

Лютенко В.Є.,
Яресько М.В.
Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія
Кондратюка»
E-mail: vlutik@ukr.net;

ДИНАМІКА ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З ПРИВОДОМ ВІД
ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

УДК 629.331.5

Лютенко В.Є., Яресько М.В. «Динаміка електромобіля з приводом від електродвигуна постійного струму»

Визначення тягово-швидкісних властивостей електромобіля являється важливим елементом при проектуванні нових конструкцій, в тому числі при виборі нових типів електромобілів, що відповідають різним умовам експлуатації. Для вирішення даної задачі найбільш прийнятним є метод теорії електромобіля – науки про експлуатаційні властивості які характеризують спроможність ефективного використання електромобіля в певних умовах і дозволяє оцінити відповідність його конструкції цим умовам. Використання теорії електромобіля на практиці дає можливість підвищити продуктивність електромобіля і значно знизити його експлуатаційні затрати. Для цього необхідно збільшити середню швидкість руху і зменшити експлуатаційні енергетичні затрати.

Тягово – швидкісні властивості визначають динамічність електромобіля – спроможність перевозити пасажирів або вантажів з максимально можливою швидкістю. Чим вища динамічність електромобіля, тим більша його продуктивність.

Важливим елементом також являються методи аналізу таких характеристик електромобіля як силовий і потужностний баланс, динамічна і паливно-економічна характеристика.

В роботі виконано дослідження динаміки електромобіля з приводом від електродвигуна постійного струму. Розроблена методика розрахунку динамічних навантажень у електромашиинній та механічній системах електромобіля. Методика враховує електромагнітні явища у двигуні та коливальні процеси в механічній системі. На основі розробленої математичної моделі і з використанням математичного програмного застосунку MathCAD отримані розрахунки тягового балансу електромобіля, а також – перехідних процесів у електромашиинній та механічній системах, побудовані графіки, які наведені в даній науковій роботі.

Здійснення приводу електромобіля передбачається за допомогою одного електродвигуна постійного струму.

При розробленні математичної моделі було розраховано тяговий баланс та досліджено динаміку пуску привода електромобіля за допомогою математичного програмного забезпечення MathCAD і отримано сили, моменти, переміщення, швидкості та прискорення пружних ланок електромеханічної динамічної системи.

В даний час, при проектуванні електромобілів динамічні фактори, що виникають при їх експлуатації не враховуються. Тому надійність електромобілів можна підвищити, якщо на стадії їх проектування враховувати хвильовий характер навантажень.

Динаміка електромобіля нами розглядалася у взаємодії механічних і електромагнітних процесів і в результаті була отримана математична модель динамічних процесів при роботі, котра включала диференціальні рівняння руху мас, а також диференціальне рівняння електромагнітних явищ в двигуні приводу.

Аналізуючи отриману інформацію можна акцентувати, що динаміці електромобіля з приводом від електродвигуна постійного струму мало приділено уваги і широка інформація практично відсутня. Тому являється актуальним створення продуктивних зразків електромобілів, методик їх розрахунків і проведення наукових досліджень динаміки робочих процесів цих машин на що і направлена дана робота.

Мета роботи полягає в аналізі і розрахунку тягового балансу електромобіля з електродвигуном постійного струму, дослідженню динаміки при перехідних процесах.

Ключові слова: математична модель, динаміка, коливання, електромобіль, привід, механічна, електромашиинна системи, динамічні навантаження, електромеханічні процеси.

V.Ye. Liutenko, M.V. Yaresko "Dynamics of the electric vehicle with the drive from the dc motor"

Determining the traction and speed properties of an electric car is an important element in the design of new structures, including the choice of new types of electric vehicles that meet different operating conditions. To solve this problem, the most acceptable method is the theory of the electric car – the science of operational properties that characterize the ability to use effectively electric car in certain conditions and allows you to assess the compliance of its design with these conditions. The use of the theory of the electric car in practice makes it possible to increase the productivity of the electric car and significantly reduce its operating costs. To do this, increase the average speed and reduce operating energy costs.

Traction – speed properties determine the dynamism of the electric car – the ability to transport passengers or goods at the maximum possible speed. The higher the dynamics of the electric car, the greater its productivity.

