

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

**ЗИОНГ ШІ ХІЕП**



УДК 629.114.2.001

**ПОКРАЩЕННЯ КЕРОВАНOSTІ ШВИДКОХІДНИХ ГУСЕНИЧНИХ  
МАШИН ЗА РАХУНОК ВСТАНОВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ  
МЕХАНІЗМІВ ПОВОРОТУ**

Спеціальність 05.22.02 – автомобілі та трактори

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі інформаційних технологій і систем колісних та гусеничних машин ім. О.О. Морозова Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Волонцевич Дмитро Олегович**,  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут», завідувач кафедри  
інформаційних технологій і систем колісних  
та гусеничних машин ім. О.О. Морозова

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Подригало Михайло Абович**,  
Харківський національний автомобільно-дорожній  
університет, завідувач кафедри технології  
машинобудування та ремонту машин

кандидат технічних наук  
**Веретенников Олександр Іванович**,  
АТ «Харківський тракторний завод»,  
радник генерального директора з інноваційної  
діяльності

Захист відбудеться «29» серпня 2016 р. о 15.00 годині на засіданні спеці-алізованої вченої ради Д 64.050.13 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21, кафедра двигунів внутрішнього згоряння, ауд. 11.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий « \_\_ » липня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Ребров О.Ю.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У світі за підрахунками різних джерел на рубежі тисячоріч налічувалося в експлуатації від 40 до 50 тисяч багатоцільових транспортерів-тягачів легких броньованих (МТ-ЛБ) і машин на їхньому шасі. Ці машини дотепер показують гарні результати по надійності і прохідності, але вони істотно поступаються сучасним машинам по питомій потужності, захищеності та ергономічним параметрам.

Один з таких ергономічних параметрів це зручність керування напрямком руху. В швидкохідних гусеничних машинах (ШГМ) за це відповідають механізми повороту (МП), завдяки яким машина може рухатись за обраною криволінійною траєкторією. В гусеничній техніці попередніх поколінь ці МП, як правило, були механічними і мали обмежену кількість фіксованих радіусів повороту (РП). Потрібна кривизна траєкторії досягалася або шляхом послідовного вмикання-вимикання фіксованих РП, або шляхом тривалого буксування фрикційних елементів з ручним керуванням за допомогою важелів. Сучасні вимоги до МП ШГМ передбачають плавну зміну РП за допомогою штурвалу з використанням розвинених автоматичних систем керування швидкістю і напрямком руху.

Для військової гусеничної техніки за правилами експлуатації прийнято при проходженні машинами капітального ремонту – одночасно проводити більш-менш істотну модернізацію, що дозволяє якщо не привести їх у повну відповідність, то хоча б наблизити машини попередніх поколінь до нових вимог.

Так при різкому збільшенні обсягів експлуатації ШГМ в останні часи в Україні зросла кількість аварій і дорожньо-транспортних пригод з їхньою участю, спровокованих сполученням невисокої кваліфікації механіків-водіїв і складністю і незручністю системи керування поворотом гусеничної техніки попередніх поколінь.

Тому для часткової модернізації трансмісій військової гусеничної техніки попередніх поколінь науково-прикладна задача отримання науково обґрунтованих технічних рішень, що дозволять із мінімальними витратами домогтися плавної керованої зміни радіуса повороту від вільного до фіксованого з рекуперацією енергії гальмування, є актуальною і визначає напрямок дисертаційного дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, темами.** Робота виконувалась на кафедрі інформаційних технологій і систем колісних та гусеничних машин ім. О.О. Морозова в межах відкритих розділів проекту "Державної програми розвитку озброєння та військової техніки до 2015 року" і держбюджетної НДР МОН України «Удар», а також творчого договору про співробітництво між ДП "ХКБМ ім. О.О. Морозова" (м. Харків) і НТУ «ХПІ», у яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної роботи є покращення керованості швидкохідних гусеничних машинах із двопотоковими механічними ме-

ханізмами повороту шляхом плавної зміни радіуса повороту від вільного до фіксованого з рекуперацією енергії гальмування відстаючого борту за рахунок установки асинхронного електропривода з частотним керуванням.

Для досягнення зазначеної мети поставлені такі задачі:

- аналіз переваг і недоліків схем механізмів повороту швидкохідних гусеничних машин;

- попередня аналітична оцінка потужності приводу, яка необхідна для повороту швидкохідних гусеничних машин із двопотоковими механічними механізмами повороту; вибір схем, типу і способу керування електромоторами механізмів повороту;

- удосконалення математичної моделі криволінійного руху швидкохідних гусеничних машин з урахуванням одночасного використання механічних і електромеханічних гілок в механізмах повороту і комп'ютерної програми, що її реалізує;

- чисельне моделювання і порівняльний аналіз криволінійного руху швидкохідних гусеничних машин із двопотоковими механічними і електромеханічними механізмами повороту.

*Об'єкт дослідження* – процес керованого криволінійного руху швидкохідних гусеничних машин із двопотоковими механічними і електромеханічними механізмами повороту.

*Предмет дослідження* – керованість швидкохідних гусеничних машин в процесі руху за криволінійною траєкторією.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених задач застосовувалися наступні методи: метод порівнянь і аналогій для аналізу переваг і недоліків схем механізмів повороту; методи теоретичної механіки та аналітичні методи теорії руху швидкохідних гусеничних машин на місцевості; методи теорії електроприводу для побудови механічних характеристик електромоторів з різними способами регулювання частоти обертання; методи складання диференціальних рівнянь руху твердого тіла на основі теорем про рух центру мас та рівняння обертального руху; методи математичного моделювання перехідних процесів, що відбуваються при криволінійному русі швидкохідних гусеничних машин; метод Runge-Kutta для розв'язання диференціальних рівнянь та їх систем.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

- уперше численним методом отримані залежності характеристик повороту швидкохідних гусеничних машин із двопотоковими механічними механізмами повороту від параметрів потужності додаткового електроприводу для схем з одним електромотором і з двома електромоторами, що працюють переважно в гальмівному режимі;

- одержала подальший розвиток теорія руху швидкохідних гусеничних машин в аспекті використання електродинамічного гальмування у двопотокових механічних механізмах повороту;

– одержала подальший розвиток математична модель криволінійного руху швидкохідних гусеничних машин на горизонтальній місцевості, яка доповнена можливістю паралельного функціонування електродинамічного і фрикційного гальмування відстаючого борту для двопотокових механічних механізмів повороту.

**Практична цінність отриманих результатів** для транспортного машинобудування полягає у тому, що:

– запропоновані варіанти модернізації існуючих двопотокових механічних механізмів передач і повороту шляхом установки додаткових електроприводів для схем з одним електромотором і обертанням в протилежні боки сонячних шестірень підсумовуючих рядів і з двома електромоторами, що працюють переважно в гальмівному режимі, які при незначних витратах дозволяють легко здійснювати плавну керовану зміну радіуса повороту від вільного до фіксованого з рекуперацією енергії гальмування відстаючого борту;

– запропоновано для тягачів сімейства МТ-ЛБ при установці двигунів потужністю більше 220 кВт (300 к.с.) і збереженням механічного механізму передач і повороту зменшувати передатне відношення в гільці приводу сонячних шестірень підсумовуючих планетарних рядів з 2,61 до 2 для підвищення не тільки швидкості та динамічності машини, а й для істотного поліпшення її маневреності.

Результати досліджень впроваджені та використовуються в розрахунковій практиці ДП «ХКБМ ім. О.О. Морозова», а також у навчальному процесі НТУ «ХП» при підготовці студентів за напрямом 6.050503 – «Машинобудування» та спеціальності 7(8).05050305 – «Колісні та гусеничні транспортні засоби».

