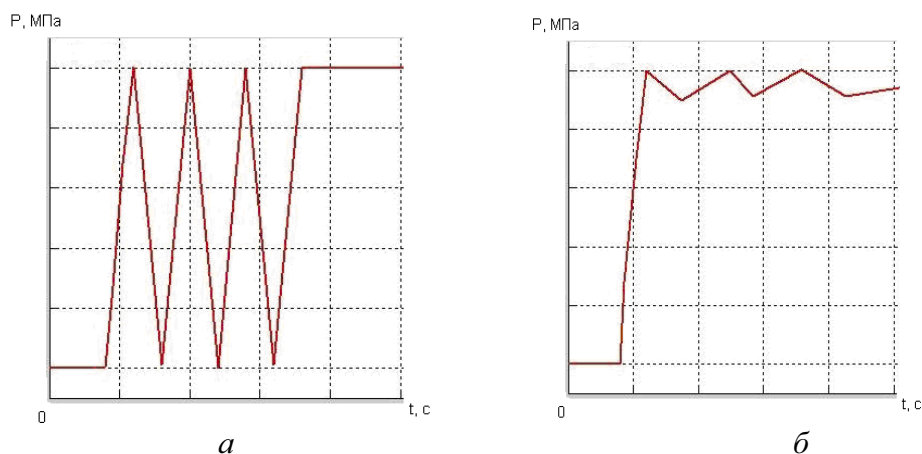


Рисунок 1 – Імпульсне гальмування: а – переривчастий спосіб; б – ступінчастий спосіб;  $P$  – тиск в гальмівному приводі;  $t$  – час гальмування.

Переривчасте гальмування – періодичне натиснення на педаль гальма і повний її відпуск. Основною причиною, що вимушує тимчасово припинити дію гальмівних механізмів, є блокування коліс. Такий спосіб застосовується на нерівній дорозі і там, де чергуються ділянки з різними коефіцієнтами зчеплення, наприклад асфальт з льодом, снігом і брудом. Перед наїздом на нерівність або слизьку ділянку слід повністю відпускати гальмо. Ефективність переривчастого способу при екстремому гальмуванні недостатня, оскільки тимчасове припинення дії гальм впливає на збільшення

гальмівного шляху автомобіля, проте при цьому підвищується керованість та стійкість автомобіля.

Важливою характеристикою гальмівного механізму, що значно впливає на процес гальмування, є залежність створюваного гальмівним механізмом гальмівного моменту  $M_{Tij}$  від тиску в гальмівному приводі  $P_{ij}$ . Для опису залежності  $M_{Tij} = M_{Tij}(P_{ij})$  доцільно застосовувати нижче наведену кусочно-лінійну функцію.

При підвищенні приводного тиску гальмівний момент визначається з виразу:

$$M_{Tij} = k_{1ij} \cdot P_{ij} - A_{1ij}, \text{ якщо } M_{Tij} < 0, \text{ тоді } M_{Tij} = 0, \quad (1)$$

де  $k_{1ij}$ ,  $A_{1ij}$  – коефіцієнти, які визначаються за експериментальними даними;  
 $i$  – номер борта автотранспортного засобу ( $i=n$  – правий борт,  $i=l$  – лівий борт);

$j$  – номер осі автотранспортного засобу ( $j=1$  – передня вісь,  $j=2$  – середня вісь,  $j=3$  – задня вісь);

$P_{ij}$  – тиск в  $ij$  виконавчому апараті, Па;

$M_{Tij}$  – гальмівний момент на  $ij$  колесі, Н·м.

Після початку зниження тиску в гальмівній камері відбувається затримка зниження гальмівного моменту, при цьому значення гальмівного моменту визначається з виразу:

$$M_{Tij} = A_{2ij} + k_{2ij} \cdot P_{ij}, \quad (2)$$

де  $k_{2ij}$ ,  $A_{2ij}$  – коефіцієнти, які визначаються за експериментальними даними.

При зниженні приводного тиску гальмівний момент визначається з виразу:

$$M_{Tij} = k_{3ij} \cdot P_{ij}, \quad (3)$$

де  $k_{3ij}$  – коефіцієнт, який визначається за експериментальними даними.

Значні гістерезисні втрати в барабанних гальмівних механізмах спостерігаються після загальмування, що пов'язано з ефектом самозаклинювання гальмівних колодок унаслідок їх знаходження тривалий час в статичному стані. При екстремому гальмуванні, в разі відсутності на автотранспортному засобі антиблокувальної системи, водій примусово, як правило, змінює гальмівний момент на колесах за рахунок періодичного “биття” по педелі гальма, гальмівні колодки при цьому постійно знаходяться в динамічному стані (присутнє незначнє їх переміщення) унаслідок зміни тиску у виконавчих апаратах ПГП, що приводить до зниження гістерезисних втрат, те ж саме спостерігається і при роботі антиблокувальної системи, тільки при цьому переміщення колодок відбувається за рахунок модулятора тиску.

Враховуючи вище приведені аргументи, гістерезисними втратами в барабанних гальмівних механізмах нехтуємо, тоді виразом (1) буде описуватися зміна гальмівного моменту при підвищенні та зниженні приводного тиску.

