

«Електромеханічний амортизатор»

(Шифр)

**«СИНТЕЗ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО АМОРТИЗАТОР-РЕКУПЕРАТОРА ДЛЯ
ПРИМІСЬКИХ ПОЇЗДІВ»**

Галузь: Інфраструктура залізничного транспорту (рухомий склад залізниць та тяга поїздів, транспортні споруди, залізнична колія)

2021

АНОТАЦІЯ

Шифр «ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИЙ АМОРТИЗАТОР»

Необхідна заміна морально застарілого і фізично зношеного електрорухомого складу приміського сполучення, яке експлуатується в даний час на залізницях країни. Очевидно також, що новий рухомий склад повинен створюватися на базі сучасних і перспективних технологій транспортного машинобудування. Однією з таких технологій є гібридна система рекуперації коливань кузова електропоїзду що дозволяє підвищити енергоефективність ходової частини з одночасним підвищенням плавності руху.

У роботі проведено синтез перспективного електромеханічного амортизатор-рекупєратора для приміських поїздів шляхом параметричної оптимізації конструкції.

Мета роботи – оптимізація конструкції електромеханічного амортизатор-рекупєратора у складі ходової частини для двовісний візок моделі 68-7090-02/03 встановленого на заміну пневматичних ресор центрального (вторинного) ресорного підвішування.

Для досягнення зазначеної мети поставлено такі завдання:

1) Дослідити спрощену математичну модель по визначенню електромагнітної та електрорушійної сили електромеханічного амортизатор-рекупєратора.

2) Отримати геометричні співвідношення в елементах конструкції амортизатор-рекупєратора.

3) провести синтез амортизатор-рекупєратора на підставі вирішення задачі умовної оптимізації параметрів електромеханічного амортизатор-рекупєратора для приміських поїздів.

Методи дослідження. Методи умовної багатокритеріальної оптимізації на підставі генетичних алгоритмів та Нелдера-Міда при визначенні оптимальних параметрів.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СИСТЕМ ГАСІННЯ КОЛИВАНЬ В ЯКИХ МОЖЛИВО ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО АМОРТИЗАТОР- РЕКУПЕРАТОРА	4
РОЗДІЛ 2 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТИПУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО АМОРТИЗАТОРУ-РЕКУПЕРАТОРУ	7
РОЗДІЛ 3 ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО АМОРТИЗАТОРУ-РЕКУПЕРАТОРА	10
РОЗДІЛ 4 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ АМОРТИЗАТОР-РЕКУПЕРАТОРА	15
4.1 Вибір параметрів задачі оптимізації	15
4.2 Вибір параметрів задачі оптимізації	15
4.3 Цільова функція	17
РОЗДІЛ 5 ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ АМОРТИЗАТОР- РЕКУПЕРАТОРА	20
5.1 Вибір методу вирішення задачі синтезу амортизатор-рекуператора	20
5.2 Результати вирішення задачі оптимізації	22
ВИСНОВКИ	26
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	30

ВСТУП

Наявність та ефективність систем гасіння коливань обумовлює плавність руху транспортного засобу на ділянці шляху. Одним з основних елементів ходової частини рухомого складу є система гасіння коливань, яка зазвичай має дві, різні за параметрами ступені ресорного підвішування. Зменшення впливу нерівностей шляху і коливань з боку ходової частини на екіпажну частину електрорухомого складу забезпечується наявністю амортизаторів (гасників коливань).

Найважливішим елементом, що обумовлює безпеку руху та швидкість електрорухомого складу, є динамічні показники амортизаторів. Це ствердження слушне як для міського, так і магістрального рейкового транспорту. Показники амортизаторів визначаються типом та конструкцією амортизатора. За плавністю руху найкращі показники властиві пневматичним амортизаторам [1], проте їх використання потребує додаткової системи пневматичного живлення – компресорів, що знижують загальну енергоефективність електрорухомого складу. [2] Іншим підходом для підвищення динамічних якостей електрорухомого складу є застосування електромеханічних амортизаторів-рекуператорів [3]. Амортизатори такого типу не споживають додаткової енергії, натомість вони спроможні частково рекуперувати енергію коливань. Такі можливості електромеханічних амортизаторів-рекуператорів дають змогу підвищити енергоефективність рухомого складу в цілому [3].

Спираючись на світовий досвід, перспективним рішенням є застосування електромеханічних амортизаторів в ходових частинах складу. Дане науково-технічне рішення сприяє підвищенню ефективності роботи ходових частин електрорухомого складу за рахунок регулювання сили демпфування. При цьому з'являється можливість рекуперації електричної енергії в мережу, що не існує при використанні інших видів амортизаторів.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СИСТЕМ ГАСІННЯ КОЛИВАНЬ В ЯКИХ МОЖЛИВО ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО АМОРТИЗАТОР- РЕКУПЕРАТОРА

Як зазначається в [4], у світовій практиці найбільш поширеним є ресорне підвішування візків, що складається з буксової та центральної частини. Таку ж систему застосовують і на вагонах мотор-вагонного рухомого складу в Україні. Ресорне підвішування має за мету зменшення впливу ударів, що виникають під час роботи рухомого складу від нерівностей колії та при вписуванні в криві. Гасіння коливань, що при цьому виникають в центральному підвішуванні візків, здійснюється завдяки гідравлічним амортизаторам [4].

Аналіз систем гасіння коливань на міському рейковому транспорті, проведений в роботі [5] визначив, що найбільш поширеним технічним рішенням є фрикційні гасителі коливань, що доповнені гідравлічними демпферами. Такі комбіновані системи встановлено у другому ступені ресорного підвішування.

Як зазначається в [6], на ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» (м. Кременчук, Україна) розроблені нові візки моделі 68-7090-02/03 з центральним пневматичним ресорним підвішуванням, яке доповнено гідро амортизаторами (рис. 1.1) . Застосування пневматичних ресор дає можливість регулювання параметрів демпфування в залежності від завантаження вагону та величини зовнішніх впливів, проте пневматичне підвішування потребує додаткових втрат енергії та потужностей пневматичної системи [2].

Аналіз різних типів електромеханічних амортизаторів [2] доводить, що серед відомих на сьогодні типів – асинхронного, синхронного, електромагнітного [7] та постійного струму [8] – найбільш прийнятним варіантом є останній. Такий тип електромеханічного перетворювача енергії забезпечує для електромеханічного амортизатора потрібну постійну тягову [9] (механічну) характеристику, що змінюється лише від швидкості руху якоря.

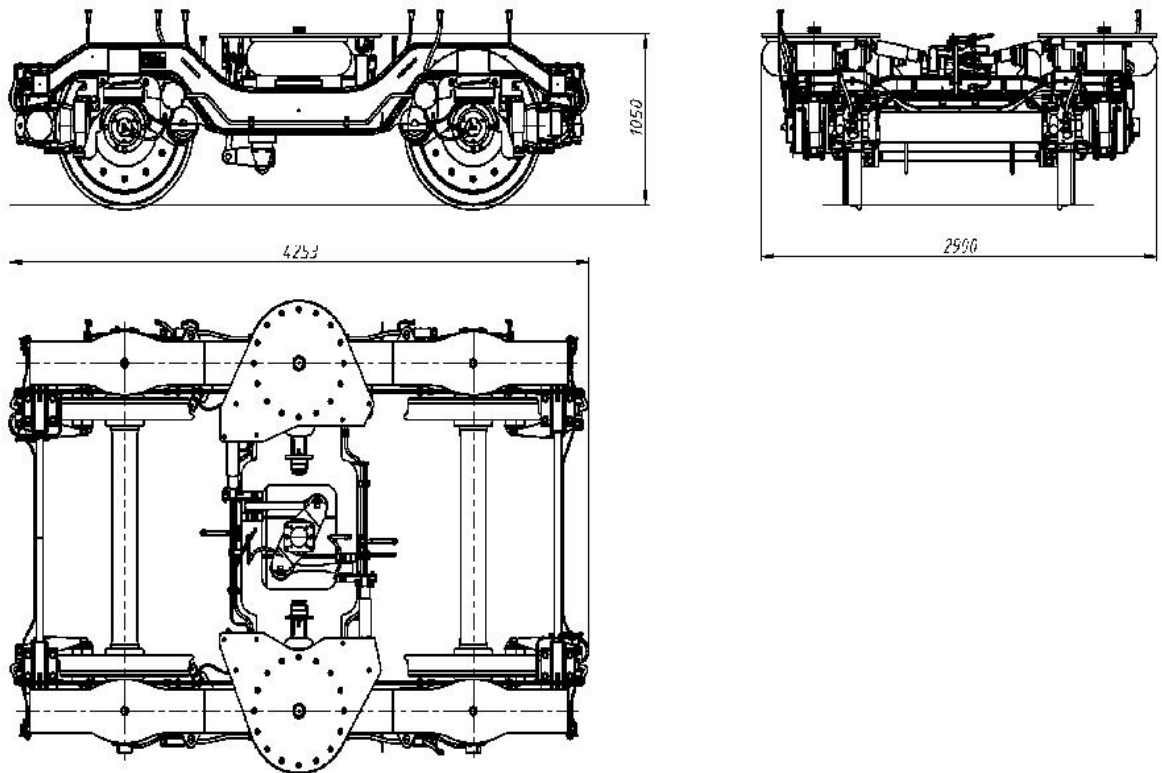


Рисунок 1.1 – Візок моделі 68-7090-02/03

Електромеханічні амортизатори досить швидко розповсюджуються в автомобільному транспорті, інтегруючись у підвіску типу McPherson [10] спільно з пружиною. Включенню електроамортизатора до єдиної бортової мережі транспортного засобу присвячена робота [11], в якій розглядається можливість рекуперації енергії коливань, що перетворено на електричну енергію, з метою підвищення енергоефективності системи.

