

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ЗАЛОГІН МАКСИМ ЮРІЙОВИЧ



УДК 629.35.02.001.57

**ПОКРАЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ
ГІДРАВЛІЧНОГО МЕХАНІЗМУ ПЕРЕКИДАННЯ КАБІНИ
ЯК КОМПОНЕНТА СИСТЕМИ «ЛЮДИНА-МАШИНА»**

05.22.02 – автомобілі та трактори

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Шуклінов Сергій Миколайович,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, професор кафедри автомобілів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лебедєв Анатолій Тихонович,
Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка, завідувач кафедри тракторів і автомобілів;

кандидат технічних наук, доцент
Сергієнко Микола Єгорович,
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри автомобіле- і тракторобудування.

Захист відбудеться "14" червня 2016 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.059.02 у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: 61002, Україна м. Харків, вул. Петровського, 25.

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

Автореферат розіслано "13" травня 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



В. М. Павленко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми визначається необхідністю вирішення наукової проблеми зниження витрат енергії людини (оператора) при перекиданні кабіни транспортного засобу категорії *N*.

Тенденція до зниження витрат енергії під час керування різними механізмами сприяла зростанню масштабів застосування машин із гідравлічним приводом, що дозволило механізувати й автоматизувати різні технологічні та допоміжні процеси, а також покращити умови праці.

Виниклі проблеми, як на стадії проектування, так і під час експлуатації механізму перекидання кабіни, пов'язані з відсутністю теоретичних положень функціонування людини у разі керування процесом перекидання кабіни.

Вирішення цих проблем безпосередньо пов'язане з необхідністю вивчення і зниження динамічних навантажень приводу, скороченням енерговитрат і проведенням робіт із удосконалення методик проектування, та теоретичних методів дослідження динамічних параметрів гідроприводу із застосуванням обчислювальної техніки. У цьому зв'язку аналіз плинних процесів у разі перекидання кабіни, а також вплив їх на енергетичні витрати людини в умовах зростання маси кабіни є актуальним.

Для України серед пріоритетних задач є вдосконалення конструкцій гідравлічних механізмів перекидання кабіни для освоєння їх українськими виробниками та впровадження таких механізмів в будову українських автомобілів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота є складовою частиною досліджень Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ) та виконувалась відповідно до:

- постанови Національної Ради з питань безпеки життєдіяльності населення №3 від 25 грудня 1997 р. «Про відповідальність вимогам охорони праці машин, транспортних засобів, обладнання, які виробляються в Україні»;
- комплексної теми досліджень кафедри автомобілів ХНАДУ «Удосконалення конструкції і підвищення експлуатаційних властивостей автотранспортних засобів» (№ ДР0110U001167).

Особистий внесок пошукача у виконанні цих науково-дослідницьких робіт полягає: у розвитку концепції проектування гідравлічних компонентів механізму перекидання кабіни, заснованій на енергетичному балансі системи «людина-машина»; розробці і дослідженню конструкцій гідравлічних агрегатів механізму перекидання кабіни; розробці критеріїв оцінювання експлуатаційних показників механізму перекидання кабіни.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є покращення експлуатаційних показників гідравлічного механізму перекидання кабіни шляхом зниження витрат енергії людини на основі енергетичного балансу системи «людина-машина».

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:

- виконати аналіз технічних вимог та експлуатаційних показників гідравлічного механізму перекидання кабіни на відповідність вимогам ергономіки до системи «людина-машина»;
- провести теоретичні дослідження кінематики механізму перекидання кабіни і визначити ступінь впливу його кінематичних параметрів на енергетичні витрати людини;
- провести теоретичні дослідження робочого процесу гідравлічного механізму перекидання кабіни для оцінювання витрат енергії в системі «людина-машина»;
- удосконалити гідравлічний механізм перекидання кабіни, параметри якого отримані на основі результатів теоретичних досліджень і провести експериментальні дослідження для підтвердження адекватності теоретичних положень.

Об’єкт дослідження: процес перекидання кабіни транспортного засобу.

Предмет дослідження: параметри гідравлічного механізму перекидання кабіни транспортного засобу і їх вплив на енергетичні витрати людини під час перекидання кабіни.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи застосовувались методи збору та аналізу інформації; для дослідження робочих процесів гідравлічного механізму перекидання кабіни – методи математичного моделювання; в експериментальних дослідженнях використовувались методи вимірювання фізичних величин.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у такому:

- уперше обґрунтовано критерії оцінювання експлуатаційних показників гідравлічного механізму перекидання кабіни і виконано теоретичну оцінку витрат енергії людини на керування процесом перекидання кабіни;
- отримала подальший розвиток концепція проектування гідравлічного механізму перекидання кабіни, яка відрізняється від відомої тим, що враховує системний підхід до проектування його компонентів, заснований на енергетичному балансі системи «людина-машина».

Практичне значення отриманих результатів. Робота має як теоретичне, так і практичне значення. Запропоновані в роботі методика і результати теоретичних досліджень можна використовувати для розробки нових конструкцій та агрегатів гідравлічного механізму перекидання кабіни. Практичне використання отриманих результатів спрямоване на покращення умов праці людини під час перекидання та опускання кабіни. Запропоновано вимоги, що регламентують параметри робочого місця оператора з урахуванням антропометричних і фізіологічних характеристик людини. Результати досліджень упроваджено на ПАТ «АвтоКрАЗ» та ПАТ «Вовчанський агрегатний завод».

Особистий внесок здобувача. Теоретичні й експериментальні дослідження, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: аналіз принципових гідравлічних схем механізму перекидання кабіни [1]; математична модель гідравлічного механізму перекидання кабіни [2, 4, 10]; імітаційна модель гідравлічного механізму перекидання кабіни, що виконана у середовищі Simulink програми MATLAB [3]; результати теоретичного й

експериментального дослідження удосконаленої конструкції гідравлічного насоса [5]; розробка конструкції гідравлічного насосу з ручним приводом [6]; розробка принципової схеми гідравлічного механізму перекидання кабіни [7]; розробка принципової схеми гідравлічного механізму перекидання кабіни з енергоакумулятором [8]; аналіз функціональних властивостей механізму перекидання кабіни [9]; шляхи покращення експлуатаційних показників гідравлічного механізму перекидання кабіни [11]; критерії оцінювання гідравлічного механізму перекидання кабіни [12].

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати теоретичних та експериментальних досліджень оприлюднені й обговорені на науково-технічних і науково-методичних конференціях ХНАДУ та міжнародних наукових конференціях:

- VI міжнародна науково-практична конференція "Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту" (м. Вінниця, Україна, ВНТУ 21-23 жовтня 2013 р.);
- міжнародна конференція "Актуальні проблеми інженерної механіки" (м. Одеса, Україна, ОНПУ 10-14 березня 2014 р.);
- міжнародна науково-практична конференція з нагоди Дня автомобіліста і шляховика "Новітні технології розвитку конструкції, виробництва, експлуатації, ремонту і експертизи автомобіля" (м. Харків, Україна, ХНАДУ, 15-16 травня 2014 р.);
- 76-79 науково-технічна і науково-методична конференція Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (м. Харків, Україна, ХНАДУ, 2012-2015);
- міжнародна науково-технічна конференція, присвячена 85-річчю заснування ХНАДУ та 85-річчю автомобільного факультету «Новітні технології в автомобілебудівництві та транспорті» (м. Харків, Україна, ХНАДУ, 15-16 жовтня 2015 г.);
- XIII міжнародна науково-технічна конференція «Наука – образованию, производству, экономике» (м. Мінськ, Білорусь, БНТУ, 2015 р.).

Публікації. По матеріалах дисертаційної роботи опубліковано 12 наукових праць: 5 статей у спеціалізованих наукових виданнях, які входять до переліку МОН України, 4 – у виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз, 1 – репрезентовано у електронному виданні, 4 тези доповідей (1 у виданні іноземної держави), 3 патенти, які видані Державним департаментом інтелектуальної власності України.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 216 сторінок, у тому числі 81 рисунок, 8 таблиць, 5 додатків на 42 сторінках. Список використаних джерел нараховує 157 найменувань на 17 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

