

Informacionne tehnologii. Avtomatizirovannye sistemy upravlenija.» No. 1105. Vol. 24. Kharkov. 2014. 122–128. Print. 2. Litvinova, Ju. S., K. V. Maksimenko-Shejko and T. I. Shejko. "Matematicheskoe i komp'uternoje modelirovanie stroitel'nyh konstrukcij na osnove R – funkcij." *Mezhdunar.-tehnich. zurnal «Problemy mashinostroenija»*. No. 3. Vol. 17. Kharkov. 2014. 45–50. Print. 3. MAKE-3D.RU "Pechat' domov na 3D printere." MAKE-3D.RU, 2014. Web. 05 October 2015. <<http://make-3d.ru/articles/3d-printer-dlya-pechati-domov>>. 4. Rvachev, V. L. Teorija R – funkcii i nekotorye ee prilozhenija. Kiev: Nauk. dumka, 1982. Print. 5. Rvachev, V. L., and T. I. Shejko. " R – functions in boundary value problems in mechanics." *Appl. Mech. Reviews*. Vol. 48. No. 4. 1995. Print. 6. Maksimenko-Sheyko, K. V. R – funkcii v matematicheskom modelirovanii geometricheskikh ob'ektov i fizicheskikh polej. Kharkov: IPMash NAN Ukraini, 2009. Print.

Поступила (received) 06.10.2015

Литвинова Юлія Сергіївна – аспірантка ІПМаш НАН України, м. Харків; тел.: 067-835-93-63; e-mail: litjuli@mail.ru.

Литвинова Юлія Сергеевна – аспірантка ІПМаш НАН України, г. Харків; тел.: 067-835-93-63; e-mail: litjuli@mail.ru.

Litvinova Yuliya Sergeevna – postgraduate student, Institute for Mechanical Engineering Problems NAS of Ukraine; tel.: 067-835-93-63; e-mail: litjuli@mail.ru.

УДК 629.429.3:621.313

Б. Г. ЛЮБАРСЬКИЙ, Б. Х. ЄРІЦЯН, Д. І. ЯКУНІН, М. Л. ГЛЄБОВА

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЛІНІЙНОГО ДВИГУНА НАХИЛУ КУЗОВА ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Запропоновано спрощену математичну модель лінійного двигуна для визначення електромагнітної сили. Сформульовано задачу умовної оптимізації геометричних параметрів лінійного двигуна. Запропоновано у якості цільової функції використати залежність, пропорційну різниці енергії, що може перетворити лінійний двигун та енергії, яка потрібна для руху механізму нахилу кузова. У якості методу оптимізації на попередньому етапі пошуку обрано комбінований метод, що включає в себе генетичний алгоритм. На завершальному етапі оптимізаційної процедури уточнення оптимуму здійснюється методом Нелдера-Міда. Розроблено алгоритм вирішення задачі оптимізації, та його реалізацію в пакеті MATLAB. Запропоновано напрямок удосконалення електромеханічних приводів нахилу кузова за рахунок розробки комбінованих приводів, у яких сумарний кут нахилу буде створено частково електроприводом з лінійним двигуном, а частково іншими механізмами, які вже встановлені на рухомому складі.

Ключевые слова: лінійний двигун, умовна оптимізація, генетичні алгоритми, кут нахилу, активні матеріали.

Вступ. Вельми важливими критеріями ефективності роботи міжміського пасажирського транспорту є швидкість і пропускна здатність. На залізницях передових в технічному відношенні країн їх вдалося істотно підвищити, запровадивши високошвидкісний електричний транспорт [1 – 5].

Підвищення швидкості руху можна здійснити двома основними шляхами. По-перше, відмовитися від використання кривих порівняно малого радіусу. По-друге, залишити в експлуатації існуючу мережу залізниць, вживши заходів по зміні конструкції рухомого складу, що дозволяють підвищити швидкість проходження кривих за рахунок впровадження систем нахилу кузовів [6]. Другий шлях представляється менш витратним, оскільки вводити новий рухомий склад можна поступово, витісняючи існуючий у міру його фізичного та морального зносу.

Аналіз останніх досліджень. В якості силового приводу для нахилу кузовів швидкісних поїздів використовуються гідравлічні, пневматичні і електромеханічні системи. Гідравлічна система залежить від погодних умов, екологічно недосконала через можливість витоків, її конструкція, експлуатація та ремонт відносно складні; пневматична система не забезпечує належної швидкодії; електромеханічна система, будучи найбільш перспективною, не забезпечує належного рівня безпеки руху через відсутність самоповернення механізму нахилу [1 – 5].

Усунути зазначені недоліки електромеханічного приводу можливо шляхом використання силового приводу на базі лінійного електродвигуна [1 – 5]. Геометричні та електромагнітні параметри лінійного двигуна можуть змінюватись у широкому діапазоні. Тому для їх вибору необхідно застосовувати методи оптимального проектування, основною частиною яких є задача аналізу, що визначає цільову функцію.

У [1] доведено принципову можливість використання лінійного двигуна для нахилу кузова швидкісного потяга. Проте, геометричні параметри задіяного лінійного двигуна обиралися найбільшми з можливих за умов компонування у візку рейкового транспортного засобу – задля досягнення якнайбільшого зусилля на якорі лінійного двигуна. Так, діаметр корпусу двигуна за умов компонування не має бути більшим 0,5 м у діаметрі та 0,4 м завдовжки.