В роботі [12] проведено оцінку енергетичної ефективності систем рекуперації енергії механічних коливань автомобілів КРАЗ-65055 (Росія), КАМАЗ-45143 (Росія), Газель-3302 (Росія), ВАЗ 2101 (Росія), Reno Megane (Франція), Toyota Camry (Японія) на основі попередньо проведених результатів математичного моделювання таких систем.

Аналізу складних процесів коливань в механічній системі ходової частини транспортних засобів присвячена робота [13]. Автори роботи [13] розробили основні підходи до моделювання механічних коливань на основі створення узагальненої математичної моделі.

Для моделювання складних електромеханічних систем в роботі [14] запропоновано створення єдиної математичної моделі електромеханічної системи, однак враховується вплив електромеханічної складової лише в якості функції, що збуджує додаткові коливання в системі. Такий підхід не дає можливості враховувати геометричні параметри ходової візка на розміни амортизатору.

В зв'язку відсутність методик обрання основних геометричних розмірів електромеханічних амортизатор-рекуператорів їх вибір може бути здійснено на підставі вирішення задачі оптимального проектування з урахуванням компонованих обмежень візка поїзду.

РОЗДІЛ 2

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТИПУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО АМОРТИЗАТОРУ-РЕКУПЕРАТОРУ

При виборі типу електромеханічного перетворювача енергії необхідно врахування вигляду тягової (механічної) характеристики. Обираючи тип і конструкції лінійного електромеханічного перетворювача для електромеханічного амортизатор-рекуператора відзначимо, що він не підпадає ні під один з видів існуючої їх класифікації: силовий, енергетичний і мощностной згідно з класифікацією наведеною в [15,16, 23]. Для силових конструкцій визначальним є сила в короткочасному робочому циклі, при відсутності або при дуже малих переміщеннях. Енергетичні перетворювачі покликані забезпечити задану кінетичну енергію на певному активній ділянці. Потужності перетворювачі працюють з максимальними потужностями в безперервному режимі роботи або з великими періодами включення. Електромеханічний перетворювач для амортизатору знаходиться в рамках такої класифікації в області усіх типів перетворювачів одночасно.

При виборі топографії лінійних двигунів в зрівнянні між плоскими і коаксіальними, перевагу однозначно знаходиться на стороні коаксіальних згідно дослідженням поведеним в [17,18,19,20, 23]. Плоскі, як односторонні, так і двосторонні двигуни, мають поздовжнім і поперечним крайовими ефектами, які негативно позначаються на їх робочих і енергетичних показниках [21]. Ці ефекти в найбільшій мірою проявляються на «коротких» перетворювачах, якими і є потрібні для наших цілей. Коаксіальні ж абсолютно вільні принаймні від поперечних крайових ефектів. Такі конструкції також більш вдало розміщуються у об'ємі циліндричної пружини які потрібні для компенсації статичних сил ваги кузова.

При виборі типу електромеханічного перетворювача амортизатор-рекуператора відзначимо, що з відомих на сьогодні типів - асинхронного, синхронного, електромагнітного та постійного струму, найбільш гідною кандидатурою видається останній [23,22]. Два перших типи для забезпечення

відносно невеликих переміщень із заданою силою і швидкістю руху штока, а також регулювання цих параметрів зажадає досить складних напівпровідникових перетворювачів, що змінюють напругу і частоту до одиниць Гц на виході. Також, у цих типів двигунів не висока перевантажувальна здатність. Для третього характерна досить нерівномірна характеристика сили тяги від переміщення, яка близька до гіперболічної. Для електромеханічного амортизатор-рекуператора потрібна постійна [31] тягова (механічна) характеристика що змінюється лише від швидкості руху якоря.

Таким чином зупинимося на конструкції що наведено на рис. 2.1

Принцип дії амортизатор-рекуператора складається у наступному. Постійний магніт 4 (рис. 3.1) має радіальне намагнічення. Силкові магнітні лінії потоку збудження замикаються по колу: повітряний зазор з якорем 1 (рис. 3.1) та обмоткою якорю 2 (рис. 3.1), спинка станини, станина 3 (рис. 3.1), постійний магніт. Потік збудження зчіплюється з обмоткою якоря, що розташована на немагнітному якорі. При руху якоря (до низу або до верху), що обумовлений зовнішніми динамічними силами коливання кузова та візка, якір рухається. У обмотці якоря виникає електрорушійної сили. При замкненні обмотки якоря на навантаження виникає струм якоря. У провідниках обмотки якоря зі струмом виникає сила, яка направлена супротив динамічної сили, що призводить до демпфування коливань кузова. На потік збудження впливає потік реакції якоря, що розмагнічує одну з половин магнітного кола станини (верхню чи нижню) в залежності від напрямлення руху якоря (донизу чи до верху), а іншу (протилежну) намагнічує, що може призвести до насичення магнітного кола та зменшення електромагнітної сили. Усі ці процеси доволі аналогічні процесам у уніполярній електричній машині постійного струму.

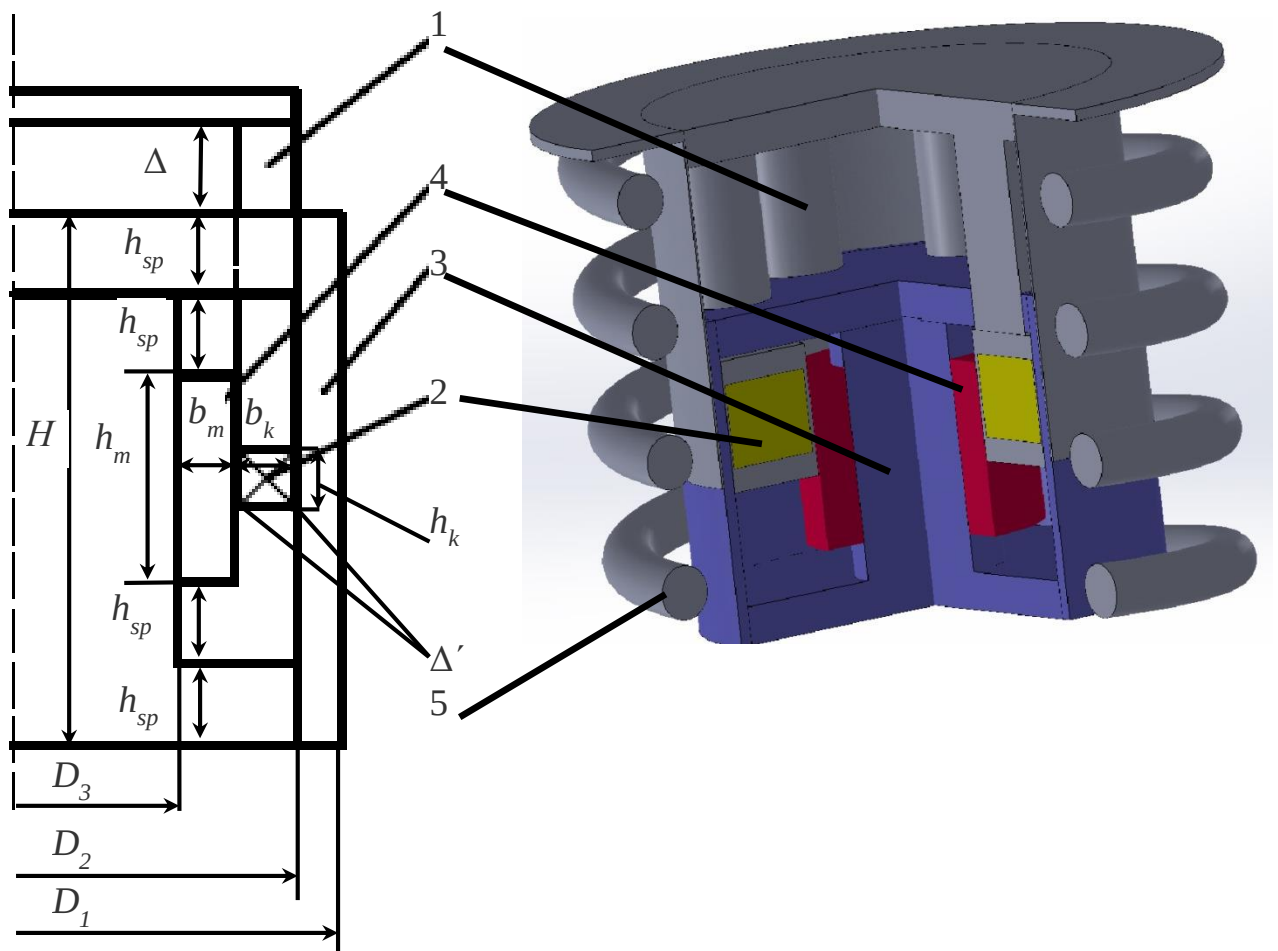


Рисунок 2.1 – Електромеханічний амортизатор-рекуператор постійного струму:
1- ярк; 2- обмотка яркору;3- станина;4- постійний магніт. 5- пружина

Як видно з принципу дії електромагнітна сила залежить, в першу чергу, від струму у обмотці яркору. На силу практично не впливає положення яркору відповідно станини, що забезпечує стабільність сил демпфування при зазорах між кузовом та візком. Цей вплив найбільше помітний при крайніх положеннях яркору та великих значеннях струму його обмотки коли різко збільшується потік розсіювання. Для стабілізації параметрів можливо застосування регулювання опору кола яркору, як і регулювання електромагнітної сили.

РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО АМОРТИЗАТОРУ-РЕКУПЕРАТОРА

Основні характеристики амортизатор-рекуператору наведені у табл. 3.1 згідно рис. 2.1. Вони обрані евристично та приблизно відповідають вимогам до амортизатору вагону дизель-потягу.

Таблиця 3.1 Основні характеристики електромеханічного дослідного амортизатор-рекуператора

Параметр	Величина	Примітки
F_{dem}	3000 Н	Номінальна електромагнітна сила на якорі амортизатор-рекуператора
V_{dem}	0,08 м/с	Номінальна швидкість якоря амортизатор-рекуператора
Δ	0,06 м	Максимальний хід амортизатор-рекуператора, згідно рис. 3.1
H_c	$9,5 \cdot 10^5$ А/м	Коерцитивна сила постійного магніту
B_{ost}	1,05 Тл	Остаточна індукція постійного магніту
I_W	5120 А	МРС обмотки якоря у номінальному режимі
H	0,293 м	Висота ярма амортизатор-рекуператора, згідно рис. 3.1
D_1	0,360 м	Зовнішній діаметр амортизатор-рекуператора, згідно рис. 3.1
D_2	0,312 м	Згідно рис. 3.1
D_3	0,18 м	Згідно рис. 3.1
h_m	0,114 м	Висота постійного магніту, згідно рис. 3.1

b_m	0,032 м	Товщина постійного магніту, згідно рис. 3.1
h_k	0,034 м	Висота обмотки якоря, згідно рис. 3.1
b_k	0,0325 м	Товщина обмотки якоря, згідно рис. 3.1
h_{sp}	0,045 м	Товщина спинки якоря, згідно рис. 3.1
Δ'	0,001 м	Технологічні повітряні зазори, згідно рис. 3.1

Електромагнітну силу що діє на обмотку якоря з MPC IW та EPC можливо обчислити за виразом [48]:

$$\begin{aligned} F_{dem} &= B_{\delta} (IW) l_{sr}, \\ E_{dem} &= B_{\delta} V_{dem} l_{sr}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

де B_{δ} – індукція магнітного поля у повітряному зазорі, l_{sr} – середня довжина вітка яку можливо обчислити з геометричних параметрів амортизатор-рекуператору за виразом

$$l_{sr} = \pi(D_3 + 2b_m + 2\Delta' + b_k). \quad (2.2)$$

Для визначення індукція магнітного поля у повітряному зазорі розглянемо режим роботи постійного магніту у амортизатор-рекуператорі. У останній час у якості матеріалів для постійних магнітів найбільш поширені сплави NdFeB. Вони мають приблизно лінійну криву розмагнічення (рис. 2.2). Основний опір магнітному потоку є повітряний зазор між постійним магнітом та станиною. Він складається з товщини обмотки та двох технологічних зазорів ($b_k + 2\Delta'$). Приймав наступні допущення:

- опір магнітному потоку складається з опору повітряного зазору,
- незначність впливу потоку струму якоря на режим роботи постійного магніту,
- визначення індукцій у постійному магніті яка дорівнює індукцій у повітряному зазорі можливо за геометричними відношеннями з рис 3.1.

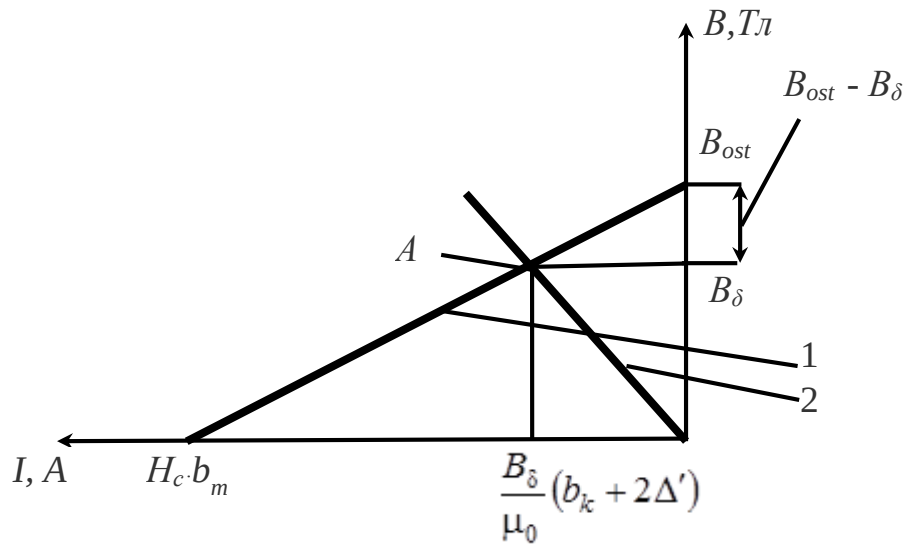


Рисунок 3.1 – До визначення індукція магнітного поля у повітряному зазорі: 1- магнітна характеристики постійного магніту; 2- магнітна характеристика повітряного зазору.

МРС у робочий точці А можливо визначити виразом:

$$I_m = H_\delta (b_k + 2\Delta') = \frac{B_\delta}{\mu_0} (b_k + 2\Delta'), \quad (3.3)$$

де H_δ – напружність поря у повітряному зазорі , μ_0 – магнітна проникність повітря.

У відповідності до подібностей трикутників з рис. 2.2

$$\frac{B_{ost} - B_\delta}{B_{ost}} = \frac{\frac{B_\delta}{\mu_0} (b_k + 2\Delta')}{H_c b_m} \quad (3.4).$$

З виразу (3.4) отримаємо

$$B_\delta = \frac{1}{\frac{1}{B_{ost}} + \frac{(b_k + 2\Delta')}{\mu_0 H_c b_m}} \quad (3.5)$$

Підставивши вирази (3.2) та (3.5) у (3.1) отримаємо

$$F_{dem} = \pi \frac{D_3 + 2b_m + 2\Delta' + b_k}{\frac{1}{B_{ost}} + \frac{(b_k + 2\Delta')}{\mu_0 H_c b_m}} IW,$$

$$E_{dem} = \pi \frac{D_3 + 2b_m + 2\Delta' + b_k}{\frac{1}{B_{ost}} + \frac{(b_k + 2\Delta')}{\mu_0 H_c b_m}} V_{dem}.$$
(3.6)

Вираз (3.6) є спрощена математична модель щодо визначення електромагнітної сили та електрорушійна сила амортизатор-рекуператора.

Отже, запропонована методика та спрощення математична модель є прийнятною та може бути використана у подальшому дослідженні.

Для вирішення задачі оптимізації приведемо геометричні співвідношення, зумовлені обраною конструкцією амортизатор-рекуператора.

Перетин зовнішньої спинки статора

$$S_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_1^2 - D_2^2),$$
(3.7)

Перетин внутрішньої спинки статора

$$S_4 = \frac{\pi \cdot D_3^2}{4}.$$
(3.8)

Перетин постійного магніту

$$S_m = \pi D_3 h_m.$$
(3.9)

Перетин верхньої та нижньої спинки статора у найбільш напруженому місці – при з'єднанні з внутрішньою спинкою

$$S_3 = S_3 = \pi D_3 h_{sp}.$$
(3.10)

Площа перетину міді обмотки з урахуванням коефіцієнту заповнення k_z

$$S_w = k_z b_k h_k.$$
(3.11)

Магнітні потоки у елементах магнітопроводу:

– зовнішньої спинки статора

$$\Phi_1 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_1^2 - D_2^2) B_1,$$
(3.12)

де B_1 – індукція у сталевих елементах магнітопроводу у номінальному режимі.

– внутрішньої спинки статора

$$\Phi_4 = \frac{\pi \cdot D_3^2}{4} B_1, \quad (3.13)$$

– верхньої та нижньої спинки статора

$$\Phi_3 = \Phi_3 = \pi D_3 h_{sp} B_1, \quad (3.14)$$

– постійного магніту

$$\Phi_m = \pi D_3 h_m B_\delta. \quad (3.15)$$

Зважаючи на те, що магнітний потік у спинках статора однакові та дорівнюють половині потоку постійного магніту. Тому при розрахунках розмірів осердь справедливо рівняння:

$$\Phi = \Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \Phi_4 = \frac{1}{2} \Phi_m. \quad (3.16)$$

Тоді, з (3.7) - (3.16) витікає, що оптимальним співвідношенням геометричних параметрів лінійного двигуна є

$$D_2 = D_3 + 2(b_m + b_k + 2\Delta')$$

$$D_1 = \sqrt{D_3^2 + D_2^2},$$

$$h_m = \frac{D_3 B_1}{2B_\delta}, \quad (3.17)$$

$$h_{sp} = \frac{D_3}{4},$$

$$h_k = h_m - 2\Delta,$$

$$H = h_m - 4h_{sp}.$$

Таким чином, наведено геометричні параметри амортизатор-рекуператору обраної конструкції, та здобуто їх оптимальне співвідношення.

РОЗДІЛ 4

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ АМОРТИЗАТОР-РЕКУПЕРАТОРА

4.1 Вибір параметрів задачі оптимізації

Передумовою вирішення задачі оптимізації є визначення її параметрів та обмежень.

В якості параметрів для вирішення задачі оптимізації раціонально обрати геометричні параметри, що наведені на рис. 2.1 та табл.3.1, тобто $H, D_1, D_2, D_3, h_m, b_m, h_k, b_k, h_{sp}$. Однак, з (3.17) видно, що H, D_1, D_2, h_m, h_k є лінійно залежними від інших параметрів. Тому їх потрібно віднести до функцій інших параметрів оптимізації. Остаточно, параметрами задачі обираємо товщину постійного магніту та обмотки, діаметр внутрішнього осердя та число витків обмотки якоря: D_3, b_m, b_k, W .