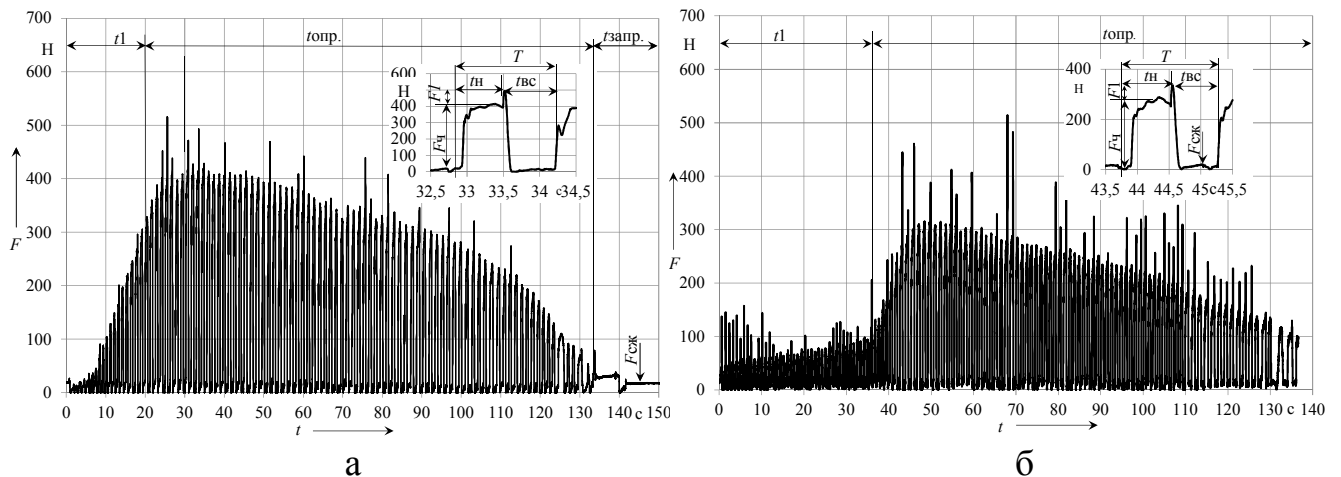
У **вступі** обґрунтовано актуальність теми. Сформульовано предмет, об'єкт, мету і задачі дослідження. Визначено наукову новизну і практичну значущість отриманих результатів, подано відомості про публікацію й апробацію основних положень роботи.

У першому розділі виконано аналіз розвитку транспортних засобів категорії *N*. Встановлено, що за останні 30 років маса кабіни збільшилася на 31,3%. Виконано загальний огляд та аналіз існуючих конструкцій та принципових схем гідравлічного механізму перекидання кабіни. Зазначено, що процес перекидання кабіни може здійснюватися за рахунок роботи електрогідравлічного і пневмогідравлічного приводу, але вони процесспроможні тільки за наявності зовнішніх джерел живлення. Наголошується, що керувальний сигнал для перекидання кабіни здійснює людина (рис.1). Проаналізовано вплив принципових схем механізму перекидання кабіни на енергетичні витрати людини.



Рисунок 1 – Схема розташування гідравлічного механізму перекидання кабіни

У межах наукового дослідження проведено пошукові експерименти на транспортних засобах, обладнаних гідравлічним механізмом перекидання кабіни, з метою оцінювання його експлуатаційних показників на енергетичні витрати людини (рис. 2).



а – автомобіль DAF-XF 95.430; б – автомобіль MAN 9-403 Silent. F – сумарне зусилля; $F_{\text{ч}}$ – корисне зусилля людини на рукоятці; F_1 – зусилля на рукоятці в момент упору привідного вала насоса в його корпус; $F_{\text{сж}}$ – зусилля, що викликано конструкцією рукоятки для експерименту; t_1 – час відкриття гідравлічних замків фіксації кабіни; $t_{\text{опр}}$ – час руху кабіни до положення нестійкої рівноваги; $t_{\text{запр}}$ – час руху кабіни після положення нестійкої рівноваги; $t_{\text{вс}}$ – час заповнення рідиною поршневої порожнини насоса; $t_{\text{н}}$ – час нагнітання рідини в порожнину гідроциліндра; T – період дії зусилля на рукоятку.

Рисунок 2 – Залежність експлуатаційних показників під час перекидання кабіни

Встановлено, що перекидаючи кабінку, людина виконує від 60 до 220 зворотно-поступальних рухів рукояткою з максимальним зусиллям $F=400$ Н (короткочасно 600 Н). Також встановлено, що величина та темп створеного зусилля на рукоятці насоса має стохастичний характер і залежить від антропометричних характеристик і фізичного стану людини, параметрів робочого місця оператора та масово-габаритних параметрів кабіни. Зазначається, що енергетичні параметри механізму перекидання кабіни повинні відповідати енергетичним спроможностям людини. У перебізі дисертаційного дослідження доведено, що умови праці людини характеризуються рівнем комфорту виконання процесу перекидання кабіни. Комфорт повинен оцінюватися роботою, яку людина витрачає під час перекидання кабіни, а не величиною зусилля на рукоятці.

У результаті вивчення стану, використання та розвитку гідравлічного механізму перекидання кабіни дослідження впливу робочого процесу перекидання кабіни на енергетичні витрати людини (оператора), особливо зі збільшенням ваги кабіни, набуває особливої значущості й актуальності.

На основі огляду науково-технічної літератури освітлюються: особливості функціонування людини (оператора) в системі «людина-машина» під час керування процесом перекидання кабіни; технічні вимоги щодо процесу перекидання кабіни. Зроблено висновок, що функціонування людини у разі роботи з гідравлічним механізмом перекидання кабіни вивчена недостатньо. Таким чином, виходячи із результатів аналізу стану питання, обґрунтовано мету та сформульовано пріоритетні задачі дослідження.

У **другому розділі** виконано теоретичне обґрунтування вибору параметрів гідравлічного механізму перекидання кабіни. Для зіставлення існуючих механізмів перекидання кабіни, а також для розробки нових запропоновано використовувати критерії оцінювання гідравлічного механізму перекидання кабіни, а саме:

- зусилля на рукоятці насоса;
- робота, яку людина витрачає під час перекидання кабіни;
- потужність, яку людина розвиває на рукоятці насоса під час перекидання кабіни;
- час перекидання кабіни.

При визначенні вказаних критеріїв для забезпечення ідентичності умов оцінювання запропоновано регламентувати частоту зворотно-поступальних рухів рукоятки 1 Гц. Перші три критерії мають порогові значення, що визначаються комфортними умовами керування процесом перекидання кабіни. Мінімальний час перекидання кабіни визначається максимальним значенням зусилля та підведеної до рукоятки потужності.

Покращення експлуатаційних показників можливе за допомогою зменшення витрат енергії людини під час керування процесом перекидання кабіни. Зменшення витрат енергії людини уможливлене через удосконалення робочого процесу, а саме:

- удосконалення процесу здійснення керувального сигналу;
- удосконалення процесу передавання енергії;
- удосконалення процесу виконання корисної роботи.

Удосконалення процесу здійснення керувального сигналу виконано шляхом теоретичного обґрунтування параметрів робочого місця оператора гідравлічного механізму перекидання кабіни. Вимоги щодо параметрів робочого місця оператора пропонується формувати з урахуванням фізіологічних можливостей і антропометричних характеристик людини. Автором були розглянуті роботи, спрямовані на дослідження ергономічних параметрів, зокрема таких учених, як: Аруїн О.С., Заціорський В.М., Ломов Б.Ф., Муніпов В.М., М. Шмід.

Констатується, що максимальне зусилля на рукоятці розвивається на рівні плеча, за згинання руки в ліктьовому суглобі під кутом $90-135^\circ$ і прикладенні зусилля в напрямку «на себе-від себе». Вибираючи допустиму силу керування, необхідно враховувати форму рукоятки і спосіб її захоплення. У результаті аналізу процесу роботи людини встановлено такі параметри: довжина рукоятки 600-700 мм; хід рукоятки – 300-350 мм; кут руху рукоятки – не більше 50° . Запропоновано оцінювання ергономічних параметрів робочого місця оператора, за яким встановлено, що під час перекидання кабіни постійні керувальні сили, що перевищують 150 Н, призводять до втоми людини. Зазначено, що людина здатна розвивати потужність в межах 50-60 Вт не відчуваючи втоми, та 330 Вт протягом 2-3 хвилин. Подана інформація покладена в основу критеріїв оцінювання гідравлічного механізму перекидання кабіни.

Удосконалення процесу передавання енергії виконане шляхом раціоналізації таких параметрів, як: кінематичне передавальне число механізму; робочий тиск у гідравлічному приводі; діаметр трубопроводу високого тиску, робочий об'єм насоса.

Встановлено, що робочий тиск чинить найбільший вплив на витрати у виробництві гідроциліндрів. Найнижчі показники сумарних витрат досягаються у виробництві гідроциліндрів, що працюють за тисків 25-32 МПа.

Задача раціоналізації діаметра трубопроводу вирішена з урахуванням витрат енергії на стиснення рідини, а також на здійснення роботи проти сил в'язкого тертя і витрат енергії на розгін рідини. У дослідженні було встановлено, що раціональний діапазон значень діаметра трубопроводу знаходиться в межах 5-8 мм.

Обґрунтований вибір раціонального передавального числа механізму перекидання кабіни шляхом визначення параметрів a , r , β , при яких цільовій функції $F_{max}=F(\varphi)$ доставляється мінімум у випадку зміни кута φ в межах $\varphi_{min} \leq \varphi \leq \varphi_{max}$ (рис. 3). Цільова функція доповнена обмеженнями, які впливають із визначеного за теоремою косинусів зв'язку між лінійними розмірами та кутами механізму:

$$\begin{aligned} -L_{min}^2 &= 2 \cdot a \cdot r \cdot \cos(\beta + \varphi_{min}) - a^2 + r^2; \\ -L_{max}^2 &= 2 \cdot a \cdot r \cdot \cos(\beta + \varphi_{max}) - a^2 + r^2, \end{aligned} \quad (1)$$

де L_{min} , L_{max} – переміщення штока гідроциліндра відповідно при кутах φ_{min} і φ_{max} ;
 $L = L_{цил} + z$ – відстань від A до C при $z = 0$.