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні положення дисертаційного дослідження виконані здобувачем особисто. Серед них: аналітична оцінка необхідної потужності окремого електропривода для двопотокової трансмісії тягачів типу МТ-ЛБ; обрання кінематичних схем механізмів повороту для чисельного моделювання; удосконалення математичної моделі; проведення розрахунків і обробка їхніх результатів; формулювання висновків і рекомендацій.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи доповідалися на: XXII, XXIII і XXIV Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2014 р. – 2016 р.); 23 Міжнародній науково-технічній конференції «Trans and Motauto'15» (м. Варна, Болгарія, 2015 р.), Міжнародній конференції «International conference of industrial technologies and engineering» (ICITE 2015), (м. Шимкент, Казахстан: 30-31 жовтня, 2015). У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на науковому семінарі кафедри інформаційних технологій і систем колісних та гусеничних машин ім. О.О. Морозова НТУ «ХП» в 2016 році і на розширеному засіданні кафедри автомобіле- і тракторобудування НТУ «ХП» в 2016 році.

**Публікації.** Основні положення дисертації відображені у 6 наукових публікаціях, з них: 3 статті у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз, 2 – у закордонних періодичних фахових виданнях, 1 – у матеріалах конференції.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 146 сторінок; з них 32 рисунки по тексту; 14 рисунків на 13 окремих сторінках; 6 таблиць по тексту; список використаних джерел з 150 найменувань на 17 сторінках, 2 додатки на 4 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані її мета і основні завдання дослідження, наведені шляхи їхнього рішення, визначено об'єкт і предмет дослідження, наукову новизну та практичну цінність роботи, дана інформація про особистий внесок здобувача, апробацію і впровадження результатів роботи.

**Перший розділ** присвячений аналізу існуючих напрямків розробок, модернізації та досліджень МП ШГМ.

Дослідженням по теорії та практичними розробками МП займалися такі вчені як Антонов А.С., Балдін В.О., Благонравов О.О., Бурцев С.Є., Вонг Джон, Гуськов В.В., Дмитрієв А.О., Забавников М.О., Кондаков С.В., Красеньков В.І., Опейко А.Ф., Платонов В.Ф., Сергеев Л.В., Фаробін Я.Є. і багато інших. Їхні роботи з теоретичного опису криволінійного руху ШГМ склали класичний підхід до моделювання цих процесів. Але і сьогодні доцільним є подальший аналіз керованості ШГМ стосовно приведення цього параметру для машин попередніх поколінь до сучасних вимог.

На основі аналізу існуючих конструкцій МП гусеничної техніки попередніх поколінь зроблено висновок про неефективність часткової модернізації ШГМ з МП на основі бортових фрикціонів, планетарних і диференціальних МП. Як об'єкт часткової модернізації запропоновано двопотокові механічні ступінчасті механізми передач і повороту (МПП), що встановлені на гусеничних транспортерах МТ-ЛБ.

Відмічено, що останнім часом з бурхливим розвитком електричного і гібридного приводу в автомобілебудуванні до цієї теми повернулися і розробники військових гусеничних та колісних машин. Відповідно застосування електроприводу в МП, на відміну від гідроприводу, дозволить накопичувати рекуперовану енергію гальмування відстаючого борту на повороті в акумуляторних батареях.

Доведено, що доцільним є застосування електроприводу для організації повороту в двопотокових механічних ступінчастих трансмісіях ШГМ, тим більше, варіанту з використанням електромоторів переважно в генераторному і гальмівному режимах.

**Другий розділ** присвячений визначенню механічних характеристик електроприводу і вибору електродвигунів для двохпотокowego МП ШГМ.

Для тягача МТ-ЛБ з шириною колії  $B=2,5$  м та штатними значеннями передаточних відношень з допомогою апарату теорії руху ШГМ розраховані залежності швидкості центру мас тягача  $v_C$  від РП по забігаючому борту  $R_2$ :

$$\text{за умовою повного заносу} - v_C \geq \sqrt{\mu_{\max} g \left( R_2 - \frac{B}{2} \right)}; \quad (1)$$

$$\text{за умовою часткового заносу} - \sqrt{\mu g \left( R_2 - \frac{B}{2} \right)} \leq v_C < \sqrt{\mu_{\max} g \left( R_2 - \frac{B}{2} \right)}; \quad (2)$$

$$\text{за умовою без заносу} - v_C < \sqrt{\mu g \left( R_2 - \frac{B}{2} \right)}. \quad (3)$$

Тут поточне значення коефіцієнту опору повороту  $\mu$  визначається через його максимальну величину  $\mu_{\max}$  за формулою  $\mu = \frac{\mu_{\max}}{a + \frac{(1-a)R_2}{B}}$ , де  $a=0,85$ .

На рис. 1 і 2 наведені отримані за формулами (1) – крива 2 і (3) – крива 1 залежності та штатні значення фіксованих РП на передачах нормального ряду трансмісії тягача МТ-ЛБ – крива 3 для ґрунтів з коефіцієнтами опору повороту  $\mu_{\max}=0,8$  та  $\mu_{\max}=0,4$ .

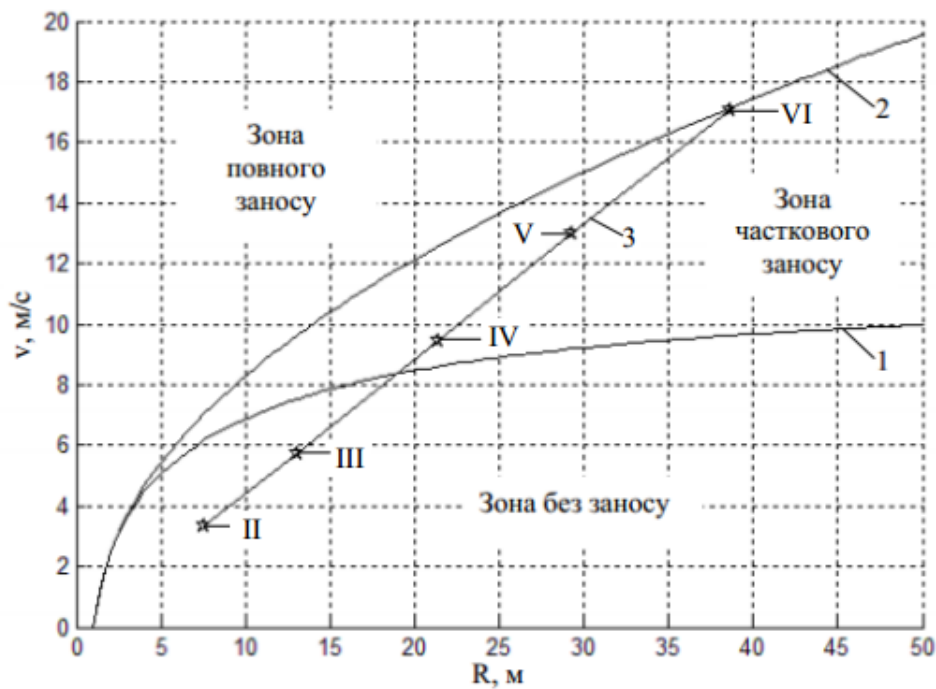


Рисунок 1 – Залежність швидкості від радіусу повороту при  $\mu_{\max}=0,8$ :  
II-VI- номер передачі

