МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО–ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

СИЛЬЧЕНКО МИКОЛА МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 681.583.2, 681.587.72

ВДОСКОНАЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МЕХАНІЧНОЮ КОРОБКОЮ ПЕРЕДАЧ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ КАТЕГОРІЇ N_3 ТА M_3

Спеціальність 05.22.02 – автомобілі та трактори

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Михалевич Микола Григорович,
Харківський національний автомобільно–дорожній університет, доцент кафедри автомобілів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Шуляк Михайло Леонідович
Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, професор кафедри тракторів і автомобілів.

кандидат технічних наук, доцент
Сергієнко Микола Єгорович
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри автомобіле– та тракторобудування

Захист відбудеться "5" червня 2019 р. о 14^{00} годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.059.02 у Харківському національному автомобільно–дорожньому університеті за адресою: 61002, Україна м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25. 15.10.2019. Зуб.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного автомобільно–дорожнього університету за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Автореферат розіслано "3" травня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради О.П. Смирнов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дисертаційна робота стосується важливої проблеми з формування наукових основ створення автомобілів з автоматизованим керуванням коробкою передач.

Вирішення проблеми забезпечення енергетичної ефективності та підвищення динамічних властивостей автомобілів в сучасних умовах нерозривно пов'язане зі створенням автоматизовано керованих трансмісій. У загальному розумінні автоматизовано керовані трансмісії – це комплекс взаємопов'язаного обладнання призначеного для автоматизованого та автоматичного керування зчепленням та коробкою передач. До числа вказаних установок відносяться механізми перемикання передач з електромеханічним приводом.

Використання автоматизованих механізмів керування агрегатами трансмісій при доповнені цих систем відповідними блоками дає можливість створити повністю автоматичне керування трансмісією. Крім цього, використання розробленого електромеханічного механізму перемикання передач дозволить обладнати автомобілі що знаходяться в експлуатації шляхом заміни штатного механізму перемикання.

Проте в теперішній момент відсутній системний підхід проектування та розробки механізмів автоматизованого керування коробкою передач, оцінювання ефективності та динамічних властивостей таких приводів перемикання, що не дає можливість здійснити отримання їх раціональних характеристик.

Виникає необхідність у вирішенні актуальної та важливої для практики наукової проблеми з формування наукових основ вдосконалення автоматизованої системи керування коробкою передач.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота є складовою частиною досліджень Харківського національного автомобільно–дорожнього університету (ХНАДУ) та виконувалася у відповідності до:

–комплексної теми досліджень кафедри автомобілів ХНАДУ «Теоретичні основи проектування інтелектуальної автоматизованої механічної трансмісії автобусів та вантажних транспортних засобів» (№0110U001167);

–комплексної теми досліджень кафедри автомобілів ХНАДУ «Створення та впровадження інтелектуальної системи керування трансмісією автомобіля» (№0108U007435).

Особистий внесок пошукача у виконанні цих науково–дослідницьких робіт полягає у розробці, теоретичному та експериментальному дослідженні електромеханічного механізму перемикання передач в механічній коробці передач.

Мета і задачі дослідження. За *мету* дисертаційної роботи прийнято покращення умов праці водія та зменшення навантаження на синхронізатор за рахунок вдосконалення електромеханічного приводу перемикання передач шляхом вибору режиму роботи силового електродвигуна автоматизованої системи керування.

У відповідності до сформульованої мети визначино наступні задачі:

– провести аналіз існуючих приводів перемикання передач і виявити їх недоліки;

– провести експериментальні дослідження для виявлення особливостей протікання робочих процесів в електромеханічному механізмі керування коробкою передач;

– виконати теоретичні дослідження робочих процесів з урахуванням їх особливостей протікання в електромеханічному механізмі керування коробкою передач;

– обґрунтувати параметри електромеханічного механізму перемикання передач та системи керування ним.

Об'єкт дослідження – робочі процеси в електромеханічному механізмі керування механічною коробкою передач.

Предмет дослідження – динамічні силові впливи, що виникають в процесі перемикання передач при автоматизованому керуванні механічною коробкою передач електромеханічним приводом.

Методи дослідження – для визначення стану питання і постановки задачі дослідження використовувалися методи збору, вибору та аналізу інформації; для дослідження роботи електромеханічного механізму автоматизованого перемикання передач, методи математичного моделювання та чисельні методи вирішення диференційних рівнянь; в експериментальних дослідженнях використовувались електричні методи виміру фізичних величин та натурні випробування в стендових умовах.

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна отриманих результатів полягає у такому:

вперше одержано:

–залежність між силою на важелі перемикання передач та силою струму на обмотках силового електродвигуна електромеханічного механізму перемикання передач;

–визначено закон керування струмом в обмотках силового електродвигуна електромеханічного механізму перемикання передач, який на відміну від раніше відомих дозволяє зменшити перевантаження синхронізатора;

–виявлено ефект, що дозволив уточнити динаміку переміщення елементів електромеханічного механізму перемикання передач при робочому процесі включення передачі;

–одержаний діапазон значень жорсткості виконавчого механізму перемикання при якому скорочується час включення передачі та виключаються ударні навантаження між зубцями муфт;

–визначено закон керування механізмом перемикання, що дозволяє запобігти зворотньому руху муфти після повного включення;

удосконалено:

–метод розрахунку динаміки електромеханічного приводу який відрізняється від раніше відомого застосуванням змінних коефіцієнтів пропорційності;

набуло подальшого розвитку:

–метод оцінки навантаженості синхронізатора шляхом використання імпульсу сили як критерія навантаження.

Практичне значення отриманих результатів. Основні результати дисертації можуть використовуватися для модернізації існуючих та створення нових

автомобілів з автоматизованим керуванням коробкою передач.

Практична значимість результатів дисертаційної роботи підтверджується актами впровадження на ДП «Харківський автомобільний завод».