Вибір коефіцієнтів  $k_{1ij}$ ,  $A_{1ij}$  вважається вірним, якщо при  $P_b = P_{ij} = 0,16 \dots 0,18$  МПа гальмівний момент  $M_{Tij} = 0$ ; при  $P_{max}$  гальмівний момент  $M_{Tij} = M_{Tijmax}$ . Тобто для знаходження коефіцієнтів  $k_{1ij}$ ,  $A_{1ij}$  необхідно вирішити систему рівнянь:

$$\begin{cases} k_{lij} \cdot P_b - A_{lij} = 0; \\ k_{lij} \cdot P_{\max} - A_{lij} = M_{Tij\max}, \end{cases} \quad (4)$$

де  $P_b$  – величина тиску в ПГП, яка необхідна для вибірки всіх зазорів і подолання сил тертя в гальмівному механізмі та стягуючих пружинах колодок, рівна 0,16...0,18 МПа;

$P_{\max}$  – максимальний тиск повітря на вході в гальмівний кран, Па.

Визначити коефіцієнти  $k_{lij}$ ,  $A_{lij}$  можливо лише в тому випадку, коли відомий максимальний гальмівний момент, що реалізується на кожному колесі автотранспортного засобу –  $M_{Tij\max}$ .

На автомобілях повною масою більше 9 тонн застосовують ПГП, який може створювати практично необмежене приводне зусилля з боку гальмівних механізмів. Основними елементами ПГП є компресор, ресивери (повітряні балони), що зберігають запас стислого повітря, кран, магістралі і виконавчі апарати, що впливають на розтискні пристрої гальмівних механізмів. При гальмуванні автомобіля кран сполучає ресивери з магістралями, встановлюючи в них тиск повітря, пропорційний силі, прикладеній водієм до гальмівної педалі. При знятті зусилля з гальмівної педалі кран від'єднує магістралі від ресиверів і сполучає їх з навколишнім середовищем. Пневматичний привід розділяється на контури.

Особливістю ПГП КрАЗ-6510 є те, що він складається з двох незалежних контурів, пов'язаних з гальмівним краном: верхня секція з контуром заднього моста – перший контур, нижня з контуром середнього та переднього мостів – другий контур.

Принцип роботи приводу полягає в наступному: при дії водієм на гальмівну педаль зусилля передається через пружний елемент ПГП на клапан відкриття верхньої секції і стисле повітря подається до гальмівної камери (ГК) заднього моста. Далі повітря через отвір, що дроселює, поступаючи в силову порожнину, відкриває клапан нижньої секції і здійснюється подача повітря до ГК переднього та середнього мостів.

Об'єктом дослідження виступають перехідні процеси в ПГП автомобіля КрАЗ-6510, що має наступні типові параметри: довжини сполучних трубопроводів знаходяться в діапазоні від 0,8 до 5,6 м; діаметри трубопроводів прийняті 8...10 мм; в якості виконавчого апарату ПГП прийнято гальмівну камеру типу 30.

Математичний аналіз значно полегшує і прискорює вибір можливого варіанту параметрів приводу, дозволяє краще зрозуміти і осмислити робочі процеси та причинно-наслідкові зв'язки в системі або пристрої.

У математичних моделях контурів ПГП були прийняті наступні допущення:

- тиск повітря на вході в двосекційний гальмівний кран не змінюється за час перехідного процесу і дорівнює  $P_{\max}$ ;
- відсутні витоки повітря з системи;
- температура повітря в порожнинах апаратів гальмівного приводу не змінюється;
- в процесі наповнення та спорожнення теплообмін з навколишнім середовищем відсутній;
- пневмоопори клапанів і трубопроводів приймаємо зосередженими;
- коефіцієнт витрати через дросель приймаємо постійним для всього перехідного процесу;
- об'єм виконавчих апаратів приймаємо постійним.

З метою спрощення рішення і уніфікації описів процесів в робочій гальмівній системі, математична модель за методом Метлюка М.Ф. складена на основі балансу миттєвих масових витрат у вузлах пневмоланцюгів з використанням гіперболічної функції миттєвої масової витрати через дросель.

Для складання диференціальних рівнянь за методом Метлюка М.Ф. використовується закон вузлів для пневматичного ланцюга, який формулюється так: сума миттєвих масових витрат повітря у вузлі рівна 0, тобто:

$$\sum_{i=1}^n \left( \frac{dm}{dt} \right)_i = 0. \quad (5)$$

Масову витрату  $dm/dt$  вважатимемо позитивною по відношенню до даного вузла, якщо рух потоку направлений до вузла, і негативним, якщо від вузла.

Рівняння для визначення миттєвої масової витрати повітря через місцевий опір (дросель) в загальному виді записується наступним чином:

$$\left( \frac{dm}{dt} \right)_{Di} = \mu \cdot f \cdot V_{kp} \cdot P_0 \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_0 - P_1}{B \cdot P_0 - P_1}, \quad (6)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт витрати через дросель;

$f$  – площа прохідного перетину дроселя,  $m^2$ ;

$V_{kp}$  – критична швидкість руху повітря,  $m/s$ ;

$P_0$  – тиск повітря перед дроселем,  $Pa$ ;

$A$  – постійний коефіцієнт, рівний 0,654;

$R$  – газова постійна для повітря, рівна  $287,14 \text{ } m^2 / (c^2 \cdot K)$ ;

$T$  – температура повітря перед дроселем,  $K$ ;

$P_1$  – тиск повітря за дроселем,  $Pa$ ;

$B$  – постійний коефіцієнт, рівний 1,13.