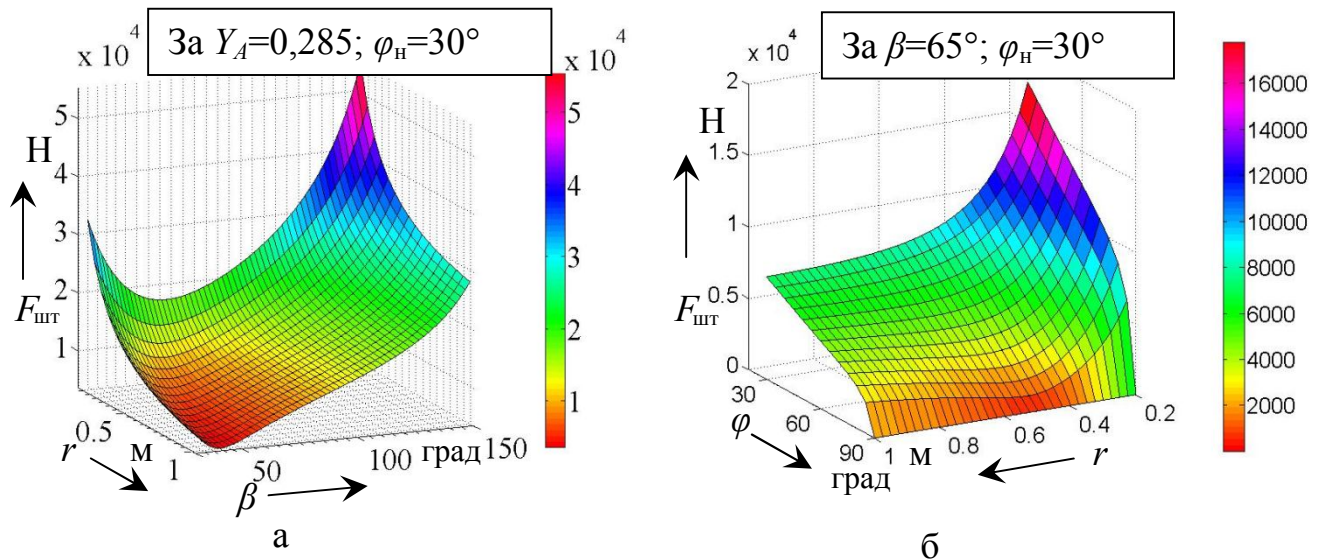


Рисунок 4 – Залежність початкового зусилля $F_{шт}$ на штоці гідроциліндра від кінематичних параметрів механізму перекидання кабіни за заданих умов

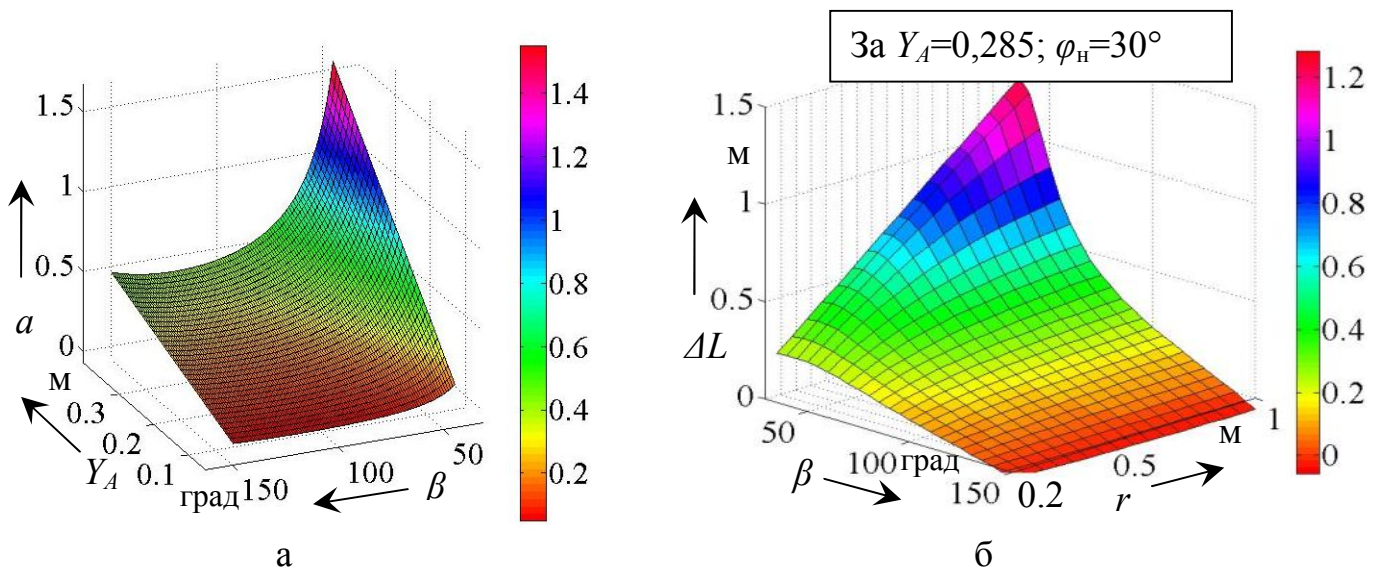
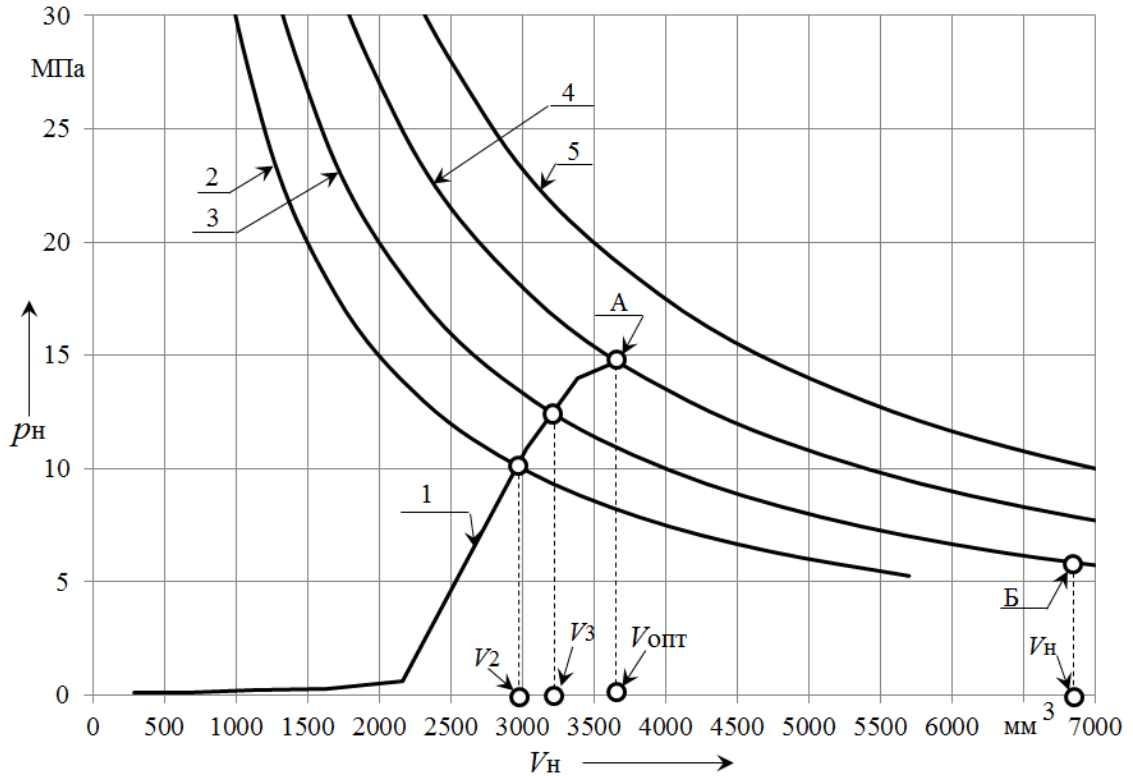


Рисунок 5 – Залежність кінематичних параметрів механізму перекидання кабіни за заданих умов

На основі енергетичного балансу системи «людина-машина» вдосконалена методика визначення параметрів насоса з ручним приводом. Для визначення раціонального діаметра і ходу поршня насоса побудована статична характеристика гідравлічного механізму перекидання кабіни 1, що відображає його енергетичну ємність (рис. 6). Також репрезентовано характеристики чотирьох насосів, що мають різні параметри (p і V). Кожна характеристика насоса побудована за зусилля на рукоятці $F_q=150$ Н для відповідного максимального переміщення поршня y_{max} та змінних значеннях його діаметра. Встановлено, що раціональні параметри насоса, що дозволяють отримати заданий максимальний тиск p , визначаються в точці перетину його характеристики з характеристикою механізму перекидання кабіни. При цьому оптимальний хід поршня $y_{опт} = y_{max}$. Встановлено, що за цих параметрів насоса витрати енергії людини є мінімальними.