Результати роботи використовуються у навчальному процесі на автомобільному факультеті ХНАДУ в курсах: «Автомобілі і трактори. Основи конструкції», «Спеціалізований рухомий склад автомобілів і тракторів», «Теорія автоматичних систем автомобілів і тракторів». Результати досліджень використовуються при підготовці курсових, дипломних проектів і в науково–дослідній роботі студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати дисертаційної роботи одержані самостійно. У наукових роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать такі результати: аналіз існуючих конструкцій трансмісій та механізмів перемикання передач в коробках передач [1, 6], визначення шляхів підвищення швидкодії виконавчого електромеханічного механізму перемикання [2]; дослідження динамічних явищ при роботі автоматизованого механізму перемикання [4]; обґрунтування вибору способу керування робочим процесом та побудова алгоритму керування автоматизованим механізмом перемикання передач [3, 7, 8, 11]; розроблена конструкція електромеханічного механізму перемикання передач [12]

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

– 73–76 Науково–технічній і науково–методичній конференції Харківського національного автомобільно–дорожнього університету (м. Харків, Україна, ХНАДУ, 2009–2012 рр.);

– 78 науково–технічна та науково–методична конференції університету ХНАДУ (м. Харків 2014р.);

– міжнародна науково–технічна конференція, присвячена 85–річчю заснування ХНАДУ та 85–річчю автомобільного факультету «Новітні технології в автомобіле будівництві та транспорті» (м. Харків, 2015 р.);

– Науково–практичній конференції «Актуальні питання розвитку, вдосконалення та експлуатації озброєння та військової техніки в Національній гвардії України» (м. Харків, Україна, НАНГУ, 26 листопада 2015 р.);

– III міжнародна науково–практична та науково–методична конференція присвячена 85–річчю кафедри автомобілів та 100–річчю з дня народження професора А.Б. Гредескула «Нові технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці спеціалістів» (м. Харків, 2016 р.);

– 30 наукова конференція Харківського національного університету повітряних сил імені Івана Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору» (м. Харків, 2017 р.)

Публікації. Наукові положення та результати дисертаційної роботи опубліковані у 13 наукових працях: 1 монографія, 7 публікацій у наукових фахових виданнях України та інших держав, 4 тези доповідей, 1 патент, який видано Державним департаментом інтелектуальної власності України.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу,

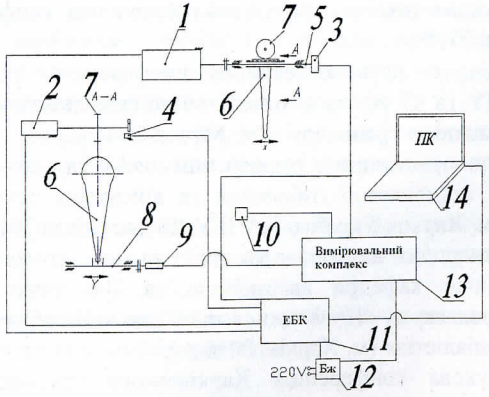
чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 174 сторінки, обсяг основного тексту – 115 сторінок, у тому числі 79 рисунків, 13 таблиць та 5 додатків на 24 сторінках. Список використаних джерел нараховує 141 найменування на 16 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, визначені мета і завдання дослідження, сформульовані положення, що виносяться на захист, наведені основні наукові і практичні результати.

У першому розділі проведено аналіз існуючих механізмів перемикання передач, досліджені розробки зі створення електромеханічних систем керування коробками передач. Виявлено основні недоліки існуючих систем керування автоматизованими коробками передач. Так електропневматичному механізм перемикання передач властивий суттєвий недолік обумовлений тим, що пневматичний циліндр перемикання виготовлений для забезпечення необхідного зусилля для включення найбільш навантаженої передачі. Разом з тим інші передачі які мають менше потрібне зусилля для перемикання та знаходяться під значним перевантаженням яке досягає до 500% при мінімальному робочому тиску. На сьогоднішній день трансмісія вантажних транспортних засобів активно оснащується автоматизованими системами керування. Необхідність їх застосування обумовлена полегшенням роботи водія і необхідністю скорочення витрати палива.

У **другому розділі** виконано експериментальне дослідження спроектованого автоматизованого електромеханічного мезанізму перемикання передач в стендових умовах. Структурна схема лабораторної установка показана на (рис. 1)



1 – силовий електродвигун; 2 – селекторний електродвигун; 3 – датчик включення передачі; 4 – датчик вибору повзуна; 5 – вал механізму перемикання; 6 – важіль перемикання передачі; 7 – шестерня селекторного електродвигуна; 8 –повзун КП; 9 – датчик переміщення повзуна КП; 10 – датчик частоти обертання вторинного валу КП; 11 – електронний блок керування; 12 – блок живлення; 13 – вимірювальний комплекс; 14 – комп'ютер.

Рисунок 1 – Структурна схема лабораторної установки

В результаті пошукових експериментів було отримано графіки перемішення повзунів КП при перемиканні передач на котрих було відмічено особливості руху які потребують детального дослідження (рис. 2).

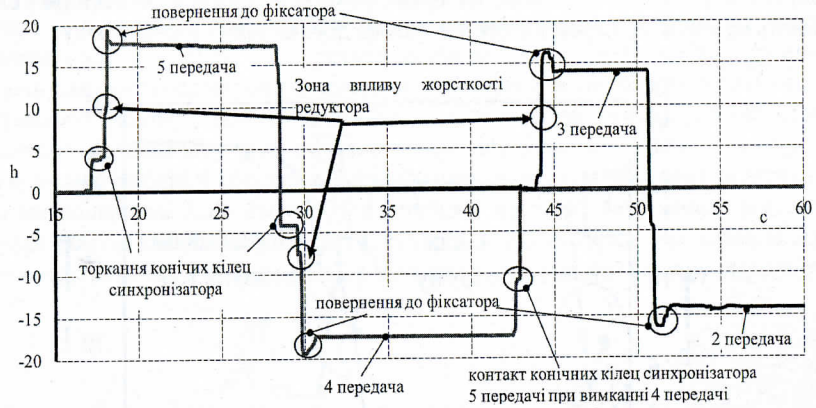


Рисунок 2 – Динаміка руху повзунів при перемиканні передач отримана експериментально

Аналізуючи отримані результати руху повзуна та залежності зміни сили струму на обмотках силового електродвигуна при перемиканні були виділені характерні зони та ділянка прискореного руху яка потребує додаткового дослідження (рис. 3-4)

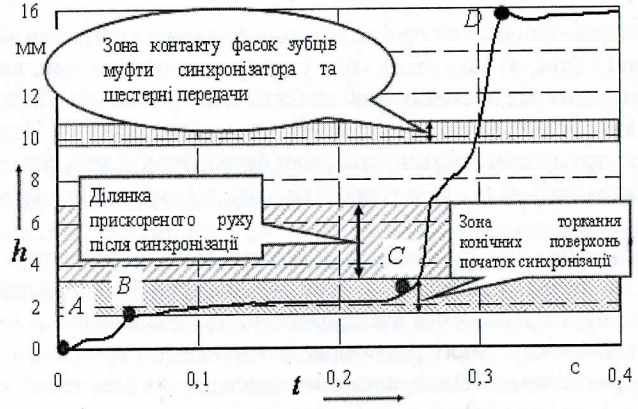


Рисунок 3 – Етапи процесу включення передачі

Так під час руху від т. А до т. В проходить вибирання зазорів в механізмі перемикання та переміщення повзуна з вилкою перемикання та корпусу синхронізатора до торкання конічних поверхонь синхронізатора.

На проміжку від т. В до т. С проходить вирівнювання кутових швидкостей вала та шестерні передачі (синхронізація).

