

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Крамський Олександр Володимирович



УДК 629.33+621.8.033

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ДИНАМІКИ
ПНЕВМОАПАРATІВ ТА ПНЕВМАТИЧНОГО ГАЛЬMІВНОГО
ПРИВОДУ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

Спеціальність 05.22.02 – автомобілі та трактори

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2006

Дисертацію є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук,
професор **Клименко Валерій Іванович**,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри автомобілів.

Офіційні опоненти:
доктор технічних наук,
професор **Волков Володимир Петрович**,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри технічної експлуатації та сервісу автомобілів;

кандидат технічних наук,
доцент **Мандрика Володимир Ростиславович**,
Національний технічний університет "ХПІ", доцент кафедри автомобіле- та тракторобудування.

Провідна організація: Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України (відділ поршневих енергоустановок), м. Харків.

Захист відбудеться "31" січня 2007 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вчені ради Д 64.059.02 при Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою:
61002, м. Харків, вул. Петровського, 25.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за адресою:
61002, м. Харків, вул. Петровського, 25.

Автореферат розісланий "26" грудня 2006 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вчені ради

Наглюк І.С.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Вступ. Динаміка і якість гальмування є одними із найважливіших конструктивних та експлуатаційних властивостей автомобіля. Широке впровадження електронних систем керування та постійне вдосконалення конструкції пневмоапаратів приводу викликає необхідність в розробці і вдосконаленні методів розрахунку перехідних процесів, що протикають в приводі при гальмуванні. Підвищення інтересу до даної проблеми обумовлено тим, що раніше моделювання перехідних процесів на етапі проектування апарату і приводу було неможливе без проведення додаткових експериментальних досліджень. І лише поява сучасних методів газової динаміки (наприклад, схема С.К. Годунова та її аналоги, класи TVD і ENO схем та ін.) в суккупності з підвищеннем швидкодії комп'ютерів інтенсифікувала дослідження в області динаміки пневматичного гальмівного приводу (ПГП) автомобіля.

Актуальність теми. На сучасному етапі автомобілебудування вимоги к гальмівним системам автотранспортних засобів (АТЗ) постійно підвищуються. Це находить відображення в стандартах та інших державних і міжнародних документах, які рекомендують для різних категорій АТЗ показники ефективності гальмування.

Традиційні методи, що використовуються для розрахунку динамічної характеристики ПГП, не дозволяють на етапі проектування здійснювати прогнозування перехідних процесів без проведення додаткових експериментальних досліджень. Ефективне використовування числових методів, заснованих на просторовому моделюванні руху стислого повітря в розрахункових порожнинах, а також вдосконалення відомих розрахункових залежностей спрятиме підвищенню якості проектування автомобільних пневматичних гальмівних приводів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика досліджень є частиною наукових робіт, які виконувалися відповідно з Постановою Національної Ради з питань безпечної життєдіяльності населення №3 від 25 грудня 1997 р. „Про відповідність вимогам охорони праці машин, транспортних засобів, обладнання, які виготовляються в Україні”, а також відповідно з планами науково-дослідницьких робіт кафедри автомобілів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету по проблемі „Безпека дорожнього руху” та комплексними темами „Розв'язання зв'язаних задач газової та електродинаміки у електропневматичних апаратах машинобудування” (ДР №0103U001442) та „Розробка програмного комплексу для розрахунку нестационарних в'язких течій газу на паралельних системах” (ДР №0105U002170). Роль автора у виконанні цих науково-дослідницьких робіт – розробка та реалізація методів для проектного розрахунку апаратів ПГП АТЗ в рамках моделей з зосередженими та розподіленими параметрами, розробка програмного комплексу для моделювання нестационарних просторових течій та пакету програм для дослідження пневматичних систем комбінованим методом, виконання експериментальних досліджень типових ДС-ланок ПГП автомобіля.

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є вдосконалення методів розрахунку динаміки пневмоапаратів і ПГП автомобіля на основі фізичного та математичного моделювання перехідних процесів.

У зв'язку з тим, що перехідні процеси, що протікають в ПГП АТЗ, уявляють собою складний об'єкт, у якому зосереджено багато завдань фізики та математики, основними задачами є:

- розробка та вдосконалення методів математичного моделювання перехідних процесів в пневмоапаратах і ПГП автомобіля з урахуванням специфіки їх роботи;
- розробка програмного комплексу для математичного моделювання тривимірних нестационарних течій в'язкого газу в пневмоапаратах ПГП АТЗ та синтезу перехідних характеристик привода в цілому;
- виконання (на основі розроблених методів) теоретичних досліджень динаміки гальмівного пневмоприводу автомобіля КрАЗ-6510;
- виконання розрахунку динаміки ПГП автомобіля КрАЗ-6510 найбільш широко розповсюдженими методами – Є.В. Герц та М.Ф. Метлюка;
- розробка комплексу програм для моделювання динаміки, як окремих гілок приводу, так і його самого в цілому;
- виконання експериментальних досліджень динаміки типових ДС-ланок ПГП автомобіля з метою перевірки адекватності розроблених математичних моделей.

Об'єкт дослідження – процес течії стислого повітря в порожнинах пневмоапаратів та в ПГП АТЗ.

Предмет дослідження – методи проектного розрахунку динаміки ПГП та пневмоапаратів гальмівних систем АТЗ.

Методи дослідження. В процесі визначення стану питання і постановки задач досліджень використовувались методи збору, вибору та аналізу інформації. Для дослідження динаміки руху стислого повітря в порожнинах пневмоапаратів використовувались методи математичного та комп'ютерного моделювання, методи рішення звичайних диференційних рівнянь та диференційних рівнянь в часткових похідних (метод контрольного об'єму); при обробці результатів експериментальних досліджень – метод кореляційного аналізу.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- вперше запропоновано метод визначення коефіцієнту витрати повітря для пневмоапаратів гальмівної системи на основі просторового моделювання тривимірних течій стислого повітря в розрахункових порожнинах;
- вдосконалено відомий метод з зосередженими параметрами у частині визначення коефіцієнта витрати на основі чисельного моделювання та урахування зміни тиску вузлі і розповсюджено на пневматичні гальмівні приводи АТЗ;
- розроблена концепція, яка узагальнена на клас пневматичних систем гальмівного приводу АТЗ та яка розвиває ідеї створення системного підходу до проектуванню гальмівних систем автомобіля.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблені методи дозволяють здійснити моделювання перехідних процесів в ПГП АТЗ та в порожнинах пневмоапаратів приводу й підібрати такі параметри, при яких якість гальмування АТЗ буде найвищою.

Результати проведених досліджень впроваджені на Полтавському автоагрегатному заводі ВАТ "ПААЗ" та на Волчанському агрегатному заводі ВАТ "ВАЗ" і використовуються при проектуванні пневмоапаратів.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні та експериментальні результати досліджень, викладені в дисертації, виконані особисто автором і задекларовані у подальшому переліку.