4.2 Вибір параметрів задачі оптимізації

Обмеження розділяються на три види.

1) Обмеження, що визначаються рівням розмагнічення постійного магніту

Режими роботи постійного магніту обмежені мінімальною індукцією лінійної частини кривої розмагнічення. Якщо індукція знизиться нижче цієї позначки можливе часткове розмагнічення магніту. Для NdFeB становить 0,1 Тл тому

$$B_{\delta} > 0,1, \text{ Тл}, \quad (4.1)$$

2) Обмеження за щільністю струму

Важливим параметром обмежуючим можливості роботи є щільність струму у обмотці якоря. Її можливо обчислити виходячи з виразу (3.11) та (3.6)

$$J_W = \frac{I}{S_W} = \frac{F_{dem} \left(\frac{1}{B_{ost}} + \frac{(b_k + 2\Delta')}{\mu_0 H_c b_m} \right)}{\pi W k_z b_k h_k (D_3 + 2b_m + 2\Delta' + b_k)}. \quad (4.2)$$

3) Обмеження визначення компоновкою візка. Вони зумовлені необхідністю розміщення амортизатор-рекуператора у монтажному об'ємі ходової частини, а також конструкцією самого амортизатора [15].

$$D_1 < 0,5, \text{ м}, H < 0,3, \text{ м}, \quad (4.3)$$

4) Обмеження, які накладаються на параметри задачі оптимізації. На геометричні розміри елементів конструкції накладаються обмеження які обумовленні компоновочними обмеженнями (4.3), а на кількість витків повинна бути цілою виліченою. Максимальна кількість витків обертається з урахування конструктивних обмежень та не може перевищувати 10000, а мінімальна не може бути менша за 1:

$$\begin{aligned} 0,01 \text{ м} < D_3 < 0,5 \text{ м}; \quad 0,01 \text{ м} < b_m < 0,5 \text{ м}; \\ 0,01 \text{ м} < b_k < 0,5 \text{ м}; \quad 1 < W < 10000 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Позначення відповідають рис. 2.1.

4.3 Цільова функція

В якості цільових функцій для рішення задачі можливо обрати:

- затрати на створення амортизатор-рекуператору;
- енергія, що може генерувати амортизатор-рекуператор за час своєї роботи.

При цьому перший критерій необхідно мінімізувати, а другий максимізувати. Розглянутими обидві цільові функції.

1) Цільова функція затрат.

Затрати на створення конструкції амортизатору пропорційні затратам на матеріали, які необхідні при його створенні. Таке твердження справедливо тому як затрати на науково-дослідні, проектор-конструкторські роботи та утилізацію значно менші зв'язку з великою кількістю потрібних конструкцій. Таки підхід до обрання цільових функцій застосовано у [23, 47, 46] Тому затрати на матеріали складається з

$$C = C_{st} + C_c + C_{pm}, \quad (4.5)$$

де C_{st} , C_c , C_{pm} – затрати на матеріали зі сталі, матеріали мідної обмотки, та постійного магніту, відповідно.

Для можливості використання методики при різних ринкових цінах на матеріали пропонуємо використання приведених об'ємів матеріалів

$$V = \frac{C}{Z_{st}} = \frac{C_{st}}{Z_{st}} + \frac{C_c}{Z_{st}} + \frac{C_{pm}}{Z_{st}} = V_{st} + V_c k_c + V_{pm} k_{pm}, \quad (4.6)$$

де Z_{st} – вартість 1м^3 сталі, що застосована у конструкції амортизатору, V_{st} , V_c , V_{pm} – об'єми сталей, обмоткової міді та постійного магніту амортизатора відповідно, k_c , k_{pm} , коефіцієнти міді та постійного магніту, що розраховуються співвідношеннями:

$$k_c = \frac{\rho_c Z_{c1}}{\rho_{st} Z_{st1}}, \quad k_{pm} = \frac{\rho_{pm} Z_{pm1}}{\rho_{st} Z_{st1}} \quad (4.7)$$

де $\rho_c, \rho_{st}, \rho_{pm}$ – щільність міді, сталі та постійного магніту, відповідно, та Z_{c1}, Z_{st1}, Z_{pm1} – вартість 1кг міді, сталі та постійного магніту відповідно. Для сучасного стану економіки вони становлять $k_c=5,64$, $k_{pm}=47$ в.о.

Приведений об'ємів матеріалів має відносно невелике коливання відносно курсу валют, що вказує на універсальність розробленого підходу.

Об'єм сталі амортизатору визначається за виразом

$$V_{st} = \frac{\pi}{4} H (D_3^2 + D_1^2 - D_2^2) + \frac{\pi}{2} h_{sp} (D_2^2 - D_3^2). \quad (4.8)$$

Об'єм міді амортизатору визначається за виразом

$$V_c = \pi (D_3 + 2 b_m + 2 \Delta' + b_k) b_k h_k. \quad (4.9)$$

Об'єм постійного магніту амортизатору визначається за виразом

$$V_{pm} = \pi (D_3 + b_m) b_m h_m. \quad (4.10)$$

Таким чином вираз (4.6) з урахуванням виразів (4.7)-(4.10) є першим критерієм, який обрано для вирішення задачі визначення оптимальних параметрів електромеханічного амортизатору.

2) Критерій, що визначає енергію, що рекуперує амортизатор, за час роботи

$$W = P_{msr} T_{\Sigma} \eta \quad (4.11)$$

де P_{msr} – середня потужність механічних коливань кузова, T_{Σ} – строк служби амортизатора, η – ККД амортизатору. Перші дві складові P_{msr} , T_{Σ} визначаються зовнішніми факторами та залежать від конструкції ходової частини ЕРС. ККД амортизатору в свою чергу визначається втратами у його конструкції та залежить від неї. Тому ККД амортизатора визначає енергію, що може рекуперувати пристрій, та може бути обрано у якості другого критерію.

Втрати у амортизаторі складаються з втрат в міді обмотки, сталі магнітопроводу та механічних втрат. Визначення двох останніх складових втрат на попередньому етапі розрахунків дуже складна задача. До того ж значення втрат у сталі є незначними тому, що змінний магнітний потік проходить лише у верхньої та нижньої спинки статора, а частота його складає 0,5..10 Гц. Це значно нижче за показників поширених електричних машин. Тому втрати у амортизаторі приблизно дорівнюють електричним втратам у обмотці

$$p_{\Sigma} = R_{ya} I^2, \quad (4.12)$$

де R_{ya} – опір обмотки амортизатора.

Потужність навантаження згідно рис. 2.1 складає

$$P_2 = R_n I^2, \quad (4.13)$$

де R_n – опір навантаження амортизатора.

Потужність, що перетворює амортизатор-рекуператор складає

$$P_1 = P_2 + p_{\Sigma}. \quad (4.14)$$

Коефіцієнт корисної дії амортизатор-рекуператора дорівнює

$$\eta = 1 - \frac{p_{\Sigma}}{P_1} = 1 - \frac{R_{ya}}{R_{ya} + R_n} = 1 - \frac{R_{ya}}{R_{\Sigma}}, \quad (4.15)$$

де R_{Σ} – загальний опір кола обмотки якоря, що можливо визначити виразом

$$R_{\Sigma} = \frac{E_{dem}}{I} . \quad (4.16)$$

Для визначення E_{dem} та I можливо застосувати спрощену математичну модель (3.6) перетворив її до виду

$$E_{dem} = \pi \frac{D_3 + 2b_m + 2\Delta' + b_k}{\frac{1}{B_{ost}} + \frac{(b_k + 2\Delta')}{\mu_0 H_c b_m}} V_{dem}, \quad I = \frac{F_{dem} \left(\frac{1}{B_{ost}} + \frac{(b_k + 2\Delta')}{\mu_0 H_c b_m} \right)}{\pi W (D_3 + 2b_m + 2\Delta' + b_k)}. \quad (4.17)$$

Опір навантаження амортизатора визначається з урахуванням середньої довжини вітка, його площини та питомого опору міді

$$R_{ya} = 1,72 \cdot 10^{-8} \pi \frac{(D_3 + 2b_m + 2\Delta' + b_k)}{b_k h_k k_z} W^2 . \quad (4.18)$$

Таким чином вираз (4.15) з урахуванням виразів (4.16)-(4.18) є другим критерієм, який обрано для вирішення задачі визначення оптимальних параметрів електромеханічного амортизатор-рекуператору.

3) Згортка параметрів

Задача оптимізації, що розглядається належить до групи багатокритеріальних задач оптимізації. У якості обрано два рівнозначних за перевагою критерію: приведений об'ємів матеріалів (V), та коефіцієнту корисної дії амортизатору (η). Для задач такого типу згідно з [27, 43] необхідно провести згортку параметрів встановлюючи загальний критерій:

$$F' = k_1 V - k_2 \eta \rightarrow \min , \quad (4.19)$$

де k_1, k_2 – вагові коефіцієнти згортки параметрів. Знак «-» у виразі необхідне для врахування того факту, що другий фактор потребує максимізації.

Фізично вагові коефіцієнти повинні перевести приведений об'ємів матеріалів та ККД до значень фінансових затрат. Так для сучасних цін на електротехнічну сталь та вартість електроенергії та 10 річного строку використання амортизатор-рекуператору вагові коефіцієнти дорівнюють: $k_1 = 7,87 \cdot 10^3$ грн/м³, а $k_2 = 1820$ грн.

РОЗДІЛ 5

ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ АМОРТИЗАТОР-РЕКУПЕРАТОРА

5.1 Вибір методу вирішення задачі синтезу амортизатор-рекуператора

Для вирішення задачі синтезу параметрів амортизатор-рекуператора для візка застосуємо методи багатокритеріальної умовної оптимізації.