У [7] показано, що максимальний кут нахилу 8° не є актуальний для залізниць України. Також враховуючи, що тестова задача у [1] вирішувалася для граничного кута нахилу $\theta = 7^\circ$, таке саме значення у подальшому також обрано за граничне і у цій роботі. Також враховано неможливість прямого використання електромагнітного лінійного двигуна для приводу нахилу кузова через невідповідність тягової характеристики навантажувальній.

© Б. Г. Любарський, Б. Х. Єріцян, Д. І. Якунін, М. Л. Глєбова, 2015

Враховуючи сказане вище, актуальним завданням є оптимізація геометричних параметрів лінійного двигуна (ЛД), з урахуванням обмежень, що наведені у працях [1 – 7].

Постановка завдання. Вирішити задачу аналізу для оптимізації геометричних розмірів лінійного двигуна, виходячи із його функціональних можливостей, щодо забезпечення нахилу кузова на різний максимальний кут при обраній геометрії та кінематиці механізму нахилу.

Математична модель. Для живлення електромагнітного двигуна в приводі нахилу кузова вбачається раціональним використання саме прямоходової схеми, тому що така схема перетворювача, як і мостова, характеризується низькими перенапруженнями при комутації, проте в ній, на відміну від мостової, використовуються тільки два ключі.

Енергія, що її перетворює ЛД, визначається інтегралом

$$W_{EM} = \int_{x_{поч}}^{x_{max}} F_T dx. \quad (1)$$

Енергія, що потрібна для нахилу кузова, має аналогічний вираз:

$$W_H = \int_{x_{поч}}^{x_{max}} F_H dx. \quad (2)$$

Кінетична енергія системи дорівнює нулю на початку та наприкінці процесу повороту кузова, адже швидкість повертання кузова у цих точках є нульовою. Тому різниця між W_{EM} та W_H є енергією втрат ΔW , зумовлених невідповідністю тягової та навантажувальної характеристик:

$$\Delta W = W_{EM} - W_H. \quad (3)$$

Нами поставлено задачу оптимізації геометричних розмірів лінійного двигуна, виходячи із його функції забезпечення нахилу кузова на різний максимальний кут при обраній геометрії та кінематиці виконавчої частини механізму нахилу. Метою оптимізації є мінімізація енергії втрат ΔW .

У роботі [1] тягову характеристику лінійного двигуна отримано розрахунком магнітного поля за методом кінцевих елементів. Такий підхід є вельми точним, проте дуже затратним у часі, адже потребує численних розрахунків поля при різному положенні якоря лінійного двигуна. Щоб позбутися вказаного недоліку, у цій роботі пропонується спрощена методика розрахунку сили лінійного двигуна.

Для розрахунку сили F_T використовувався енергетичний підхід. Внесено наступні припущення: перетворення енергії відбувається у повітряному зазорі, насичення матеріалу статора та якоря не має, а також немає розсіювання потоків у магнітопроводі. Відповідно до цього підходу маємо

$$F_T = -\frac{\partial W}{\partial x}, \quad (4)$$

де W – енергія магнітного поля,

$$W = \int_0^l \psi \cdot di = \int_0^l B \cdot S_z \cdot di = \int_0^l \mu_0 \cdot H \cdot S_z \cdot di = \int_0^l \mu_0 \cdot \frac{i}{x} \cdot S_z \cdot di = \frac{\mu_0 \cdot S_z \cdot I^2}{x} = \frac{\mu_0 \cdot I^2}{2} S_z; \quad (5)$$

ψ – потокозчеплення; I – магнітна рухома сила (МРС) обмотки ЛД; B – магнітна індукція у повітряному зазорі; S_z – площа перетину; μ_0 – магнітна проникність повітря; H – напруженість поля у повітряному зазорі.

Таким чином,

$$F_T = \frac{\mu_0 \cdot I^2}{2} S_z, \quad (6)$$

$$F_T = \left(\frac{\mu_0}{2} \kappa_3^2 J^2 \right) \frac{S_W^2}{x^2} S_4, \quad (7)$$

де κ_3 – коефіцієнт заповнення обмотки статора ЛД; J – щільність струму цієї обмотки; S_W – її; S_4 – площа перетину осердя якоря.

Таким чином (7) є спрощеною математичною моделлю ЛД для визначення електромагнітної сили.

Обрання методу вирішення задачі оптимізації. Як показали рішення тестових завдань широко вживаним методом багатогранника, що деформується [9 – 12], 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 множини 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 викорис-

товує генетичні алгоритми (ГА) [13, 14 – 21].

Генетичні алгоритми – це пошукові алгоритми, які побудовані на принципах і механізмах біологічної еволюції, основними засобами 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* наприкінці 60-х років для вирішення завдань векторної оптимізації складних технічних систем. Нині цей метод інтенсивно застосовується для вирішення оптимізаційних завдань в електромеханіці [13, 20, 21, 22].

Генетичним алгоритмам властивий один недолік – вони знаходять оптимальне рішення з малою точністю. Для виключення цього недоліку в [23] запропонований комбінований ГА, який в завершальній стадії пошуку використовує локальні методи оптимізації, зокрема, *метод Нелдера-Міда* [9]. Такий підхід підвищує ефективність пошуку і уточнює глобальний мінімум.

Слід зазначити, що сучасні роботи по ГА пропонують безліч варіантів реалізації *операторів кросовера, мутації, селекції* [14]. 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 ГА: глобальний пошук здійснюється ГА з одноточечним кросовером і селекцією за принципом рулетки. На завершальному етапі роботи оптимізаційної процедури уточнення оптимуму здійснюється методом Нелдера-Міда.