An important element is also the methods of analysis of such characteristics of the electric car as power and power balance, dynamic and fuel-economic characteristics.

The study of the dynamics of an electric car driven by a DC motor is performed. A method for calculating dynamic loads in electric and mechanical systems of electric vehicles has been developed. The technique takes into account electromagnetic phenomena in the engine and oscillating processes in the mechanical system. On Based on the developed mathematical model and using the mathematical software application MathCAD, calculations of the traction balance of the electric car, as well as transients in electrical and mechanical systems, graphs are constructed, which are given in this scientific work.

The drive of the electric car is provided by means of one electric motor of a direct current.

During the development of the mathematical model, the traction balance was calculated and the dynamics of starting the electric vehicle drive was investigated using the mathematical software MathCAD and the forces, moments, displacements, velocities and accelerations of the elastic parts of the electromechanical dynamic system were obtained.

Currently, when designing electric vehicles, the dynamic factors that occur during their operation are not taken into account. Therefore, the reliability of electric vehicles can be increased if at the design stage to take into account the wave nature of the loads. We considered the dynamics of an electric car in the interaction of mechanical and electromagnetic processes and as a result obtained a mathematical model of dynamic processes at work, which included differential equations of mass motion, as well as the differential equation of electromagnetic phenomena in the drive motor.

Analyzing the received information it is possible to emphasize that dynamics of the electric car driven by the electric motor of a direct current is paid little attention and the wide information is practically absent. Therefore, it is important to create productive samples of electric vehicles, methods of their calculations and research of the dynamics of the working processes of these machines, which is the purpose of this work.

The purpose of the work is to analyze and calculate the traction balance of an electric vehicle with a DC motor, the study of the dynamics of the transient process.

Keywords: *mathematical model, dynamics, oscillations, electric car, drive, mechanical, electromechanical systems, dynamic loads, electromechanical processes.*

Вступ

Робота механізмів машин, в тому числі електромобілів, під час перехідних процесів супроводжується динамічними навантаженнями [1 – 4], виникнення яких обумовлено пружністю ланок і їхньою здатністю до збудження в них коливальних процесів за певних умов. Змінна складова сил або моментів при пружних коливаннях може бути настільки великою, що сумарні миттєві значення їх перевищують статичні та інерційні навантаження. Це може привести до перевантаження механізмів і їх виходу з ладу. Уникнути цих коливань неможливо, проте можна їх суттєво зменшити на стадії проектування електромобіля.

Отже, врахування динамічних навантажень на ланки механізмів електромобіля та дослідження його тягового балансу є актуальним завданням і на попередньому етапі проектування його доцільно розв'язувати шляхом математичного моделювання.

Враховуючи вище сказане була обрана тема роботи, яка направлена на вирішення викладеної вище проблеми, а саме дослідження тягового балансу та динамічних навантажень у механізмі приводу електромобіля з електродвигуном постійного струму при різних режимах роботи.

Аналіз останніх досліджень

Нами уже наголошувалось на те, що багато уваги приділяється, в наш час, створенню сучасних електромобілів.. Значна увага також приділяється конструюванню електромобілів із приводом від електродвигунів вентильних, змінного та постійного струму. Для удосконалення електромобілів необхідно постійно їх досліджувати і знаходити шляхи найбільш раціональних способів експлуатації.

Електромобіль є прогресивним напрямом автомобілебудування, що отримує значне розповсюдження. Цим і пояснюється наявність, у цей час, великої кількості різних типів електромобілів і їх приводів. Відсутність ж уточненої методики розрахунку електромобілів, в тому числі і їх приводів, ускладнює їхнє проектування і експлуатацію.

Дослідженню та аналізу електро та гібридних автомобілів, в тому числі і їх приводів, визначенню частот коливань, присвячені праці науковців Бахмутова С.В., Каруніна А.Л., Круташова А.В., Капустіна А.А., Ракова В.А., Умяшкіна В.А., Фількіна Н.М., Музафарова Р.С., Бажинова О.В., Смирнова О.П., Серікова С.А., Гнатова А.В., Колеснікова А.В. та ін. У цих роботах електро та гібридні автомобілі описувалися різними розрахунковими схемами і їх динамічні системи розглядалися як одно – та двомасові коливальні системи, які давали можливість визначати частоти коливань [1 – 6]. Визначенню частот коливань механічних систем також присвячені праці зарубіжних вчених Коллаца Л. [7] і Тондла А. [8], Ягодіша Н.Р. [9], Каплана Д. [10].