У роботах, опублікованих в співавторстві, автору належать:

- метод розрахунку перехідних процесів у пневмоапаратах ПГП АТЗ на основі тривимірного моделювання течії газу [1,5,7];
- метод розрахунку динаміки гальмівного пневмоприводу автомобіля в цілому, так і окремих його гілок [2,3,4,6];
- розробка всіх теоретичних положень, що виносяться на захист [1-7];
- проведені експериментальні дослідження та оброблені результати [4].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи оприлюднено та схвалено на:

- міжнародній науково-технічній конференції «Автостроение-2001» (м. Харків, 2001 р.);
- міжнародній науково-технічній конференції «Автомобільний транспорт в ХХІ столітті» (м. Харків, 2003 р.);
- міжнародній науково-технічній конференції «Транспорт, екологія – устойчивое развитие» (м. Варна, 2004 р.);
- міжнародній науково-методичній конференції «Сучасні технології підготовки фахівців в умовах подальшого розвитку вищої освіти України» (м. Харків, 2005 р.);
- науково-технічних конференціях викладачів, співробітників та аспірантів ХНАДУ (2001 – 2006 р.).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи викладені у 7 статтях та тезисах докладів, у тому числі в спеціальних виданнях, що входять до переліку ВАК України, надруковано 7 статей, отримані 2 авторських свідоцтва.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг роботи складає 253 сторінки, у тому числі 82 рисунків на 35 сторінках, 5 таблиць на 3 сторінках, 4 додатків на 67 сторінках. Список використаних джерел складає 329 найменувань на 32 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі стисло розглянуто стан досліджень у даній проблемній області, обґрунтована актуальність теми, визначені мета та задачі дослідження, вказано на основні наукові результати, наведені відомості про публікації та апробацію основних положень, показана практична цінність одержаних результатів, а також кваліфікаційні ознаки дисертації.

У першому розділі виконано аналіз стану питання й визначені завдання, що підлягають розробці.

Літературний огляд складається з чотирьох частин. В першій частині приведені роботи, що визначають основні тенденції розвитку гальмівних систем АТЗ; в другій частині розглянуті основні допущення, що приймаються при моделюванні динаміки перехідних процесів у ДЄ-ланках; в третій частині представлена робота по моделюванню динаміки перехідних процесів на основі методів із зосередженими параметрами в пневматичних системах автомобіля і загального машинобудування; четверта частина присвячена роботам по моделюванню стаціонарних і нестаціонарних течій на основі рівнянь Ейлера та Нав'є-Стокса, як в автомобільних пневматичних системах, так і для вирішення аналогічних проблем у суміжних областях.

У дисертаційній роботі наголошується, що дослідженням динаміки ПГП присвячена велика кількість робіт, і що в цьому напрямі одержані чисельні результати як прикладного, так і фундаментального характеру. Значний внесок у вивчення перехідних процесів внесли наступні вчені: Метлюк М.Ф., Герц Є.В., Ідельчик І.Е., Погорелов В.І., Витков Г.А., Глікман Б.Ф., Рижих Л.О., Шипілін А.В., Гогрічані Г.В., Бартош П.Р., Беленький Ю.Б., Туренко А.М., Богомолов В.О., Казарінов В.М., Дольберг В.І., Курбатов О.В., Жестков В.В., Жестков В.О., Літке П.Е., Зелькін Г.Г., Альтшуль А.Д., Холзунов А.Г. та інші.

Аналіз наявної літератури показав, що зовсім інша ситуація в області моделювання перехідних процесів для знов створюваних гальмівних систем з електронним керуванням. До теперішнього часу недостатньо розглянути питання, пов'язані з визначенням параметрів пневмоапаратів на етапі проектування, об'єктивного опису роботи розгалужених приводів, моделювання роботи пневматичного приводу в циклічному режимі при імпульсних керуючих сигналах з боку електроніки, а також спільної роботи приводу і гальмуючого автомобіля. Розвиток методів рішення просторових рівнянь руху стислого повітря сприяв появи числових методів загальної газодинаміки, що дозволяють виконувати проектні розрахунки пневмоапаратів.

На основі проведеного аналізу були сформульовані мета та задачі дослідження.

У другому розділі виконані теоретичні дослідження по моделюванню руху повітря в порожнінах пневмоапаратів гальмівного приводу автомобіля. Розрахункова модель заснована на диференціальних рівняннях Ейлера та Нав'є-Стокса, для вирішення яких застосована різницева схема наступного вигляду

$$\begin{aligned} Q_{i,j,k}^0 &= Q_{i,j,k}^n, \\ Q_{i,j,k}^m &= Q_{i,j,k}^n + \alpha_m \Delta \tau \left[R(Q_{i,j,k}^m) - \frac{(1+\theta)(Q_{i,j,k}^m - Q_{i,j,k}^n) - \theta(Q_{i,j,k}^n - Q_{i,j,k}^{n-1})}{\Delta t} \right], \quad (1) \\ Q_{i,j,k}^0 &= Q_{i,j,k}^m, \end{aligned}$$

де m - індекс, що визначає поточний крок багатокрокової схеми Рунге-Кутта; $m = 1, N$; N - кількість кроків по багатокроковій схемі. В дисертаційній роботі кількість кроків обмежена $N_{\max} = 5$; $R(Q_{i,j,k}^m)$ - вектор невязки; Δt - фізичний крок за часом, с; $\Delta \tau$ - псевдокрок за часом, с; α_m - коефіцієнти схеми Рунге-Кутта.

Побудова сіткової моделі здійснюється на основі алгебраїчних відображень для кожного розрахункового блоку. Остаточним варіантом є неструктурена сіткова модель, що утворена з окремих блоків. Завдання граничних умов здійснюється на основі відомої канальної постановки. Вихідчи з результатів моделювання просторових течій стислого повітря в порожнінах апаратів, визначається коефіцієнт витрати.

У рамках вдосконаленого розрахункового методу ПГП і окремих його гілок були визначені залежності, що дозволяють описувати динаміку зміни тиску в кожному розрахунковому вузлі при змінному законі тиску і температури на вході та виході з апарату (рис. 1).

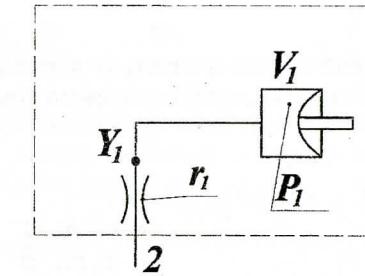


Рис. 1. ДЄ-ланка типу гальмова камера

У режимі наповнення маємо наступний вираз

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{1}{V_1} \left(k \cdot R \left(T_2 \cdot G_2 + \frac{dT_2}{dt} \int_0^t G_2 dt \right) - \frac{R^2}{c_V} T_2 \frac{d(\ln p_2)}{dt} \int_0^t G_2 dt \right) - k \cdot p_1 \frac{d(\ln V_1)}{dt}, \quad (2)$$

і спорожнення

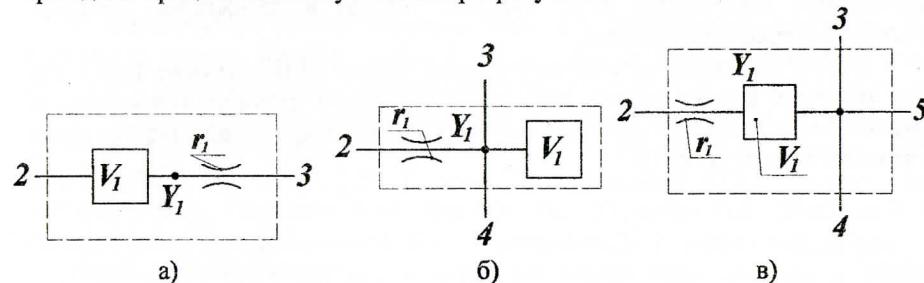
$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{R \cdot k \left(\frac{p_1 V_1}{RT_1} \frac{dT_1}{dt} + T_1 \frac{dm_1}{dt} \right) + k \cdot p_1 \frac{dV_1}{dt}}{(k-2)V_1}, \quad (3)$$

де p_1 , T_1 , V_1 - тиск, температура і об'єм порожнини; p_2 , T_2 - тиск та температура газу, що поступає з магістралі; k - показник адіабати; G_2 - функція витрати; R - газова постійна.