На проміжку CD після вирівнювання кутових швидкостей та розблокування блокуючого пристрою проходе включення відповідної передачі. Із аналізу видно, що зона взаємодії зубців муфти із зубцями шестерні знаходиться вище ділянки прискореного руху та не впливає на прискорене переміщення. Фіксатори теж не впливають на характер переміщення повзуна на ділянці прискореного руху.

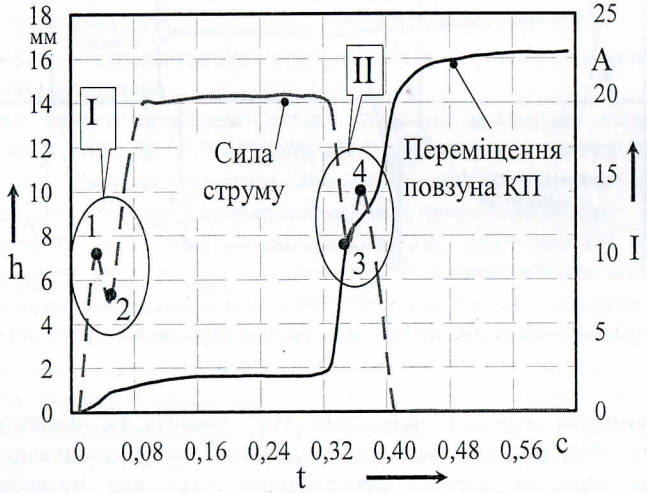


Рисунок 4 – Залежність сили струму та переміщення важеля перемикання при робочому процесі

Проаналізувавши робочий процес перемикання (рис. 4) отримав наступне:

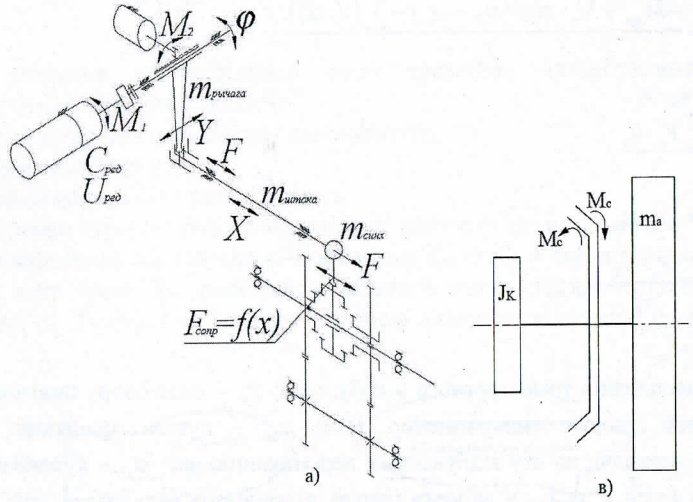
–на ділянці I (рис. 4) така зміна сили струму пояснюється тим, що до точки 1 сила струму залежить від пускових особливостей електродвигуна. До точки 2 видно спад який пояснюється розгоном інерційних мас електродвигуна. Подальший ріст величини сили струму пояснюється торканням фрикційних кілець синхронізатора та зупинкою електродвигуна під навантаженням, сила струму при цьому регулювалася реостатом.

–після закінчення синхронізації та розблокуванні синхронізатора різкий спад сили струму до точки 3 (ділянка II) (рис. 4) пов'язаний використанням енергії накопиченої в редукторі силового електродвигуна та перетворення її в кінетичну за рахунок крутильної жорсткості редуктора. Використавши накопичену енергію на прискорене переміщення деталей механізму перемикання має місце короткочасне збільшення сили струму точка 4, але внаслідок отриманого прискорення деталі переміщуються по інерції сила струму плавно зменшується.

Для вивчення цього явища було проведене всебічне дослідження силового електродвигуна електромеханічного механізму перемикання передач. Записані сигнали з датчиків були опрацьовані та по отриманим результатам були побудовані залежності як статичного наростання зусилля на важелі, так і динаміка його зміни. Отримані результати використовувалися для налаштування математичної моделі.

У **третьому розділі** виконано аналіз робочого процесу перемикання передач за допомогою математичної моделі автоматизованого електромеханічного мезанізму перемикання передач.

Для розрахунку параметрів ефективності системи була створена математична модель, що дозволяє виявити залежність досліджуваних критеріїв від параметрів системи і КП, структури і алгоритмів взаємодії елементів в системі. Математична модель є аналогом проектованої системи і основою для вирішення головних завдань системного підходу. Для математичного моделювання роботи автоматизованого механізму перемикання була складена приведена фізична модель механізму рис 5, яка враховує інерційні складові синхронізатора, штока повзуна, важеля перемикання та електродвигуна. При цьому були прийняті наступні допущення: вал силового електродвигуна, важіль перемикання, синхронізатор та вилка перемикання передачі абсолютно жорсткі, а редуктор силового електродвигуна має кінцеву жорсткість.



M_1– момент на вихідному валу силового електродвигуна; M_2– момент на вихідному валу селекторного електродвигуна; $U_{ред}$– передавальне число редуктора; $C_{ред}$– жорсткість редуктора; φ– кут повороту вихідного валу силового електродвигуна; $m_{важ}$– маса важеля перемикання; $m_{штока}$– маса штока перемикання; $m_{синх}$– маса синхронізатора

а) – приведена фізична модель механізму перемикання,

в) – розрахункова схема синхронізації в коробці передач.

Рисунок 5 – Моделі для математичного моделювання

Для визначення часу синхронізації була розроблена математична модель коробки передач автомобіля яка враховує можливі перемикання.

У дослідженнях приділялась увага моделюванню процесу перемикання передачі в основній коробці без участі дільника, а інші варіанти не розглядалися.

Під час моделювання робочих процесів, які відбуваються при перемиканні передач враховувалася інформація про геометричні параметри шестерень і валів,

моменти опору коченню в підшипниках і кількість зубів шестерень. Система рівнянь, що описує процес включення передачі, складається з двох структурних складових. Частини що описує обертання шестерень та валів коробки передач та частини що описує уповільнення транспортного засобу під час перемикання з однієї передачі на іншу. Зєднувальною ланкою між двома частинами виступає момент, що створюється синхронізатором.