Формулювання мети досліджень

Мета роботи полягає в аналізі і розрахунку тягового балансу електромобіля з електродвигуном постійного струму, дослідженню динаміки при перехідних процесах.

Результати дослідження

Для визначення основних параметрів електромобіля приймаємо: на несущий кузов автомобіля ЗАЗ–1102 підбираємо і встановлюємо необхідне обладнання для електромобіля. Привід електромобіля здійснюємо електродвигуном постійного струму через додатково встановлений задній міст Москвича – 2140.

Із рівняння динаміки руху електромобіля, яке зв'язує всі сили, що діють на електромобіль під час його руху отримуємо рівняння силового балансу:

$$m_a \frac{dV}{dt} = F_T - F_D - F_{II}, \quad (1)$$

де $m_a \frac{dV}{dt}$ – сила інерції;

V – максимальна швидкість електромобіля. Приймаємо 90 км/г;

F_T – сила тяги на ведучих колесах;

F_D – сила дорожнього опору;

F_{II} – сила опору повітря.

Сила опору дороги F_D рівна сумі сили опору підйому F_G і сили опору коченню F_f , тобто:

$$\begin{aligned} F_D &= F_G + F_f; \\ F_{GT} &= G_a \sin \beta = 11025 \cdot \sin 0,59 = 6505 \text{ H}; \\ F_f &= G_a \cos \beta \cdot f = 11025 \cdot \cos 0,81 = 214 \text{ H}, \end{aligned} \quad (2)$$

де G_a – повна вага електромобіля, $G_a = m_a g = 1125 \cdot 9,8 = 11025 \text{ H}$;

$\beta = 36^\circ$ – максимальний підйом, що долає електромобіль;

f – коефіцієнт опору коченню. Нами визначений і рівний 0,024.

Сила опору повітря визначається за формулою

$$F_{\Pi} = \frac{1}{2} C_x \cdot \rho \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,3 \cdot 1,293 \cdot 90^2 = 1571 \text{ Н}, \quad (3)$$

C_x – коефіцієнт аеродинамічного опору. Приймаємо по [4] рівним 0,3;

ρ – щільність повітря. Приймаємо по [4] рівним $1,293 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^4}$.

В свою чергу, сила тяги електричного автомобіля визначається наступним чином

$$F_T = \frac{M_T}{r_{\delta}}, \quad (4)$$

де M_T – тяговий момент;

r_{δ} – динамічний радіус колеса.

Із джерел [1,6] тяговий момент електродвигуна постійного струму з послідовним збудженням буде визначатися наступною диференціальною залежністю:

$$M_T(t) = A_0 u + A_1 M_T(t) + A_2 u^2 V(t), \quad (5)$$

де A_0, A_1, A_2 – постійні електродвигуна. Значення постійних визначаються виразами:

$$A_0 = \frac{2M_k}{S_k}; \quad A_1 = \frac{1}{\omega_0 S_k}; \quad A_2 = \frac{2M_k}{\omega_0 S_k}, \quad (6)$$

де M_k – критичний момент двигуна;

S_k – критичне ковзання ротора;

ω_0 – синхронна кутова швидкість двигуна;

t – час.

Враховуючи вирази (1 – 6) одержимо рівняння руху електричного автомобіля:

$$m_a V'(t) = \frac{M_T(t)}{r_{\delta}} - G_a \cdot f - \frac{1}{2} C_x \cdot \rho \cdot V^2. \quad (7)$$

Отриманий вираз (7) дійсний для динаміки руху електричного автомобіля по горизонтальній дорозі. При русі електромобіля на спуск (рис.1 а) рівняння буде мати наступний вигляд:

$$m_a V'(t) = \frac{M_T(t)}{r_{\delta}} + G_a \sin \beta - G_a \cos \beta \cdot f - \frac{1}{2} C_x \cdot \rho \cdot V^2. \quad (8)$$

При русі електромобіля на підйом (рис. 1 б) рівняння буде мати наступний вигляд:

$$m_a V'(t) = \frac{M_T(t)}{r_{\delta}} - G_a \sin \beta - G_a \cos \beta \cdot f - \frac{1}{2} C_x \cdot \rho \cdot V^2. \quad (9)$$

Необхідно зауважити, що виведені вище рівняння динаміки руху можна віднести також і до тролейбуса так як у них, для привода, теж використовуються електричні двигуни постійного струму з послідовним збудженням.