У разі зміни температури при спорожненні по адіабатичному закону початкове рівняння має наступний вигляд

$$\frac{dp_1}{dt} = -\frac{R \cdot k \cdot T_1 \frac{dm_1}{dt} + k \cdot p_1 \frac{dV_1}{dt}}{V_1}. \quad (4)$$

На основі аналізу різних конструкцій автомобільного пневмоприводу гальмівної системи були визначені елементи та окремі гілки (рис. 2), що найчастіше зустрічаються, і одержані залежності (5)-(7), що описують переходний процес в кожному елементі розрахункової схеми



Для рис. 2, а маємо

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{k \cdot R \cdot T_2 \cdot G_2 - \frac{R^2}{c_V} T_2 \frac{d(\ln p_2)}{dt} \int_0^t G_2 dt}{V_1} + \frac{R \cdot k \left(\frac{p_1}{RT_1} \frac{dT_1}{dt} + \frac{T_1}{V_1} \frac{dm_1}{dt} \right) - k \cdot p_1 \frac{d(\ln V_1)}{dt}}{k-2}. \quad (5)$$

Для схеми рис.2, б

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{k \cdot R \cdot T_2 \cdot G_2 - \frac{R^2}{c_V} T_2 \frac{d(\ln p_2)}{dt} \int_0^t G_2 dt}{V_1} - k \cdot p_1 \frac{d(\ln V_1)}{dt} + \frac{R \cdot k \left[2 \frac{p_1}{RT_1} \frac{dT_1}{dt} + \frac{T_1}{V_1} \left(\frac{dm_3}{dt} + \frac{dm_4}{dt} \right) \right]}{k-2}. \quad (6)$$

Для схеми рис.2, в

$$\begin{aligned} \frac{dp_1}{dt} = & \frac{k \cdot R \cdot T_2 \cdot G_2 - \frac{R^2}{c_V} T_2 \frac{d(\ln p_2)}{dt} \int_0^t G_2 dt}{V_1} - k \cdot p_1 \frac{d(\ln V_1)}{dt} + \\ & + \frac{R \cdot k \left[3 \frac{p_1}{RT_1} \frac{dT_1}{dt} + \frac{T_1}{V_1} \left(\frac{dm_3}{dt} + \frac{dm_4}{dt} + \frac{dm_5}{dt} \right) \right]}{k-2}. \end{aligned} \quad (7)$$

На основі розглянутих елементів складені математичні моделі для типових гілок пневмоприводу АТЗ

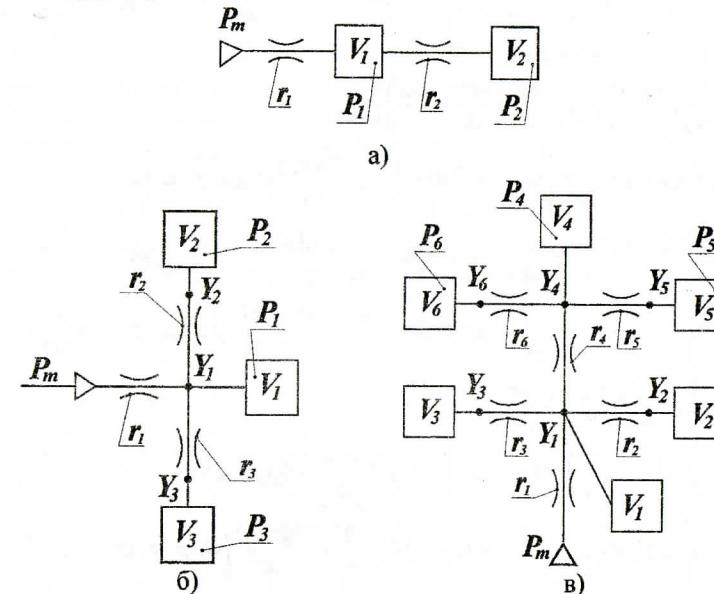


Рис. 3. Типові гілки пневмоприводу автомобіля: а) дві послідовно з'єднані ДС-ланки; б) контур, зв'язаний з мостом автомобіля; в) контур, зв'язаний з задньою теліжкою

Для схеми рис. 3, а, маємо

$$\begin{aligned} V_1 \frac{dp_1}{dt} = & \left[k \cdot R \left(T_m \cdot G_m(p_1, p_m) + \frac{dT_m}{dt} \int_0^t G_m(p_1, p_m) dt \right) - \frac{R^2}{c_V} T_m \frac{d(\ln p_m)}{dt} \int_0^t G_m(p_1, p_m) dt \right] + \\ & + \frac{R \cdot k \left(\frac{p_1 V_1}{RT_1} \frac{dT_1}{dt} + T_1 \frac{dm_2}{dt} \right)}{k-2}; \\ V_2 \frac{dp_2}{dt} = & k \cdot R \left(T_m \cdot G_2(p_2, p_1) + \frac{dT_1}{dt} \int_0^t G_2(p_2, p_1) dt \right) - \frac{R^2}{c_V} T_1 \frac{d(\ln p_1)}{dt} \int_0^t G_2(p_2, p_1) dt - k \cdot p_2 \frac{dV_2}{dt}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для схеми рис. 3, б, маємо

$$\begin{cases} V_1 \frac{dp_1}{dt} = \frac{R \cdot k}{k-2} \left[2 \frac{P_1 V_1}{RT_1} \frac{dT_1}{dt} + T_1 \left(\frac{dm_2}{dt} + \frac{dm_3}{dt} \right) \right] + \\ + \left[k \cdot R \left(T_m \cdot G_m(p_1, p_m) + \frac{dT_m}{dt} \int_0^t G_m(p_1, p_m) dt \right) - \frac{R^2}{c_v} T_m \frac{d(\ln p_m)}{dt} \int_0^t G_m(p_1, p_m) dt \right]; \\ V_2 \frac{dp_2}{dt} = k \cdot R \left(T_1 \cdot G_1(p_2, p_1) + \frac{dT_1}{dt} \int_0^t G_1(p_2, p_1) dt \right) - \frac{R^2}{c_v} T_1 \frac{d(\ln p_1)}{dt} \int_0^t G_1(p_2, p_1) dt - k \cdot p_2 \frac{dV_2}{dt}; \\ V_3 \frac{dp_3}{dt} = k \cdot R \left(T_1 \cdot G_1(p_3, p_1) + \frac{dT_1}{dt} \int_0^t G_1(p_3, p_1) dt \right) - \frac{R^2}{c_v} T_1 \frac{d(\ln p_1)}{dt} \int_0^t G_1(p_3, p_1) dt - k \cdot p_3 \frac{dV_3}{dt}. \end{cases} \quad (9)$$