Критична швидкість руху повітря:

$$V_{kp} = \sqrt{k \cdot R \cdot T}, \quad (7)$$

де  $k$  – показник адиабати, рівний 1,4.

Рівняння стану повітря в місткості в загальному виді:

$$\left( \frac{dm}{dt} \right)_{Ei} = \frac{P_E}{R \cdot T} \cdot \frac{dV_E}{dt} + \frac{V_E}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_E}{dt}, \quad (8)$$

де  $P_E$  – тиск в місткості,  $Pa$ ;

$V_E$  – об'єм місткості,  $m^3$ .

Адекватна математична модель ПГП дозволяє визначити час спрацювання та розгальмовування гальмівного приводу, значення яких регламентується стандартом:

- час від початку приведення в дію органу управління робочої гальмівної системи автотранспортного засобу з двигуном до моменту, коли тиск у виконавчому апараті ПГП, що знаходиться в найменш сприятливих умовах, досягає 75% тиску, яке повинне встановитися в цьому виконавчому апараті при повному приведенні в дію органу управління, не повинно перевищувати 0,6 с.;

• ПГП повинен забезпечувати при розгальмуванні падіння тиску у виконавчому апараті автотранспортного засобу за час не більше 1,2 с. до значення, що становить 10% тиску, яке встановлюється у виконавчому апараті при повному приведенні в дію органу управління.

Розрахункова схема першого та другого контурів досліджуваного ПГП наведена на рис. 2.

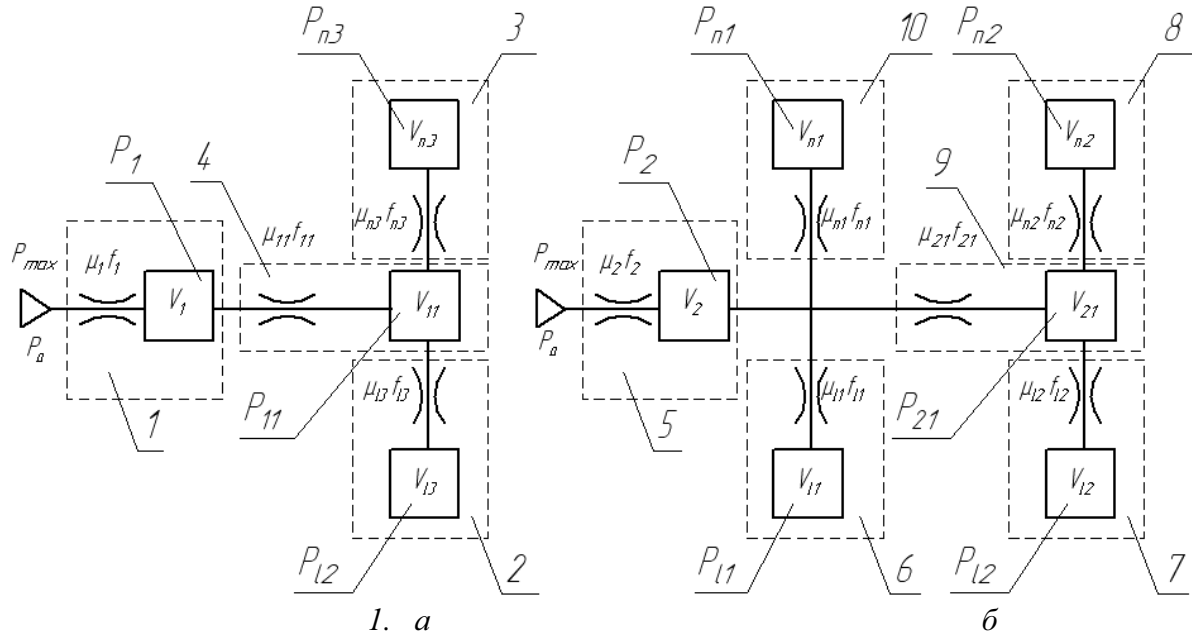


Рисунок 2 – Розрахункова схема досліджуваного ПГП:

*а* – перший контур; *б* – другий контур; 1 – верхня секція гальмівного крана; 2, 3, 6, 7, 8, 10 – ГК; 4, 9 – з’єднувальні трубопроводи; 5 – нижня секція гальмівного крана.

Математична модель першого контуру ПГП записується в наступному вигляді:

– наповнення:

$$\begin{cases} \left(\frac{dm}{dt}\right)_{D1} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{D11} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{E1} = 0; \\ \left(\frac{dm}{dt}\right)_{D11} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dn3} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{D13} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{E11} = 0; \\ \left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dn3} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{En3} = 0; \quad \left(\frac{dm}{dt}\right)_{D13} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{E13} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

– спорожнення:

$$\begin{cases} -\left(\frac{dm}{dt}\right)_{D1} + \left(\frac{dm}{dt}\right)_{D11} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{E1} = 0; \\ -\left(\frac{dm}{dt}\right)_{D11} + \left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dn3} + \left(\frac{dm}{dt}\right)_{D13} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{E11} = 0; \\ -\left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dn3} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{En3} = 0; \quad -\left(\frac{dm}{dt}\right)_{D13} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{E13} = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Математична модель другого контуру ПГП записується в наступному вигляді:

– наповнення:

$$\left\{ \begin{aligned} &\left(\frac{dm}{dt}\right)_{D2} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dn1} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dl1} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{D21} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{E2} = 0; \\ &\left(\frac{dm}{dt}\right)_{D21} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dn2} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dl2} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{E21} = 0; \quad \left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dn1} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{En1} = 0; \\ &\left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dl1} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{E11} = 0; \quad \left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dn2} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{En2} = 0; \quad \left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dl2} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{E12} = 0. \end{aligned} \right. \quad (11)$$

– спороження:

$$\left\{ \begin{aligned} &-\left(\frac{dm}{dt}\right)_{D2} + \left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dn1} + \left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dl1} + \left(\frac{dm}{dt}\right)_{D21} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{E2} = 0; \\ &-\left(\frac{dm}{dt}\right)_{D21} + \left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dn2} + \left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dl2} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{E21} = 0; \quad -\left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dn1} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{En1} = 0; \\ &-\left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dl1} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{E11} = 0; \quad -\left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dn2} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{En2} = 0; \quad -\left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dl2} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{E12} = 0. \end{aligned} \right. \quad (12)$$

Підставимо вирази (6), (8) в вище наведені системи рівнянь з урахуванням позначень рис. 2, отримаємо математичну модель першого контуру ПГП в розгорнутому вигляді:

– наповнення:

$$\left\{ \begin{aligned} &\mu_1 \cdot f_1 \cdot V_{kp} \cdot P_{max} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{max} - P_1}{B \cdot P_{max} - P_1} - \mu_{11} \cdot f_{11} \cdot V_{kp} \cdot P_1 \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_1 - P_{11}}{B \cdot P_1 - P_{11}} - \frac{V_1}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_1}{dt} = 0; \\ &\mu_{11} \cdot f_{11} \cdot V_{kp} \cdot P_1 \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_1 - P_{11}}{B \cdot P_1 - P_{11}} - \mu_{n3} \cdot f_{n3} \cdot V_{kp} \cdot P_{11} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{11} - P_{n3}}{B \cdot P_{11} - P_{n3}} - \\ &-\mu_{l3} \cdot f_{l3} \cdot V_{kp} \cdot P_{11} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{11} - P_{l3}}{B \cdot P_{11} - P_{l3}} - \frac{V_{11}}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_{11}}{dt} = 0; \\ &\mu_{n3} \cdot f_{n3} \cdot V_{kp} \cdot P_{11} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{11} - P_{n3}}{B \cdot P_{11} - P_{n3}} - \frac{V_{n3}}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_{n3}}{dt} = 0; \\ &\mu_{l3} \cdot f_{l3} \cdot V_{kp} \cdot P_{11} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{11} - P_{l3}}{B \cdot P_{11} - P_{l3}} - \frac{V_{l3}}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_{l3}}{dt} = 0. \end{aligned} \right. \quad (13)$$

– спороження:

$$\left\{ \begin{aligned} &-\mu_1 \cdot f_1 \cdot V_{kp} \cdot P_1 \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_1 - P_a}{B \cdot P_1 - P_a} + \mu_{11} \cdot f_{11} \cdot V_{kp} \cdot P_{11} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{11} - P_1}{B \cdot P_{11} - P_1} - \frac{V_1}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_1}{dt} = 0; \\ &-\mu_{11} \cdot f_{11} \cdot V_{kp} \cdot P_{11} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{11} - P_1}{B \cdot P_{11} - P_1} + \mu_{n3} \cdot f_{n3} \cdot V_{kp} \cdot P_{n3} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{n3} - P_{11}}{B \cdot P_{n3} - P_{11}} + \\ &+\mu_{l3} \cdot f_{l3} \cdot V_{kp} \cdot P_{l3} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{l3} - P_{11}}{B \cdot P_{l3} - P_{11}} - \frac{V_{11}}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_{11}}{dt} = 0; \\ &-\mu_{n3} \cdot f_{n3} \cdot V_{kp} \cdot P_{n3} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{n3} - P_{11}}{B \cdot P_{n3} - P_{11}} - \frac{V_{n3}}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_{n3}}{dt} = 0; \\ &-\mu_{l3} \cdot f_{l3} \cdot V_{kp} \cdot P_{l3} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{l3} - P_{11}}{B \cdot P_{l3} - P_{11}} - \frac{V_{l3}}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_{l3}}{dt} = 0, \end{aligned} \right. \quad (14)$$

де  $P_a$  – абсолютний тиск повітря, рівний 0,1 МПа.

Підставимо вирази (6), (8) в вище наведені системи рівнянь з урахуванням позначень рис. 2, отримаємо математичну модель другого контуру ПГП в розгорнутому вигляді:

– наповнення:

$$\left\{ \begin{aligned} & \mu_2 \cdot f_2 \cdot V_{kp} \cdot P_{max} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{max} - P_2}{B \cdot P_{max} - P_2} - \mu_{n1} \cdot f_{n1} \cdot V_{kp} \cdot P_2 \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_2 - P_{n1}}{B \cdot P_2 - P_{n1}} - \\ & - \mu_{l1} \cdot f_{l1} \cdot V_{kp} \cdot P_2 \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_2 - P_{l1}}{B \cdot P_2 - P_{l1}} - \mu_{21} \cdot f_{21} \cdot V_{kp} \cdot P_2 \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_2 - P_{21}}{B \cdot P_2 - P_{21}} - \frac{V_2}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_2}{dt} = 0; \\ & \mu_{21} \cdot f_{21} \cdot V_{kp} \cdot P_2 \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_2 - P_{21}}{B \cdot P_2 - P_{21}} - \mu_{n2} \cdot f_{n2} \cdot V_{kp} \cdot P_{21} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{21} - P_{n2}}{B \cdot P_{21} - P_{n2}} - \\ & - \mu_{l2} \cdot f_{l2} \cdot V_{kp} \cdot P_{21} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{21} - P_{l2}}{B \cdot P_{21} - P_{l2}} - \frac{V_{21}}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_{21}}{dt} = 0; \\ & \mu_{n1} \cdot f_{n1} \cdot V_{kp} \cdot P_2 \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_2 - P_{n1}}{B \cdot P_2 - P_{n1}} - \frac{V_{n1}}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_{n1}}{dt} = 0; \\ & \mu_{l1} \cdot f_{l1} \cdot V_{kp} \cdot P_2 \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_2 - P_{l1}}{B \cdot P_2 - P_{l1}} - \frac{V_{l1}}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_{l1}}{dt} = 0; \\ & \mu_{n2} \cdot f_{n2} \cdot V_{kp} \cdot P_{21} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{21} - P_{n2}}{B \cdot P_{21} - P_{n2}} - \frac{V_{n2}}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_{n2}}{dt} = 0; \\ & \mu_{l2} \cdot f_{l2} \cdot V_{kp} \cdot P_{21} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{21} - P_{l2}}{B \cdot P_{21} - P_{l2}} - \frac{V_{l2}}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_{l2}}{dt} = 0. \end{aligned} \right. \quad (15)$$

– спорожнення:

$$\left\{ \begin{aligned} & -\mu_2 \cdot f_2 \cdot V_{kp} \cdot P_2 \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_2 - P_a}{B \cdot P_2 - P_a} + \mu_{n1} \cdot f_{n1} \cdot V_{kp} \cdot P_{n1} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{n1} - P_2}{B \cdot P_{n1} - P_2} + \\ & + \mu_{l1} \cdot f_{l1} \cdot V_{kp} \cdot P_{l1} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{l1} - P_2}{B \cdot P_{l1} - P_2} + \mu_{21} \cdot f_{21} \cdot V_{kp} \cdot P_{21} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{21} - P_2}{B \cdot P_{21} - P_2} - \frac{V_2}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_2}{dt} = 0; \\ & -\mu_{21} \cdot f_{21} \cdot V_{kp} \cdot P_{21} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{21} - P_2}{B \cdot P_{21} - P_2} + \mu_{n2} \cdot f_{n2} \cdot V_{kp} \cdot P_{n2} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{n2} - P_{21}}{B \cdot P_{n2} - P_{21}} - \\ & + \mu_{l2} \cdot f_{l2} \cdot V_{kp} \cdot P_{l2} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{l2} - P_{21}}{B \cdot P_{l2} - P_{21}} - \frac{V_{21}}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_{21}}{dt} = 0; \\ & -\mu_{n1} \cdot f_{n1} \cdot V_{kp} \cdot P_{n1} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{n1} - P_2}{B \cdot P_{n1} - P_2} - \frac{V_{n1}}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_{n1}}{dt} = 0; \\ & -\mu_{l1} \cdot f_{l1} \cdot V_{kp} \cdot P_{l1} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{l1} - P_2}{B \cdot P_{l1} - P_2} - \frac{V_{l1}}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_{l1}}{dt} = 0; \\ & -\mu_{n2} \cdot f_{n2} \cdot V_{kp} \cdot P_{n2} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{n2} - P_{21}}{B \cdot P_{n2} - P_{21}} - \frac{V_{n2}}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_{n2}}{dt} = 0; \\ & -\mu_{l2} \cdot f_{l2} \cdot V_{kp} \cdot P_{l2} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot \frac{P_{l2} - P_{21}}{B \cdot P_{l2} - P_{21}} - \frac{V_{l2}}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dP_{l2}}{dt} = 0. \end{aligned} \right. \quad (16)$$



В результаті розрахунків одержані криві зміни тиску у ємкостях ПГП як при загальмуванні, так і розгальмуванні (рис. 3, 4). Результати розрахунків часу наповнення та спорожнення ГК наведено в табл. 1.