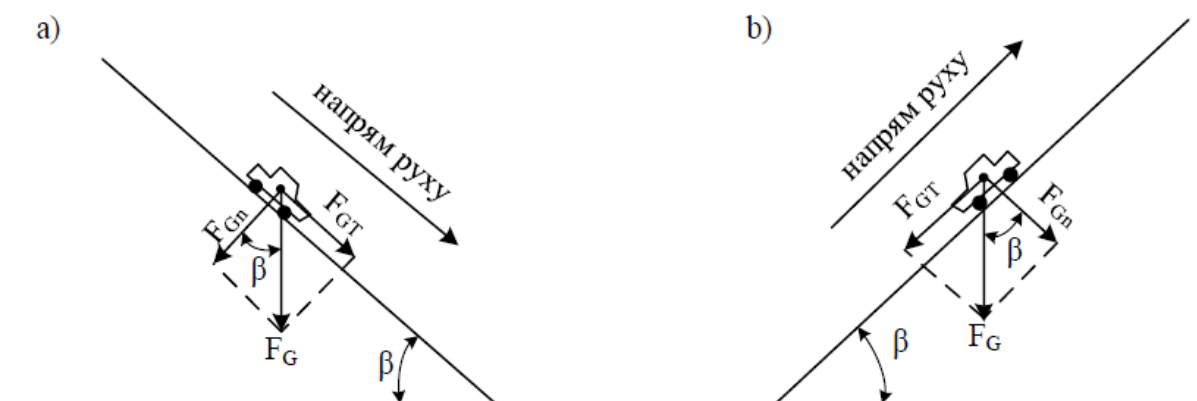


Рис. 1. Розклад сили ваги $F_G = G_a$ електромобіля під час руху на спуск – (рис. 1 а) та на підйом – (рис. 1 б)

Отримані дані для подальших розрахунків заносимо в таблиці 1 та 2.

Таблиця 1

Параметри електромобіля

Параметри	Одиниці вимірювання	Числові значення	Параметри	Одиниці вимірювання	Числові значення
m_a	кг	1125	u	–	3,5
$F_G = G_a$	Н	11025	r_δ	м	0,3
F_{GT}	Н	6505	F_f	Н	214
F_{II}	Н	1571	V_{max}	м/с	25

Таблиця 2

Значення постійних електродвигуна

Тип електро-двигуна	Режим роботи електро-двигуна	Кутова швидкість ротора електро-двигуна, рад/с	Постійні електродвигуна		
			A_0	A_1	A_2
Siemens IP V5135-4WS14 N=30 кВт n = 3000 об/хв	робоча характеристика	314,16	38951	– 0,30726	– 498,3185

Для зручності рішення на ЕОМ системи рівнянь (7 – 9) з використанням застосунку MathCAD приводимо її до такого вигляду з подальшою заміною $S = z(t)$; $V = V(t)$; $V' = d(t)$; $M_T = M(t)$, де S – шлях пройдений електромобілем, V – швидкість електромобіля; $V' = d(t)$ – прискорення електромобіля:

$$z(t) = V(t);$$

$$V'(t) = \frac{uM(t)}{r_\delta m_a} - \frac{u}{m_a} (F_{GT} + F_f + F_{II});$$

$$M'(t) = -\frac{A_0 u}{A_1} - \frac{A_2 u^2}{A_1} z'(t) + \frac{M(t)}{A_1}; \quad (10)$$

$$d(t) = \frac{uM(t)}{r_0 m_a} - \frac{u}{m_a} (F_{GT} + F_f + F_{II}).$$

Після підстановки даних взятих із таблиць 1 і 2 будемо мати:

$$\begin{aligned} z(t) &= V(t); \\ V'(t) &= 0.01036M(t) - 25.8; \\ M'(t) &= 126769 - 19884z'(t) - 3.26m(t); \\ d(t) &= 0.01036M(t) - 25.8. \end{aligned} \quad (11)$$

Початкові умови маємо наступні:

$$t(0) = 0; \quad z(0) = 0; \quad V(0) = 0; \quad d(0) = 0; \quad M(0) = 0.$$

Розв'язання системи рівнянь (11) робимо для механізмів електромобіля, що мають параметри, наведені в таблицях 1 і 2.