1 – характеристика гідравлічного механізму перекидання кабіни; 2, 3, 4, 5 – характеристика насоса під час ходу поршня відповідно: $y_{\max}=15$ мм; $y_{\max}=20$ мм; $y_{\max}=27$ мм; $y_{\max}=35$ мм; А, Б – параметри насоса з вимкненими і увімкненими торсіонними валами.

Рисунок 6 – Статична характеристика гідравлічного приводу і насоса механізму перекидання кабіни автомобіля КамАЗ-55111

У **третьому розділі** виконано математичний опис робочого процесу перекидання кабіни. На основі принципової схеми побудовано динамічну схему гідравлічного механізму перекидання кабіни (рис. 7). Розроблена математична модель виконана на основі результатів аналізу та синтезу складових частин елементів гідравлічного механізму перекидання кабіни, з використанням гідродинамічної моделі (3).

$$\begin{cases}
 y(t) = \frac{y_{\max}}{2} \cdot \sin(\omega t - 0,5 \cdot \omega) + \frac{y_{\max}}{2}; \\
 \frac{dp_H}{dt} = \frac{S_{\Pi} \cdot \dot{y} - Q_{\text{ко2}}}{S_{\Pi} \cdot (y_{\max} - y) + V_0} \cdot E_{\text{см}}; \quad \frac{dp_1}{dt} = \frac{Q_{\text{ко2}} - S_{\text{тр}} \cdot \dot{x}}{0,5 \cdot S_{\text{тр}} \cdot l_{\text{тр}}} \cdot E_{\text{см}}; \quad \frac{dp_2}{dt} = \frac{S_{\text{тр}} \cdot \dot{x} - Q_{\text{3М1}}}{0,5 \cdot S_{\text{тр}} \cdot l_{\text{тр}}} \cdot E_{\text{пр}}; \\
 \frac{dp_3}{dt} = \frac{Q_{\text{3М1}} - S_{\text{ц}} \cdot \dot{z}}{S_{\text{ц}} (z_{\min} + z)} \cdot E_{\text{см}}; \quad \frac{dp_{\text{сл}}}{dt} = \frac{(S_{\text{ц}} - S_{\text{шт}}) \cdot \dot{z} - Q_{\text{др}}}{(S_{\text{ц}} - S_{\text{шт}}) \cdot (z_{\text{н}} - z)} \cdot E_{\text{см}}; \\
 \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{p_1 - p_2 - 27,5 \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot v \cdot l_{\text{тр}}}{S_{\text{тр}}} - 0,443 \frac{k_{\xi} \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot l_{\text{тр}}}{\sqrt{S_{\text{тр}}}} - 0,5 \cdot \zeta \cdot \rho_{\text{ж}} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2}{\rho_{\text{ж}} \cdot l_{\text{тр}}},
 \end{cases} \quad (3)$$

де $\omega=2\pi\nu$ – кутова частота (ν – лінійна частота переміщення рукоятки);

$\rho_{\text{ж}}$ – щільність рідини;

k_{ξ} – коефіцієнт апроксимації;

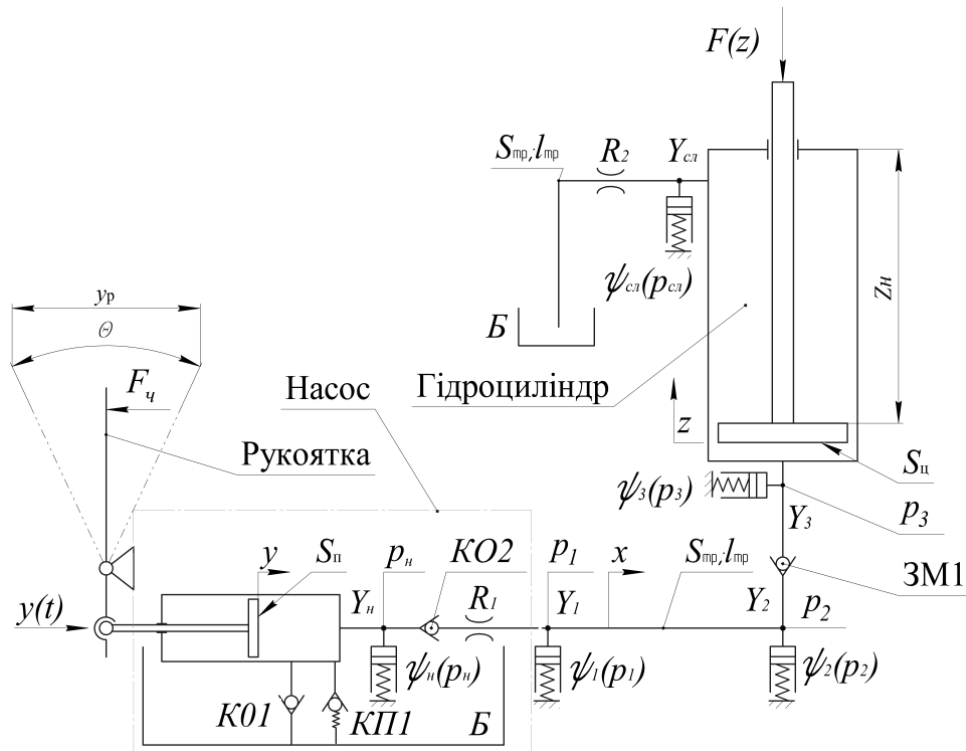
$E_{\text{см}}$ – модуль пружності рідини;

$E_{\text{пр}}$ – приведений модуль пружності;

V_0 – початковий об'єм;

z_{min} – початковий зазор.

Математична модель робочого процесу гідродинамічної моделі складається з математичної моделі вхідного сигналу переміщення поршня насоса, диференціальних рівнянь гідродинамічних функцій запропонованих М.Ф. Метлюком. Під час розгляду гідродинамічних процесів зроблено допущення: в'язкість, щільність робочої рідини і кількість нерозчиненого повітря в ній не змінюються з часом; відсутні витoki робочої рідини.



$y(t)$ – закон переміщення поршня насоса; y_p – переміщення рукоятки; y – переміщення поршня насоса; θ – кут повороту рукоятки; p_n – тиск у робочій порожнині насоса; p_1, p_2 – тиск на початку і в кінці трубопроводу; p_3 – тиск у поршневій порожнині гідроциліндра; $\psi_i(p_i)$ – коефіцієнт податливості; S_n – площа поршня насоса; x – переміщення стовпа рідини; $S_{\text{тр}}$ – площа поперечного перерізу трубопроводу; $l_{\text{тр}}$ – довжина трубопроводу; $S_{\text{ц}}$ – площа поршня гідроциліндра; z – переміщення поршня гідроциліндра; z_n – максимальний хід штока; $F(z)$ – корисне навантаження; $F_{\text{ч}}$ – м'язова сила людини, прикладена до рукоятки насосу; R_1, R_2 – опори; КО1, КО2, КП1 – зворотні клапани; 3М – гідрозамок; Б – гідравлічний бак.

Рисунок 7 – Динамічна схема гідравлічного механізму перекидання кабіни

При математичному описі руху центра мас кабіни за її перекидання були прийняті допущення: маса кабіни приведена до штока гідроциліндра; масою корпуса і штока гідроциліндра нехтуємо. Математична модель руху центру мас кабіни розроблена із застосуванням рівняння Лагранжа другого роду (4).

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d^2 z}{dt^2} &= \frac{Q - \dot{z}^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial m_{\text{пр}}}{dz}}{m_{\text{пр}}}; \\ \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial m_{\text{пр}}}{\partial z} &= J_k \cdot \frac{2 \cdot L_{\text{цил}} \left(4 \cdot a^2 \cdot r^2 - (r^2 + a^2 - L_{\text{цил}}^2)^2 \right) - 4 \cdot L_{\text{цил}}^3 (r^2 + a^2 - L_{\text{цил}}^3)}{(4 \cdot a^2 \cdot r^2 - (r^2 + a^2 - L_{\text{цил}}^2)^2)^2}; \\ Q &= p_3 \cdot S_{\text{ц}} - p_{\text{сл}} \cdot (S_{\text{ц}} - S_{\text{шт}}) + G_{\text{пр}} - F_{\text{тр}} \cdot \text{sign}\left(\frac{dz}{dt}\right); \\ G_{\text{пр}} &= -G_k \cdot R \cdot \cos(\beta - \gamma) \frac{d\beta}{dz}, \end{aligned} \right. \quad (4)$$

де $m_{\text{пр}}$ – приведена маса кабіни до штока гідроциліндра;

J_k – момент інерції кабіни;

$G_{\text{пр}}$ – приведена сила тяжіння кабіни до штока гідроциліндра;

$F_{\text{тр}}$ – сила тертя.