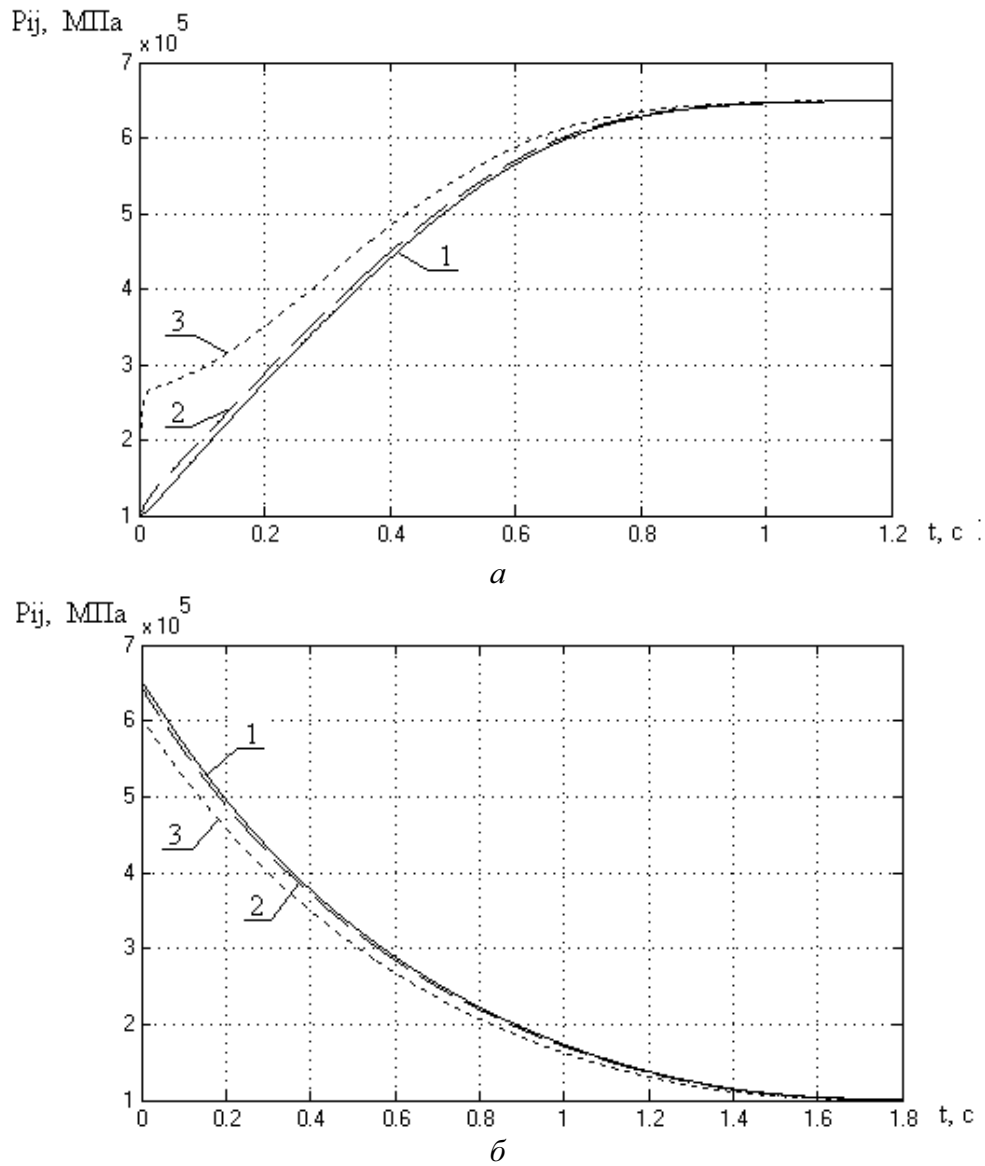


Рисунок 3 – Криві зміни тиску у ємкостях першого контуру ПГП  
 1 – ГК; 2 – з'єднувальні трубопроводи; 3 – верхня секція гальмівного крана;  
 а – наповнення; б – спорожнення.

Таблиця 1 – Результати розрахунків часу наповнення та спорожнення ГК

ГК	Час наповнення, с (підвищення тиску до 75% від $P_{max}$ )	Час спорожнення, с (зниження тиску до 10% від $P_{max}$ )
Передня вісь	0,49	1,09
Середня вісь	0,535	1,14
Задня вісь	0,51	1,1

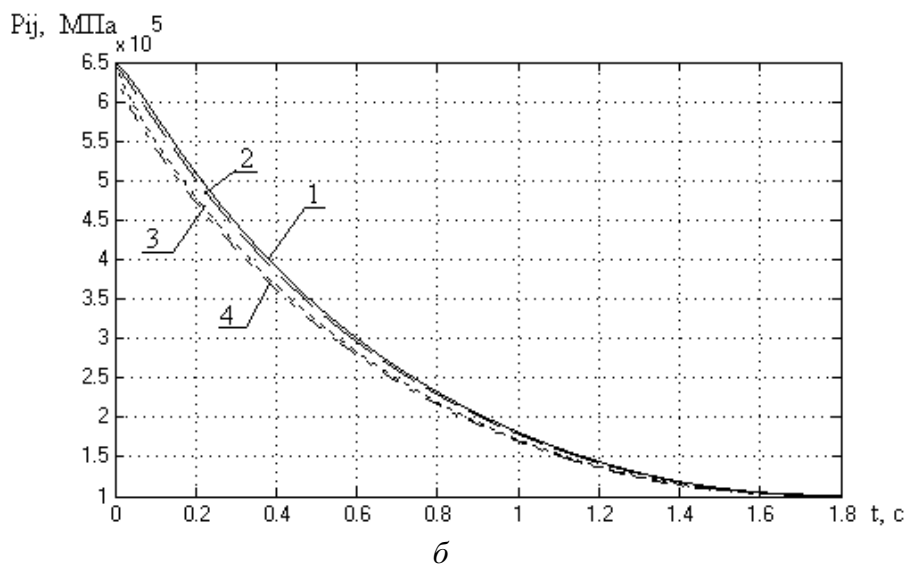
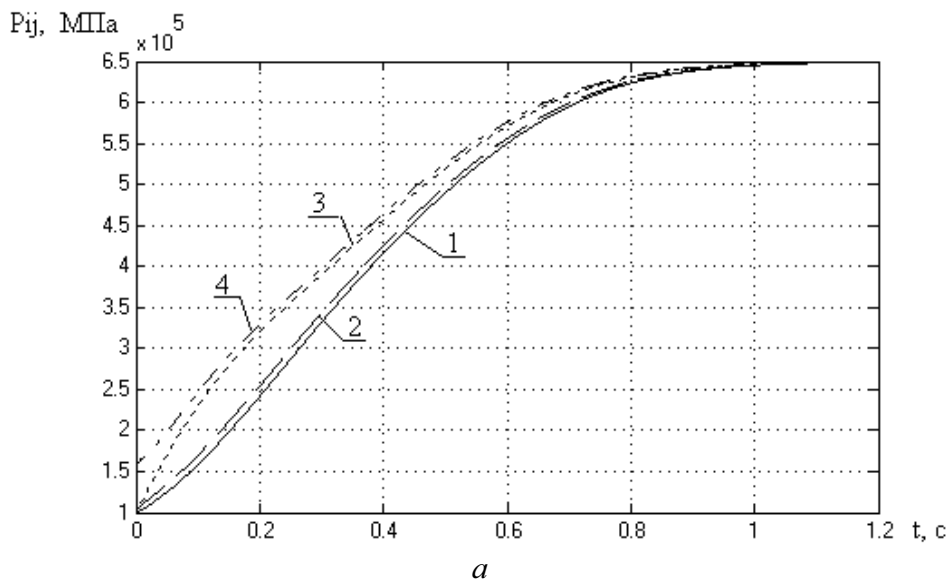