Для схеми рис. 3, в, маємо

$$\begin{cases} V_1 \frac{dp_1}{dt} = \frac{R \cdot k}{k-2} \left[3 \frac{P_1 V_1}{RT_1} \frac{dT_1}{dt} + T_1 \left(\frac{dm_2}{dt} + \frac{dm_3}{dt} + \frac{dm_4}{dt} \right) \right] + \\ + \left[k \cdot R \left(T_m \cdot G_1(p_1, p_m) + \frac{dT_m}{dt} \int_0^t G_1(p_1, p_m) dt \right) - \frac{R^2}{c_v} T_m \frac{d(\ln p_m)}{dt} \int_0^t G_1(p_1, p_m) dt \right]; \\ V_2 \frac{dp_2}{dt} = k \cdot R \left(T_1 \cdot G_2(p_2, p_1) + \frac{dT_1}{dt} \int_0^t G_2(p_2, p_1) dt \right) - \frac{R^2}{c_v} T_1 \frac{d(\ln p_1)}{dt} \int_0^t G_2(p_2, p_1) dt - k \cdot p_2 \frac{dV_2}{dt}; \\ V_3 \frac{dp_3}{dt} = k \cdot R \left(T_1 \cdot G_3(p_3, p_1) + \frac{dT_1}{dt} \int_0^t G_3(p_3, p_1) dt \right) - \frac{R^2}{c_v} T_1 \frac{d(\ln p_1)}{dt} \int_0^t G_3(p_3, p_1) dt - k \cdot p_3 \frac{dV_3}{dt}; \\ V_4 \frac{dp_4}{dt} = \frac{R \cdot k}{k-2} \left[2 \frac{P_4 V_4}{RT_4} \frac{dT_4}{dt} + T_4 \left(\frac{dm_5}{dt} + \frac{dm_6}{dt} \right) \right] + \\ + k \cdot R \left(T_1 \cdot G_4(p_4, p_1) + \frac{dT_1}{dt} \int_0^t G_4(p_4, p_1) dt \right) - \frac{R^2}{c_v} T_1 \frac{d(\ln p_1)}{dt} \int_0^t G_4(p_4, p_1) dt; \\ V_5 \frac{dp_5}{dt} = k \cdot R \left(T_4 \cdot G_5(p_5, p_4) + \frac{dT_4}{dt} \int_0^t G_5(p_5, p_4) dt \right) - \frac{R^2}{c_v} T_4 \frac{d(\ln p_4)}{dt} \int_0^t G_5(p_5, p_4) dt - k \cdot p_5 \frac{dV_5}{dt}; \\ V_6 \frac{dp_6}{dt} = k \cdot R \left(T_4 \cdot G_6(p_6, p_4) + \frac{dT_4}{dt} \int_0^t G_6(p_6, p_4) dt \right) - \frac{R^2}{c_v} T_4 \frac{d(\ln p_4)}{dt} \int_0^t G_6(p_6, p_4) dt - k \cdot p_6 \frac{dV_6}{dt}. \end{cases} \quad (10)$$

Для моделювання роботи виконуючих апаратів автомобільного пневмоприводу в циклічному режимі при керуючої дії з боку електроніки, одержані наступні залежності

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{Y}{V_1} \left(k \cdot R \cdot T_2 \cdot G_2 - \frac{R^2}{c_v} T_2 \frac{d(\ln p_2)}{dt} \int_0^t G_2 dt \right) - NOT(Y) \frac{k \cdot R \cdot T_1 \cdot G_1}{V_1} - k \cdot p_1 \frac{d(\ln V_1)}{dt}, \quad (11)$$

$$\frac{dp_1}{dt} = Y \left[\frac{k \cdot R \cdot T_2 \cdot G_2 - \frac{R^2}{c_v} T_2 \frac{d(\ln p_2)}{dt} \int_0^t G_2 dt}{V_1} - \frac{k \cdot R \cdot T_1 \cdot G_3}{V_1} \right] + NOT(Y) \left[\frac{k \cdot R \cdot T_3 \cdot G_3 - \frac{R^2}{c_v} T_3 \frac{d(\ln p_3)}{dt} \int_0^t G_3 dt}{V_1} - \frac{k \cdot R \cdot T_1 \cdot G_2}{V_1} \right] - k \cdot p_1 \frac{d(\ln V_1)}{dt}. \quad (12)$$

Результатом проведених теоретичних досліджень є створення системи поглядів, узагальненої на клас пневматичних систем гальмівного приводу АТЗ і розвиваючої ідеї створення єдиного підходу до проектування гальмівної системи автомобіля.

У третьому розділі на основі розроблених методів, а також методів С.В. Герц і М.Ф. Метлюка, в рамках пропонованої концепції виконані теоретичні дослідження динаміки ПГП автомобіля КрАЗ-6510. Виконано тривимірне моделювання наповнення і спорожнення гальмівної камери тип 30 при ході штоку 35 мм з метою визначення її витратних характеристик.

Моделювання динаміки зміни тиску складалося з наступних етапів: розбиття приводу на окремі компоненти, характеристики яких можливо описати без застосування додаткових емпірических кореляцій, з урахуванням пропонованих математичних моделей (2)-(12); визначення витратних характеристик елементів; складання розрахункової схеми з розроблених бібліотечних модулів в пакеті MatLab 6.5/Simulink; аналіз результатів. Особливістю опису перехідних процесів у вузлі є облік непостійності тиску у вхідних та вихідних по відношенню до вузла магістралях.

Пневматичний гальмівний привід автомобіля КрАЗ-6510 можна представити у вигляді двох незалежних контурів (рис. 4), утворюючих систему апаратів, що описуються диференціальними рівняннями (2)-(7).