Диференційні рівняння, що визначають характер протікання процесів у гідравлічному механізмі перекидання кабіни, відображені у вигляді імітаційної моделі, розробленої в системі моделювання динамічних і подієво-керованих процесів Simulink системи інженерних та наукових розрахунків MATLAB (рис. 8).

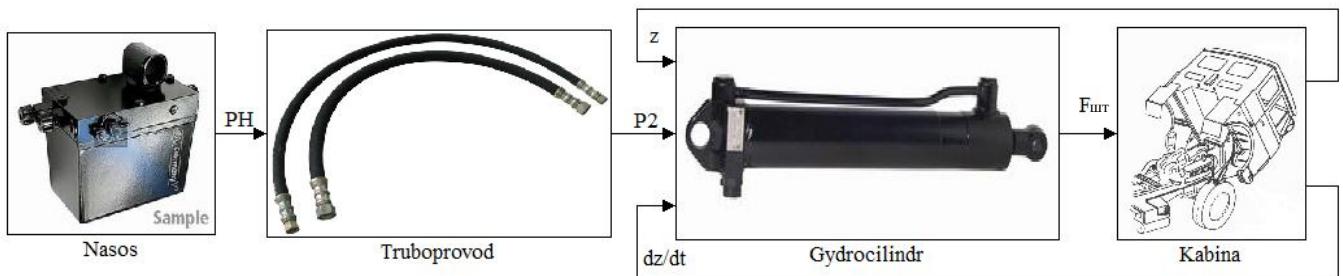


Рисунок 8 – Структурна схема імітаційної моделі гідравлічного механізму перекидання кабіни в системі моделювання Simulink

Імітаційна модель дозволяє визначити витрати енергії людини під час перекидання кабіни. Сумарні витрати енергії $E_{\text{л}}$ людини визначаються сумою витрат енергії за одне зворотно-поступальне переміщення рукоятки, на всьому проміжку часу t перекидання кабіни:

$$E_{\text{л}} = \sum_{i=1}^n F_i \cdot dy_{\text{pi}}, \quad (5)$$

де n – кількість зворотно-поступальних рухів;

i – шаг розрахунку.

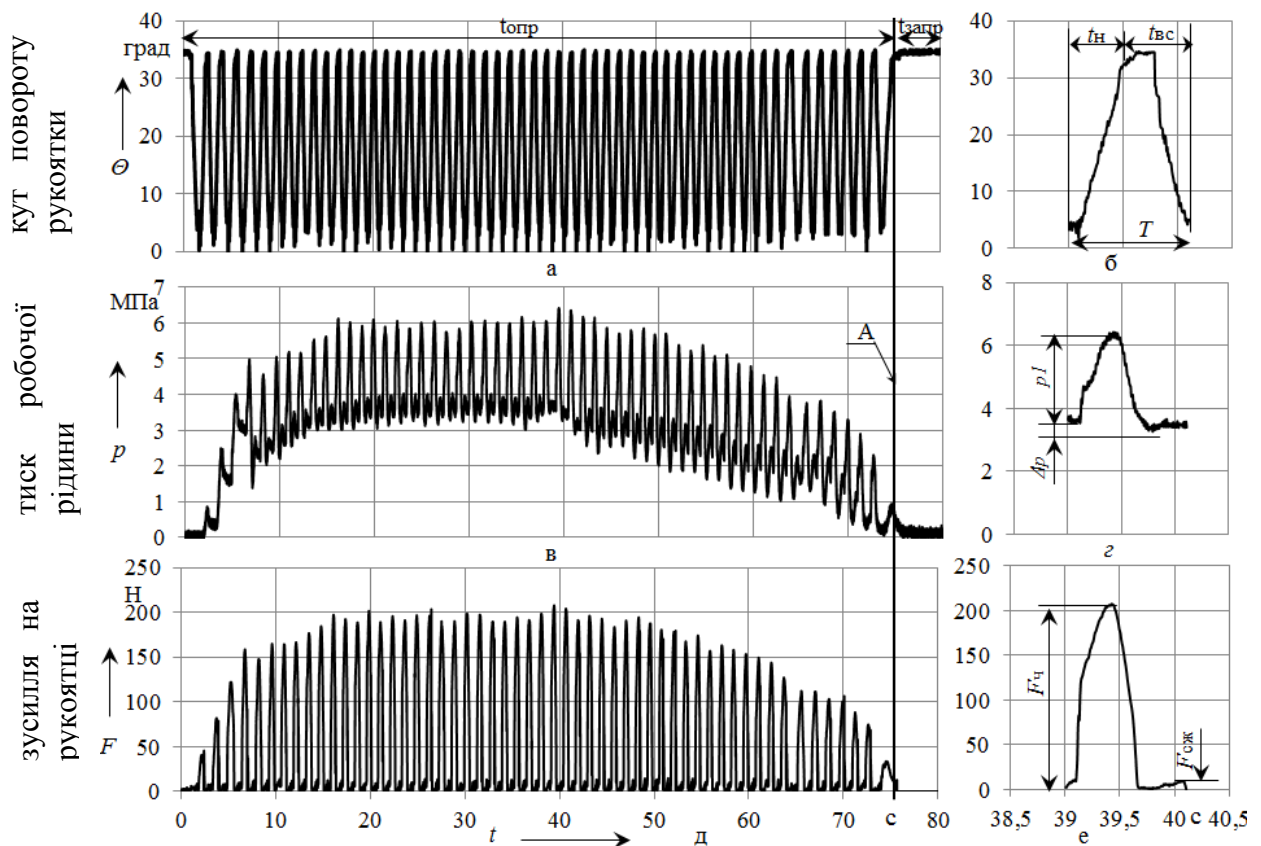
Середня потужність $N_{\text{л}}$, яку людина розвиває під час перекидання кабіни:

$$N_{\text{л}} = \frac{E_{\text{л}}}{t}. \quad (6)$$

Зазначено, що на перспективних транспортних засобах категорії N зменшення витрат енергії людини можна досягти шляхом рекуперації потенційної енергії кабіни за рахунок використання гідравлічного енергоаккумулятора. Але початковий тиск газу в енергоаккумуляторі зменшує кількість енергії, яку можна рекуперувати. У цьому зв'язку встановлено, що незалежно від структури системи рекуперації, відсоток рекуперованої енергії, не перевищує 63,2 %. На основі теоретичних досліджень удосконалено конструкцію гідравлічного механізму перекидання кабіни з енергоаккумулятором [8].

У **четвертому розділі** описані: структура експериментального механізму перекидання кабіни з гідравлічним приводом автомобіля КамАЗ-55111; структура блоку обробки сигналів і алгоритм його роботи; методика обробки сигналів вимірювання параметрів і аналіз результатів експериментальних досліджень. Зазначається, що на автомобілі КамАЗ-55111 для рекуперації потенційної енергії застосовуються торсійні вали.

Для перевірки адекватності вдосконаленої методики визначення параметрів насоса відображені результати виконаних експериментальних досліджень механізму з серійним (9645-5004010) і вдосконаленим (ХАДІ 11.5004100) насосом. Досліджено вплив рекуперації потенційної енергії кабіни на енергетичні витрати людини. Встановлено, що для перекидання кабіни з увімкненою системою рекуперації енергії потрібно від 55 до 60 зворотно-поступальних рухів рукоятки з максимальним зусиллям на ній 200 Н (рис. 9 д).