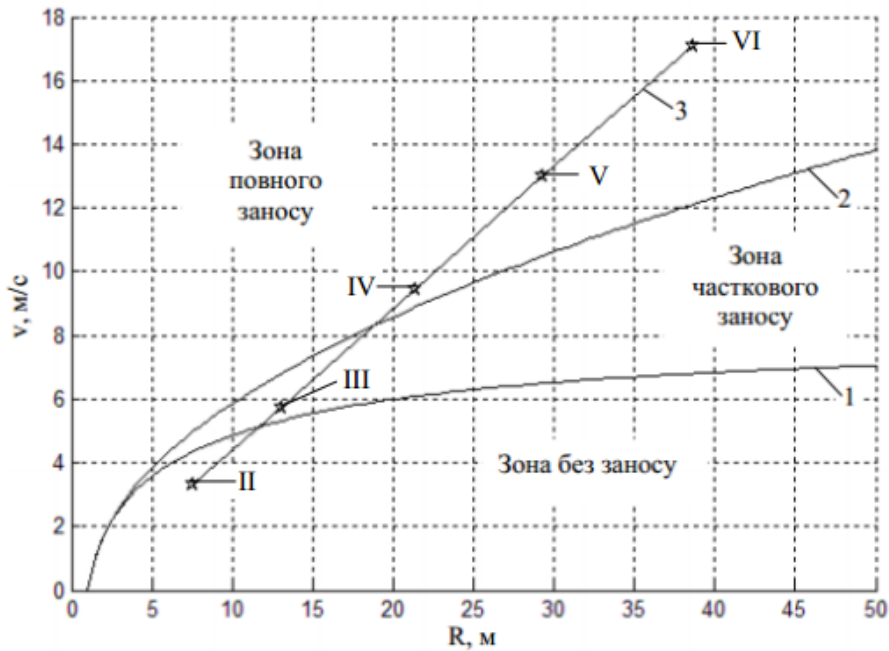


Рисунок 2 – Залежність швидкості від радіусу повороту при  $\mu_{\max}=0,4$ :  
II-VI- номер передачі

Виходячи з рисунків, визначено, що трансмісія тягача МТ-ЛБ забезпечує радіуси повороту, які на важких ґрунтах ( $\mu_{\max}=0,8$ ) не можуть призвести до повного заносу машини, а на слизькій поверхні ( $\mu_{\max}=0,4$ ) рух без повного заносу при повній подачі палива можливий тільки на другій та третій передачах.

Для тягача з масою  $m=12500$  кг, довжиною опорної поверхні рушія  $L=3,7$  м, шириною колії  $B=2,5$  м, висотою розташування центра мас машини над опорною поверхнею  $h_C=1,1$  м при коефіцієнті опору руху машини  $f=0,08$  прораховані необхідні обертальні моменти і потужності на керуючих елементах при повороті зі збереженням швидкості прямолінійного руху і показників штатної трансмісії (табл. 1), а також для здійснення повороту на границі повного заносу машини.

Таблиця 1 – Геометричні, кінематичні і силові характеристики повороту досліджуваної ШГМ

№ передач	$v_C$ , м/с	$\omega_C$ , с <sup>-1</sup>	$R_2$ , м	$v_2$ , м/с	$v_1$ , м/с	$F_Y$ , Н	$\mu$	$\chi$ , м
I	0,55	0,444	2,5	1,1	0	3025	0,8	0,057
II	2,31	0,444	3,9	2,866	1,753	25061	0,738	0,512
III	2,78	0,444	7,5	3,33	2,224	15401	0,615	0,377
IV	5,20	0,444	12,95	5,755	4,644	28710	0,491	0,882
V	8,92	0,444	21,35	9,475	8,364	49426	0,403	1,85
VI	12,45	0,444	29,3	13	11,894	69018	0,562	1,85
VII	16,53	0,444	38,6	17,085	15,974	91390	0,745	1,85



Продовження таблиці 1

№ передач	$\chi_0$	$F_X$ , Н	$Q_2$ , Н	$Q_1$ , Н	$K$	$P_2$ , Н	$P_1$ , Н	$\eta_{гус2}$
I	0,030	138	62644	59982	1	41544	31328	0,930
R	0,276	4845	72339	50284	1,076	39125	24470	0,898
II	0,204	930	68088	54535	1,041	32669	21929	0,89
III	0,477	2156	73944	48679	1,227	24194	12227	0,846
IV	1	4549	83059	39564	2	8919	-5439	0,779
V	1	4552	91680	30943	2	9610	-4751	0,716
VI	1	4526	101523	21100	2	10384	-3951	0,642

Продовження таблиці 1

№ передач	$\eta_{гус1}$	$M_{БП2}$ , Нм	$M_{БП1}$ , Нм	$M_{С22}$ , Нм	$M_{С21}$ , Нм	$\omega_{С22}$ , с <sup>-1</sup>	$\omega_{С21}$ , с <sup>-1</sup>	$N_{С22}$ , Вт	$N_{С21}$ , Вт
I	0,95	2013	1486	602	445	43	-43	26488	19580
R	0,918	1959	1198	693	424	43	-43	29705	18181
II	0,91	1651	1084	584	384	43	-43	25039	16445
III	0,86	1286	635	455	224	43	-43	19493	9632
IV	0,799	514	-306	182	-108	43	-43	7801	4645
V	0,73	603	-290	213	-102	43	-43	9149	4409
VI	0,66	727	-268	257	-95	43	-43	11013	4074

Позначення в табл. 1:  $v_C$  – швидкість центру мас тягача;  $v_2$  та  $v_1$  – швидкості тягача по забігаючому та відстаючому бортам;  $\omega_C$  – швидкість обертання корпусу відносно вертикальної осі;  $R_2$  – РП по забігаючому борту;  $F_Y$  – бокова відцентрова сила інерції;  $\chi$  – подовжнє зміщення полюсу повороту;  $\chi_0$  – відносне подовжнє зміщення полюсу повороту;  $\mu$  – поточне значення коефіцієнту опору повороту;  $F_X$  – подовжня складова сили інерції;  $Q_1$  та  $Q_2$  – Нормальні реакції ґрунту відповідно під відстаючим та забігаючим бортами;  $K$  – поправочний коефіцієнт моменту опору повороту;  $P_1$  та  $P_2$  – необхідні сили тяги під бортами;  $\eta_{гус1}$  та  $\eta_{гус2}$  – ККД гусеничних рушіїв;  $M_{БП1}$  та  $M_{БП2}$  – моменти на вході в бортові передачі;  $M_{С21}$  та  $M_{С22}$  – моменти на сонячних шестернях підсумовуючих планетарних рядів;  $\omega_{С21}$  та  $\omega_{С22}$  – кутові швидкості обертання сонячних шестерень підсумовуючих планетарних рядів;  $N_{С21}$  та  $N_{С22}$  – необхідні потужності на сонячних шестернях підсумовуючих планетарних рядів.

Із проведеного в роботі аналізу встановлено, що для електропривода електромеханічного МП ШГМ, який працює в жорстко нестаціонарних, повторно-короткочасних режимах поряд з тяговими режимами на швидкостях від нуля до номінальних значень допускається перехід у гальмівний і генераторний режими. В наслідок значних короткочасних перевантажень в сполученні з ударними перевантаженнями по прискореннях, пов'язаними з рухом машини по пересіченій місцевості, ухвалено рішення про доцільність

використання асинхронного двигуна з перетворювачем частоти джерела живлення.

У **третьому розділі** здійснено узагальнення математичної моделі криволінійного руху ШГМ для електромеханічних двохпотоккових МП.

При моделюванні прийнято рішення для подальшого розгляду залишити два варіанти використання електроприводу в двохпотоккових МП:

– з одним електродвигуном і обертанням в протилежні боки сонячних шестерень підсумовуючих планетарних рядів (рис. 3);

– з двома електродвигунами, що працюють в гальмівному режимі при збереженні механічної гілки в МП (рис. 4).