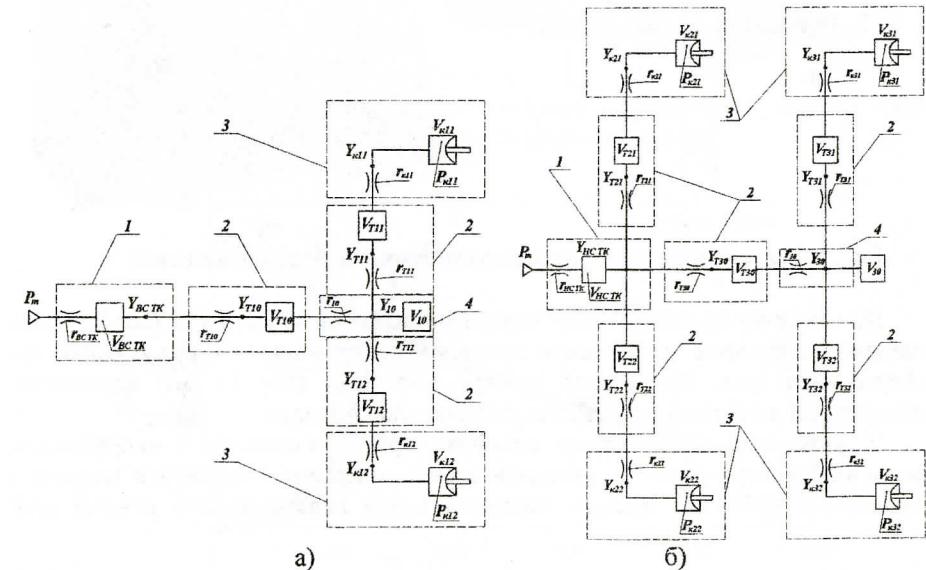


Рис. 4. Розрахункові схеми пневмоприводу КрАЗ-6510: а) контур, з'єднаний з нижньою секцією гальмівного крану; б) контур, з'єднаний з верхньою секцією гальмівного крану

На прикладі гальмівної камери типу 30 для КрАЗ (рис. 5) виконано тривимірне моделювання процесів наповнення і спорожнення стисливим повітрям робочої порожнини з метою визначення її витратних параметрів. При наповненні у якості граничних умов на вході задавалися параметри повного тиску й температури, що визначалися по параметрам в ресивері. На стінці і опорному диску гальмівної камери задавалася умова рівності нулю нормальної складової вектора швидкості потоку. При спорожненні при надзвукової течії додаткові граничні умови відсутні, а при дозвукової на межі задається статичний тиск. У якості початкових умов задані параметри стану стислого повітря в порожнині перед наповненням та спорожненням відповідно.

Відносний повний тиск на вході – 0,55 МПа.

Повна температура на вході – 291 К.

Відносний статичний тиск на виході – 0 МПа.

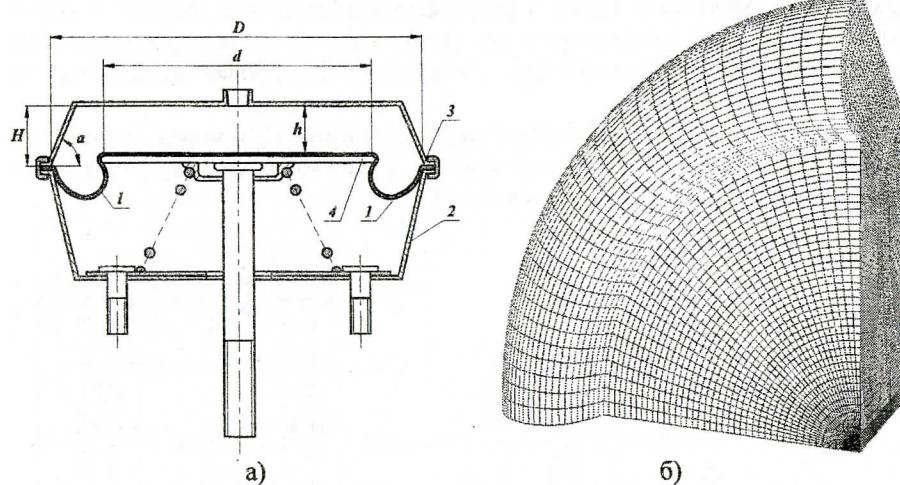


Рис. 5. Гальмівна камера: а) розрахункова схема; б) сіткова модель

При сталому трансзвуковому наповненні в порожнині утворюється струмінь повітря, що створює максимальне зусилля у центрі опорного диску. Потік, що сформувався (рис. 6), та шар повітря завтовшки біля 1,5 мм визначають максимальні динамічні зусилля, що діють на опорний диск.

У результаті моделювання визначені криві наповнення і спорожнення гальмівної камери (рис. 7), виходячи з яких, одержані коефіцієнти витрати з рівнянь (13)–(15): для процесу наповнення при надкритичному режимі течії повітря

$$\mu_n = 1.0432 \frac{V}{\Delta t \cdot p_m \cdot f \sqrt{RT_m}} (p_n - p_{n-1}), \quad (13)$$

при підкритичному режимі

$$\mu_n = 1.8898 \frac{V}{\Delta t \cdot f \sqrt{RT_m}} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{p_n}{p_m} \right)^{\frac{k-1}{k}}} - \sqrt{1 - \left(\frac{p_{n-1}}{p_m} \right)^{\frac{k-1}{k}}} \right), \quad (14)$$

при спорожненні гальмівної камери

$$\mu = 0.4891 \frac{V \cdot p_1^{2k}}{\Delta t \cdot f \sqrt{RT_m}} \left(\frac{1-k}{p_2^{2k}} - \frac{1-k}{p_1^{2k}} \right). \quad (15)$$



Рис. 6. Поле розподілення модуля вектора швидкості на момент часу 0,02061 с в процесі наповнення гальмівної камери

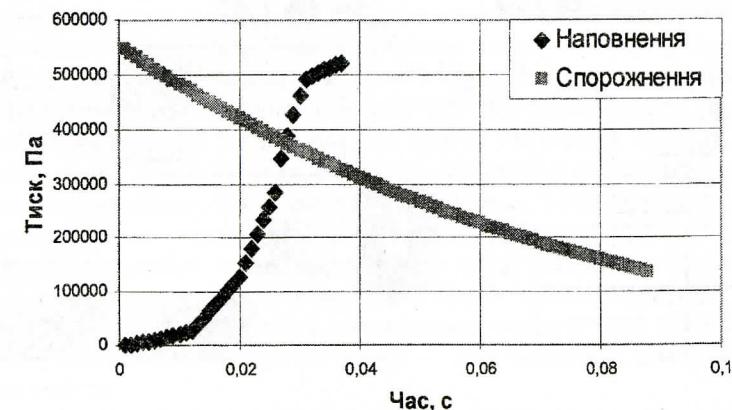
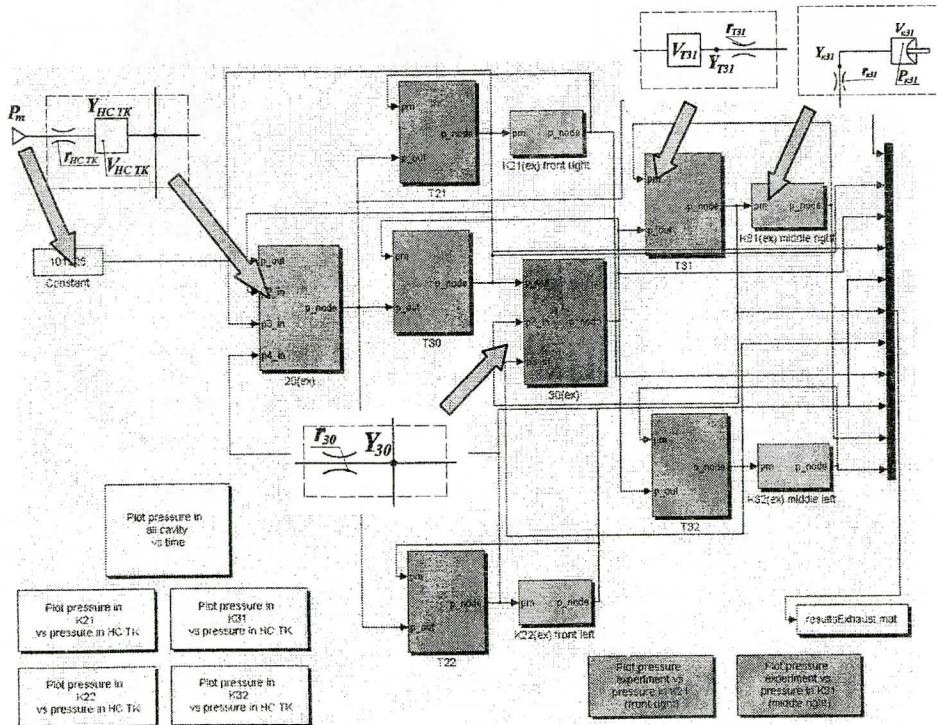