Як показали рішення тестових завдань, широко використовуваним методом багатогранника, що деформується [27, 28, 29, 30], результат рішення сильно залежить від стартової точки. Досягнення бажаної величини сили лінійного двигуна можливо при різних поєднаннях геометричних розмірів. Можливі випадки, коли рішення взагалі не може бути знайдене. Це говорить про множину локальних мінімумів, тобто про те, що цільова функція – багатоекстремальна. Тому оператори оптимізаційної процедури повинні містити разом з детермінованими і стохастичні компоненти, здатні оживити пошуковий процес при завмиранні його в локальних мінімумах рельєфу цільової функції. Одним з таких методів оптимізації є метод, що використовує генетичні алгоритми [34, 35, 36, 37, 38, 39].

Генетичні алгоритми – це пошукові алгоритми, які побудовані на принципах і механізмах біологічної еволюції, основними механізмами якої є природний відбір, що дозволяє виживати найбільш пристосованим особинам, і схрещування, що забезпечує перемішування і рекомбінацію генів потомства для прискорення еволюції. Метод був запропонований Холландом у кінці 60 -х років для вирішення завдань векторної оптимізації складних технічних систем. Нині цей метод інтенсивно застосовується для вирішення оптимізаційних завдань в електромеханіці [31, 40, 41, 42].

Особливістю методу є те, що він обробляє не один параметр, а цілий набір параметрів, структурований певним чином у вигляді ланцюжка кінцевої довжини і по аналогії з біологією, що називається хромосомою, а також і те, що він працює не з одним рішенням, а з популяцією можливих рішень, генеруючи подальші покоління популяції за допомогою генетичних операторів кросовера,

мутації, інверсії. При виконанні пошуку генетичні алгоритми керується імовірнісними правилами і тільки оцінною інформацією (значення цільової функції), не вимагаючи додаткових відомостей про параметри.

Генетичні алгоритми можна застосовувати для вирішення завдань типу

$$\min\{f(\bar{x})|\bar{x} \in X\}, X \subset R^n, f: R^n \rightarrow R. \quad (5.1)$$

де X – пошуковий простір:

Слід зазначити, що $f(\bar{x})$ не обов'язково має бути опуклою, такою, що диференціюється, безперервною або унімодальною.

Генетичні алгоритми є паралельним випадковим пошуком з централізованим управлінням, що використовує відбір і генетичні механізми відтворення [43]. Централізованою частиною є схема відбору, для якого потрібне знання середньої пристосованості усіх особин та індивідуальної пристосованості кожної особини. Випадковість обумовлена довільним вибором точок прикладення генетичних операторів, оскільки прийоми і механізми генетичні алгоритми побудовані на випадкових подіях. В результаті ж виходить високо синхронізований алгоритм.

Генетичним алгоритмам властивий один недолік – вони знаходять оптимальне рішення з малою точністю. Для виключення цього недоліку в [44] запропонований комбінований генетичний алгоритм, який в завершальній стадії пошуку використовує локальні методи оптимізації, зокрема, метод Нелдера - Міда [27]. Такий підхід підвищує ефективність пошуку і уточнює глобальний мінімум.

Слід зазначити, що сучасні роботи по генетичним алгоритмам пропонують безліч варіантів реалізації операторів кросоверу, мутації, селекції [45]. Проте нами прийнято, що на початковому етапі дослідження ЛД застосування генетичного алгоритму на основі методу рулетки цілком достатньо.

Таким чином, як метод оптимізації прийнятий комбінований генетичний алгоритм: глобальний пошук здійснюється генетичним алгоритмом з одноточечним кросовером і селекцією за принципом рулетки. На

завершальному етапі роботи оптимізаційної процедури уточнення оптимуму здійснюється методом Нелдера - Міда.

5.2 Результати вирішення задачі оптимізації

Згідно наведеного задачі оптимізації (розділ 4) та за допомогою метода генетичного алгоритму, були отримані попередні дані рішення задачі умовної оптимізації. Хід рішення задачі наведений по координатами b_k , b_m , D_3 на рис. 5.1, за координатами b_k , b_m , W на рис. 5.2, а за координатами b_m , D_3 , W на рис. 5.3. На рис. 5.1-5.3 позначені лише найкращі точки. Початкова точка пошуку позначена кругом, а кінцева ромбом.

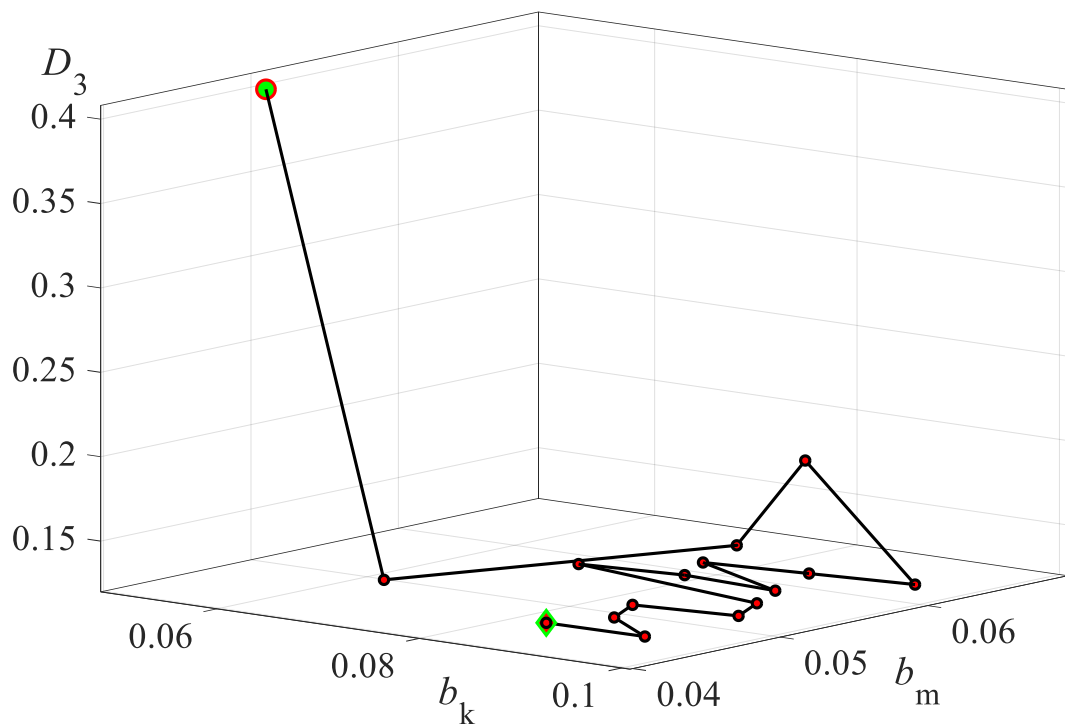


Рисунок 5.1 – Хід рішення задачі оптимізації параметрів електромеханічного амортизатор-рекуператору методом генетичного алгоритму у координатах b_k , b_m , D_3

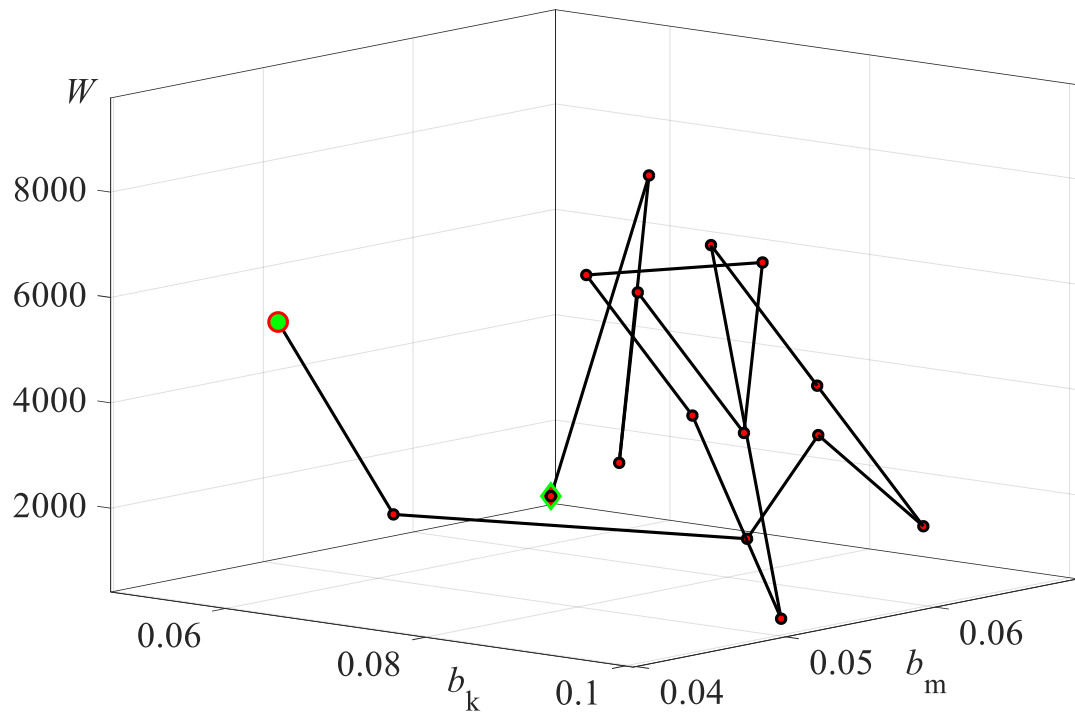


Рисунок 5.2 – Хід рішення задачі оптимізації параметрів електромеханічного амортизатор-рекуператору методом генетичного алгоритму у координатах b_k , b_m , W°