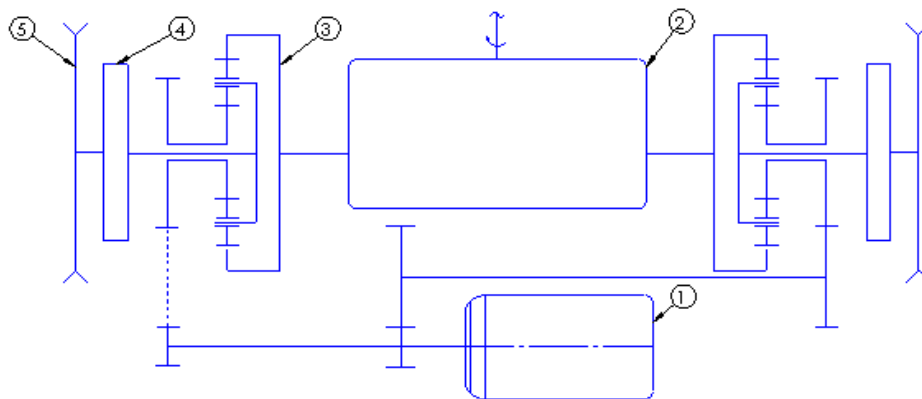


Рисунок 3 – Кінематична схема трансмісії з одним електродвигуном і обертанням в протилежні боки сонячних шестерень підсумовуючих планетарних рядів:  
1 – електродвигун; 2 –коробка передач; 3 – підсумовуючі планетарні ряди;  
4 – бортові передачі; 5 – ведучі колеса

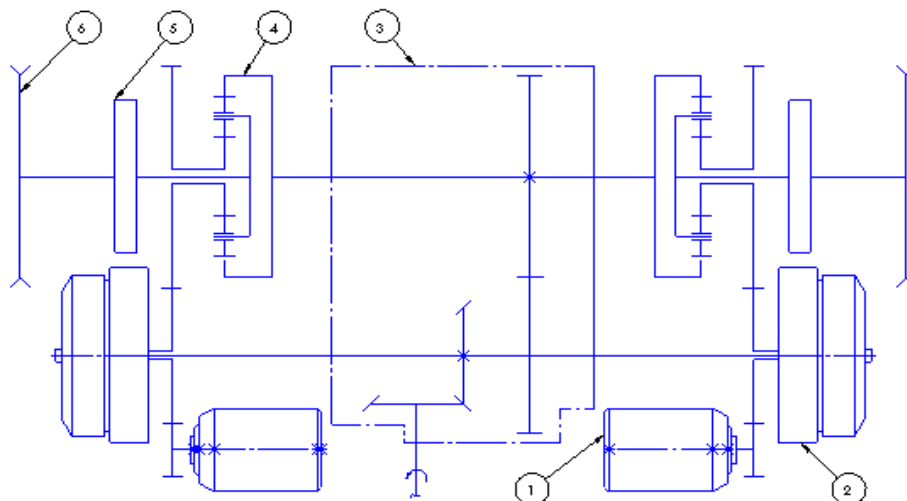


Рисунок 4 – Кінематична схема трансмісії з двома електродвигунами, що працюють в гальмівному режимі:  
1 – електродвигуни; 2 – штатні МП; 3 – коробка передач;  
4 – підсумовуючі планетарні ряди; 5 – бортові передачі; 6 – ведучі колеса

Параметри місцевості у вигляді коефіцієнту опору руху  $f$ , коефіцієнту зчеплення гусеничного рушія з дорогою  $\varphi$  та максимального значення коефіцієнту опору повороту  $\mu_{\max}$ , для яких проводились розрахунки, наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Параметри місцевості

№	Тип місцевості (дороги)	$f$	$\varphi$	$\mu_{\max}$
1.	Сухий дернистий суглинок (вологість < 8%)	0,08	0,9	0,9
2.	Суша ґрунтова дорога на суглинку	0,07	0,8	0,8
3.	Оранка на суглинку	0,10	0,7	0,7
4.	Мокра дорога на суглинку	0,125	0,6	0,35
5.	Сніг рихлий	0,25	0,3	0,3

В роботі прийняті наступні допущення і спрощення. Рух машини розглядається на горизонтальній місцевості. Система координат, пов'язана з машиною, має початок в центрі мас машини і осі:  $OX$  – вперед,  $OY$  – вліво,  $OZ$  – вгору. Вхід в поворот і рух в повороті розглядаються на обраній передачі без перемикачів в коробці передач. Двигун розглядається таким, що працює на зовнішній характеристиці при повній подачі палива. Робота трансмісії розглядається лише на нормальному ряду за наявності двох потоків через коробку передач і МП. Податливості валів і інших елементів трансмісії з огляду на дослідження низькочастотних процесів не враховуються. При включенні фрикційних елементів управління в базовій трансмісії передбачається лінійне збільшення моменту тертя від нуля до максимальної величини за 0,5 с. Поворот завжди розглядається в один бік (вліво) і, відповідно, борти розглядаються як забігаючий і відстаючий.

Математична модель динаміки входу в поворот і криволінійного руху гусеничного транспортера–тягача МТ-ЛБ побудована на основі диференціальних рівнянь, що описують збурений рух системи, яка містить 6 узагальнених швидкостей: подовжня швидкість переміщення ШГМ з врахуванням юза (буксування) –  $v_x$ ; поперечна швидкість бічного ковзання ШГМ –  $v_y$ ; кутова швидкість повороту корпусу ШГМ відносно вертикальної осі, що проходить через центр мас, –  $\omega_z$ ; кутова швидкість обертання колінчастого валу двигуна –  $\omega_E$ ; кутова швидкість обертання відстаючої вхідної ланки МП –  $\omega_1$ ; кутова швидкість обертання забігаючої вхідної ланки МП –  $\omega_2$ . По кожній з узагальнених швидкостей за принципом Даламбера складається своє диференціальне рівняння, які групуються в систему (4).

В системі (4) змінні величини:  $P_{D1}$  і  $P_{D2}$  – сили тяги (гальмування) на відстаючому і забігаючому бортах з врахуванням знаку, обчислювані по коефіцієнтах буксування або юза;  $P_{F1}$  і  $P_{F2}$  – сили опору руху на відстаючому і забігаючому бортах з врахуванням перерозподілу нормальних реакцій між

бортами в повороті за рахунок відцентрової сили  $P_Y$ ;  $P_{\varphi 1}$  і  $P_{\varphi 2}$  – сили зчеплення гусеничного рушія з ґрунтом в поперечному напрямі (величина

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv_X}{dt} = \frac{P_{D1} + P_{D2} - P_{F1} - P_{F2}}{G_M / g}; \\ \frac{dv_Y}{dt} = \frac{P_Y - P_{\varphi 1} - P_{\varphi 2}}{G_M / g}; \\ \frac{d\omega_Z}{dt} = \frac{0,5B(P_{D2} - P_{D1}) - M_{RR}}{I_Z}; \\ \frac{d\omega_E}{dt} = \frac{M_E - M_R}{I_E + I_{TR}}; \\ \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{M_{MR1} - M_{R1}}{I_{MR}}; \\ \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{M_{MR2} - M_{R2}}{I_{MR}}. \end{array} \right. \quad (4)$$

$P_Y - P_{\varphi 1} - P_{\varphi 2}$  може бути позитивною або рівною нулю – сила тертя не може бути рушійною);  $M_{RR}$  – момент опору повороту, залежний від геометричних характеристик машини, її ваги, радіусу повороту і характеристик ґрунту (дороги);  $M_E$  – обертальний момент двигуна;  $M_R$  – приведений до колінчастого валу двигуна момент опору руху, залежний від  $P_{F1}$  і  $P_{F2}$ ;  $M_{MR1}$  і  $M_{MR2}$  – моменти на вхідних ланках МП відстаючого і забігаючого бортів, залежні від моментів тертя на фрикціонах або гальмах для базової трансмісії і від моментів на електродвигунах МП за наявності в них електроприводу;  $M_{R1}$  і  $M_{R2}$  – моменти опору руху, приведені до вхідних ланок МП відстаючого і забігаючого бортів, залежні від  $P_{F1}$  і  $P_{F2}$ .