Рис. 7. Графіки залежності тиску від часу в гальмівній камері при наповненні та спорожненні

Відповідно до вимог, що пред'являються до визначення динамічної характеристики приводу, кінцевий час розрахунку відповідає моменту зміни тиску на 75% від робочого діапазону. При цьому, у контексті моделювання приводу, визначення перехідних процесів в гальмівній камері являлося допоміжною задачею.

Розрахункові схеми пневматичного приводу КрАЗ-6510 для всіх трьох способів однакові, математичні моделі складаються відповідно до принципу електропневмоаналогії. Коефіцієнти витрати для окремого вузла у всіх трьох випадках приймалися однаковими. Динаміка зміни тиску у вхідних магістралях вузла враховувалася введенням додаткового доданку: при наповненні $-\frac{R^2}{c_V} T_m \frac{d(\ln p_m)}{dt} \int_0^t G_m dt$ та $\frac{k}{k-2} \left(\frac{p_1 V_1}{T_1} \frac{dT_1}{dt} \right)$ при спорожненні. Програма та елементи

розрахункової схеми на прикладі контуру приводу, зв'язаного з нижньою секцією гальмівного крана, приведені на рис. 8.



КрАЗ-6510 по трьом методам та експериментальні данні представлені на рис. 10 (на прикладі середнього моста).

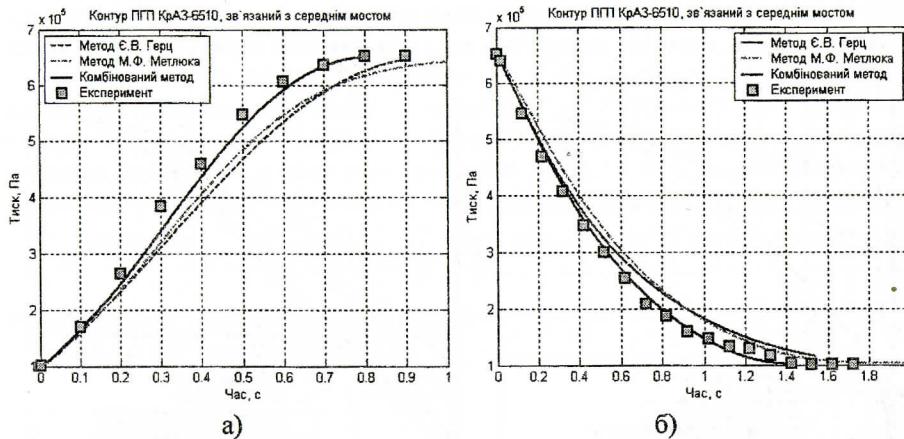


Рис. 10. Криві зміни тиску в контурі, пов'язаним з середнім мостом:
а) гальмування; б) розгальмування

Для кількісної оцінки отриманих результатів визначені та зведені у табл. 1 похибки в моделюванні роботи приводу. Відхилення від експерименту визначалося для моменту часу, що відповідає 75% зміні тиску від робочого діапазону. Отримані значення похибки свідчать про можливість використання запропонованого методу для прогнозування динаміки ПГП автомобіля.

Таблиця 1

Похибки розрахунку гальмівного приводу КрАЗ-6510

| Досліджуваний процес | Відносна похибка, % | | |
|-------------------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------------|
| | Метод М.Ф. Метлюка | Метод Є.В. Герц | Вдоскона- лений метод |
| Наповнення камери заднього моста | 1,39 | 12,94 | 3,47 |
| Спорожнення камери заднього моста | 19,31 | 35,75 | 7,20 |
| Наповнення камери переднього моста | 0,10 | 0,26 | 5,74 |
| Спорожнення камери переднього моста | 2,05 | 0,56 | 5,09 |
| Наповнення камери середнього моста | 11,46 | 14,81 | 4,39 |
| Спорожнення камери середнього моста | 15,72 | 12,46 | 4,23 |

Великі відхилення, отримані при розрахунку методом М.Ф. Метлюка, обумовлені тим, що параметри гіперболічної функції втрати обирались із умови збігу розрахованих та експериментальних даних при зміні тиску на 90% від робочого діапазону у відповідності з вимогами, що були на той час. Відхилення теоретичних результатів, отриманих методом Є.В. Герц, викликані тим, що розробка методу із початку виконувалася для пневматичних систем загального машинобудування та його застосування при розрахунку ПГП автомобіля може бути не завжди коректно. Між тим середня похибка при розрахунку динаміки приводу кожним з методів склала такі значення: 10,72% (Є.В. Герц), 8,34% (М.Ф. Метлюка) та 5,02% (вдосконалений метод).

Виконано цикл випробувань по динаміці наповнення і спорожнення ДС-ланок постійного та змінного об'ємів за допомогою вимірювального комплексу «ІК ІЭСА», що призначений для дослідження експлуатаційних властивостей автомобіля. Метою експериментальних досліджень була перевірка адекватності розроблених математичних моделей. У якості ДС-ланки використовувалася місткість об'ємом 1,026 літри, з трубопроводом, що підводить повітря, внутрішнім діаметром 12,5 мм, завдовжки 0,785 м. Експериментальний цикл, що складається з 5-ти повторень для місткості постійного об'єму, приведений на рис. 11. На основі виконаного аналізу експериментальних даних по дисперсії відтворності встановлено, що відносна похибка експерименту не перевищує 3,5 %.

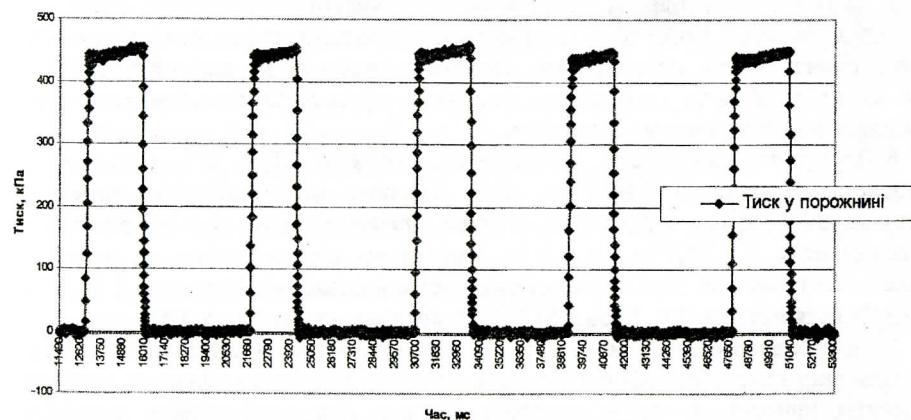


Рис. 11. Експериментальні цикли зміни тиску у порожнині

У результаті виконаних досліджень вдалось встановити, що розроблені методи моделювання динаміки пневмоапаратів та пневматичного гальмівного приводу дозволяють без використання додаткових емпірических даних прогнозувати їх характеристики.