Система рівнянь має вигляд:

$$\begin{cases} j_x = \dfrac{-P_w - P_\psi + M_c \cdot sign(\omega_ш - \omega_{II}) \cdot \dfrac{u_0}{r_к} - J_{II} \cdot \varepsilon_{II}}{m_a} \\ \varepsilon_{II} = \dfrac{j_x \cdot u_0}{r_к} \\ \varepsilon_ш = \dfrac{-M_{тр} + M_c \cdot sign(\omega_{II} - \omega_ш) - \sum(J_i \cdot \varepsilon_i)}{J_ш} \\ \varepsilon_i = \varepsilon_ш \cdot u_i \\ \omega_{II} = \dfrac{V_a \cdot u_0}{r_к} \\ \omega_ш = \int \varepsilon_ш dt \\ \omega_ш{}^0 = \dfrac{V_a \cdot u_0}{r_к} \cdot u_{II->ш} \\ V_a{}^0 = V_{крj} \end{cases} \quad (1)$$

де j_x – уповільнення транспортного засобу, м/с^2; P_w – сила опору повітря, Н; M_c – момент який створює синхронізатор, Н·м; $\omega_ш$ – кутова швидкість шестерні відповідної передачі, на яку відбувається перемикання, с$^{-1}$; ω_{II} – кутова швидкість вторинного валу, с$^{-1}$; J_{II} – момент інерції вторинного валу, кг·м^2; ε_{II} – кутове прискорення вторинного валу, с$^{-2}$; $r_к$ – радіус колеса, м; u_0 – передавальне число головної передачі; ε_i – кутове прискорення шестерень коробки передач, с$^{-2}$; $\varepsilon_ø$ – кутове прискорення шестерень коробки передач з якою входе в зчеплення синхронізатор, с$^{-2}$; u_i – передавальне число від шестерні з якою входе в зчеплення синхронізатор до і–той шестерні; V_a – швидкість автомобіля, км/год; $V_a{}^0$ – початкова швидкість автомобіля, км/год; $\omega_ш{}^0$ – початкова кутова швидкість шестерні відповідної передачі, на яку відбувається перемикання, с$^{-1}$; $u_{II->ш}$ – передавальне число від вторинного валу до шестерні на яку відбувається перемикання під час включення попередньої передачі; $V_{крj}$ – критична швидкість на попередній включеній передачі, км/год; m_a – маса автомобіля, кг; J_i – момент інерції шестерні, кг·м^2; $J_ш$ – момент інерції шестерні на яку відбувається перемикання, кг·м^2; $M_{тр}$ – момент тертя підшипників коробки передач, Н·м.

Модель КП використовувалася для визначення часу синхронізації, як допоміжного параметру при моделюванні робочого процесу в автоматизованому механізмі перемикання передач.

При моделюванні характеристик роботи електродвигуна використовуючи систему рівнянь (2) виникла проблема невідповідності сили струму та обертів якоря електродвигуна з даними каталогу виробника на різних режимах роботи.

$$\begin{cases} \dfrac{di}{dt} = \dfrac{-R_m \cdot i - K_m \dfrac{d\Theta}{dt} + U(t)}{L_m} \\ \dfrac{d^2\Theta}{dt^2} = \dfrac{K_\tau \cdot i - \Sigma M_{тр}}{I_{пр}} \end{cases} \quad (2)$$

Для усунення невідповідності було проведене налаштування моделі електродвигуна на 3 режимах роботи:

– режим пуску при нерухомому якорі двигуна;

– режим холостого ходу;

– режим номінального навантаження.

Дослідивши характер роботи моделі було виявлено що невідповідність моделі параметрам виробника обумовлено коефіцієнтами K_m та K_τ. А також істотно впливає реактивний опір якоря R_m який також залежить від частоти обертання ротора двигуна (рис. 6). Точками на графіку позначені величини відповідні паспортними даними.

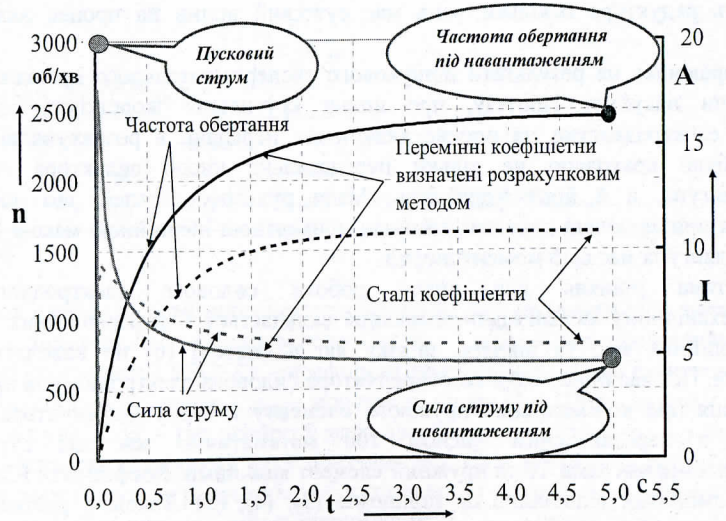


Рисунок 6 Динаміка частоти обертання та сили струму при різних коефіцієнтах K_m, K_τ, R_m.

Шляхом експериментального пошуку були визначені залежності цих коефіцієнтів. Залежності зміни коефіцієнтів описуються поліномами 4 ступеня.

$$R_m = 2E{-}12n^4{-}1E{-}0.8n^3{+}1E{-}05n^2{-}0.0021n{+}1.1834 \quad (3)$$

$$K_\tau = 2E{-}05i^4 - 0.0008i^3 + 0.0145i^2 - 0.1028i{+}0.3541 \quad (4)$$

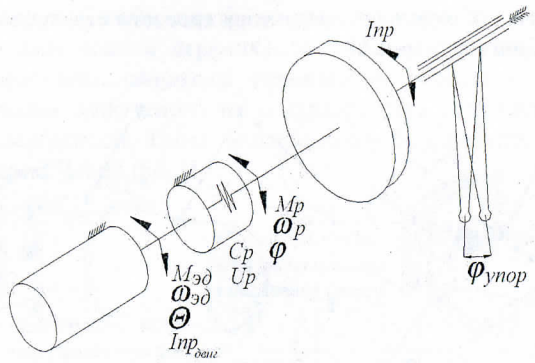
$$K_m = 2E{-}16n^4{-}8E{-}13n^3{+}8E{-}10n^2{-}4E{-}06n{+}0.01 \quad (5)$$

Так використовуючи постійні коефіцієнти при моделюванні процесу роботи силового електродвигуна пусковий струм на обмотках дорівнює 9,4 А, а швидкість обертання ротору електродвигуна дорівнює 1630 $с^{-1}$, що відповідно становить 47% і 65,2% від паспортних даних. При моделюванні з використанням змінних коефіцієнтів отримано струм на обмотках 17,7 А, що відповідає 88,5%, і швидкість обертання 2452 $с^{-1}$, що відповідає 98% від паспортних даних. Змінні коефіцієнти, визначені розрахунковим методом, дозволили підвищити точність моделювання.