Постійні величини (константи):  $G_M$  – вага (сила тяжіння) машини;  $B$  – ширина машини по колії;  $I_Z$  – момент інерції ШГМ при обертанні відносно вертикальної осі, що проходить через центр мас;  $I_E$  – момент інерції двигуна з маховиком;  $I_{TR}$  – момент інерції деталей трансмісії і ходової частини, що обертаються, приведений до колінчастого валу двигуна;  $I_{MR}$  – момент інерції бортового МП, приведений до його вхідної ланки.

За основу для розрахунків прийнятий асинхронний електродвигун, що розробляється для приводу мотора-колеса бронетранспортера (ДП «ХКБМ ім. О.О. Морозова») номінальною потужністю 46 кВт при частоті обертання валу 3150 об/хв (330 с<sup>-1</sup>). Максимальний обертальний момент в тяговому режимі цього двигуна обмежений по силі струму і перегріву величиною 230 Нм. Перехід в режим постійної потужності електродвигуна здійснюється при

$\omega_x = 195,6 \text{ c}^{-1}$ . Зменшення базової потужності досягалося кратним скороченням осьового габариту двигуна, при якому пропорційно змінювався лише обертальний момент без зміни швидкісних характеристик. Узагальнена механічна характеристика цього двигуна наведена на рис. 5.

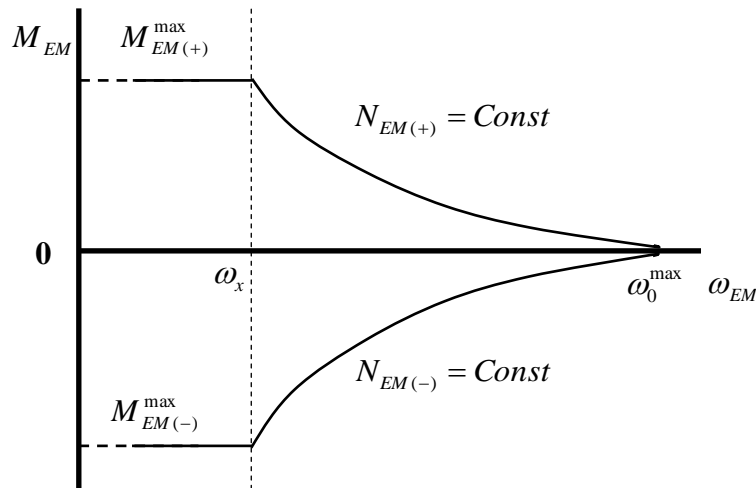


Рисунок 5 – Залежність тягового (гальмівного) моменту електродвигуна МП від швидкості обертання його якоря з урахуванням роботи системи керування

Створена математична модель і програма, що її реалізує, дозволяють моделювати криволінійний рух ШГМ на горизонтальній поверхні з різними характеристиками і різними варіантами двохпотоківих МП.

В четвертому розділі наведено порівняльний аналіз керованості ШГМ з механічними і електромеханічними двохпотоківими МП.

Як критерії керованості для порівняння обрані часові параметри входу в поворот і повороту на  $90^\circ$  на різних передачах і ґрунтах. При оцінці величини рекуперованої енергії в момент входу ШГМ у поворот розраховувалася механічна робота електромоторів, що у режимі генерації електроенергії з урахуванням втрат поверталася в бортову мережу при гальмуванні відстаючого борту в процесі переходу МП на фіксований РП.

При моделюванні електромеханічних МП передбачалося, що тягова і гальмівна характеристики електромоторів відповідають рис. 5. Потужність електромотора варіювалася при збереженні швидкісних характеристик тільки за рахунок крутного моменту східчато і становила для двомоторної схеми  $0,125N_{nom}$ ,  $0,2N_{nom}$ ,  $0,25N_{nom}$  і  $0,3N_{nom}$ , а для одномоторної схеми  $0,5N_{nom}$ ,  $0,75N_{nom}$  і  $N_{nom}$ . За номінальну потужність прийнята потужність  $N_{nom} = 46 \text{ кВт}$ .

На рис. 6 і 7 наведені сполучені залежності радіусів повороту і швидкості руху машини для двох типів місцевості. На кожному графіку цифрами позначені: 1 – границя між областями повороту з повним і частковим заносом (аналітичний розрахунок); 2 – границя між областями повороту без заносу і з частковим заносом (аналітичний розрахунок); 3 – теоретична характеристика по-

вороту базового тягача МТ-ЛБ із фіксованими радіусами на нормальному ряді трансмісії (аналітичний розрахунок); 4 – характеристика повороту тягача з базовою трансмісією (чисельне моделювання); 5 – характеристика повороту тягача з електромеханічним МП із одним електромотором при  $N_{em} = 0,5N_{nom} = 23$  кВт (чисельне моделювання); 6 – характеристика повороту тягача з електромеханічним МП із одним електромотором при  $N_{em} = 0,75N_{nom} = 34,5$  кВт (чисельне моделювання); 7 – характеристика повороту тягача з електромеханічним МП із одним електромотором при  $N_{em} = N_{nom} = 46$  кВт (чисельне моделювання); 8 – характеристика повороту тягача з базовою трансмісією при зменшеному значенні передатного відношення МП із 2,61 до 2 з фіксованими РП (чисельне моделювання); 9 – характеристика повороту тягача з вільним РП.

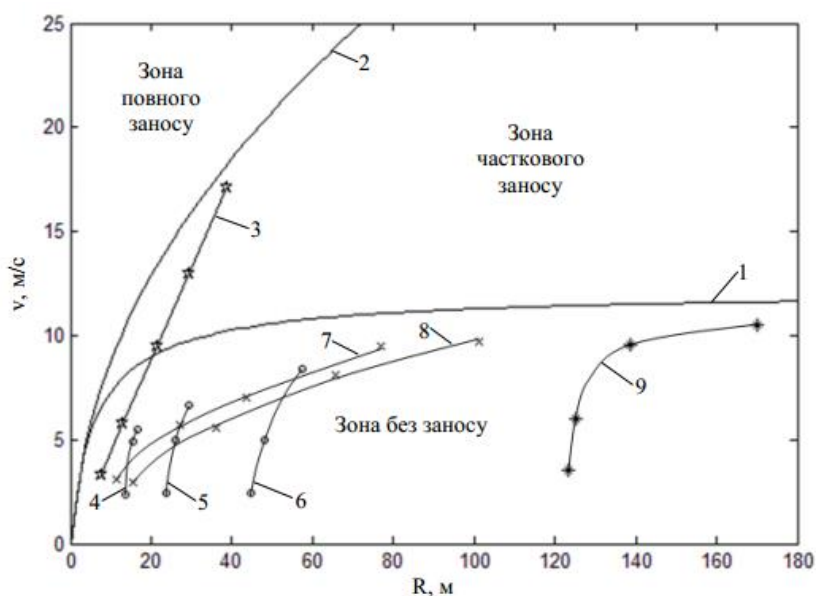


Рисунок 6 – Залежність швидкості від радіусу повороту для сухого дернистого суглинку

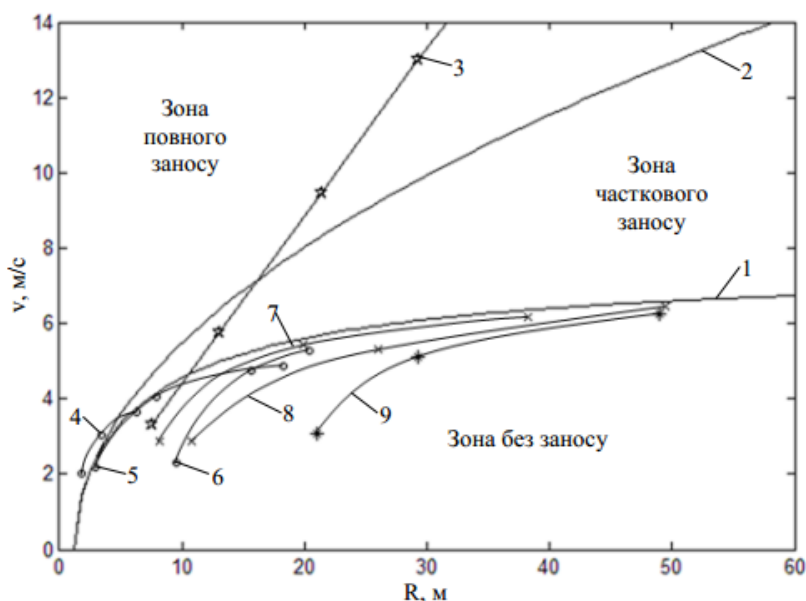


Рисунок 7 – Залежність швидкості від радіусу повороту для мокрої ґрунтової дороги на суглинку