ВИСНОВКИ

1. Виконаний аналіз літературних джерел, показав, що у публікаціях по проектуванню ПГП АТЗ відсутні роботи, які дозволяють прогнозувати динаміку приводу без застосування додаткових емпіричних кореляцій, що, у свою чергу, викликає необхідність у доопрацюванні та вдосконаленні існуючих розрахункових методів.

2. Виконане, на основі розробленого розрахункового методу, тривимірне моделювання перехідних процесів для гальмівної камери типу 30 при гальмуванні та розгальмуванні, дозволяє визначити її витратні характеристики, необхідні для моделювання ПГП АТЗ в цілому.

3. Отримані у результаті тривимірного моделювання перехідних процесів у гальмівній камері поля розподілення статичного тиску та модуля вектора швидкості потоку дозволяють стверджувати, що розподілення термодинамічних параметрів по об'єму незначне (відхилення середнього інтегрального значення статичного тиску від мінімального при наповненні не перевищує 4%) та застосування методу з зосередженими параметрами для прогнозування динамічних характеристик ПГП АТЗ є оправданим.

4. Вдоскональний розрахунковий метод з зосередженими параметрами у частині урахування зміни тиску та температури вузлах пневматичного приводу АТЗ, у комбінації з розробленим методом визначення витратних характеристик пневмоапаратів, дозволяє визначати динамічні характеристики, як окремих гілок ПГП, так і приводу в цілому, з похибкою що не перевищує 7,23%.

5. На основі розроблених методів виконані числові дослідження динаміки приводу автомобіля КрАЗ-6510. Порівняння результатів, отриманих теоретично та експериментально, показало, що похибка розрахунку не перевищує 7,20%. При цьому найбільша розбіжність виникає у процесі спорожнення контуру, з'язаного з заднім мостом автомобіля.

6. Порівняння результатів дослідження динаміки ПГП АТЗ, виконане з використанням методів Є.В. Герц, М.Ф. Метлюка та розробленого автором, показало, що вдоскональний метод дозволяє знизити максимальну розбіжність з експериментом від 35,75% до 7,20%. При цьому середнє значення похибки визначення тиску для динамічної характеристики приводу знижується з 10,72% та 8,34% (для методів Є.В. Герц та М.Ф. Метлюка відповідно) до 5,02%.

7. Розроблена методика моделювання динамічних характеристик ПГП АТЗ у програмному пакеті MatLab 6.5\Simulink у вигляді бібліотеки окремих типових елементів приводу, а також комплекс програм для моделювання динаміки перехідних процесів в окремих контурах ПГП автомобіля КрАЗ-6510, можуть бути використані при автоматизованому проектуванні ПГП АТЗ.

8. Виконані у роботі дослідження, що реалізовані у вигляді кінцевих методик, програмних модулів та алгоритмів роботи, впроваджені на Полтавському автоагрегатному заводі ВАТ "ПААЗ" та на Волчанському агрегатному заводі ВАТ "ВАЗ" та використовуються при проектуванні пневмоапаратів АТЗ і привода в цілому.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Туренко А.Н., Клименко В.И., Богомолов В.А., Крамской А.В., Ларин А.Н. Анализ методов расщепления при изучении нестационарных течений сжатого воздуха в пневматических системах автомобиля // Автомобильный транспорт. Сб. научн. тр. вып. 7-8. – Харьков: ХНАДУ. – 2001. – С. 119-121. (Дисертантом проведено аналіз застосування методів розщеплення для вирішення задач динаміки руху газу в порожнинах пневмоапаратів).

2. Туренко А.Н., Богомолов В.А., Кудрявцев И.Н., Крамской А.В., Пятак А.И., Пламмер М.С. Математическая модель пневматического цилиндра с двусторонним приводом // Автомобильный транспорт. Сб. научн. тр. вып. 10. – Харьков: ХНАДУ. – 2002. – С. 10-16. (Дисертантом розроблена математична модель та комп’ютерна програма для моделювання роботи пневматичного циліндра двохсторонньої дії).

3. Богомолов В.А., Кудрявцев И.Н., Крамской А.В., Пятак А.И., Бондаренко С.И., Муринец-Маркевич Б.Н., Пламмер М.С. Эффективный КПД пневматического двигателя для автомобильного транспорта // Проблемы машиностроения. – Харьков. – 2004. – Т.7, №2. – С. 64-72. (Дисертантом були розроблені залежності та математична модель щодо визначення ефективності пневмодвигуна).

4. Туренко А.Н., Богомолов В.А., Клименко В.И., Крамской А.В. Математическое моделирование динамического процесса наполнения типовых звеньев пневматического привода автотранспортных средств // Автошляховик України.– Київ. – 2004. – №5. – С.22-25. (Дисертантом були розроблені математичні моделі та комп’ютерна програма для моделювання перехідних процесів в окремих гілках пневматичного гальмівного приводу автотранспортних засобів, були проведені експериментальні дослідження).

5. Кудрявцев И.Н., Крамской А.В., Пятак А.И. Применение метода конечных объемов для решения задач внутренней газодинамики // Механика та машинобудування. – Харків. – 2005. – № 1. – С. 34-59. (Дисертантом було запропоновано використання методу С.К. Годунова для вирішення задач руху газу в проточних та тупикових порожнинах на прикладі його тривимірного руху в трубі, була розроблена комп’ютерна програма).

6. Богомолов В.А., Крамской А.В., Кудрявцев И.Н., Пятак А.И., Бондаренко С.И., Муринец-Маркевич Б.Н., Пламмер М.С. К вопросу о вычислении показателя политропы для поршневого пневматического двигателя // Вестник ХНАДУ и Северо-Восточного Научного Центра Транспортной Академии Украины. Сб. научн. тр. вып. 21. – Харьков: ХНАДУ. – 2003. – С.14-17. (Дисертантом була запропонована математична модель для визначення температури газу у процесі впуску стислого повітря до виконуючого органу).

7. Крамской А.В., Кудрявцев И.Н., Пятак А.И. Применение в учебном процессе современных методов компьютерного моделирования // Материалы міжнародної науково-методичної конференції «Сучасні технології підготовки фахівців в умовах подальшого розвитку вищої освіти України». – Харків:

ХНАДУ. – С. 27-28. (Дисертантом було запропоновано використання в учебовому процесі розробленого програмного комплексу для моделювання тривимірних течій стислого повітря в порожнинах пневмоапаратів).