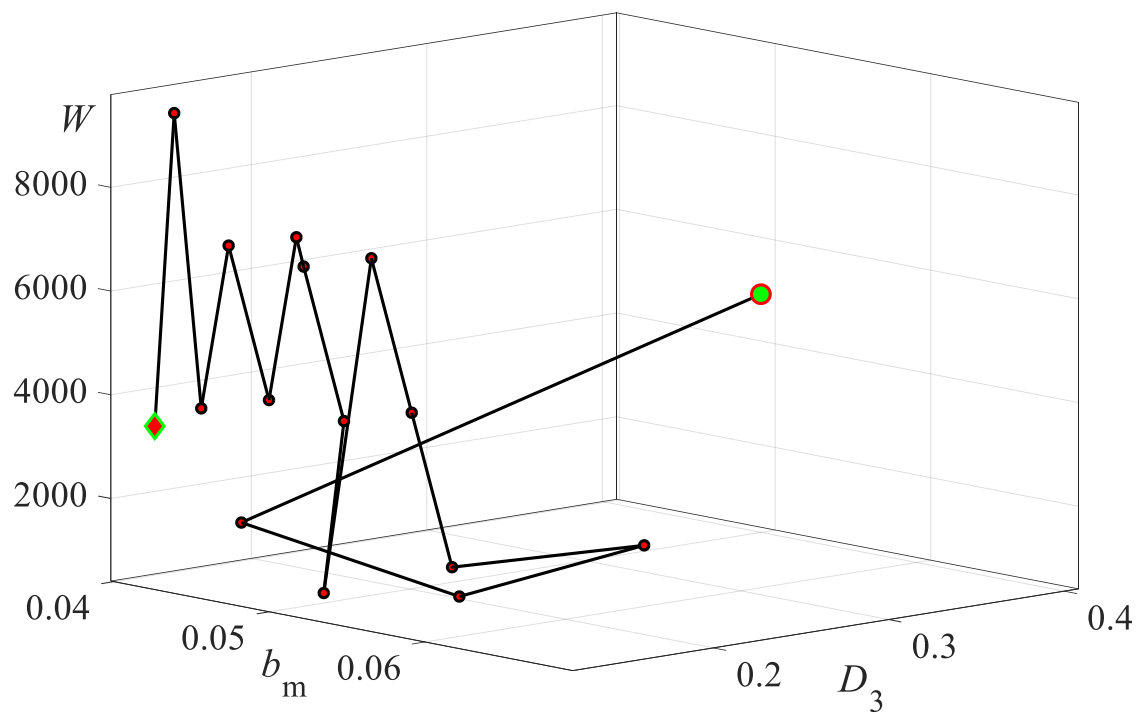


Рисунок 5.3 – Хід рішення задачі оптимізації параметрів електромеханічного амортизатор-рекуператору методом генетичного алгоритму у координатах b_m , D_3 , W°

Як видно з цих рисунків, при рішенні задачі із багатьма екстремумами, пошук рішення проводився з урахуванням всієї множини можливих рішень. Тому отримане рішення знаходиться у зоні близької до глобального мінімуму. Числові значення проміжних результатів наведені у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати попереднього обчислення параметрів амортизатор-рекуператора за генетичним алгоритмом

Параметр	Величина	Параметр	Величина
b_m	0,091 м	b_k	0,041 м
D_3	0,136 м	W	3348 м
D_1	0,421 м	D_2	0,406м
h_m	0, 157 м	h_k	0, 077 м
h_{sp}	0,034м	H	0,295 м
R_{ya}	33,59 Ом	R_Σ	42,31 Ом
E	92 В	I	2,174 А
V_{st}	0,0166 м ³	V_c	0,0069 м ³
V_{pm}	0,0036 м ³	V	0,223 м ³
η	0,21	F	1383 грн

Хід рішення задачі наведений на кінцевому етапі за методом Нелдера-Міда по координатами b_k, b_m, D_3 на рис. 5.1, за координатами b_k, b_m, W на рис. 5.2, а за координатами b_m, D_3, W на рис.5.3 .

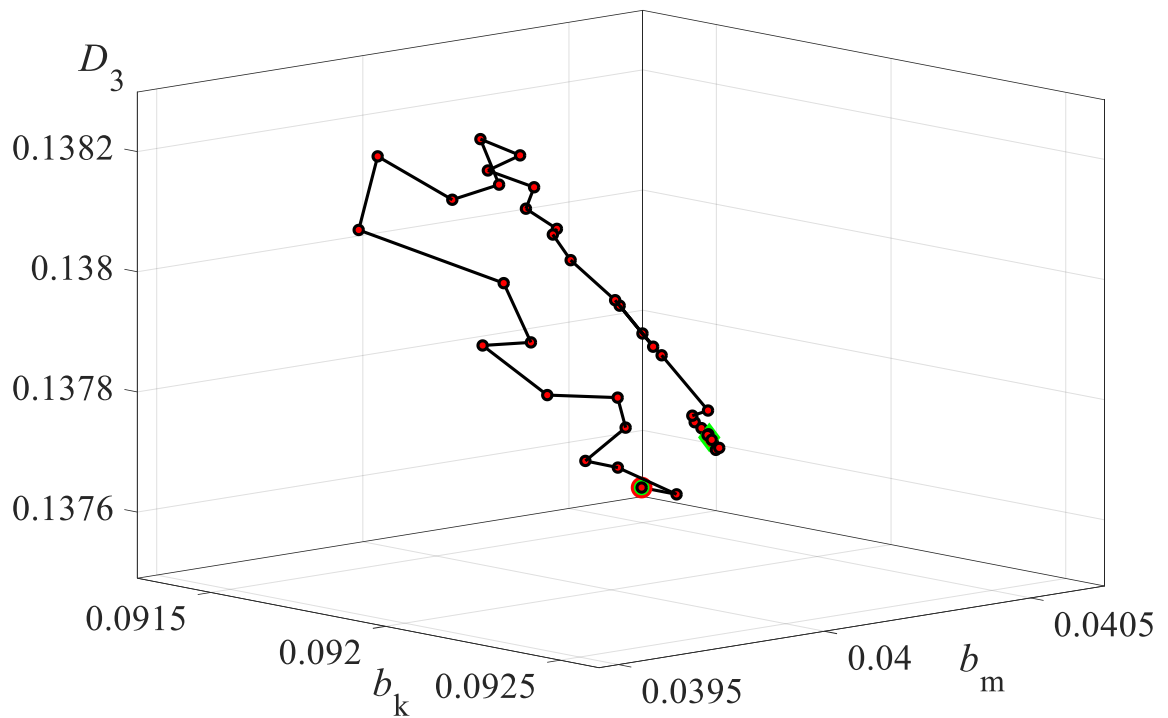


Рисунок 5.4 – Хід рішення задачі оптимізації параметрів електромеханічного амортизатор-рекуператору за методом Нелдера-Міда у координатах b_k , b_m , D_3 °

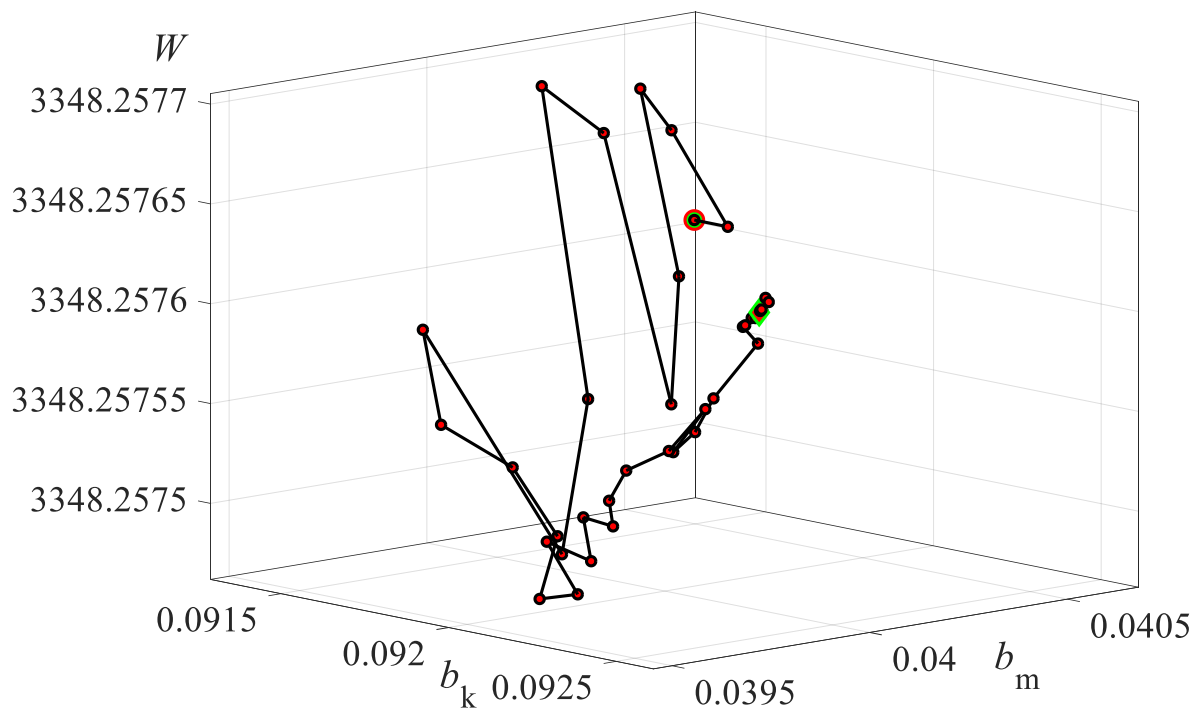


Рисунок 5.5 – Хід рішення задачі оптимізації параметрів електромеханічного амортизатор-рекуператору за методом Нелдера-Міда у координатах b_k , b_m , W °