Отримані при моделюванні залежності переміщення повзуна та важеля перемикання при включенні передачі були зіставлені з відповідними залежностями отриманими при проведені пошукового експерименту. Аналіз зіставлених залежностей показав неможливість опису виявленого ефекту прискореного руху повзуна після етапу синхронізації при включені передачі, використовуючи відому математичну модель. Оскільки на процес прискореного переміщення повзуна не впливає ні конструктивні параметри електродвигуна, ні конструкція КП була висунута гіпотеза про вплив редуктора силового електродвигуна, а саме його жорсткість. Тому при моделюванні роботи силового електродвигуна в електромеханічному механізмі перемикання потрібно враховувати крутильну жорсткість редуктора оскільки вона має суттєвий вплив на процес включення передачі.

Спираючись на результати пошукового експериментального дослідження та враховуючи висунуту гіпотезу, про вплив крутильної жорсткості редуктора силового електродвигуна на процес включення передачі, в розрахунковій схемі (рис. 7) було враховано не тільки передавальне число редуктора силового електродвигуна, а й його жорсткість. Маси рухомих деталей, що поступово рухаються при включені передачі, замінені приведеною інерційною масою $I_{пр}$. Якір силового двигуна має свій момент інерції.

Система рівнянь для опису роботи силового електродвигуна в електромеханічному механізмі перемикання складається з диференційних рівнянь руху інерційних мас та рівнянь зв'язку які в системі (6) не наводяться для спрощення. Під час опису жорсткості редуктора силового електродвигуна прийнято припущення про концентрацію пружного елементу в середині редуктора. Тобто редуктор з передавальним числом 100 математично має дві ступені з передавальними числами 10 та пружний елемент між ними. Коефіцієнти K_m, K_τ, R_m прийняті змінними відповідно до поліномів (3), (4), (5). Також в рівнянні руху важеля враховані приведені момент демпфування, момент тертя та момент опору фіксатора які підвищують відповідність математичної та фізичної моделей.



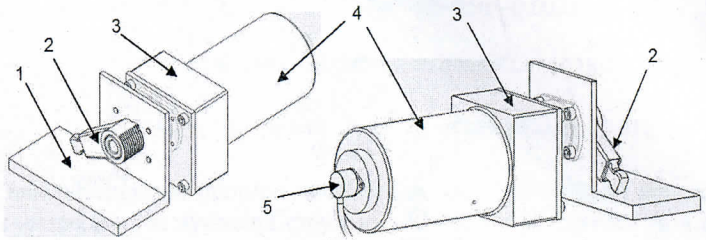
Θ – кут повороту валу електродвигуна град; $\varphi_{упор}$ – просторово часова залежність обмеження руху повзуна град; $C_р$ – жорстість редуктора Н·м; $U_р$ – передавальне число редуктора; φ– кут повороту вихідного валу редуктора град; $I_{пр}$ – приведений сумарний момент інерції кг·м^2; $I_{пр\ двиг}$– приведений момент інерції ротора силового двигуна кг·м^2; $M_{эд}$ – крутний момент на валу силового двигуна Н·м; $\omega_{эд}$ – кутова швидкість обертання вала силового двигуна $с^{-1}$; $M_р$ – крутний момент на вихідному валу редуктора силового електродвигуна Н·м.

Рисунок 7 – Розрахункова схема механізму керування коробкою передач для моделювання процесу включення та виключення передачі

$$\begin{cases} \dfrac{di}{dt} = \dfrac{-R_m \cdot i - K_m \dfrac{d\Theta}{dt} + U(t)}{L_m} \\ \dfrac{d^2\Theta}{dt^2} = \dfrac{K_\tau \cdot i - M_{тр1} - \dfrac{C_p \cdot \left(\dfrac{\Theta}{10} - 10 \cdot \varphi\right)}{10}}{I_{пр\,двиг}} \\ \dfrac{d^2\varphi}{dt^2} = \dfrac{C_p \cdot \left(\dfrac{\Theta}{10} - 10 \cdot \varphi\right) \cdot 10 - C_{упор} \cdot \left(\varphi - \varphi_{упор}\right) - M_{тр2} + M_{фіксатора}}{I_{пр}} \end{cases} \quad (6)$$

де i – сила струму на обмотках електродвигуна А; R_m – активний опір якірного кола Ом; L_m – індуктивність якірного кола Гн; K_m – коефіцієнт пропорційності між швидкістю обертання і ЕРС; $K\tau$ – коефіцієнт пропорційності між електромагнітним моментом та струмом якоря; $C_{упор}$ – жорсткість упору Н·м; U(t) – напруга живлення електродвигуна В; Θ – кут повороту вала електродвигуна град; $\varphi_{упор}$ – просторово часова залежність обмеження руху повзуна град; $C_р$ – жорсткість редуктора Н/мм; $U_р$ – передавальне число редуктора; φ– кут повороту вихідного вала редуктора град; $I_{пр}$ – приведений сумарний момент інерції кг·м^2; $I_{пр\ двиг}$ – приведений момент інерції ротора двигуна кг·м^2; $M_{тр}$ – момент тертя Н·м; $M_{фіксатора}$ – момент опору фіксатора Н·м;

Для визначення жорсткості редуктора силового електродвигуна був зібраний експериментальний стенд (рис 8).



1 – станина стенду; 2 – важіль перемикання передач; 3 – редуктор; 4 – електродвигун; 5 – датчик частоти обертання та кута повороту.

Рисунок 8 – Загальний вид стенда для визначення крутильної жорсткості

Під час випробувань важіль перемикання блокувався нерухомо і на обмотки електродвигуна подавалась різна сила струму. При цьому за допомогою датчика фіксувався кут повороту вала електродвигуна. За отриманими результатами вимірювань була побудована залежність кута закрутки вала силового електродвигуна від сили струму на його обмотках (рис. 9).

За отриманою залежністю була розрахована жорсткість редуктора силового електродвигуна механізму автоматизованого перемикання передач яка дорівнювала C_p=29 Н/градус, та в подальшому враховувалася при моделюванні роботи механізму. Результати математичного моделювання отримані при цьому мають допустиме співпадання з результатами експериментального дослідження.

Рисунок 9 – Накладення результатів експериментальних досліджень та математичного моделювання

Провівши моделювання системи з різною жорсткістю редуктора було розкрита та пояснена природа прискореного руху повзуна КП після процесу синхронізації. В процесі синхронізації редуктор силового електродвигуна, який має

певну жорсткість, дозволяє валу електродвигуна повернутися на деякий кут відносно нерухомого валу важеля перемикання. Після закінчення синхронізації відбувається різке зростання швидкості переміщення важеля з повзуном та синхронізатором відносно закрученого на редукторі вала електродвигуна через суттєву різницю в інерційності. Після вирівнювання їх положень відбувається взаємне паралельне переміщення (рис. 10).

Рисунок 10 – Динаміка повороту важеля перемикання передач із врахуванням жорсткості редуктора силового електродвигуна

Виражений процес закрутки редуктора має місце не тільки на етапі синхронізації, а й при повному включенні передачі.