Алгоритм вирішення задачі оптимізації. Початковим моментом щодо розрахунку геометричних параметрів лінійного двигуна є домовленість, що зовнішній діаметр його статора D_1 має бути визначений, виходячи з попередньо розрахованих діаметрів $D_2 \dots D_4$, а також умов рівності перетинів S_1 і S_4 та геометричного обмеження $D_1 < 0,5$ м.

Параметрами для вирішення задачі є діаметри D_2, D_3, D_4 та довжина статора l_1 .

На початку задано значення констант, що будуть використані у подальшому, а саме: щільність струму у обмотці якоря для коаксіальних лінійних двигунів станове $J = 10^6$ А/м², коефіцієнт заповнення вікна статора обмоткою для них же – $k_z = 0,5$ [1].

Встановлено електромагнітні навантаження у повітряному зазорі $B_{\max} = 1$ Тл. у найбільш напруженому режимі. Задачу оптимізації розв'язано для кута нахилу кузова θ від 7° до 1° з кроком у 1° . Початковими точками для рішення задачі були остаточні дані з попереднього кроку вирішення задачі.

Таким чином, найбільший час було витрачено для рішення задачі з найскладнішими умовами, коли кут нахилу 7° . Знайдений розв'язок вже обумовлює можливість вирішення задачі при інших кутах нахилу, тому що ЛД, який забезпечує нахил на 7° , вочевидь реалізує й менші кути. У початковій точці для вирішення першої задачі обрані параметри ЛД з роботи [1].

Алгоритм вирішення задачі наступний.

Виконується перевірка обмежень за геометричними розмірами. За програмою це обмеження $g_1 - g_4$. Обчислюється зовнішній діаметр статора та його товщина:

$$D_1 = \sqrt{D_3^2 - D_4^2 + D_2^2},$$

$$L_2 = \frac{D_3^2 - D_4^2}{2(D_2 + D_3)}.$$

Обчислюються площі перетину днища, зовнішньої стінки статора, а також якоря:

$$S_2 = \frac{\pi(D_2 + D_3) \cdot L_2}{2}, S_1 = \frac{\pi(D_1^2 - D_2^2)}{4}, S_4 = \frac{\pi(D_3^2 - D_4^2)}{2}.$$

Це проводиться для контролю рівності цих площин.

Обчислюється п'ята умова – обмеження на максимальний діаметр статора, за геометричним вписуванням у монтажний об'єм візка:

$$g_5 = D_1 - D_{\max}$$

Проводиться перевірка п'ятої умови $g_5 < 0$.

Для проведення перевірки обмежень щодо індукції у повітряному зазорі, виконуються наступні розрахунки.

Обчислюється площа перетину обмотки статора та критичне значення ходу якоря x_{\min} .

Розраховується індукція у повітряному зазорі для критичної точки, що є перевіркою обмеження $g_6 < B_{\max}$.

Проводиться розрахунок електромагнітної сили ЛД у критичній точці (обмеження g_7) та перевірка обмеження $g_7 > 0$.

Обчислюється максимальний хід якоря x_{\max} .