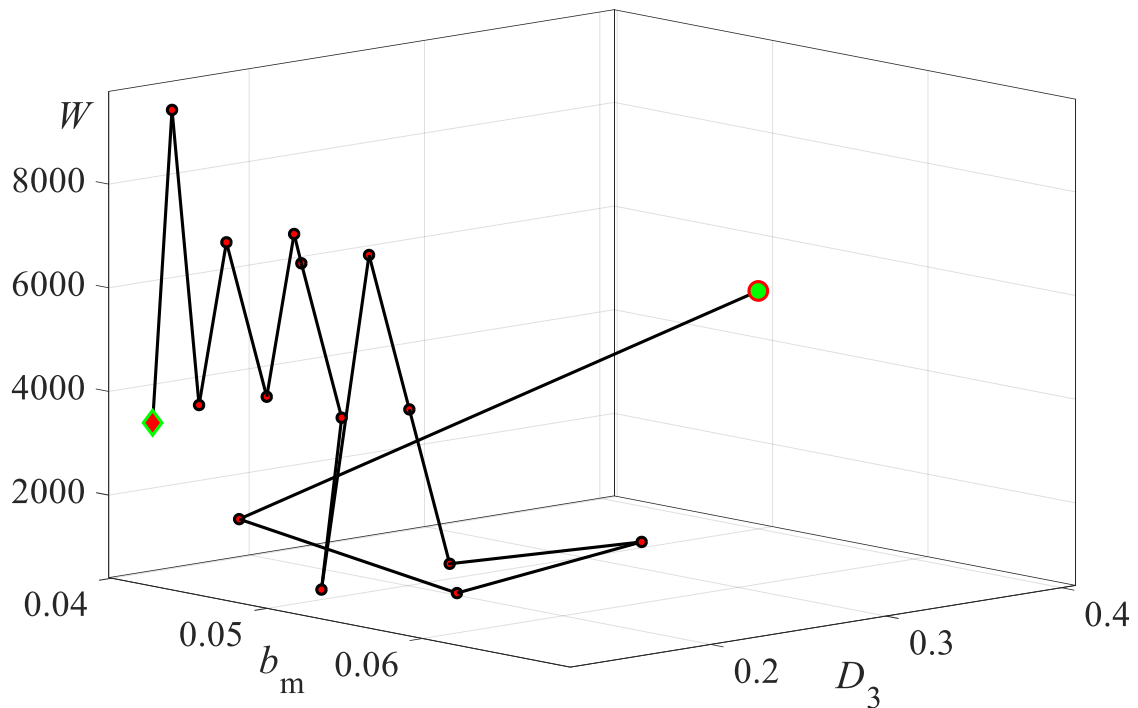


Рисунок 5.6 – Хід рішення задачі оптимізації параметрів електромеханічного амортизатор-рекуператору за методом Нелдера-Міда у координатах b_m , D_3 , W°

Як видно з цих рисунків, цей алгоритм дозволяє покращити точність визначення глобального мінімуму без урахування значень у локальних мінімумах.

Числові значення остаточних результатів наведені у табл. 5.2

Як видно з табл. 5.2 та 5.3 результати використання остаточного обчислення оптимального значення параметрів амортизатор-рекуператору в незначній мірі змінило значення розмірів постійного магніту та обмотки якоря. Кількість витків осталась не змінною. Значення цільової функції витрат зменшилось на 0,1%.

В загалі оптимальна висота амортизатор-рекуператор близька до максимальної (0,299 м), а зовнішній діаметр – 86% від максимального значення. Поперечний перетин обмотки якоря наближується до квадратного (0,093 м x 0,081 м). Товщина постійного магніту складає 43% від товщини обмотки, а висота перевищує висоту обмотки у приблизно 2 рази. Оптимальне значення ККД лежить у межах 21..22%.

Таблиця 5.2 – Результати остаточного обчислення параметрів амортизатор-рекуператора за методом Нелдера-Міда

Параметр	Величина	Параметр	Величина
b_k	0,093 м	b_m	0,04 м
D_3	0,138 м	W	3348 м
D_1	0,429 м	D_2	0,407м
h_m	0, 161 м	h_k	0, 081 м
h_{sp}	0,035м	H	0,299 м
R_{ya}	31,45 Ом	R_Σ	40,32 Ом
E	89,8 В	I	2,227 А
V_{st}	0,0168 м ³	V_c	0,0074 м ³
V_{pm}	0,0036 м ³	V	0,226 м ³
η	0,22	F	1381 грн

Подальше збільшення ККД призводить до надмірних витрат активних матеріалів і тому не раціонально. Розроблений амортизатор-рекуператор має номінальну ЕРС обмотки – 89,8 В а струм 2,227А, що надає можливості використовувати у якості ключів достатньо дешеві електронні ключі.

ВИСНОВКИ

1. Запропонована конструкція електромеханічного амортизатор-рекуператору, що складається з статора з коаксіальним постійним магнітом та якоря з обмоткою, яка розміщена у магнітному полі. Зазначено, що конструкція амортизатору забезпечує стабільне значення електромагнітної сили при будь-якому положенні якоря, а її значення обумовлюється в першу чергу електрорушійної сили обмотки якоря, яка залежить від швидкості руху якоря та параметрів навантаження.

2. Розроблена спрощена математична модель по визначенню електромагнітної сили та електрорушійної сили електромеханічного амортизатор-рекуператору. Особливістю моделі є урахування режимів роботи постійного магніту на основі розрахунку магнітного кола. Створення моделі дозволяє проводити приблизний розрахунок режимів роботи амортизатора та може бути використана у вирішенні задачі оптимізації параметрів електроамортизатору.

3. Проведено аналіз геометричних співвідношень конструкції електромеханічного амортизатор-рекуператору. Визначенні геометричні співвідношення між елементами конструкції які забезпечують оптимальне рівномірне магнітне навантаження в елементах магнітопроводу.

4. Проведена постановка задачі умовної двокритеріальної оптимізації параметрів електромеханічного амортизатор-рекуператору. У якості параметрів обрано обираємо товщину постійного магніту та обмотки, діаметр внутрішнього осердя та число витків обмотки якоря, які є умовно незалежними.

Обрані обмеження, що поділено на три категорії:

- обмеження за розмагніченням постійного магніту, що дозволяють зберегти працездатність постійного магніту;
- обмеження за щільністю струму, яке забезпечує теплові режими роботи амортизатору;

– компоновачні обмеження та обмеження, на параметри задачі оптимізації, що забезпечують розміщення конструкції у ходовій частині візка.

Запропоновано у якості критеріїв обрати приведений об'єм амортизатор-рекуператору, що обумовлює затрати на створення амортизатору та його ККД, який обумовлює рекуперовану енергію коливань. Проведено згортку параметрів до єдиної цільової функції затрат та обрані вагові коефіцієнти – $k_1 = 7,87 \cdot 10^3$ грн/м³, а $k_2 = 1820$ грн.

5. У якості метода оптимізації обрано комбінований метод, що включає в себе генетичний алгоритм, на попередньому етапі пошуку. На завершальному етапі оптимізаційної процедури уточнення оптимуму здійснюється методом Нелдера-Міда.

6. За результатами вирішення задачі оптимізації параметрів амортизатор-рекуператору визначено, що оптимальна висота амортизатор близька до максимальної (0,299 м), а зовнішній діаметр – 86% від максимального значення. Поперечний перетин обмотки якоря наближується до квадратного (0,093 м х 0,081 м). Товщина постійного магніту складає 43% від товщини обмотки, а висота перевищує висоту обмотки у приблизно 2 рази. Оптимальне значення ККД лежить у межах 21..22%. Подальше збільшення ККД призводить до надмірних витрат активних матеріалів і тому не раціонально. Розроблений амортизатор має номінальну електрорушійну силу обмотки – 89,8 В а струм 2,227А, що надає можливості використовувати у якості ключів достатньо дешеві електронні ключі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Сердобинцев Е.В. Вертикальные колебания метровагона с пневмоподвешиванием/ Е.В. Сердобинцев, Ёе Вин Хан. // Журнал «Мир транспорта». М., 2013. – №2. – С.78–84.
- 2 Liubarskyi, B. Procedure for modeling dynamic processes of the electromechanical shock absorber in a subway car / B. Liubarskyi, N. Lukashova, O. Petrenko, B. Yeritsyan, Y. Kovalchuk, L. Overianova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 5, N 5 (101). - P. 44-52. doi : 10.15587/1729-4061.2019.181117.
- 3 Liubarskyi, B. Devising a procedure to choose optimal parameters for the electromechanical shock absorber for a subway car / B. Liubarskyi, N. Lukashova, O. Petrenko, T. Pavlenko, D. Iakunin, S. Yatsko, Y. Vashchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 4, N 5 (100). - P. 16-25. doi : 10.15587/1729-4061.2019.176304.
- 4 Выбор параметров метровагона с пневморессорами [Текст] / Евгений Сердобинцев, Павел Званцев, Ёе Вин Хан // Мир транспорта. - 2014. - № 1. - С. 34-41
- 5 Lukashova N. Аналіз конструкцій ресорних підвішувань рейкового міського електрорухомого складу / N. Lukashova, T. Pavlenko, B. Liubarskyi, O. Petrenko // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2018. – Т. 5 (51). – С. 65-68. – doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.5.065>
- 6 Крюковский вагоностроительный завод. Каталог. Пассажирское вагоностроение. [Електронний ресурс] . – 2019 – Режим доступа до ресурсу: <http://www.kvsz.com/images/catalogs/tsn.pdf>
- 7 Kolpakhch'yan, P. G.. Sensorless control of a linear reciprocating switched-reluctance electric machine/ P. G. Kolpakhch'yan, , V. G. Shcherbakov, , A. E.