Під час експериментальних досліджень та математичного моделювання був виявлений негативний ефект впливу крутильної жорсткості редуктора на процес вмикання передачі. А саме самовільне переміщення вала з важелем перемикання та муфтою синхронізатора в зворотному напрямку після повного включення передачі та зняття живлення з електродвигуна, що призводить до вимкнення передачі.

У **четвертому розділі** було проведено опис впливу жорсткості релуктора на процес перемикання передач. Моделювання динаміки вмикання передачі з різною жорсткістю редуктора силового електродвигуна показало, що із збільшенням жорсткості редуктора зменшується ефект прискорення повзуна після синхронізації.

Побудовані залежності, які описують зону прискореного руху важеля та скорочення часу руху повзуна від жорсткості редуктора, ці залежності описуються поліномами 3–го порядку (7), (8) та зображені на (рис. 11).

$$\Delta h = -0.0003C_p^3 + 0.026C_p^2 - 0.8667C_p + 11.842 \qquad (7)$$

$$\Delta t = -0{,}035\ln(C_p) + 0{,}0761 \qquad (8)$$

Проведений аналіз експериментальних досліджень роботи механізму керування коробкою передач дозволяє стверджувати, що на кожній передачі рівень прискорення повзуна свій що повязано з різною допустимою силою на синхронізатори різних передач. Так як жорсткість редуктора не може становити значення яке задовольнить всі передачі. Тому для корегування зусилля на кожній

передачі, а значить і ступінь прискорення після закрутки редуктора можна регулювати силою струму у обмотці електродвигуна.

Для вирішення задачі регулювання зусилля, на етапі синхронізації, та для запобігання інерційному виключенню передачі була розроблена модель генератора з керуванням ШІМ за рахунок регулювання скважності ШІМ сигналу. Скважністю ШІМ сигналу керує ПІД – регулятор в якості сигналу зворотного зв'язку якого виступає кут закрутки редуктора силового електродвигуна який пропорційний зусиллю на важелі перемикання.

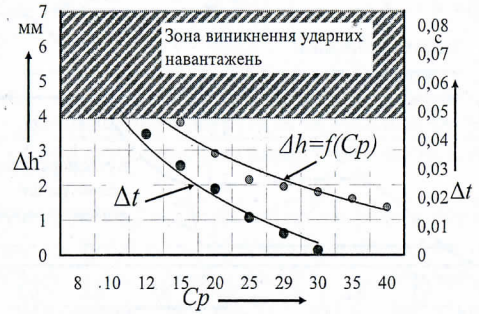


Рисунок 11 – Залежність прискореного переміщення та часу переміщення від жорсткості редуктора

Критерієм для визначення навантаженості синхронізатора при включенні передачі використано імпульс сили. Для цього було знайдено площу під кривою сили на важелі перемикання відповідно до визначеної моделюванням зміни сили (рис. 12). Отримані результати моделювання робочого процесу перемикання показали, що зусилля на синхронізаторі на II, III, IV, V передачах не перевищує величин обмежених умовами довготривалої роботи. Похибка при цьому не перевищує 18%.

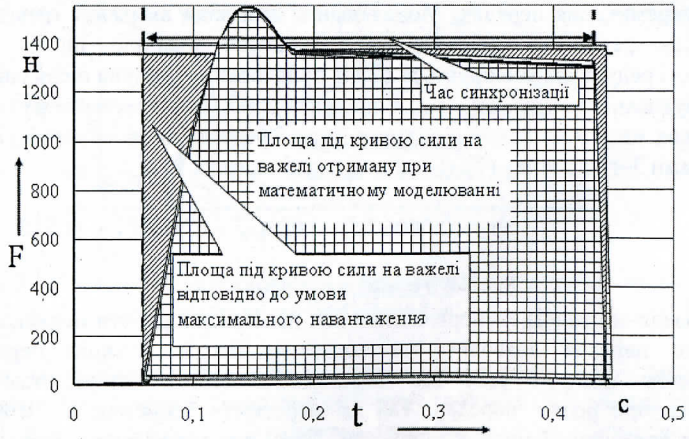


Рисунок 12 – Визначення імпульсу сили

Для усунення ефекту самовільного виключення передачі після відключення живлення з обмоток електродвигуна було використано додаткову ланку використання ШІМ–регулювання на етапі повного включення передачі. Використання повторного ШІМ–регулювання дозволило плавно зменшити силу струму на обмотках електродвигуна при цьому після повного включення передачі не відбувалося інерційне вимкнення передачі (рис. 13).

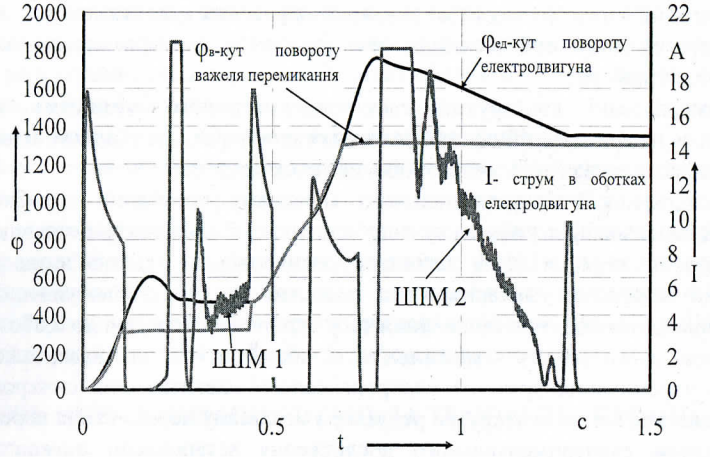


Рисунок 13 – Процес включення з керуванням ШІМ на етапі повного вмикання

Зіставивши результати математичного моделювання з експериментально отриманими даними визначили, що похибка в результатах становить не більше 15%, що є прийнятним результатом (рис. 14).

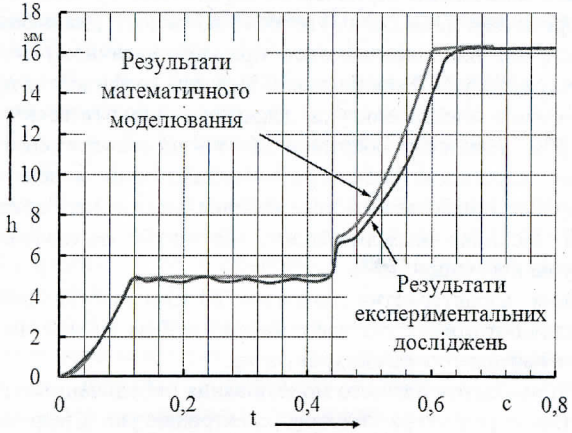


Рисунок 14 – Зіставлення результатів експериментального та теоретичного досліджень робочого процесу електромеханічного механізму керування коробкою передач

ВИСНОВКИ

1. В результаті аналізу існуючих приводів перемикання передач виявлено:
- що використання електропневматичного механізму керування 5–ти ступеневою коробкою передач призводить до перевантаження синхронізаторів 3, 4 та 5 передачі на 205%, 324%, 534% відповідно;
- складність регулювання тиску в силовому циліндрі електропневматичного механізму перемикання та швидкоплинність переміщення важеля після синхронізації може призвести до виникнення ударних навантажень;
- електропневматичний механізм має додаткове джерело живлення у вигляді стиснутого повітря;
- проаналізовані конструкції електропневматичного механізму перемикання базуються на три позиційних пневматичних циліндрах, що обмежує їх використання на коробках передач які мають не більше трьох повзунів.