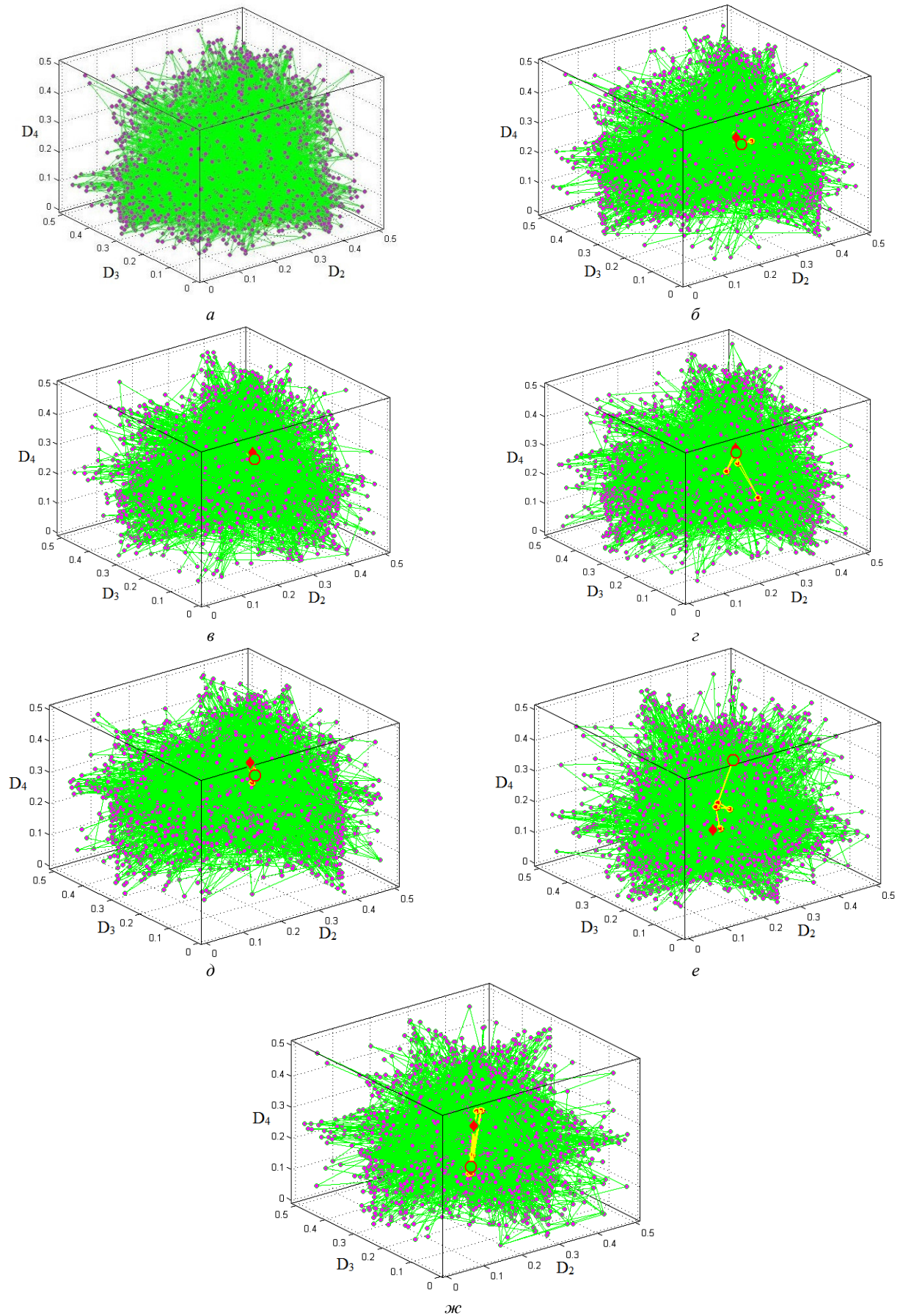


Рис. 1 – Точки проміжних розв'язків задачі оптимізації параметрів ЛД методом генетичного алгоритму при обраному максимальному куті нахилу кузова: *a* – 7° ; *б* – 6° ; *в* – 5° ; *г* – 4° ; *д* – 3° ; *е* – 2° ; *ж* – 1° .

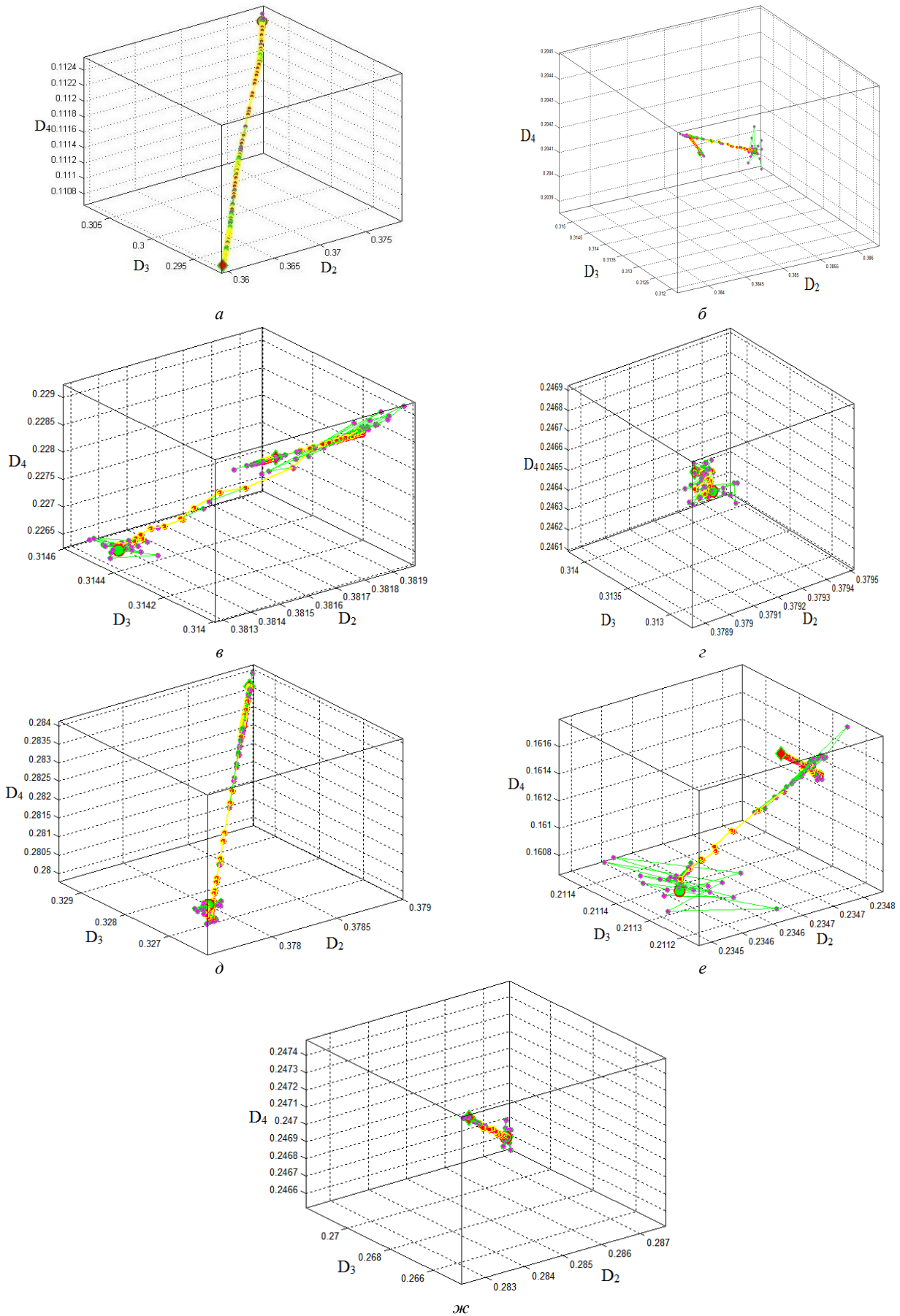


Рис. 2 – Траєкторії уточнених розв’язків задачі оптимізації параметрів ЛД методом Нелдера-Міда при обраному максимальному куті нахилу кузова: *a* – 7° ; *б* – 6° ; *в* – 5° ; *г* – 4° ; *д* – 3° ; *е* – 2° ; *ж* – 1° .