У результаті розв'язання одержуємо значення моменту електродвигуна, переміщення, а також швидкості та прискорення електромобіля (рис. 2 – 4).

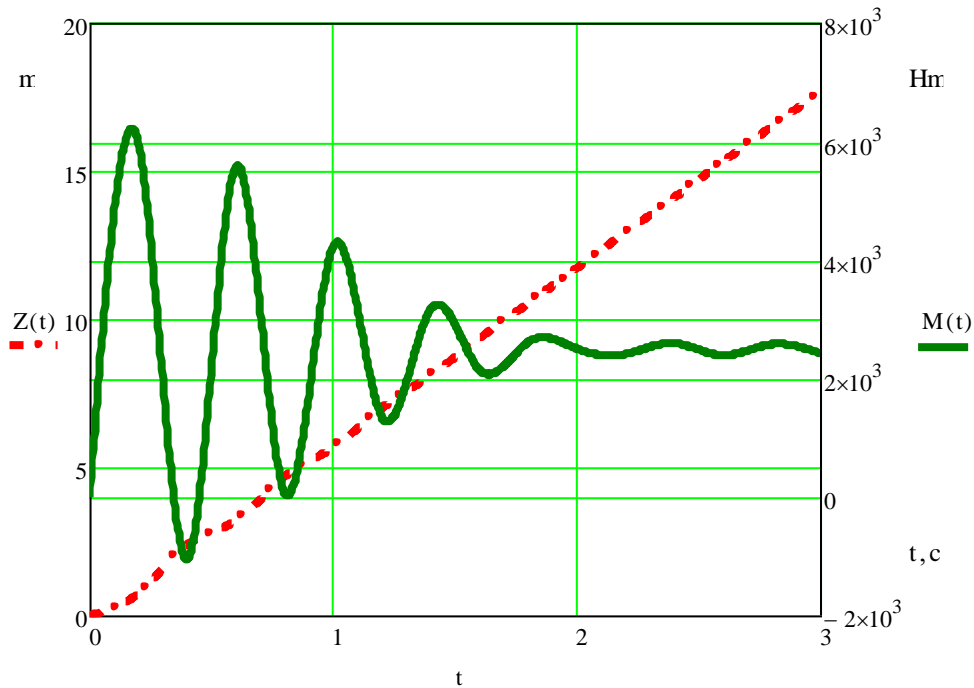


Рис. 2. Переміщення маси $Z(t) = S$ та зміна моменту електродвигуна механізму приводу електромобіля $M(t) = M_T$