При використанні схеми електромеханічного МП із двома електромоторами, що працюють тільки (або переважно) в режимі гальмування, радіуси повороту виходять такими ж, як і для базових механічних МП, тому вони на графіках окремо не представлені. Криві 3–9 на рис. 6 і 7 побудовані з урахуванням юзу та буксування рушія. Тому криві 3 відповідно на рис. 1 і 2 та 6 і 7 відрізняються між собою і показують, що особливо на важких для повороту ґрунтах МП тягача МТ-ЛБ має запас по збільшенню повороткості (зменшенню РП) без загрози повного заносу машини.

Результати чисельного моделювання процесу повороту тягача із двома варіантами електромеханічної трансмісії за часом повороту на  $90^\circ$  представлені на рис. 8 і 9.

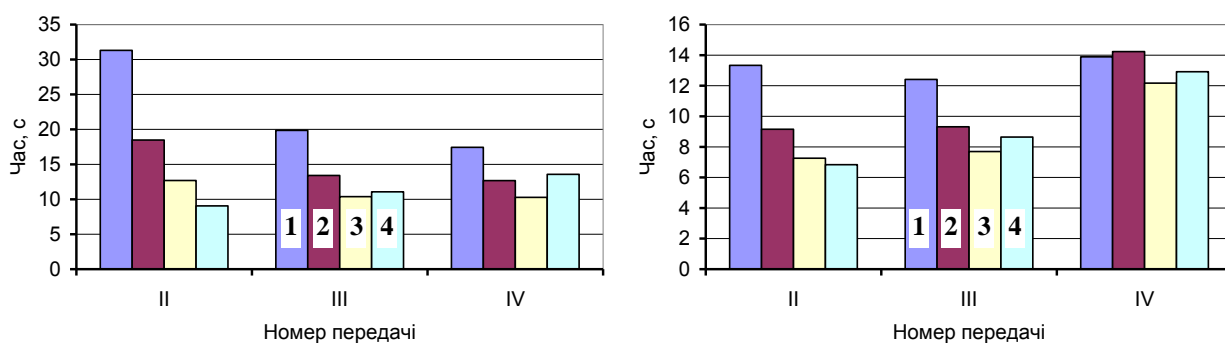


Рисунок 8 – Залежність часу повороту на  $90^\circ$  від типу місцевості і номера передачі для електромеханічного МП із одним електромотором для сухого дернистого суглинку і мокрої ґрунтової дороги:

1 –  $N_{em} = 0,5N_{nom}$ ; 2 –  $N_{em} = 0,75N_{nom}$ ; 3 –  $N_{em} = N_{nom}$ ; 4 – штатна трансмісія

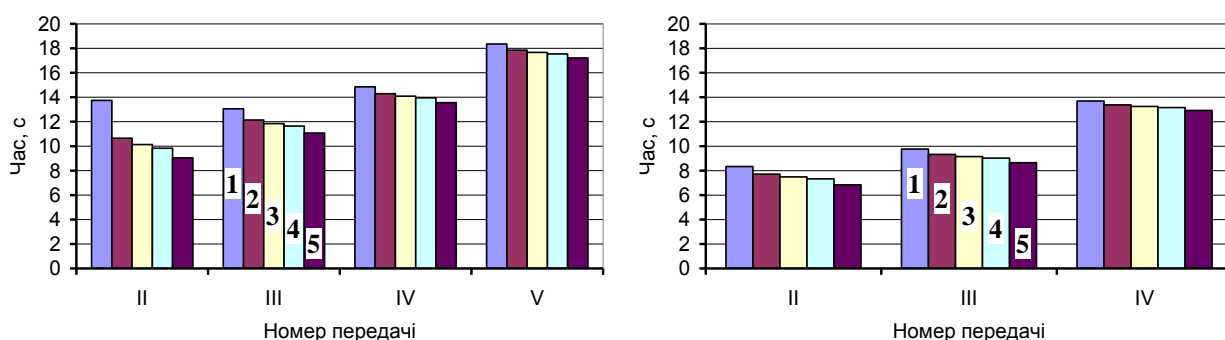


Рисунок 9 – Залежність часу повороту на  $90^\circ$  від типу місцевості і номера передачі для електромеханічного МП з двома електромоторами для сухого дернистого суглинку і мокрої ґрунтової дороги: 1 –  $N_{em} = 0,125N_{nom}$ ; 2 –  $N_{em} = 0,2N_{nom}$ ; 3 –  $N_{em} = 0,25N_{nom}$ ; 4 –  $N_{em} = 0,3N_{nom}$ ; 5 – штатна трансмісія

На рис. 10 представлені залежності кількості механічної енергії гальмування відстаючого борту, що схема з електромеханічним МП із двома електромоторами, які працюють тільки (або переважно) в режимі гальмування,

може повернути за один вхід у поворот тягача в бортову мережу без урахування ККД перетворювача.

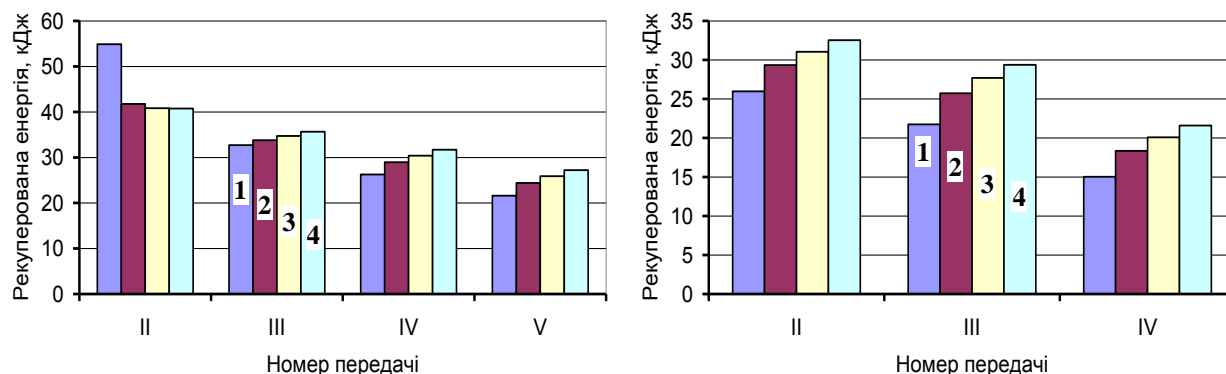


Рисунок 10 – Залежність енергії, що повертається в бортову мережу при вході в поворот з фіксованим радіусом для сухого дернистого суглинку і мокрої ґрунтової дороги від номера передачі для електромеханічного МП із двома електродвигунами:

1 –  $N_{em} = 0,5N_{nom}$ ; 2 –  $N_{em} = 0,75N_{nom}$ ; 3 –  $N_{em} = N_{nom}$ ; 4 – штатна трансмісія

З рис. 8 видно, що для збереження динаміки входу в поворот такої ж, як на базовій машині, для електромеханічного МП із одним електродвигуном необхідно застосовувати електродвигун потужністю не меншою ніж  $N_{em} = 0,75N_{nom} = 34,5$  кВт. Для електромеханічного МП з двома електродвигунами (рис. 9) при таких же умовах потрібно два електродвигуна потужністю не менше  $N_{em} = 0,3N_{nom} = 13,8$  кВт. Крім того, схема з двома електродвигунами і збереженими механічними гілками штатного МП дозволяє в особливо важких умовах повертати виключно на механіці, а при використанні електроприводу повертати в бортову мережу за один вхід в поворот від 20 до 40 кДж в залежності від ґрунту і передачі в трансмісії (рис. 10).