Проводиться розрахунок сили тяги при максимальному повітряному зазорі, який дорівнює ходу якоря, що визначає умову g_8 ; виконується перевірка умови $g_8 > 0$.

Мінімальний повітряний зазор обирається з умов залишкової величини повітряного зазору, що дорівнює для ЛД обраного типу дорівнює [1]

$$x_{\text{поч}} = 4 \cdot 10^{-3}$$

та обчислюється електромагнітна сила при $x = x_{i \pm}$, яка обумовлює обмеження $g_9 > 0$.

Розраховується цільова функція.

Результати вирішення задачі оптимізації. Згідно наведеного алгоритму та за допомогою метода генетичного алгоритму, були отримані попередні дані рішення задачі умовної оптимізації.

Хід рішення задачі наведений за координатами D_2 , D_3 , D_4 на рис. 1.

Як видно з рис. 1, $a - ж$ при рішенні задачі з багатьма екстремумами, пошук розв'язку проводився з урахуванням всієї множини можливих рішень. Тому, отримане рішення знаходиться у зоні, близької до глобального мінімуму.

Числові значення проміжних результатів наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Результати попереднього обчислення параметрів ЛД за генетичним алгоритмом

$\theta, ^\circ$	1	2	3	4	5	6	7
D_2	0,28743	0,23461	0,37793	0,37939	0,38136	0,38611	0,40034
D_3	0,27162	0,21133	0,32736	0,31405	0,31448	0,31518	0,31291
D_4	0,24661	0,16068	0,27997	0,24619	0,22633	0,20394	0,17803
L_1	0,24226	0,39166	0,27962	0,30239	0,37043	0,42227	0,41734

Остаточні результати обчислення параметрів ЛД, знайдені за допомогою метода Нелдера-Міда для координат D_2 , D_3 , D_4 , наведені на рис. 2.

Як видно з рис. 2, $a - ж$ цей алгоритм дозволяє покращити точність визначення глобального мінімуму без урахування значень у локальних мінімумах.

Числові значення остаточних результатів наведені у табл. 2

Таблиця 2 – Результати остаточного обчислення параметрів ЛД за Нелдером-Мідом

$\theta, ^\circ$	1	2	3	4	5	6	7
S_1	0,0073	0,0146	0,0219	0,0291	0,0364	0,0437	0,0510
S_w	0,0020	0,0041	0,0061	0,0082	0,0102	0,0123	0,0143
L_1	0,2503	0,3909	0,2866	0,3019	0,3700	0,4214	0,4219
L_2	0,0084	0,0208	0,0197	0,0268	0,0333	0,0399	0,0455
D_1	0,2989	0,2714	0,4140	0,4250	0,4381	0,4506	0,4739
D_2	0,2830	0,2347	0,3789	0,3789	0,3815	0,3840	0,3996
D_3	0,2655	0,2113	0,3292	0,3130	0,3141	0,3120	0,3130
D_4	0,2474	0,1616	0,2838	0,2468	0,2287	0,2044	0,1819
x_{\min}	0,0129	0,0257	0,0386	0,0515	0,0643	0,0772	0,0901
F_{\min}	$1,05 \cdot 10^{-11}$	$1,73 \cdot 10^{-11}$	$1,82 \cdot 10^{-12}$	$1,79 \cdot 10^{-5}$	$2,84 \cdot 10^{-7}$	$2,63 \cdot 10^{-5}$	$1,09 \cdot 10^{-11}$

Графічне представлення остаточних результатів розрахунку наведено на рис. 3.

Як видно з рис. 3, зі зменшенням граничного кута нахилу від 7° до 3° зменшуються розміри активної частини лінійного двигуна за рахунок зменшення довжини l_1 та одночасного зменшення зовнішніх діаметрів D_3 та D_4 та росту внутрішніх діаметрів D_3 та D_4 . Однак, при нахилі на 2° , оптимальним виявився альтернативний варіант, при якому зменшення активних матеріалів досягнуто за рахунок деякого збільшення довжини l_1 при рі-

зкому зменшенні усіх діаметрів.