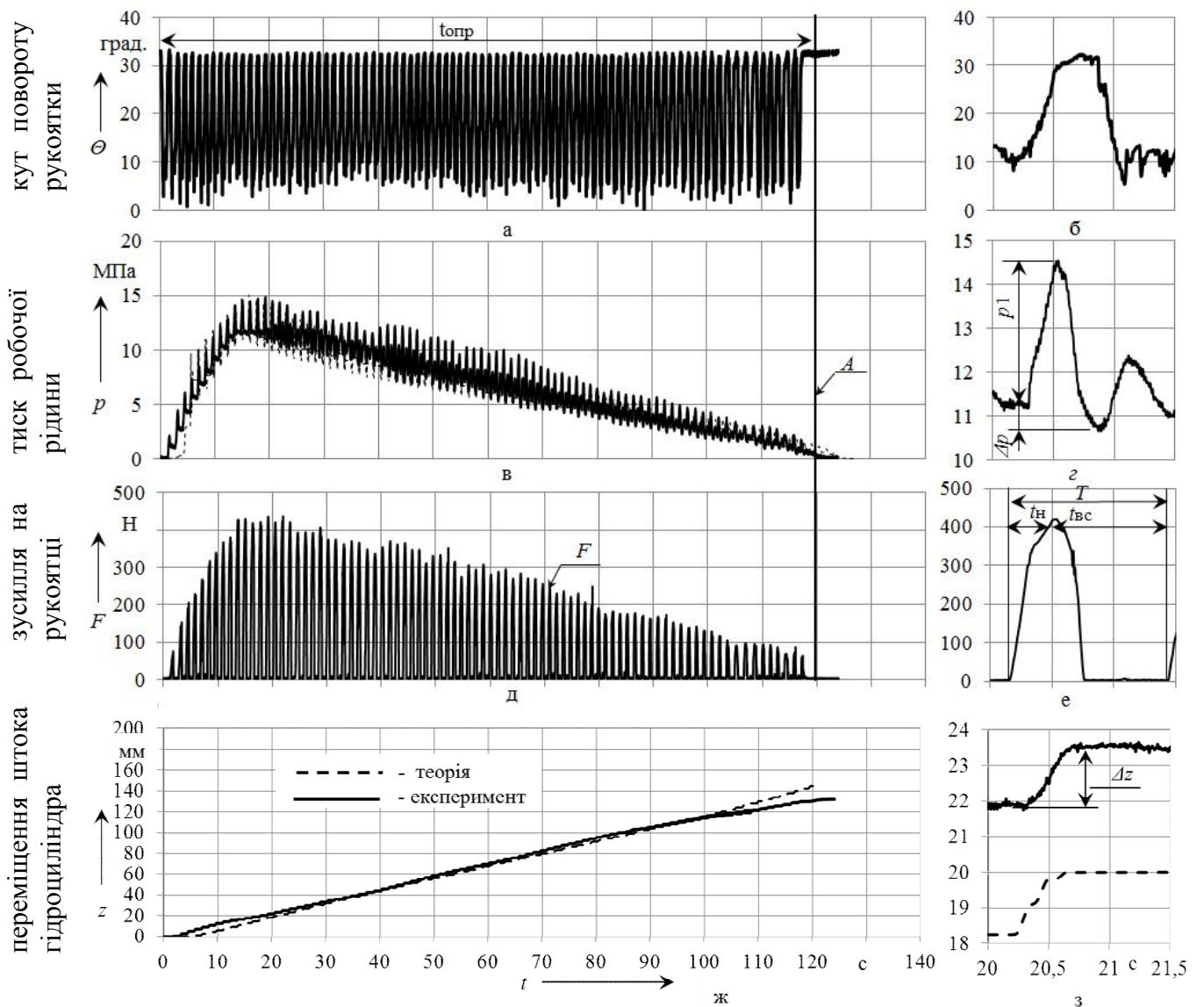


а – залежність $\theta(t)$ і її фрагмент б; в – залежність $p(t)$ і її фрагмент г; д – залежність $F(t)$ і її фрагмент е; А – положення нестійкої рівноваги.

Рисунок 9 – Експериментальна характеристика гідравлічного механізму перекидання кабіни автомобіля КамАЗ-55111 з увімкненою системою рекуперації

При цьому максимальний тиск робочої рідини дорівнює 6,15 МПа (рис. 9 в, з).

Для дослідження процесу перекидання кабіни з вимкненою системою рекуперації енергії торсіонні вали тимчасово від'єднувалися. Встановлено, що для перекидання кабіни до положення нестійкої рівноваги потрібно виконати 85 зворотно-поступальних рухів рукоятки з максимальним зусиллям 415 Н. При цьому максимальний тиск робочої рідини зростає до 15 МПа. Рух кабіни характеризує залежність переміщення штока гідроциліндра $z(t)$ від часу перекидання. Переміщення штока за період T визначається величиною Δz (рис. 10 з). При цьому кількість ступенів дорівнює кількості повторюваних періодів T .

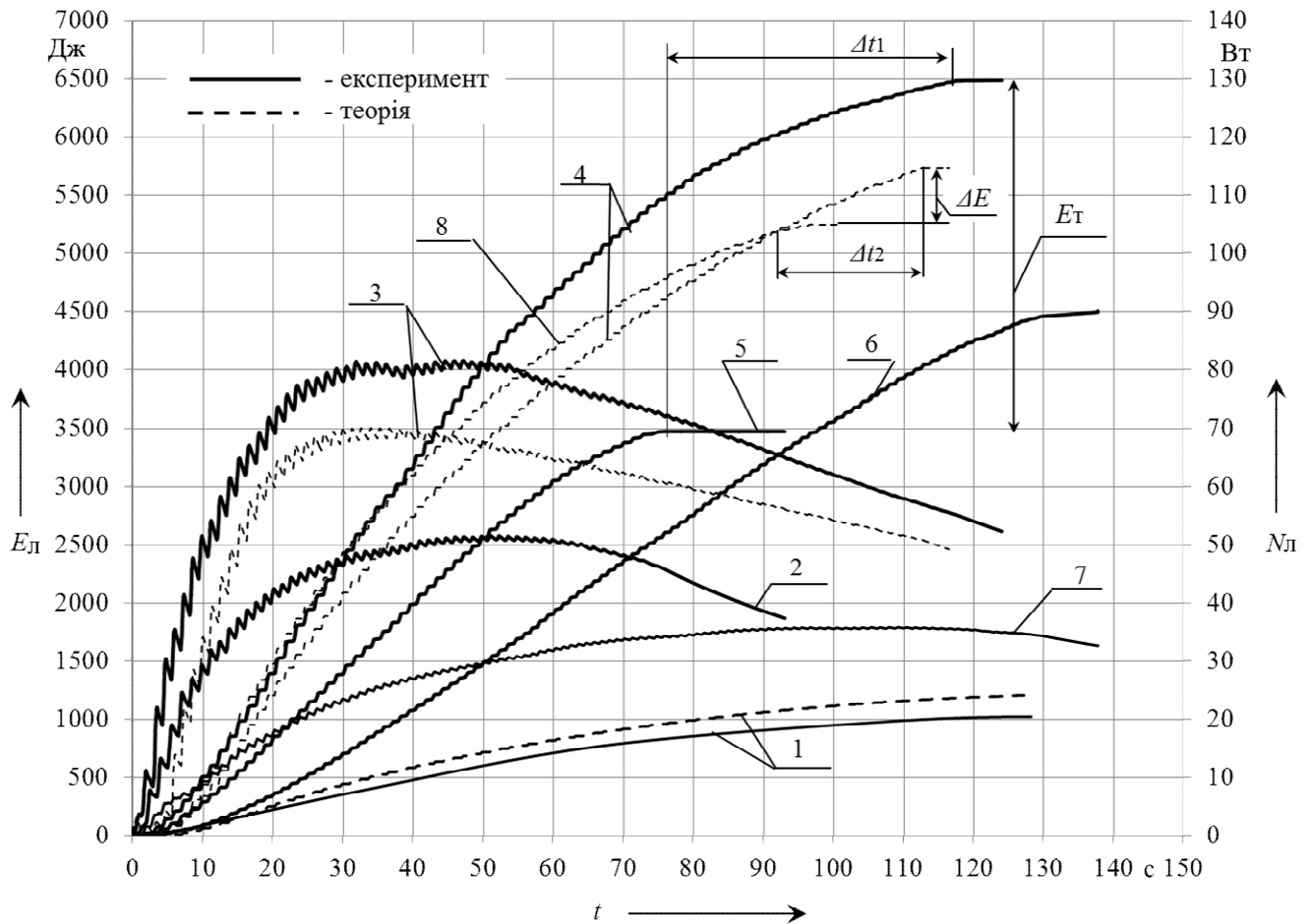


а – залежність $\theta(t)$ і її фрагмент б; в – залежність $p(t)$ і її фрагмент г; д – залежність $F(t)$ і її фрагмент е; ж – залежність $z(t)$ і її фрагмент з; А – положення нестійкої рівноваги.

Рисунок 10 – Експериментальна характеристика гідравлічного механізму перекидання кабіни автомобіля КамАЗ-55111 з вимкненою системою рекуперації

Оцінювання експлуатаційних показників механізму перекидання кабіни з вдосконаленим насосом ХАДІ 11.5004100, а також вплив роботи системи рекуперації

енергії виконано за результатами аналізу рівня витраченої людиною енергії і потужністю, яку людина розвиває під час перекидання кабіни (рис. 11).



1 – корисна робота під час перекиданні кабіни; 2 – підведена потужність людини з увімкненою системою рекуперації енергії; 3 – підведена потужність людини за вимкненої системи рекуперації енергії; 4 – витрачена робота людини за вимкненої системи рекуперації енергії; 5 – витрачена робота людини з увімкненою системою рекуперації енергії; 6 – витрачена робота людини під час використання насоса ХАДІ 11.5004100; 7 – підведена потужність людини під час використання насоса ХАДІ 11.5004100; 8 – витрачена робота людини під час використання насоса ХАДІ 11.5004100 за вимкненої системи рекуперації енергії; E_T – енергія рекуперації.