Рисунок 4 – Криві зміни тиску у ємкостях другого контуру ПГП  
 1 – ГК середнього моста; 2 – з'єднувальні трубопроводи; 3 – ГК переднього моста;  
 4 – нижня секція гальмівного крана; а – наповнення; б – спорожнення.

За результатами розрахунків встановлено, що час спрацювання ПГП складає 0,535 с, час розгальмовування 1,14 с. ПГП автомобіля КрАЗ-6510 відповідає діючим стандартам.

Для моделювання процесу гальмування автомобіля КрАЗ-6510 створена програмна реалізація, що розроблена в системі Matlab за допомогою підсистеми моделювання динамічних процесів Simulink. Результати моделювання процесу гальмування наведені в табл. 2.

В результаті моделювання було встановлено, що блокування коліс відбувається при екстремому гальмуванні на сухому асфальті та снігу і службовому на снігу. При цьому максимальна гальмівна ефективність спостерігається при екстремому гальмуванні.

Підвищення керованості та стійкості спостерігається при переривчастому і ступінчастому гальмуванні зі втратою при цьому гальмівної ефективності. Зміна параметрів при переривчастому гальмуванні на сухому асфальті наведена на рис. 5.

Таблиця 2 – Результати моделювання процесу гальмування

Умови експлуатації	Досліджуваний спосіб гальмування при початковій швидкості гальмування							
	Службове (експоненціальний закон натиснення на педаль гальма, максимальне уповільнення спостерігається через 3 с.)				Екстрене (лінійний закон натиснення на педаль гальма, максимальне уповільнення спостерігається через 1,5 с.)			
	40 км/год		60 км/год		40 км/год		60 км/год	
	S*, м	t*, с	S*, м	t*, с	S*, м	t*, с	S*, м	t*, с
	Асфальт сухий	29,0	3,44	50,4	4,23	21,4	2,69	39,9
Сніг	68,7	10,87	153,8	16,54	66,4	10,67	151,1	16,38
	Переривчасте				Ступінчасте			
Асфальт сухий	31,5	3,70	52,7	5,69	21,5	2,70	41,6	3,68
Сніг	77,3	12,32	164,1	17,46	68,1	10,82	153,3	16,51

де S\* – зупинний шлях, м;

t\* – час, за який автотранспортний засіб пройшов зупинний шлях, с.