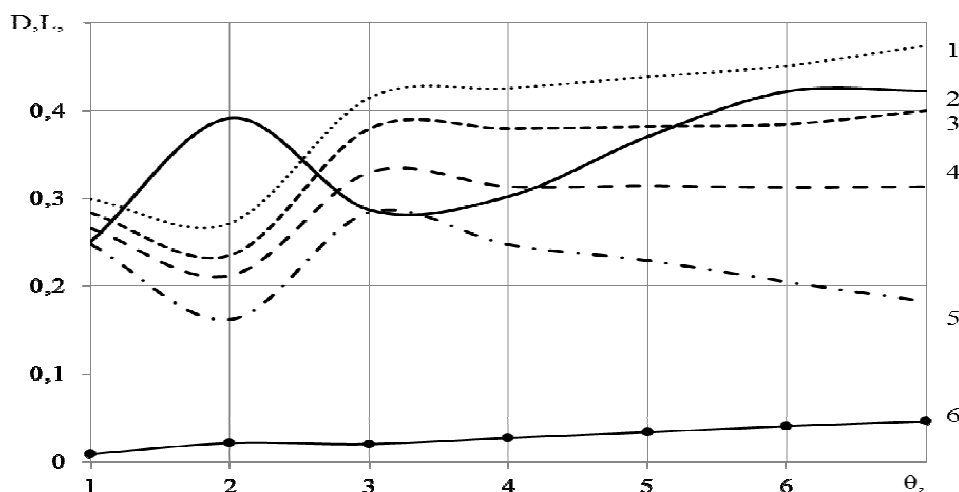


Рис. 3 – Залежність параметрів ЛД від граничного кута нахилу, остаточно обчислених за Нелдером-Мідом:
1 – D_1 ; 2 – l_1 ; 3 – D_2 ; 4 – D_3 ; 5 – D_4 ; 6 – l_2 .

Результати розрахунків цільової функції та мас активних матеріалів – міді та сталі, наведені у табл. 3. Розрахунок маси міді M_{Cu} проводиться за виразом

$$M_{Cu} = (k_z P_{Cu} \pi (D_2 + D_3) (D_2 - D_3) (l_1 - 2l_2)) / 4$$

де P_{Cu} – щільність міді.

Розрахунок маси сталі M_{Fe} виконується за виразом

$$M_{Fe} = \frac{k_z P_{Fe} \pi (D_1 + D_2) (D_1 - D_2) (l_1 - 2l_2)}{4} + \frac{(D_3 + D_4) (D_3 - D_4) (l_1 - 2l_2)}{4} + \frac{\pi (D_1 + D_4) (D_1 - D_4) l_2}{2}$$

де P_{Fe} – щільність сталі.

Однак, для остаточного порівняння коштів на використання активних матеріалів доцільно привести масу використаної сталі до маси міді, орієнтуючись на її актуальну середню вартість на ринку. Таким чином ми отримуємо сумарну приведену масу активних матеріалів лінійного двигуна.

$$M_{\Sigma} = M_{Cu} + \frac{B_{Fe}}{B_{Cu}} M_{Fe}$$

де B_{Fe} – вартість сталі, B_{Cu} – вартість міді.

Результати розрахунку відносної маси наведено у табл. 3 та на рис. 4.

Таблиця 3 – Розрахунок мас активних матеріалів лінійного двигуна

$\theta, ^\circ$	1	2	3	4	5	6	7
$k_{ef}, 10^{-4}$	0,406	1,812	3,950	7,495	12,148	18,419	26,771
M_{Cu} , кг	7,83	12,74	30,41	39,57	49,71	59,83	71,37
M_{Fe} , кг	29,41	91,52	106,22	152,05	229,35	311,43	369,84
B_{Cu}	86,17	140,15	334,46	435,26	546,86	658,12	785,06
B_{Fe}	88,23	274,56	318,66	456,16	688,05	934,30	1109,51
M_{Σ} , кг	15,85	37,70	59,37	81,04	112,26	144,77	172,23
M_{oe} , о.е.	0,09	0,22	0,34	0,47	0,65	0,84	1

Для оцінки масових показників ЛД раціонально використовувати відносну приведену масу активних матеріалів, прийнявши у якості базової сумарну приведену масу при куті нахилу 7° . Відносна маса визначається виразом:

$$M_{oe} = M_{\Sigma} / M_{\Sigma 7},$$



Рис. 4 – Залежність відносної приведенної маси ЛД від максимального кута нахилу кузова.

де $M_{\Sigma 7}$ – приведенне значення маси при куті нахилу кузова 7° .

Як видно з розглянутої залежності, при зменшенні максимального кута нахилу з 7° до 5° маса активних матеріалів знижується на 35%, а до 4° – на 53%. Тому одним з напрямків удосконалення електромеханічних приводів нахилу кузова може бути розробка комбінованих приводів, у яких сумарний кут нахилу буде створено частково електроприводом з ЛД, а частково – іншими механізмами, які вже встановлені на рухомому складі.

Висновки. Таким чином, у даній роботі запропоновано спрощену математичну модель лінійного двигуна для визначення електромагнітної сили.

Сформульовано задачу умовної оптимізації геометричних параметрів лінійного двигуна. У якості параметрів було обрано зовнішній діаметр якоря, внутрішні діаметри якоря та статора, а також довжина статора.

Запропоновано у якості цільової функції використати залежність, пропорційну різниці енергії, що може перетворити лінійний двигун та енергії, яка потрібна для руху механізму нахилу кузова.

Обрані обмеження, поділено на три категорії: компоновочні, обумовлені конструкцією механізму нахилу кузова; за індукцією, які обмежують можливість електромагнітних навантажень; за функціональністю, котрі обумовлюють перевагу тягової характеристики перед навантажувальною у всьому діапазоні ходу якоря.

Для оптимізації на попередньому етапі пошуку обрано комбінований метод, що включає в себе генетичний алгоритм, а на завершальному етапі оптимізаційної процедури уточнення оптимуму здійснюються методом Нелдера-Міда. Запропоновано алгоритм вирішення задачі оптимізації, та його реалізація на MATLAB.

Шляхом розв'язку задачі оптимізації визначені геометричні співвідношення для лінійних двигунів, що забезпечують можливість нахилу кузова на максимальні кути від 1° до 7° .