АНОТАЦІЯ

Крамський О.В. Вдосконалення методів розрахунку динаміки пневмоапаратів та пневматичного гальмівного приводу автотранспортних засобів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.02 – автомобілі та трактори. – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, 2006.

Дисертація присвячена вдосконаленню методу розрахунку переходних процесів в пневматичному гальмівному приводі автомобіля, розробці методу розрахунку характеристик витрату повітря пневмоапаратів для подальшого використання при проектуванні приводу, створенню концепції, яка узагальнена на клас пневматичних систем гальмівного приводу автотранспортних засобів та розвиває ідеї створення системного підходу к проектуванню гальмівних систем автомобіля.

У дисертації запропоновано метод для визначення витратних характеристик пневмоапаратів на основі тривимірного моделювання стаціонарного і нестаціонарного перебігу стислого повітря. Розроблені математичні моделі типових вузлів та окремих гілок пневматичного гальмівного приводу. Отримані математичні моделі динаміки зміни тиску у апаратах електропневматичного приводу. Дані рекомендації щодо декомпозиції схем приводів для розрахунку в рамках існуючих та пропонованого методів.

Ключові слова: привод, автомобіль, процес, динамічна характеристика, коефіцієнт, метод кінцевих об'ємів.

АННОТАЦИЯ

Крамской А. В. Совершенствование методов расчёта динамики пневмоаппаратов и пневматического тормозного привода автотранспортных средств. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.02 – автомобили и тракторы. – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков, 2006.

Пневматический тормозной привод автомобиля на современном этапе проходит новый виток развития в виде повышения функциональности и безопасности и представляет собой, как правило, лишь исполнительную часть, а управляющая роль отводится электронике, что накладывает на прогнозируемость характеристик привода жёсткие требования. Разработка и эксплуатация антиблокировочных систем, систем стабилизации курсовой устойчивости, противобуксовых и прочих систем, рабочие циклы которых сравнимы по длительности с переходными процессами в пневматическом тормозном приводе, определяет требования, предъявляемые к точности и адекватности расчётных

методов моделирования переходных процессов в приводе. Таким образом, необходимость в быстром и качественном предсказании динамических характеристик, как всего привода, так и отдельных его ветвей является реалией проектировщиков.

Диссертация посвящена совершенствованию метода расчёта переходных процессов в пневматическом тормозном приводе автомобиля, разработке метода расчёта расходных характеристик пневмоаппаратов для дальнейшего использования при проектировании привода, созданию концепции, обобщённой на класс пневматических систем тормозного привода автотранспортных средств и развивающей идеи создания системного подхода к проектированию тормозных систем автомобиля. Цель исследования – совершенствование методов расчёта динамики пневмоаппаратов и пневматического тормозного привода автомобиля на основе физического и математического моделирования переходных процессов.

В работе предложен расчётный метод для определения расходных характеристик пневмоаппаратов на основе трёхмерного моделирования стационарных и нестационарных течений сжатого воздуха. Разработаны математические модели типовых узлов и отдельных ветвей пневматического тормозного привода. Даны рекомендации по декомпозиции схем приводов для расчёта в рамках существующих и предлагаемого методов.

На примере тормозной камеры тип 30 для КрАЗ-6510 выполнено трёхмерное моделирование процессов наполнения и опорожнения сжатым воздухом рабочей полости с целью определения её расходных параметров. При наполнении в качестве граничных условий на входе задавались параметры полного давления и температуры, определяемые по значениям в ресивере. На стенке и опорном диске тормозной камеры задавалось условие равенства нулю нормальной составляющей вектора скорости потока. При опорожнении при сверхзвуковом истечении дополнительные условия отсутствовали, а при дозвуковом на границе задавалось статическое давление. В качестве начальных условий заданы параметры состояния сжатого воздуха в полости перед наполнением и опорожнением соответственно.

Показано, что применение метода с сосредоточенными параметрами (для моделирования динамики пневматического привода) в совокупности с методом с распределёнными параметрами (для определения характеристик ДЕ-звеньев) позволяет без дополнительных эмпирических корреляций прогнозировать характеристики пневматической тормозной системы автомобиля с инженерной точностью.

Выполненные сравнительные исследования динамики пневматического тормозного привода КрАЗ-6510 по трём различным методам (предлагаемый, Е.В. Герц и Н.Ф. Метлюка) показали качественное сходство результатов расчёта и непротиворечивость полученных данных имеющимся результатам.

Сравнение результатов, полученных теоретически и экспериментально, показало, что погрешность разработанных моделей не превышает 7,20%. При этом наибольшее расхождение наблюдается в процессе опорожнения контура,

связанного с задним мостом автомобиля, на завершающей стадии опорожнения.

На основании выполненных исследований привода КрАЗ-6510 в рамках методов, разработанных Н.Ф. Метлюком и Е.В. Герц показано, что максимальное расхождение для данного случая с экспериментом составляет 19,31% и 35,75% соответственно. При этом наиболее точное совпадение результатов с погрешностью 0,10% показал метод, использующий гиперболическую функцию расхода, а среднее значение погрешности определения давления для динамической характеристики привода снижается с 10,72% и 8,34% (для методов Е.В. Герц и Н.Ф. Метлюка соответственно) до 5,02%.

На основе усовершенствованного комбинированного метода создана методика моделирования динамических характеристик пневматического тормозного привода автотранспортных средств, реализованная в пакете MatLab 6.5\Simulink в виде библиотеки отдельных типовых элементов привода, а также комплекс программ для моделирования переходных процессов в отдельных контурах привода КрАЗ-6510.

Ключевые слова: привод, автомобиль, процесс, динамическая характеристика, коэффициент, метод конечных объёмов.

ABSTRACT

Kramskoy A.V. The perfection of the methods of calculation dynamic of pneumatic valve and pneumatic brake drive of the vehicle. – Manuscript.

Thesis for the academic degree of Candidate of Engineering Sciences in speciality 05.22.02 – automobiles and tractors. – Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, 2006.

The thesis is dedicated to improvement of the method calculation transient processes in pneumatic brake drive car, development of the method calculation characteristic expense pneumatic valves for the further use when designing the drive; creation to concepts, generalized on class of the pneumatic systems of the brake drive of car and develop-sculpting ideas of the making the system approach to designing the brake systems of the car.

In dissertation there is a proposition method for determination of expense descriptions of pneumatic valves on the basis of three-dimensional design of steady and unsteady motion of the compressed air. Developed mathematical models of typical knots and separate branches of pneumatic brake drive. Got mathematical models of dynamics of change of pressure in the vehicles of electro-pneumatic drive. Are given recommendations of decompositions of the schemes drive for calculation within the framework of existing and proposed methods.

Key words: pneumatic brake drive, vehicle, process, dynamic performance, coefficient, method.

Підписано до друку 11.12.06

Формат 60x84 1/16. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.

Друк RISO. Умов. друк. арк. 0,9

Замовлення № 1075/06 Тираж 100 прим.

Видавництво ХНАДУ, 61002, м. Харків – МСП, вул. Петровського, 25

Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців, видавництв і розповсюджувачів видавничої продукції, серія ДК №897 від 17.04.2002 р.