Рисунок 11 – Залежність витраченої енергії і потужності людини від часу перекидання кабіни автомобіля КамАЗ-55111

Встановлено, що коефіцієнт корисної дії гідравлічного механізму перекидання кабіни на автомобілі КамАЗ-55111 не перевищує 0,3. Зроблено висновок, що за використання системи рекуперації енергії можна знизити зусилля на рукоятці насоса вдвічі, а також скоротити час перекидання кабіни на 34 % (рис. 11 Δt_1). Також встановлено, що витрати енергії людини зменшились на 46%, а підведена потужність на 37,5%. Слід зазначити, що за перекидання кабіни за допомогою вдосконаленого насоса ХАДІ 11.5004100, з увімкненою системою рекуперації, підведена потужність

знизилася на 30%. При цьому витрачена людиною енергія збільшилася на 22% (криві 5 і 6 рис. 11). Однак у разі перекидання кабіни з вимкненою системою рекуперації енергії витрачена енергія людини знизилась на 8% (ΔE), а час перекидання кабіни – на 18% (рис. 11 Δt_2), порівняно з серійно встановлюваним насосом 9545-5004100. Це підтверджує адекватність теоретичних положень вдосконаленої методики визначення параметрів гідравлічного механізму перекидання кабіни. На основі виконаного аналізу експериментальних даних за дисперсією відтворності встановлено, що відносна похибка експерименту у зіставленні з результатами математичної моделі не перевищує 10%.

Виконана оцінка експлуатаційних показників підтверджує те, що для визначення параметрів гідравлічного механізму перекидання кабіни необхідно не тільки керуватися максимальним зусиллям на рукоятці, але і враховувати критерії гідравлічного механізму перекидання кабіни, що ґрунтуються на енергетичному балансі системи «людина-машина».

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена наукова задача з покращення експлуатаційних показників гідравлічного механізму перекидання кабіни шляхом зменшення витрат енергії людини за керування процесом перекидання кабіни. Основні результати, що отримані в процесі теоретичних і експериментальних досліджень, полягають у такому:

1. У результаті аналізу науково-технічної літератури, а також технічних вимог і експлуатаційних показників гідравлічного механізму перекидання кабіни встановлено, що:

- маса кабіни транспортних засобів категорії N за останні 30 років збільшилася на 31,3%;
- існуючі технічні вимоги не дозволяють повною мірою оцінити витрати енергії людини на перекидання кабіни і не регламентують вимоги до робочого місця оператора;
- у процесі перекидання кабіни людина виконує від 60 до 220 зворотно-поступальних рухів рукояткою насоса з максимальним зусиллям на ній 400 Н (короткочасно 600 Н).

Для покращення експлуатаційних показників гідравлічного механізму перекидання кабіни доцільно знижувати витрати енергії людини під час перекидання кабіни, що в умовах зростання маси кабіни набуває особливого значення та актуальності.

2. Обґрунтовано такі критерії оцінювання гідравлічного механізму перекидання кабіни: зусилля на рукоятці насоса; робота, що людина витрачає під час перекидання кабіни; потужність, яку людина розвиває у разі перекидання кабіни; час перекидання кабіни.

Отримані критерії дозволяють виконати оцінювання витрат енергії людини під час перекидання кабіни.

3. На підставі аналізу результатів досліджень фізіологічних можливостей та антропометричних характеристик людини, обґрунтовано ергономічні параметри робочого місця оператора, зокрема: довжина рукоятки – 600-700 мм; хід рукоятки – 300-350 мм; кут руху рукоятки – не більше 50° ; зусилля на рукоятці – не більше 150 Н; потужність, яку витрачає людина не втомлюючись – 50-60 Вт. Також встановлено, що максимальне зусилля розвивається на рівні плеча, за згинання руки в ліктьовому суглобі під кутом $90-135^\circ$ і прикладенню зусилля в напрямку «на себе-від себе».

Отриманий результат дозволяє сформувати ергономічні параметри робочого місця оператора під час перекидання кабіни.

4. У результаті проведення теоретичних досліджень встановлено, що: раціональний кут установки гідроциліндра $\beta=65^\circ$, а раціональне значення важеля $r=0,45$ м. Також встановлений раціональний діапазон значень робочого тиску в гідравлічному приводі 25-32 МПа і діаметра трубопроводу 5-8 мм. Указані параметри отримані для автомобіля КамАЗ-55111 з урахуванням його початкових кінематичних параметрів.

5. Удосконалено методику визначення раціональних параметрів гідравлічного механізму перекидання кабіни, яка відрізняється від відомої тим, що ґрунтується на результатах аналізу енергетичного балансу системи «людина-машина».

На підставі запропонованої методики визначено раціональні параметри вдосконаленого насосу ХАДІ 11.5004100, що дозволяють зменшити витрати енергії людини на 8% і час перекидання кабіни на 18 % у порівнянні з серійним насосом 9645-5004010.

Отриманий результат підтверджує адекватність розроблених теоретичних положень методики, зниження витрат енергії людини і покращення експлуатаційних показників гідравлічного механізму перекидання кабіни.

Розроблена конструкція вдосконаленого насосу захищена патентом України і прийнята до впровадження у виробництво на ПАТ «Вовчанський агрегатний завод».

6. Встановлено, що найбільш раціональним способом зниження витрат енергії людини є рекуперація потенційної енергії кабіни. Також встановлено, що незалежно від структури системи рекуперації відсоток рекуперованої енергії не може бути більшим ніж 63,2 %. На основі теоретичних досліджень вдосконалено конструкцію гідравлічного механізму перекидання кабіни з енергоакумулятором, що захищена патентом України і прийнята до впровадження у виробництво на ПАТ «АвтоКрАЗ».

7. Експериментальні дослідження гідравлічного механізму перекидання кабіни автомобіля КамАЗ-55111 дозволили встановити, що:

- розроблена математична та імітаційна модель робочого процесу гідравлічного механізму перекидання кабіни дозволяє оцінити витрати енергії людини під час керування процесом перекидання кабіни з відносною похибкою 10%;
- коефіцієнт корисної дії системи «людина-машина» не перевищує 0,3;
- використання торсіонних валів для рекуперації енергії дозволяє знизити витрати енергії людини на 46%, підведену потужність на 37,5% і час перекидання кабіни на 34%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Аврунин Г. А. Анализ конструктивных особенностей объемных гидроприводов для подъема кабины / Г. А. Аврунин, В. А. Богомолов, В. И. Клименко, М. Ю. Залогин, И. И. Мороз, И. В. Кабаненко // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Промислова гідроліка і пневматика». – 2012. – № 1(35). – С. 86 – 98.
2. Шуклинов С. Н. Математическое моделирование рабочих процессов механизма подъема кабины грузового автомобиля / С. Н. Шуклинов, М. Ю. Залогин, П. Р. Бартош // Праці Одеського національного університету. – 2014. – № 2 (44). – С. 39 – 44.
3. Шуклінов С. М. Імітаційне дослідження динамічних процесів механізму перекидання кабіни вантажного автомобіля / С. М. Шуклінов, М. Ю. Залогін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 58 (1100). – С. 154-161.
4. Шуклинов С. Н. Математическое описание динамических процессов гидравлического механизма опрокидывания кабины грузового автомобиля / С. Н. Шуклинов, М. Ю. Залогин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 6 (1115). – С. 182-190.
5. Клименко В. И. Экспериментальное исследование гидравлического механизма опрокидывания кабины / В. И. Клименко, С. Н. Шуклинов, М. Ю. Залогин // Вестник ХНАДУ [Сб. науч. тр.] – 2015. – Вып. № 69. – С. 19-28.
6. Пат. 87429 Україна, МПК F15B 15/00. Насос гідравлічного механізму підйому кабіни / Богомолов В. О., Клименко В. І., Шуклінов С. М., Залогін М. Ю.; патентовласник Клименко В. І. — № u201309317; заявл. 25.07.2013; надр. 10.02.2014, Бюл. № 3, 4 с.
7. Пат.104969 Україна, МПК F15B 15/00 Об'ємний гідропривід механізму підйому кабіни / заявники Богомолов В. О., Клименко В. І., Аврунін Г. А., Шуклінов С. М., Залогін М. Ю.; патентовласник Клименко В. І. - № a201305517; заявл. 29.04.2013; надр. 25.03.2014, Бюл. № 6, 6 с.
8. Пат. 101744 Україна, МПК F15B 15/00, B62D 33/067. Гідравлічний механізм підйому кабіни з енергоаккумулятором / Богомолов В. О., Клименко В. І., Шуклінов С. М., Залогін М. Ю.; патентовласник Клименко В. І. – № u201503610; заявл. 17.04.2015; надр. 25.09.2015, Бюл. № 18, 7 с.
9. Шуклінов С. М. Аналіз функціональних властивостей механізмів підйому кабіни вантажних автомобілів / С. М. Шуклінов, М. Ю. Залогін // Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту: міжнародна науково-практична конференція Вінницького національного технічного університету, 21-23 жовтня 2013 р.: тези доповідей – Вінниця, 2013. – С. 183 – 184.