Встановлено, що при зменшенні граничного кута нахилу знижуються розміри активної частини лінійного двигуна за рахунок скорочення довжини статора та одночасного поменшання зовнішніх і зростання внутрішніх діаметрів. Виявлено альтернативний оптимальний варіант при нахилі на 2° , при якому зменшення активних матеріалів досягнуто за рахунок деякого збільшення довжини статора при різкому зниженні усіх діаметрів.

Визначено суттєве зниження мас активних матеріалів при обмеженні максимального кута нахилу. Встановлено, що при зниженні максимального кута нахилу з 7° до 5° маса активних матеріалів знижується на 35%, а до 4° – на 53%. Запропоновано напрямок удосконалення електромеханічних приводів нахилу кузова за рахунок розробки комбінованих приводів, у яких сумарний кут нахилу буде створено частково електроприводом з ЛД, а частково – іншими механізмами, які вже встановлені на рухомому складі.

Список літератури: 1. Якунин Д.И. Электромеханическая система привода с линейным двигателем для наклона кузовов скоростного подвижного состава. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Харьков, 2010, 202 с. 2. Любарский Б.Г. Теоретические основы для выбора та оцінки перспективных систем электромеханичного перетворення енергії електрорухомого складу. – Диссертация на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09. – «Електротранспорт». Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, – 2014. 368с. 3. Корниенко В.В., Омеляненко В.И. Высокоскоростной электрический транспорт. Мировой опыт. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – 159с. 4. Омеляненко В.И., Кривякин Г.В., Якунин Д.И., Редченко Е.С. Поезда с наклоняемыми кузовами для скоростного пассажирского движения // Локомотив-информ. – Харьков: Техностандарт, 2008. – №5. – С. 12 – 17. 5. Развитие технологии наклона кузовов вагонов // Железные дороги мира, 2001. – №11. – С. 10 – 14. 6. Якунин Д.И., Макаренко Ю.В., Маслиев В.Г. Влияние наклона кузова вагона при движении по кривым участкам пути на взаимодействие колес с рельсами // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетр.: ДНУЗТ ім. акад. В.Лазаряна, 2009. Вип. 30. – С. 248 – 251. 7. Якунин Д.И., Зверев Е.Ю., Срибник А.Н. Предпосылки для моделирования движения по рельсовому пути экипажа, оборудованного устройствами для наклона кузова // Вісник НТУ «ХПИ», 2013. № 32. – С. 76 – 80. 8. Finite Element Method Magnetics [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>. 9. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование: Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 534 с. 10. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с. 11. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Регсдел К. Оптимизация в технике: в 2-х книгах. Книга 1: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 350 с. 12. Реклейтис Г., Рейвиндран А. Оптимизация в технике: в 2-х книгах. Книга 2: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 320 с. 13. Лысенко Л.И. Исследование пределов использования линейного синхронного двигателя для разгрузки системы подвеса магнитолевитирующего транспорта: дис... канд. техн. наук: 05.09.01. – Х.: [б. и.], 1999. – 186 с. 14. 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. 15. Вороновский Г.К., Махотило К.В., Петрашев С.Н., Сергеев С.А. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности. – Харьков: Основа, 1997. – 112 с. 16. Генетические алгоритмы / Т.В. Панченко / [Под ред. Ю.Ю. Тарасевича. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет». 2007. – 88 с. 17. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 452 с. 18. Weise T.

Global optimization algorithms: theory and application. – E-Book. – 2008. – 820 p. **19.** Back T. Evolutionary algorithms in theory and practice. – New York: Oxford University Press, 1996. – 328 p. **20.** Balaji M., Kamaraj V. 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. **21.** Owatchaiphong S., Nisai H., Fuengwarodsakul. Multi-Objective Based Optimization for Switched Reluctance Machines Using Fuzzy and Genetic Algorithms // Power Electronics and Drive Systems, 2009. Vol. 12. PEDS, 2009. International Conference on, vol., no., pp. 1530 – 1533, 2 – 5 Nov. 2009. **22.** Дзензерский В.А., Омельяненко В.И., Васильев С.В., Матин В.И., Сергеев С.А. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией: Монография. – К.: Наукова думка, 2001. – с. 479. **23.** Джафару Хенджани Сейед Моджтаба. Многокритериальный синтез интеллектуальных систем управления энергоблоков АЭС генетическими алгоритмами. Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07. Харьков, 2010, 224 с.