2. Дослідження експериментального механізму керування коробкою передач дозволило визначити аномальну зону підвищеної швидкості переміщення важеля перемикання передач після закінчення синхронізації яка пов'язана з наявністю кінцевої жорсткості механізму між важелем та електродвигуном. Позитивною стороною цього ефекту є скорочення часу включення передачі до 0,07с. Негативною стороною цього ефекту є можливість виникнення ударних навантажень на зубці муфти перемикання уразі не контрольованого навантаження синхронізатора. Це пов'язано з величиною закрутки редуктора механізму перемикання передач.

3. Шляхом експериментального дослідження встановлено наявність суттєвого впливу жорсткості редуктора силового електродвигуна на робочий процес вмикання передачі. Визначена реальна жорсткість редуктора силового електродвигуна експериментального електромеханічного механізму перемикання передач яка склала 29 $Н•м^{-1}$. Встановлено залежність між струмом в обмотках силового електродвигуна та кутом закрутки його редуктора, який може перевищувати 200°, а також між струмом та силою на важелі перемикання передач яка має лінійний характер.

4. Під час теоретичних досліджень уточнено залежності для визначення коефіцієнтів пропорційності які використовуються при математичному моделюванні роботи силового електродвигуна. Використання змінних коефіцієнтів пропорційності, при моделюванні роботи електродвигуна, дозволяє підвищити точність моделювання по струму до 88,5%, і швидкості обертання до 98% від експериментальних даних.

5. Врахування жорсткості редуктора в математичній моделі дало змогу якісно відтворити процес прискореного переміщення важеля перемикання після процесу синхронізації. Похибка моделювання в результаті зіставлення з результатами експерименту не перевищує 15 %.

6. Дослідження характеристик силового електродвигуна дозволило визначити допустимі величини струму під час синхронізації на кожній передачі за критерієм дозволеного навантаження на синхронізатор.

5. За результатами математичного моделювання побудовані поліноми, які описують зв'язок жорсткості редуктора силового електродвигуна з величиною прискореного переміщення важеля перемикання та часом переміщення.

6. Спираючись на результати математичного моделювання встановлено, що жорсткість редуктора силового електродвигуна не повинна бути меншою за

15 $Н•м^{-1}$ відповідно до критерію виключення ударних навантажень на зубці муфти.

7. Шляхом теоретичних досліджень встановлено допустимі величини кута закрутки редуктора силового електродвигуна під час синхронізації на кожній передачі за критерієм дозволеного навантаження на синхронізатор. Так для другої передачі допустимий кут складає 160°, для третьої передачі допустимий кут складає 100°, для четвертої передачі допустимий кут складає 68° та для п'ятої передачі допустимий кут складає 40°. Ці значення були встановлені для експериментального електромеханічного механізму перемикання з жорсткістю редуктора 29$Н•м^{-1}$.

8. Шляхом експериментальних та теоретичних досліджень було встановлено необхідність регулювання сили струму в обмотках силового електродвигуна на двох етапах включення передачі:
- під час синхронізації для запобігання перевантаження синхронізатора;
- після повного включення передачі для запобігання можливого інерційного виключення передачі після знеструмлення силового електродвигуна.

9. Визначено закон керування струмом в обмотках силового електродвигуна на етапах синхронізації та після включення передачі. Керування реалізовано за допомогою керованого ШІМ – регулятора, а також визначені коефіцієнти ПІД – регулятора які визначають час подачі струму при керуванні ним у режимі ШІМ (пропорційний дорівнює 3, інтегральний – 5, диференціальний – 0,1).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Богомолов В.О. Розробка адаптивних систем керування трансмісією: монографія / В.О. Богомолов, В.І. Клименко, М.Г. Михалевич, Д.М. Леонтьєв, О.О. Ярита, М.М. Сильченко – Харків: ХНАДУ, 2018.– 192с.
2. Богомолов В. А. Анализ существующих конструкций трансмиссий/ В. А. Богомолов, В. И. Клименко, Н. Г. Михалевич, Н. Н. Сильченко // Автомобільний транспорт. – Х.: ХНАДУ, 2010. – Випуск №27 – С. 17–21.
3. Богомолов В. А. Результаты экспериментальных исследований механизма управления коробкой передач / В. А. Богомолов, В. И. Клименко, Н. Г. Михалевич, Г. К. Кальянов, В. В. Воробьев, Н. Н. Сильченко // Автомобільний транспорт. – Х.: ХНАДУ, 2011. – Випуск №29 – С. 126–128.
4. Богомолов В. О. Моделювання робочого процесу синхронізації у десятиступінчастій коробці передач вантажного автомобіля / В. О. Богомолов, В. І. Клименко, М. Г. Михалевич, М. М. Сильченко // Автомобільний транспорт. – Х.: ХНАДУ, 2011. – Випуск №29 – С. 56–61.
5. Сильченко Н.Н. Теоретическое исследование рабочих процессов, протекающих при переключении передач/ Н. Н. Сильченко // Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов: сборник научных трудов Випуск №8 «Безопасность дорожного движения», – Минск, БНТУ, 2016, С.493–501.
6. Михалевич Н.Г. Анализ современных тенденций в развитии конструкций автоматизированого управления агрегатами трансмиссии /

Н. Г. Михалевич, Н. Н. Сильченко // Вісник Харківського національного автомобільно–дорожнього університету, – Х.: ХНАДУ, 2016. – Випуск №75. – С. 54 – 57.

7. Михалевич Н.Г. Теоретическое иследование робочих процессов в механизме переключения передач./ Н. Г. Михалевич, Н. Н. Сильченко // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил, – Х., 2017. – Випуск №1(50). – С. 88 – 91.