- Kochin, , & A. R. Shaikhiev, // Russian Electrical Engineering, 88(6), 2017 pp. 366–371. doi:10.3103/s1068371217060086
- 8 Forster N. Design of a Linear Actuator for Railway Turnouts / N. Forster, A. Gerlach, R. Leidhold, S. Buryakovskiy, A. Masliy and B. G. Lyubarskiy// IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, – Washington, DC:, 2018. pp. 463-470. doi: 10.1109/IECON.2018.8591471
- 9 Сергиенко А.Н. Математическая модель колебаний в ходовой системе автомобиля с электромагнитным демпфированием / А.Н. Сергиенко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Транспортне машинобудування. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2013. – №31 (1004). – С. 86–93.
- 10 Bart L. Efficiency of a regenerative direct-drive electromagnetic active suspension/ L. Bart J. Gysen, Tom P. J. van der Sande, Johan J.H. Paulides, Elena A. Lomonova. // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2011. – Volume 60, Issue 4. – P.1384 - 1393.
- 11 Sulym A.O. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock/ A.O. Sulym O. V. Fomin P.O. Khozia A.G. Mastepan// Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2018. – №5 – pp. 79-87 DOI: 10.29202/nvngu/2018-5/8
- 12 Васьковський Ю. М. Оцінка енергетичної ефективності систем рекуперації енергії механічних коливань транспортних засобів / Ю. М. Васьковський, М. В. Пода // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 52-55. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.09.
- 13 Simulation modeling of external perturbations affecting wheeled vehicles of special purpose / O. Nikonov, I. Kyrychenko, V. Shuliakov // The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020). Zaporizhzhia, Ukraine, April 27 - May 1, 2020, CEUR-WS.org, online, pp. 547-556. <http://ceur-ws.org/Vol-2608/>

- 14 Uspensky B. Nonlinear torsional vibrations of electromechanical coupling of diesel engine gear system and electric generator / B. Uspensky, K. Avramov, B. Liubarskyi, Yu. Andrieiev, O. Nikonov // Journal of Sound and Vibration. – 2019. – Vol. 460. – 114877. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.114877>
- 15 Болюх В.Ф. Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії: моногр. / В.Ф. Болюх, В.Г. Данько; Х.: [б. и.], 2006.– 258 с.
- 16 Болюх В.Ф., Электромеханические импульсные преобразователи с криорезистивными обмотками / В.Ф. Болюх, В.Г. Данько.– Харьков: Изд. ХНАДУ, 2001.– 215 с.
- 17 Сика З.К., Электродинамическая левитация и линейные синхронные двигатели транспортных систем / З.К. Сика, И.И. Куркалов, Б.А. Петров.– Рига: Зинатне, 1988.– 258 с.
- 18 Афонин А.А. Линейные двигатели с концентраторами магнитного потока / А.А. Афонин, В.В. Гребенников // Proceedings of the 3rd International scientific and technical conference «Unconventional electromechanical and electrical systems».– Alushta, The Crimea, Ukraine. Szczecin, 1997.– Vol. 2.– P. 189–194.
- 19 Уваров Г.Г. Основные принципы и пути повышения силовых и энергетических показателей линейных электромагнитных двигателей для импульсных технологий / Г.Г. Уваров // Механика горных пород, технология горных работ.– Новосибирск: Ин-т горного дела Сиб. отделения АН России, 1993.– С. 107–110.
- 20 Электрические ударные машины возвратно-поступательного действия / [Под ред. П.М.Аблужева].– Новосибирск: Наука, 1969.– 287 с.
- 21 Ижелия Г.И., Линейные асинхронные двигатели / Г.И. Ижелия, С.А. Ребров, А.Г. Шаповаленко.– К.: «Техника», 1975.– 136 с.
- 22 Омеляненко В.И. Линейные двигатели постоянного тока с тиристорным коммутатором / В.И. Омеляненко.– Харьков: Основа, 1994.– 76 с.
- 23 Якунин, Д. И. Электромеханическая система привода с линейным двигателем для наклона кузовов скоростного подвижного состава. –

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09. – «Электротранспорт». Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». Харьков, – 2010. 202 с.

- 24 Йе Вин Хан Обоснование параметров пневморессоры рессорного подвешивания для вагона метрополитена города Янгон Республики Мьянма [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Йе Вин Хан Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения», 2014. – 132с.
- 25 Пат. 93154 Україна, МПК F03G7/08, B60K 25/00. Пристрій для рекуперації енергії коливань транспортного засобу / Сергієнко М.Є., Худолій О.І., Сергієнко А.М.; заявник та патентовласник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № а200912230; заявл. 27.11.09; опубл. 10.01.11, Бюл. №1.
- 26 Любарський Б. Г. Теоретичні основи для вибору та оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу. – Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09. - «Електротранспорт». Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, - 2014. 368 с.
- 27 Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование: Пер. с англ / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1975. – 534 с.
- 28 Штойер Р. Многокритериальная оптимизация / Р. Штойер. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с.
- 29 Реклейтис Г. Оптимизация в технике: в 2-х книгах. Книга 1: Пер. с англ. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Регсдел. – М.: Мир, 1986. – 350 с.
- 30 Реклейтис Г. Оптимизация в технике: в 2-х книгах. Книга 2: Пер. с англ. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Регсдел. – М.: Мир, 1986. – 320 с.

- 31 Лысенко Л. И. Исследование пределов использования линейного синхронного двигателя для разгрузки системы подвеса магнитолевитирующего транспорта [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.09.01 / Л.И. Лысенко. - Х.: [б. и.], 1999. - 186 с.
- 32 Рябов Е.С. Синтез тягового реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком для скоростного подвижного состава / Б.Г. Любарский, В.П. Северин, Е.С. Рябов В.Л., Емельянов // Електротехніка і електромеханіка.– 2010. – №6. – С. 28–30.
- 33 Вороновский Г. К. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев, С. А. Сергеев. – Харьков: Основа, 1997. – 112 с.
- 34 Генетические алгоритмы / Т. В. Панченко / [Под ред. Ю. Ю. Тарасевича. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 88 с.
- 35 Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинський, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 452 с.
- 36 Weise T. Global optimization algorithms theory and application / T. Weise. – E-Book. – 2008. – 820 p.
- 37 Back T. Evolutionary algorithms in theory and practice / T. Back. – New York: Oxford University Press, 1996. – 328 p.
- 38 M.Balaji, V.Kamaraj. Design of High Torque Density and Low Torque Ripple Switched Reluctance Machine using Genetic Algorithm // European Journal of Scientific Research, Vol.47 No.2 (2010), pp.187-196.
- 39 Satit Owatchaiphong, Nisai H. Fuengwarodsakul. Multi-Objective Based Optimization for Switched Reluctance Machines Using Fuzzy and Genetic Algorithms // PEDS, 2009, pp. 1530–1533.
- 40 Дзензерский В.А. Высокоскоростной магнитный транспорт и электродинамической левитацией [Текст]: Монография / В.А. Дзензерский, В.И. Омеляненко, С.В. Васильев, В.И Матин, С.А. Сергеев. – К.: Наукова думка, 2001. – с. 479.

- 41 M.Balaji, V.Kamaraj. Design of High Torque Density and Low Torque Ripple Switched Reluctance Machine using Genetic Algorithm // European Journal of Scientific Research, Vol.47 No.2 (2010), pp.187-196.
- 42 Satit Owatchaiphong, Nisai H. Fuengwarodsakul. Multi-Objective Based Optimization for Switched Reluctance Machines Using Fuzzy and Genetic Algorithms // PEDS, 2009, pp. 1530–1533.
- 43 Рябов Е.С. Синтез тягового реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком для скоростного подвижного состава / Б.Г. Любарский, В.П. Северин, Е.С. Рябов В.Л., Емельянов // Електротехніка і електромеханіка.– 2010. – №6. – С. 28–30.
- 44 Джафари Хенджани Сейед Моджаба. Многокритериальный синтез интеллектуальных систем управления энергоблоков АЭС генетическими алгоритмами. Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07. Харьков, 2010, 224 с.
- 45 Рябов Е.С. Синтез тягового реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком для скоростного подвижного состава / Б.Г. Любарский, В.П. Северин, Е.С. Рябов В.Л., Емельянов // Електротехніка і електромеханіка.– 2010. – №6. – С. 28–30.
- 46 Маслій А. С. Структурний та параметричний синтез систем автоматичного керування лінійними електродвигунами моношпального стрілочного переводу [Електронний ресурс] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.13.07 / Андрій Сергійович Маслій ; [наук. керівник Буряковський С. Г.] ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків, 2018. – 24 с. – Бібліогр.: с. 18-21.
- 47 Єріцян Б. Х. Синтез комбінованої системи нахилу кузова швидкісного електричного рухомого складу [Електронний ресурс] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.22.09 / Багіш Хачикович Єріцян ; [наук. керівник Любарський Б. Г.] ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків, 2016. – 21 с. – Бібліогр.: с. 16-19.
- 48 Евсеев М.Е. Теоретические основы электротехники. Анализ линейных электрических цепей при установившихся режимах работы: Рекомендовано

Учебно-методическим объединением по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений. –СПб.: СЗТУ, 2006. – 244 с.