Для ідентифікації розробленої математичної моделі проведено порівняння результатів здійсненого раніше випробування тягача МТ-ЛБ з результатами розрахунків по запропонованій моделі. Для цього в математичну модель вводились вихідні дані, що відповідають машині і умовам проведення полігонних випробувань. Величина розбіжності в дійсних радіусах повороту на дернистому суглинку склала від 3,3% на вищій передачі до 9,6% на другій передачі (див. табл. 3).

Таблиця 3 – Порівняння розрахункових і експериментальних результатів

	I	II	III	IV
$R_2$ , м (експеримент)	2,68	7,3	13,5	21,4
$R_2$ , м (розрахунок)	2,9	8	14,2	22,1
Розбіжність $\Delta$ , %	8,21	9,59	5,19	3,27



У додатках наведено акти впровадження розроблених алгоритмів в розрахункову практику ДП "ХКБМ ім. О.О. Морозова" та у навчальний процес НТУ „ХП”.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі поставлено і вирішено науково-практичну задачу підвищення керованості ШГМ із двопотоковими механічними МП в процесі проведення часткової модернізації їхніх трансмісій за рахунок встановлення додаткового електроприводу в МП. Рішення даної задачі дозволило одержати наступні наукові і практичні результати:

1. З аналізу існуючих схем організації повороту ШГМ витікає, що:
  - при проведенні часткової модернізації трансмісії нераціонально намагатися привести у відповідність із сучасними вимогами старі ШГМ, що мають МП, побудовані за схемами бортових фрикціонів, планетарних і диференціальних МП;
  - найбільш раціональним об'єктом для одержання максимального ефекту при частковій модернізації трансмісії визначені двопотокові механічні ступінчасті МПП, найпоширенішим з яких є трансмісія сімейства тягачів МТ-ЛБ;
  - найбільш раціональним варіантом МП при механічній або гідромеханічній ступінчастій трансмісії є двопотокова схема з використанням у керуючому потоці безступінчастого трансформатора крутного моменту гідрооб'ємного або електричного типу, причому застосування електропривода в МП, на відміну від гідроприводу, дозволить накопичувати рекуперовану енергію гальмування відстаючого борта на повороті в акумуляторних батареях.
2. Аналітична оцінка потужності приводу, необхідного для організації повороту тягача МТ-ЛБ на різних ґрунтах і передачах, показала, що збільшення потужності в порівнянні із прямолінійним рухом залежно від типу ґрунту і швидкості руху становить від 6% на VI передачі на бетонній дорозі до 320% (28 кВт) на I передачі на сухому дернистому суглинку. Однак аналітичні розрахунки не дозволяють із достатньою точністю аналізувати перехідні процеси входу в поворот і виходу з нього, а дають можливість відносно коректно моделювати тільки рівномірний поворот ШГМ, що унеможлиблює оцінку часу її входу в поворот і, відповідно, оцінку рухливості і керованості.
3. При визначенні типу електромоторів для МП і способу їхнього керування вибір був зупинений на асинхронних двигунах із частотним керуванням тому, що саме вони забезпечують найкраще сполучення зовнішньої механічної характеристики, малої чутливості до ударів і вібрацій та бюджетної вартості.
4. Узагальнено математичну модель криволінійного руху ШГМ на місцевості за рахунок введення можливості сумісного використання електричного і механічного приводів в двохпотокових механічних ступінчастих МПП, що дозволяє аналізувати динаміку криволінійного руху ШГМ з двопотоковою трансмісією будь-якої структури.

5. Чисельне моделювання і порівняльний аналіз криволінійного руху ШГМ із двопотоковими механічними і електромеханічними МП показали наступне:

- величина розбіжності в дійсних радіусах повороту на дернистому суглинку для результатів, отриманих при чисельному моделюванні і полігонних випробуваннях, склала від 3,3% на вищих передачах до 9,6% на другій передачі;

- використання схеми з одним електродвигуном і обертанням в протилежні боки сонячних шестірень підсумовуючих планетарних рядів дозволяє одержати відносно менші значення необхідної потужності електромотора, однак не дає можливості використовувати електромотор у генераторному режимі і потребує установки на машині при модернізації потужнішого генератора і накопичувача. Крім того, забезпечуваний цією схемою поворот зі збереженням швидкості руху перевантажує основний дизельний двигун і вона може бути рекомендована тільки при збільшенні потужності до 220 кВт (300 к.с.), що відповідає збільшенню питомої потужності до 17,6 кВт/т (24 к.с./т);

- при проведенні часткової модернізації використання схеми із двома електромоторами, що працюють як у тяговому, так і в гальмівному режимах недоцільно, тому що в цьому випадку для збереження керованості на базовому рівні буде потрібна установка електромоторів потужністю 30-35 кВт на один борт;

- застосування схеми із двома електромоторами при збереженні механічних ланок МП і використанням електромоторів переважно в генераторному режимі дозволить одержати легкокеровану плавну зміну радіусів повороту від вільного до фіксованого зі збереженням динаміки повороту при використанні двох електромоторів потужністю по 15 кВт. При цьому вони не будуть вимагати обов'язкового збільшення ємності накопичувача і повністю замінять штатний генератор потужністю 4,2 кВт, визволивши цю потужність для передачі в трансмісію;

- при збільшенні питомої потужності до 18 кВт/т зменшення передатних відносин у гілках МП з 2,6 до 2 дозволить збільшити керованість машини на 11-15% навіть без введення електропривода в МП;

6. Основні теоретичні положення дисертаційного дослідження у вигляді розроблених алгоритмів дістали впровадження в розрахункову практику ДП "ХКБМ ім. О.О. Морозова" та у навчальний процес НТУ „ХПІ” при підготовці магістрів з спеціальності 05050305 – колісні та гусеничні транспортні засоби.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Зионг Ші Хіеп. Оценка необходимой мощности двухпоточного механизма поворота гусеничной машины / Д. О. Волонцевич, М. Г. Медведєв, Зионг Ші Хіеп // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Хар-

ків: НТУ «ХПІ». – 2014. – №22 (1065). – С. 73–83. *Здобувачем за відомими залежностями проведено аналітичну оцінку необхідної потужності окремого електроприводу для двопотокової трансмісії тягачів типу МТ-ЛБ.*

2. Зионг Ші Хієп. Определение механических параметров электропривода двухпоточного механизма поворота гусеничной машины / Д. О. Волонцевич, М. Г. Медведев, Зионг Ші Хієп // Механіка та машинобудування. – 2014. – №1. – С. 51–57. *Здобувачем уточнені значення необхідної потужності окремого електроприводу для двопотокової трансмісії тягачів типу МТ-ЛБ з урахуванням перевизначення коефіцієнту опору повороту в зонах часткового заносу.*

3. Зионг Ші Хієп. Обоснование выбора тягового электродвигателя для двухпоточного электромеханического механизма поворота гусеничной машины / Зионг Ші Хієп, Д.О. Волонцевич // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 43 (1152). – С. 151–156. *Здобувачем на основі аналізу літератури зроблено вибір типу електромотора та способу його керування для отримання потрібної механічної характеристики.*