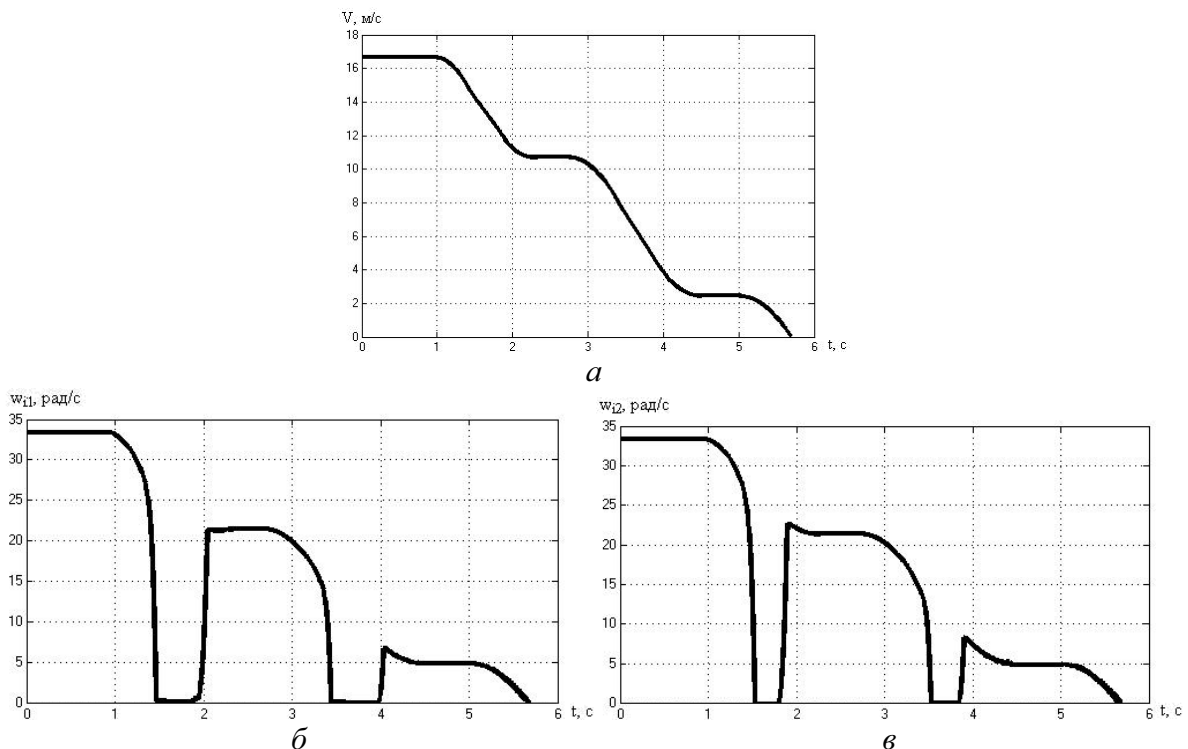


Рисунок 5 – Зміна параметрів при переривчастому гальмуванні на сухому асфальті: а – швидкість автомобіля; б – кутова швидкість передніх коліс; в – кутова швидкість коліс заднього моста.

**Висновки.** В разі відсутності ЗСАКГ на автотранспортному засобі добитися водієві одночасного збереження гальмівної ефективності, керованості і стійкості не представляється можливим. При блокуванні коліс спостерігається не значне зменшення гальмівної ефективності зі втратою при цьому керованості і стійкості. При ступінчастому та переривчастому гальмуванні спостерігається збереження керованості і стійкості при незначній втраті гальмівної ефективності.

**Список літератури:** 1. Григорян В.Г. Исследование динамики торможения трехосного грузового автомобиля: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.05.03 “Автомобили и тракторы” / В.Г. Григорян – М., 1978. – 16 с. 2. Цитович И.С. Динамика автомобиля / И.С. Цитович, В.Б. Альгин. – Минск: “Наука и техника”, 1981. – 191 с. 3. Подригало М.А. Устойчивость колесных машин при торможении / Подригало М.А., Волков В.П., Курчатый В.И. – Харьков: Изд-во ХНАДУ, 1999. – 93 с. 4. Устойчивость колесных машин против заноса в процессе торможения и пути ее повышения / [Подригало М.А., Волков В.П., Павленко В.А. и др.]; под ред. М.А. Подригало. – Харьков: Изд-во ХНАДУ, 2006. – 377 с. 5. Фрумкин А.К. Рабочие процессы и расчеты автомобиля. Тормозное управление: учебн. [для студ. высш. учебн. зав.] / Аркадий Константинович Фрумкин. – М., 1979. – 73 с. 6. Петров М.А. Работа автомобильного колеса в тормозном режиме: учебн. [для студ. высш. учебн. зав.] / Михаил Александрович Петров. – Омск: Западносибирское книжное издательство, 1973. – 224 с. 7. Розанов В.Г. Торможение автомобиля и автопоезда. Элементы теории торможения, методы оценки тормозных свойств, пути совершенствования тормозных систем / В.Г. Розанов – М.: Машиностроение, 1964. – 243 с. 8. Динамика автомобиля / [Подригало М.А., Волков В.П., Бобошко А.А. [и др.]. – Харьков: ХНАДУ, 2008 – 452 с. 9. Волков В.П. Оценка курсовой устойчивости грузовых автомобилей в тяговом и тормозном режимах движения / В.П. Волков, М.А. Подригало, М.Б. Корсун [и др.] // Вісник Сідноукраїнського національного університету. – 2008. – № 22. – С. 122 – 126. 10. Бондаренко А.І. Удосконалення процесів модуляції тиску в пневматичному гальмівному приводі автомобілів: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.02 “Автомобілі та трактори” / Бондаренко Анатолій Ігорович. – Харьков, 2010. – 203с.

Надійшла до редколегії 24.04.2013

УДК 629.4-592

**Дослідження процесу гальмування транспортних засобів з пневматичним гальмівним приводом / А. І. Бондаренко, Хассан Аль Ражаб // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування, 2013. – № 29 (1002). – С. 16–27. – Бібліогр.: 10 назв.**

Проведен анализ основных способов торможения автотранспортных средств, составлена математическая модель пневматического тормозного привода автомобиля КрАЗ-6510, смоделировано служебное и экстренное торможения данного автомобиля, исследованы возможности повышения тормозной эффективности, управляемости и устойчивости грузовых автомобилей в случае отсутствия замкнутых систем автоматического управления торможением.

**Ключевые слова:** динамика, процесс торможения, тормозная эффективность, управляемость, устойчивость.

The analysis of basic methods of braking of vehicles is conducted, the mathematical model of pneumatic brake drive of car of KrAZ-6510 is made, the official and urgent braking of this car is modelled, possibilities of increase of brake efficiency, to dirigibility and stability of trucks in the case of absence of the closed systems of automatic control braking are conducted.

**Keywords:** dynamics, braking process, brake efficiency, dirigibility, stability.