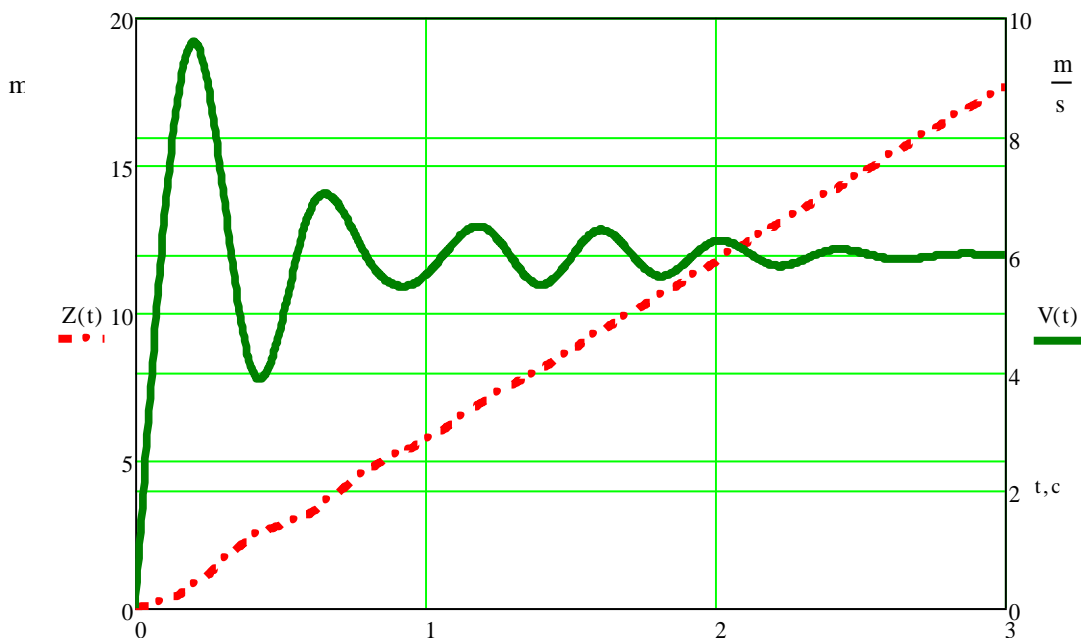


Рис. 3. Переміщення маси $Z(t) = S$ та швидкості $V(t) = V$ електромобіля

Побудований за виконаними розрахунками графік зміни моменту електродвигуна у функції часу (рис. 2) показує, що розгін привода електромобіля триває близько 1,8 с від моменту його включення. Максимального значення момент досягає при $t = 0,2$ с.

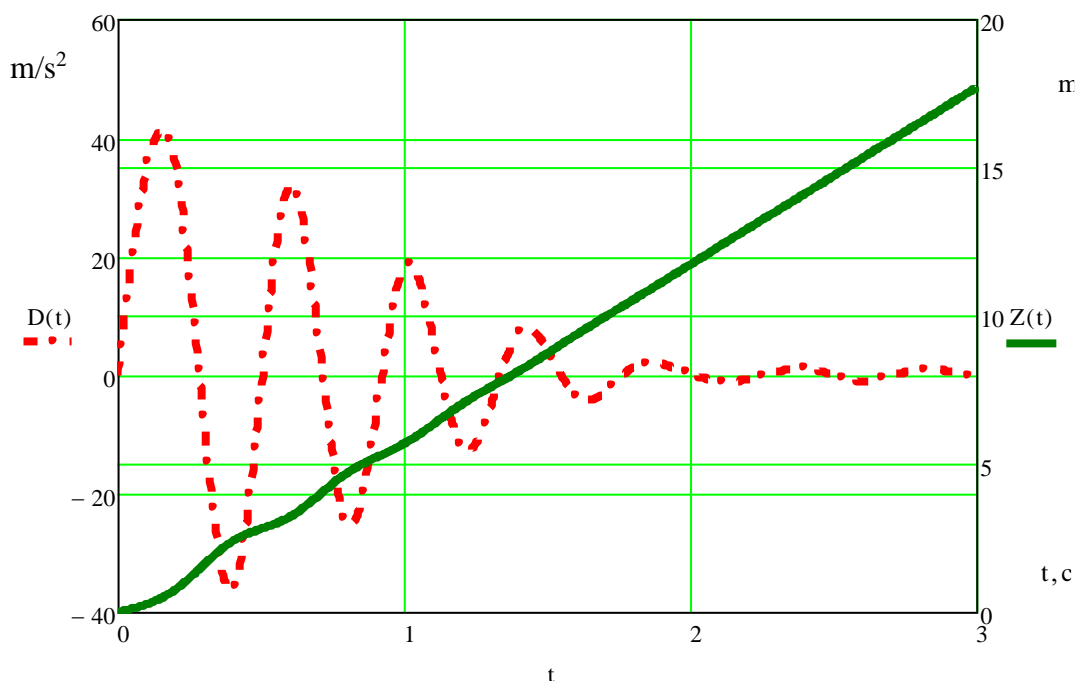


Рис. 4. Переміщення маси $Z(t) = S$ та прискорення $V'(t) = D(t)$ електромобіля

Використання числових методів інтегрування диференціальних рівнянь руху і електромагнітного стану дає можливість використовувати запропоновану методику для розрахунку динамічних навантажень у електромашинній та механічній системах електромобілів та їх гібридів.