4. Duong Sy Hiep. Research of possibility of electromechanical turning mechanism creating for tracked vehicle as first step to hybrid transmission / D. Volontsevich, Duong Sy Hiep // Machines, technologies, materials: International journal. (Scientific technical union of mechanical engineering: Sofia, Bulgaria). – 2015. – №9. – P. 55–59. *Здобувачем на основі результатів попередніх досліджень обрані кінематичні схеми механізмів повороту для чисельного моделювання.*

5. Duong Sy Hiep. Modeling Curvilinear Motion of Tracked Vehicle with the Dual-Flux Electromechanical Turning Mechanism / D. Volontsevich, Duong Sy Hiep // Mechanics, Materials Science and Engineering, – 2016. – Österreich, Austria. – Vol. 3, Part II: Mechanical Engineering and Physics. – P. 107–119. DOI: 10.13140/RG.2.1.4361.8960. *Здобувачем розроблено математичну модель та програму, що дозволили чисельно промоделювати криволінійний рух гусеничної машини із запропонованими механізмами повороту.*

6. Duong Sy Hiep. Electromechanical turning mechanism creating for tracked vehicle as first step to hybrid transmission / D. Volontsevich, Duong Sy Hiep // International conference of industrial technologies and engineering (ICITE 2015): Shymkent, Kazakhstan. October 30-31, 2015. – P. 228-237. *Здобувачем представлені в узагальненому виді результати дисертаційного дослідження.*

## АНОТАЦІЇ

**Зионг Ші Хієп. Покращення керованості швидкохідних гусеничних машин за рахунок встановлення електромеханічних механізмів повороту.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.02 – автомобілі та трактори. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків, 2016.

Дисертація присвячена вирішенню науково-практичної задачі розробки науково обґрунтованих технічних рішень, що дозволяють для гусеничних машин попереднього покоління з двопотоковими механічними ступінчастими механізмами передач і повороту з мінімальними витратами домогтися плавної керованої зміни радіуса повороту від вільного до фіксованого з рекуперацією енергії гальмування.

Запропоновані і теоретично обґрунтовані напрями і варіанти реалізації часткової модернізації двопотокових механічних ступінчастих механізмів передач і повороту, які дають можливість наблизити гусеничні машини попереднього покоління до сучасних вимог і стандартів з керованості та рухливості.

*Ключові слова:* дорожньо-транспортний засіб, гусенична машина, механізм повороту, математичне моделювання, криволінійний рух, керованість, рухливість, асинхронний електропривод.

**Зыонг Ши Хиеп. Улучшение управляемости быстроходных гусеничных машин за счет установки электромеханических механизмов поворота.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.02 – автомобили и тракторы. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». – Харьков, 2016.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной задачи разработки научно обоснованных технических решений, позволяющих для быстроходных гусеничных машин (БГМ) предыдущего поколения с двухпоточными механическими ступенчатыми механизмами передач и поворота (МПП) с минимальными затратами добиться плавного управляемого изменения радиуса поворота от свободного до фиксированного с рекуперацией энергии торможения отстающего борта.

В работе были проведены:

- анализ достоинств и недостатков схем организации поворота БГМ;
- предварительная аналитическая оценка мощности, необходимой для организации поворота тягача МТ-ЛБ с двухпоточными механическими МПП, и выбор схем, типа и способа управления электромоторами механизмов поворота (МП);
- усовершенствование математической модели криволинейного движения БГМ, оборудованной электромеханическими МП, на местности с учетом одновременного использования механических и электрических ветвей МП;

– численное моделирование и сравнительный анализ криволинейного движения тягача МТ-ЛБ с двухпоточными механическими и электромеханическими МП.

Из анализа существующих схем организации поворота БГМ следует, что:

– наиболее эффективным МП при механической или гидромеханической ступенчатой трансмиссии является двухпоточная схема с использованием в управляющем потоке бесступенчатого трансформатора крутящего момента гидрообъемного или электрического типа, причем применение электропривода в МП, в отличие от гидрапривода, позволит накапливать рекуперированную энергию торможения отстающего борта на повороте в аккумуляторных батареях.

При выборе типа электродвигателей для МП и способа их управления выбор был остановлен на асинхронных двигателях с частотным управлением потому, что именно они обеспечивают на данном этапе наилучшее сочетание внешней моментной характеристики, малой чувствительности к ударам и вибрациям и бюджетной стоимости.

Обобщена математическая модель криволинейного движения БГМ за счет введения возможности совместного использования электрического и механического приводов в двухпоточных механических ступенчатых МПП, что позволяет анализировать динамику криволинейного движения БГМ с двухпоточной трансмиссией любой структуры.

Численное моделирование и сравнительный анализ криволинейного движения БГМ с двухпоточными механическими и электромеханическими МП показали:

– величина расхождения в действительных радиусах поворота на задер-  
женном суглинке для результатов, полученных при численном моделировании и полигонных испытаниях, составила от 3,3% на высших передачах до 9,6% на второй передаче;

– использование схемы с одним электродвигателем позволяет получить относительно меньшие значения потребной мощности электродвигателя, однако не дает возможности использовать электродвигатель в генераторном режиме и требует установки на машине при модернизации более мощного генератора и накопителя. Кроме того, обеспечиваемый этой схемой поворот с сохранением скорости движения перегружает основной дизельный двигатель, и она может быть рекомендована только при увеличении мощности основного двигателя до 220 кВт, что соответствует увеличению удельной мощности до 17,6 кВт/т;

– при проведении частичной модернизации использование схемы с двумя электродвигателями, работающими как в тяговом, так и в тормозном режимах нецелесообразно, так как в этом случае для сохранения поворачиваемости на базовом уровне потребуется установка электродвигателей мощностью 30-35 кВт на один борт;

– применение схемы с двумя электродвигателями при сохранении механических ветвей МП и использованием электродвигателей в генераторном режиме позволит получить легко управляемое плавное изменение радиусов поворота

от свободного до фиксированного радиусов поворота с сохранением динамики поворота при использовании двух электромоторов мощностью по 15 кВт. При этом они не потребуют увеличения емкости накопителя и полностью заменят штатный генератор мощностью 4,2 кВт, высвободив эту мощность для трансмиссии;

– при увеличении удельной мощности до 18 кВт/т уменьшение передаточных отношений в ветвях МП с 2,6 до 2 позволит увеличить поворачиваемость машины на 11-15% даже без введения электропривода в МП.

*Ключевые слова:* дорожно-транспортное средство, гусеничная машина, механизм поворота, математическое моделирование, криволинейное движение, управляемость, подвижность, асинхронный электропривод.

**Duong Sy Hiep. Improving controllability of fast tracked vehicles due to installation of electromechanical turning mechanisms.** – Manuscript.

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in speciality 05.22.02 – Automobiles and Tractors. – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". – Kharkiv, 2016.

Dissertation is devoted to solving scientific problems of development of science-based technical solutions, which allow for the old tracked vehicles with double-flow mechanical stepped mechanisms of transmission and turning with minimum costs to achieve a smooth change-managed turning radius. This change comes from free radius of the turning to a fixed with recuperation of braking energy of the lagging side.

Directions and embodiments of shallow modernization of double-flow mechanical stepped mechanisms of transmission and turning, proposed and verified by dint of methods of mathematical modeling and numerical experiment was allowed to bring the old tracked vehicles to the modern requirements and standards for the controllability and mobility.

*Keywords:* road vehicle, tracked vehicle, turning mechanism, mathematical modeling, curvilinear motion, controllability, mobility, asynchronous electric.



Відповідальний за випуск к.т.н. Осетров О.О.

Підписано до друку 12.05.2016 р. Формат видання 145x215.  
Формат бумаги 60x90/16. Папір – офсетний. Печать – ризографія.  
Об'єм 1,9 авт. арк. Зам. № 15. Тираж 100 прим.

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»  
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО№022953)  
м. Харків, вул. Червонопрапорна, 3 літер Б-1  
Тел. 7-170-354  
[www.modelist.in.ua](http://www.modelist.in.ua)