10. Шуклинов С. Н. Математическое моделирование рабочих процессов механизма подъема кабины грузового автомобиля / С. Н. Шуклинов, М. Ю. Залогин, П. Р. Бартош // Актуальные проблемы инженерной механики: международная конференция Одесского национального политехнического университета, 10-14 марта 2014 г.: тезисы докладов – Одесса, 2014. – С. 51 – 55.

11. Шуклинов С. Н. Улучшение эксплуатационных свойств гидравлического механизма опрокидывания кабины транспортного средства категории N / С. Н. Шуклинов, М. Ю. Залогин // Новітні технології в автомобілебудівництві та транспорт: міжнародна науково-практична конференція присвячена 85-річчю заснування ХНАДУ, 85-річчю заснування автомобільного факультету та з нагоди Дня автомобіліста і дорожника Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, 15-16 жовтня 2015 р.: наукові праці – Харків, 2015 – С. 63-64.

12. Шуклинов С. Н. Критерии оценки качества гидравлического механизма опрокидывания кабины / С. Н. Шуклинов, М. Ю. Залогин, П. Р. Бартош, М. И. Жилевич // Наука – образованию, производству, экономике: тринадцатая международная научно-техническая конференция Белорусского национального технического университета, 2015 г.: тезисы докладов – Минск, 2015, Т.2. – С.45.

АНОТАЦІЯ

Залогін М. Ю. Покращення експлуатаційних показників гідравлічного механізму перекидання кабіни як компонента системи «людина-машина». – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.02 – автомобілі та трактори. – Харківський національний автомобільно-дорожній університет Міністерства освіти і науки України, Харків, 2016.

Дисертація присвячена покращенню експлуатаційних показників гідравлічного механізму перекидання кабіни транспортного засобу категорії N, удосконаленню конструкції гідравлічного насоса з ручним приводом, удосконаленню методики визначення раціональних параметрів гідравлічного механізму перекидання кабіни, пошуку шляхів зниження енергетичних витрат людини під час перекидання кабіни.

У роботі розглянуто та досліджено процес передавання енергії від людини до виконавчого ланцюга механізму перекидання кабіни. Виконано аналіз вимог до системи «людина-машина». На підставі теоретичних досліджень обґрунтовано критерії оцінювання гідравлічного механізму перекидання кабіни. На підставі результатів досліджень ергономіки обґрунтовано вимоги до робочого місця оператора. Визначено раціональні значення функційних параметрів механізму перекидання кабіни.

Розроблено математичну і імітаційну модель гідравлічного механізму перекидання кабіни, що дозволяє оцінити витрати енергії під час перекидання кабіни з відносною похибкою 10%. Імітаційні дослідження дозволили встановити, що констру-

кція насоса ХАДІ 11.5004100 дозволяє зменшити витрати енергії людини на 8% і час перекидання кабіни на 18% у порівнянні з серійно встановлюваним насосом 9645-5004010. Для підтвердження теоретичних положень проведено експериментальні дослідження на автомобілі КамАЗ-55111, який має систему рекуперації потенційної енергії кабіни за допомогою двох торсіонних валів. Зроблено висновок, що використання торсіонних валів для системи рекуперації дозволяє знизити витрати енергії людини на 46%, підведеної потужності на 37,5% і час перекидання кабіни на 34%. Теоретично обґрунтовано, що на перспективних транспортних засобах, в якості рекуперації енергії, доцільно використовувати гідравлічний енергоакумулятор.

Встановлено, що для визначення параметрів гідравлічного механізму перекидання кабіни необхідно враховувати критерії гідравлічного механізму перекидання кабіни, що ґрунтуються на енергетичному балансі системи «людина-машина».

Ключові слова: гідравліка, механізм перекидання кабіни, система «людина-машина», робоче місце оператора, енергетичні витрати, рекуперация енергії.

АННОТАЦИЯ

Залогин М. Ю. Улучшение эксплуатационных показателей гидравлического механизма опрокидывания кабины как компонента системы «человек-машина». — На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.02 – автомобили и тракторы. – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2016.

Диссертация посвящена улучшению эксплуатационных показателей гидравлического механизма опрокидывания кабины транспортного средства категории N, усовершенствованию конструкции гидравлического насоса с ручным приводом, совершенствованию методики определения рациональных параметров гидравлического механизма опрокидывания кабины, поиска путей снижения энергетических затрат человека при опрокидывании кабины.

В работе рассмотрен и исследован процесс передачи энергии от человека к исполнительному звену гидравлического механизма опрокидывания кабины. Выполнен анализ требований к системе «человек-машина». На основании теоретических исследований обоснованы критерии оценки гидравлического механизма опрокидывания кабины. На основании результатов исследований эргономики, обоснованы требования к рабочему месту оператора, учитывающие его физиологические свойства и антропометрические характеристики. Определены рациональные значения функциональных параметров механизма опрокидывания кабины, позволяющие снизить затраты энергии при опрокидывании кабины.

Разработана математическая и имитационная модель гидравлического механизма опрокидывания кабины, которая позволяет оценить затраты энергии при опрокидывании кабины с относительной погрешностью 10%. Имитационные исследования позволили установить, что конструкция насоса ХАДИ 11.5004100 позволяет уменьшить затраты энергии человека на 8% и время опрокидывания кабины на 18% в сравнении с серийно устанавливаемым насосом 9645-5004010. Для подтверждения теоретических положений были проведены экспериментальные исследования на автомобиле КамАЗ-55111, который имеет систему рекуперации потенциальной энергии кабины при помощи двух торсионных валов.

Сделан вывод, что применение торсионных валов, для рекуперации энергии, позволяет снизить усилие на рукоятке насоса вдвое, затраты энергии человека на 46%, развиваемую мощность человека на 37,5% и время опрокидывания кабины на 34%. Отмечается, что торсионные валы целесообразно применять только на транспортных средствах с малыми габаритными параметрами кабины, которая имеет маятниковую систему подвески кабины.

В работе отмечается, что на перспективных транспортных средствах категории *N* уменьшение затрат энергии человека можно достичь путем рекуперации потенциальной энергии кабины за счет использования гидравлического энергоаккумулятора. Однако, начальное давление газа в энергоаккумуляторе уменьшает количество энергии, которую можно рекуперировать. В этой связи установлено, что независимо от структуры системы рекуперации, процент рекуперированной энергии, не превышает 63,2 %. На основе теоретических исследований усовершенствована конструкция гидравлического механизма опрокидывания кабины с энергоаккумулятором.

Установлено, что для определения параметров гидравлического механизма опрокидывания кабины необходимо учитывать критерии оценки гидравлического механизма опрокидывания кабины, основанные на энергетическом балансе системы «человек-машина».

Ключевые слова: гидравлика, механизм опрокидывания кабины, система «человек-машина», рабочее место оператора, энергетические затраты, рекуперация энергии.

ABSTRACT

M. Zalohin. Improvement of operational indicators of the hydraulic drive for tilting the cab as a component of the man-vehicle system. – Manuscript copyright.

Thesis for scientific degree of the candidate of technical sciences, specialty 05.22.02 – Automobiles and Tractors. – Kharkiv National Automobile and Highway University, Ministry of Education and Science of Ukraine. Kharkiv, 2016.

The thesis deals with improving the operating characteristics of the hydraulic drive for tilting the cab of the vehicle of category *N*, improving the design of the hydraulic pump

with manual transmission, improving the technique of determining rational parameters of the hydraulic drive for tilting the cab, searching the ways to reduce the energy expenditures of a person at cab rollover.

In the given paper there was reviewed and analyzed the process of energy transfer from the person to the actuator of the hydraulic drive for tilting the cab of the vehicle. Analysis of the requirements to the man-vehicle system is carried out. On the basis of theoretical studies there were justified the criteria for evaluating the hydraulic drive for tilting the cab. Based on the research of ergonomics, there were substantiated the requirements to the workplace of the operator. The rational values of functional parameters of the drive for tilting the cabin that allow reducing the energy expenditures at overturning the cabin are determined.

The mathematical and simulation model of the hydraulic drive for cab tilt that allows estimating the expenditures of the energy at overturning the cabin with a relative error of 10% is developed. Simulation studies revealed that the design of the pump Hadi 11.5004100 makes it possible to reduce the energy expenditures of a person by 8% and the time of cab tilt by 18% in comparison with the standard set by the pump 9645-5004010. To confirm the theoretical assumptions, there was conducted an experimental research, using KAMAZ-55111, which is equipped with a system of potential cabin energy recuperation with the help of two torsion shafts. It has been concluded that the use of torsion shafts for energy recuperation can reduce the force on the handle of the pump in half, a person's energy expenditure by 46%, the developing human capacity by 37.5% and the time of cab tilt by 34%. It is also noted that in the promising vehicles for energy recuperation it is expedient to use the hydraulic energy storage battery.

In general, while determination the parameters of the hydraulic drive for cab tilt one must take into account the evaluation criteria of the hydraulic drive for tilting the cab based on the energy balance of the man-vehicle system.

Key words: hydraulics, tilting cab, the man-vehicle system, workplace of the operator, energy expenditures, energy recuperation.