Висновки

Виконаний аналіз та розрахунок тягового балансу електромобіля з електродвигуном постійного струму, досліджено динаміку при перехідних процесах.

При використанні створеної математичної моделі можливість проводити аналіз перехідних процесів електромобіля з урахуванням нерозривної взаємодії електричної машини і механічної частини приводу.

Отримані результати дослідження механізму приводу електромобіля, з застосуванням математичного програмного середовища MathCAD, можуть бути використані при проектуванні, розрахунку тягового балансу та визначенні динамічних навантажень в ланках електромобілів.

Список використаних джерел

1. Чабан В. Й. Математичне моделювання в електротехніці / В.Й. Чабан. – Львів.: Вид-во Тараса Сороки, 2010. – 508 с.
2. Бахмутов С.В. Конструктивные схемы автомобилей с гибридными силовыми установками: учебное пособие / С.В. Бахмутов, А.Л. Карунин, А.В. Круташов.– М.: МГТУ «МАМИ», 2007.– 71 с.
3. Капустин А.А. Гибридные автомобили: учебное пособие / А.А. Капустин, В.А. Раков; М-во образ. и науки РФ, Вологод. гос. ун-т. – Вологда: ВолГУ, 2006. – 96 с.
4. Умняшкин В.А. Теория автомобиля: учеб. пособие / В.А. Умняшкин, Н.М. Филькин, Р.С. Музафаров.– Ижевск. Изд-во ИжГТУ, 2006.– 272 с.
5. Бажинов О.В. Гібридні автомобілі / О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков, А.В. Гнатов, А.В. Колесніков. – Харків, ХНАДУ, 2008. – 327 с.
6. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергия, 1976. – 320 с.
7. Коллац Л. Задачи на собственные значения: Монография.– М.:Наука, 1968.– 504 с.
8. Тондл А. Автоколебания механических систем: Монография.–М.: Мир, 1979.– 432 с.
9. Jagadish, H. P. Robust Sensorless Speed Control of Induction Motor with DTFC and Fuzzy Speed Regulator / H. P. Jagadish, S. F. Kodad // International Journal of Electrical and Electronics Engineering. – 2011. – № 5. – P. 17-27.
10. Kaplan, D. Understanding Nonlinear Dynamics / D. Kaplan, L. Glass. – New York: Springer-Verlag, 1995. – 420 p.

References

1. Chaban V. J. Matematische modellen in Elektrotechniki / V.J. Chaban. - Lviv.: Vida-vo Taras Soroki, 2010. - 508 s.
2. Bakhmoutov C.V. Hybrid Powered Vehicle Designs: Training Manual / C.V. Bakhmoutov, A.L. Karunin, A.V. Krutoshov. M.: MGTU «MAMI», 2007.- 71 s.
3. Kapustin A.A. Hybrid Cars: Teaching Manual / A.A. Kapustin, V.A. Rakov; M. Image and Science of the Russian Federation, Vologd. Mr. Sunt.- Vologda: Volga, 2006. - 96 s.
4. Umniashkin V.A. Clever-Yashkin Car Theory: Study Manual / V.A. Umniashkin, N.M. Filkin, R.S. Muzafarov.- Izhevsk. Izd-vo Izgtu, 2006 - 272 s.
5. Bazhinov O.V. Gybridni automobili / O.V. Bazhinov, O.P. Smirnov, S.A. Syrykov, A.V. Gnatov, A.V. Kolyovnikov. - Kharkiv, 2008. - 327 s.
6. Key V.I. Control of dynamic loads of electric drive / V.I. Key. - M.: Energy, 1976. - 320 s.
7. Collac L. Eigenvalues: Monograph.- M.:Science, 1968.- 504 s.
8. Tondle A. Automatic oscillations of mechanical systems: Monograph.- M.: World, 1979.- 432 s.
9. Jagadish, H. P. Robust Sensorless Speed Control of Induction Motor with DTFC and Fuzzy Speed Regulator / H. P. Jagadish, S. F. Kodad // International Journal of Electrical and Electronics Engineering. - 2011. - 5. - S. 17-27.
10. Kaplan, D. Understanding Nonlinear Dynamics / D. Kaplan, L. Glass. - New York: Springer-Verlag, 1995. - 420 s.