8. Михалевич М. Г. Усовершенствование параметров модели электродвигателя механизма переключения передач в трансмиссии автотранспортных средств./ М. Г. Михалевич, Н. Н. Сильченко // Автомобіль і Електроніка. Сучасні технології, – Х.: ХНАДУ, 2018. – Випуск №13 – С. 42–47.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Сильченко Н.Н. Исследование динамических процессов происходяших в электромеханическом механизме переключения передач/ Н. Н. Сильченко // Матеріали VI міжнародної науково – практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» м. Вінниця, 21 – 23 жовтня 2013 , 2013. – С. 62 – 63.

10. Сильченко М.М. Імітаційне моделювання процесів перемикання передач і дослідження законів перемикання / М.М. Сильченко // Актуальні питання розвитку, удосконалення та експлуатації озброєння та військової техніки в Національній гвардії України, 26 листопада 2015 р.: збірник тез доповідей – Харків, 2015 – С. 42.

11. Михалевич Н.Г. Теоретическое иследование робочих процессов в механизме переключения передач / Н. Г. Михалевич, Н.Н. Сильченко // Новітні технології–для захисту повітряного простору тридцята наукова конференція Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба , 12–13 квітня 2017 р.: збірник тез доповідей – Харків, 2017 – С. 334.

12. Сильченко Н.Н., Михалевич Н.Г. Математическое моделирование механизма управления коробкой передач / Н. Н. Сильченко // Новітні технології в автомобілебудівництві та транспорті: 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. 52 – 54.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

13. Пат. 93788 Україна, МПК F16H 59/00. Механизм автоматизованого перемикання передач / заявники Богомолов В. О., Клименко В. І., Михалевич М.Г. Сильченко М.М. патентовласники Богомолов В. О., Клименко В. І. – № 201405714; заявл. 27.05.2014; надр. 10.10.2014. Бюл. №19

АНОТАЦІЯ

Сильченко М.М. Вдосконалення автоматизованої системи керування механічною коробкою передач транспортних засобів категорії N_3 та M_3. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.02 «Автомобілі та трактори» (274 – Автомобільний транспорт). – Харківський національний автомобільно–дорожній університет МОН України, Харків, 2019.

Дисертація присвячена покращенню експлуатаційних показників електромеханічного автоматизованого приводу перемикання передач великовантажних автомобілів та автобусів, удосконаленню конструкції виконавчого механізму приводу керування коробкою передач, оптимізації роботи алгоритму керування автоматизованим електромеханічним приводом перемикання передач.

В роботі запропонована конструкція виконавчого механізму перемикання передач з двома електродвигунами постійного струму власної розробки. Визначено, що запропоновані нові взаємозв'язки між конструктивними елементами механізму перемикання передач дозволяють отримати одночасно необхідну швидкодію приводу, високу точність регулювання, та забезпечують необхідне зусилля на синхронізаторі.

Математична модель виконавчого механізму електромеханічного приводу керування коробкою передач включає: диференціальні рівняння які описують роботу електродвигуна постійного струму, а також рівняння зв'язку.

Ключові слова: коробка передач, електромеханічний привод, перемикання передач, силовий електродвигун, синхронізатор, жорсткість редуктора, зусилля на синхронізаторі.

АННОТАЦИЯ

Сильченко М.М. Совершенствования автоматизированной системы управления механической коробкой передач транспортных средств категории N_3 и M_3. - Квалификационная научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.22.02 «Автомобили и тракторы» (274 - Автомобильный транспорт). - Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет МОН Украины, Харьков, 2019.

Диссертация посвящена улучшению эксплуатационных показателей электромеханического автоматизированного привода переключения передач большегрузных автомобилей и автобусов, усовершенствованию конструкции исполнительного механизма привода управления коробкой передач, оптимизации работы алгоритма управления автоматизированным электромеханическим приводом переключения передач.

Одним из путей улучшения условий работы водителей большегрузных автомобилей и автобусов является облегчение процесса управления агрегатами трансмиссии, в частности коробкой передач. Увеличение мощности двигателей транспортных средств и передающего ряда коробок передач приводит к повышению усилия на переключение передач и периодичности этих переключений. Для выполнения существующих нормативов, касающихся легкости и удобства управления агрегатами трансмиссии транспортных средств, автомобильные производители должны использовать в приводе переключения передач разнообразные усилители и разрабатывать автоматизированные системы

управления. Отсутствие подобных разработок на территории Украины приводит к использованию отечественными автомобильными заводами продукции ведущих мировых производителей автомобильных компонентов, которые в последние годы решают проблему уменьшения усилия на органе управления и автоматизации переключения передач путем применения различного рода сервоприводов в механических коробках передач. Использование иностранных компонентов приводит к увеличению стоимости отечественных транспортных средств и снижение их конкурентоспособности на рынке.

В работе предложена конструкция исполнительного механизма переключения передач с двумя электродвигателями постоянного тока собственной разработки. Определено, что предложенные новые взаимосвязи между конструктивными элементами механизма переключения передач позволяют получить одновременно необходимое быстродействие привода, высокую точность регулирования, и обеспечивают необходимое усилие на синхронизатор.

Математическая модель исполнительного механизма электромеханического привода управления коробкой передач включает: дифференциальные уравнения описывающие работу электродвигателя постоянного тока, а также уравнения связи.

Ключевые слова: коробка передач, электромеханический привод, переключение передач, силовой электродвигатель, синхронізатор, жесткость редуктора, усилие на синхронизаторе.

ABSTRACT

Sylchenko M. M. Improvement of the automated mechanical transport management system of category N_3 and M_3. Qualifying research paper printed as manuscript.

Thesis for the Degree of Ph.D. of Engineering Sciences (Doctor of Philosophy) in 05.22.02 "Automobiles and Tractors" (274 – Automobile Transport). – Kharkiv National Automobile and Highway University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The focus of this thesis is on the improvement of operational parameters of electro–mechanical automatic gear–shift assembly of heavy–duty trucks and buses, improvement of the design of the transmission control assembly actuator, optimization of the control algorithm of the automatic electro–mechanical gear–shift assembly.

According to the analysis of the obtained results, a design of the actuator of gear–shift mechanism with two proprietary DC motors is proposed for further improvement. It was determined that the proposed new interconnections between the structural components of the gear–shift mechanism provide means for simultaneously obtaining the required response time of the assembly, high adjustment accuracy, and provide the necessary effort on the synchronizer.

A mathematical formulation of the working process of the actuation of gear by automated electro–mechanical gear–shifting mechanism is performed. The mathematical model of the actuator of the electro–mechanical gear–shift assembly includes: differential equations describing the operation of the DC motor, and the equation of connection.

Keywords: transmission, electro–mechanical gear–shift assembly, power motor, synchronizer, rigidity of the gear unit, efforts on the synchronizer.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0.9. Тир. 100 прим. Зам. № 202-19.
Підписано до друку 25.04.2019. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (057) 758-01-08, (066) 822-71-30
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.

СТИЛЬ-ИЗДАТ
ТИПОГРАФИЯ
www.stil-izdat.com