Bibliography (transliterated): **1.** Jakunin, D. I. *Elektromehaničeskaja sistema privoda s linejnym dvigatelem dlja naklona kuzovov skorostnogo podvizhnogo sostava. Dis. na soiskanie učennoj stepeni kand. tehn. nauk.* Kharkov, 2010. Print. **2.** Ljubars'kyj, B. G. *Teoretični osnovy dlja vyboru ta ocinky perspektivnyh sistem elektromehaničnogo peretvorenja energii' elektroruhomogo skladu. Dys. na zdobuttja naukovogo stupenja d-ra tehn. nauk.* Kharkiv, 2014. Print. **3.** Kornienko, V. V., and V. I. Omel'janenko. *Vysokoskorostnoj jelektričeskij transport. Mirovoj opyt.* Kharkov: NTU «KhPI», 2007. Print. **4.** Omel'janenko, V. I., et al. "Poezda s naklonjaemymi kuzovami dlja skorostnogo passazhirskogo dvizhenija." *Lokomotiv-inform.* No. 5. Kharkov: Tehnostandart, 2008. 12–17. Print. **5.** "Razvitie tehnologii naklona kuzovov vagonov." *ZHeleznye dorogi mira.* No. 11. 2001. 10–14. Print. **6.** Jakunin, D. I., JU. V. Makarenko and V. G. Masliev. "Vlijanie naklona kuzova vagona pri dvizhenii po krivym uchastkam puti na vzaimodejstvie koles s rel'sami." *Visnyk Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznyčnogo transportu im. akad. V. Lazarjana.* No. 30. Dnipropetrovsk: DNUZT im. akad. V.Lazarjana, 2009. 248–251. Print. **7.** Jakunin, D. I., E. JU. Zverev and A. N. Sribnik. "Predposylki dlja modelirovanija dvizhenija po rel'sovomu puti jekipazha, oborudovannogo ustrojstvami dlja naklona kuzova." *Visnyk NTU «KhPI».* No. 32. 2013. 76–80. Print. **8.** Meeker, David. "Finite Element Method Magnetics." David Meeker, 2014. Web. 9 September 2015. <<http://www.femm.info/wiki/HomePage>>. **9.** Himmelblau, D. *Prikladnoe nelinejnoe programirovanie: Per. s angl.* Moscow: Mir, 1975. Print. **10.** Shtojer, R. *Mnogokriterial'naja optimizacija.* Moscow: Radio i svjaz', 1992. Print. **11.** Reklejtis, G., A. Rejvindran and K. Regsdel. *Optimizacija v tehnike: v 2-h knigah. Kniga 1: Per. s angl.* Moscow: Mir, 1986. Print. **12.** Reklejtis, G., A. Rejvindran and K. Regsdel. *Optimizacija v tehnike: v 2-h knigah. Kniga 2: Per. s angl.* Moscow: Mir, 1986. Print. **13.** Lysenko, L. I. *Issledovanie predelov ispol'zovanija linejnogo sinhronnogo dvigatelja dlja razgruzki sistemy podvesa magnitolevitirujushhego transporta. Dis. ... kand. tehn. nauk.* Kharkov, 1999. Print. **14.** Rjabov, E. S., et al. "Sintez tjavogogo reaktivnogo induktornogo dvigatelja s aksial'nym magnitnym potokom dlja skorostnogo podvizhnogo sostava." *Elektrotehnika i elektromehaniika.* No. 6. 2010. 28–30. Print. **15.** Voronovskij, G. K., et al. *Genetičeskie algoritmy, iskusstvennyje neyronnye seti i problemy virtual'noj real'nosti.* Kharkov: Osnova, 1997. Print. **16.** Panchenko, T. V. *Genetičeskie algoritmy.* Ed. JU. JU. Tarasevich. Astrakhan: Izdatel'skij dom «Astrahanskij universitet», 2007. Print. **17.** Rutkovskaja, D., M. Pilins'kij and L. Rutkovskij. *Nejronnye seti, genetičeskie algoritmy i nečetkie sistemy.* Moscow: Gorjachaja linija-Telekom, 2006. Print. **18.** Weise, T. "Global optimization algorithms: theory and application." Thomas Weise, 2008. Web. 11 September 2015. <<http://www.it-weise.de/projects/book.pdf>>. **19.** Back, T. *Evolutionary algorithms in theory and practice.* New York: Oxford University Press, 1996. Print. **20.** Balaji, M., and 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. 187–196. Print. **21.** Owatchaiphong, Satit, and Nisai H. Fuengwarodsakul. "Multi-Objective Based Optimization for Switched Reluctance Machines Using Fuzzy and Genetic Algorithms." *International Conference. Power Electronics and Drive Systems.* Vol. 12. PEDS, 2009. 1530–1533. Print. **22.** Dzenzerskij, V. A., et al. *Vysokoskorostnoj magnitnyj transport s jelektrodinamičeskaj levitaciej: Monografija.* Kiev: Naukova dumka, 2001. Print. **23.** Dzhafari Hendzhani Sejed Modzhtaba. *Mnogokriterial'nyj sintez intelektual'nyh sistem upravlenija jenergoblokov AJES genetičeskimi algoritмами. Dis. ... kand. tehn. nauk.* Kharkov, 2010, Print.

Надійшла (received) 15.09.2015

Любарський Борис Григорович – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: +38679937569, e-mail: lboris19111972@mail.ru

Любарский Борис Григорьевич – доктор технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», тел.: +38679937569, e-mail: lboris19111972@mail.ru.

Liubarskyi Boris Grigoryevich – Doctor of Technical Sciences, Docent, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", tel.: +38679937569. lboris19111972@mail.ru.

Єрицян Багіш Хачикович – старший викладач, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: +380989897022, e-mail: bagish_ericjan@mail.ru.

Ерицян Багиш Хачикович – старший преподаватель, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», тел.: +380989897022, e-mail: bagish_ericjan@mail.ru.

Yeritsyan Bagish Khachikovich – Senior Lecturer, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", tel.: +380989897022, e-mail: bagish_ericjan@mail.ru.

Якунін Дмитро Ігорович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: +380677155894. unicomber@ukr.net.

Якунин Дмитрий Игоревич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; тел.: +380677155894. unicomber@ukr.net.

Yakunin Dmitry Igorevich – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", tel.: +380677155894. unicomber@ukr.net.

Глебова Марина Леонідівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова; тел.: +380678635034; e-mail: glebova_ml_1968@mail.ru .

Глебова Марина Леонидовна – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, тел.: +380678635034; e-mail: glebova_ml_1968@mail.ru .

Glebova Marina Leonidovna – Candidate of Technical Sciences, Docent A. N. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, tel.: +380678635034; e-mail: glebova_ml_1968@mail.ru.