

В.Ю. ТКАЧОВ, А.П. КОЖУШКО

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ЕЛЕКТРОТРАКТОРА З УРАХУВАННЯМ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ

Складено математичний апарату для аналізу робочих процесів, які протікають в колісному тракторі на електричній тязі. Використано методику, яка передбачає опис загального руху колісного трактора в процесі виходу на технологічну або транспортну швидкість. Окреслений апарат враховує взаємодію коліс з ґрунтом в функції конструктивних параметрів та фізико-механічних властивостей опорної поверхні. Як результат отримано відомості щодо моделювання руху електротрактора, а саме залежність бажаної та реальної швидкостей від часу розгону; залежність розряду батареї від реальної швидкості руху. Практична значимість роботи полягає в отриманні теоретичної моделі, яка дає змогу проаналізувати можливість використання двигунів постійного струму як силових агрегатів для електротракторів малої потужності.

Ключові слова: електричний трактор, електричний двигун, батарея, лінійне керування, шина, тягова ефективність.

V. TKACHOV, A. KOZHUSHKO

SIMULATION OF ELECTRIC TRACTOR MOVEMENT TAKING INTO ACCOUNT OPERATING MODES

The development of electric drives in the last period of time has reached significant indicators, so electric and hybrid vehicles are becoming widely distributed in the world. At the international level, they began to seriously address the issue of reducing the emissions of harmful gases into the environment, which are produced by vehicles with ICE internal combustion engines by replacing them with electric vehicles. Therefore, the material of this article has the purpose of assembling a mathematical apparatus for the analysis of work processes that occur in a wheeled tractor on electric traction. When solving the set goal, a technique was used, which provided for the description of the general movement of the wheeled tractor in the process of reaching the technological or transport speed. The described device takes into account the interaction of the wheels with the soil as a function of the structural parameters and physical and mechanical properties of the supporting surface. As a result, information was obtained regarding the modeling of the electric tractor movement, namely the dependence of the desired and actual speeds on the acceleration time; dependence of the battery discharge on the real speed of movement. The practical significance of the work consists in obtaining a theoretical model, which makes it possible to analyze the possibility of using direct current motors as power units for low-power electric tractors.

Key words: electric tractor, electric motor, battery, linear control, tire, traction efficiency.

Вступ. Технічний і технологічний розвиток електричних приводів за останній проміжок часу досяг значних показників, тому у світі великого розповсюдження набувають електричні та гібридні транспортні засоби. На міжнародному рівні серйозно почали займатися вирішенням питання щодо зменшення викидів шкідливих газів у навколишнє середовище, які виробляються транспортними засобами з двигунами внутрішнього згоряння ІСЕ шляхом їх заміни на електромобілі. Електропривод зручний в експлуатації та за своєю конструкцією має такі основні частини, як двигун, контролер, акумулятор та інші динамічні компоненти. Якщо електродвигун має гарне керування, то він може легко утримувати високий крутний момент і швидкість в межах загального стабільного динамічного керування. В ході експлуатації електромобілі мають низьку переваг: низьку вартість обслуговування та економію палива. Такі транспортні засоби класифікуються як виключно електричні транспортні засоби, в яких використовується лише джерело енергії та рушійна сила (тобто батарея та електродвигун), а також гібридний електромобіль, у якому електродвигун, як і ДВЗ використовуються для руху транспортного засобу. Вони розподіляються на підкатегорії залежно від їх дизайну та структури.

Зважаючи на це, актуальним є проведення дослідження роботи електричних двигунів як джерела енергії сільськогосподарського трактора. Першим етапом такого дослідження є формування математичної моделі руху такого електротрактора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В матеріалах робіт [1 – 4] дослідники вирішують окремі питання роботи електротранспорту, вибору силового електроприводу,

розробки принципових схем керування електроприводом, оцінки економічного, соціального та екологічного ефекту. В роботі [5] автори проаналізували технічні рішення світових тракторобудівників при побудові трансмісій колісних тракторів, зокрема розглянули трактори на електричній тязі: Multi Tool Trac [6], John Deere (GridCON, 1RE, Joker) [7], Fendt e100 Vario [8], а також Kramer 5055e, Escorts Farmtrac 26E, Case 580 EV «Project Zeus», Rigitrac SKE50, JCB 525-60e [9].

З 2015 року на ВАТ «ХТЗ» та ТОВ «AutoEnterprise» розробляють дві моделі легких електротракторів ХТЗ-3512 Edison та ХТЗ-2511 Electro. Модель ХТЗ-2511 Electro обладнаний електродвигуном потужністю 27 л. (20 кВт) та АКБ ємністю 30 кВт·год. Цього вистачає на 6 годин роботи у полі. Транспортує причепа вагою двох тонн, при цьому розвиває швидкість до 26 км/год.

Новіша модель ХТЗ-3512 Edison обладнана електродвигуном на 35 л.с (25,7 кВт) з живленням від літій-іонної батареї ємністю 42 кВт·год. Швидкість повного заряджання акумуляторів становить від 2 до 4 годин. У транспортному положенні трактор безперервно може працювати до 8 годин, у силових роботах – до 4 годин. Перевозить причіпний вантаж вагою двох тонн, розвиваючи швидкість до 40 км/год. Техніка даного класу застосовується переважно у тваринницьких та тепличних господарствах [9].

Мета дослідження, постановка задачі. Метою роботи є складання математичного апарату для аналізу робочих процесів, які протікають в колісному тракторі на електричній тязі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

– складання імітаційної моделі роботи електричного двигуна в системі моделювання MatLab;

– формування загальної моделі руху колісного трактора на електричній тязі.

Імітаційна модель роботи електричного двигуна. Досліджуючи динамічні показники на перехідних режимах руху, які виникають в колісному тракторі в ході експлуатації, перш за все проводять імітаційне моделювання розгінних та гальмівних характеристик. Найбільший вплив на перехідні процеси чинять безліч факторів та параметрів, але базовим є робота силового агрегату. Матеріали даної роботи направлені на формуванні математичної моделі руху електротрактора з метою подальшого дослідження роботи електричного двигуна в умовах сільськогосподарської експлуатації. На рис. 1 показана спрощена схема будови математичного апарату для дослідження показників електротрактора.

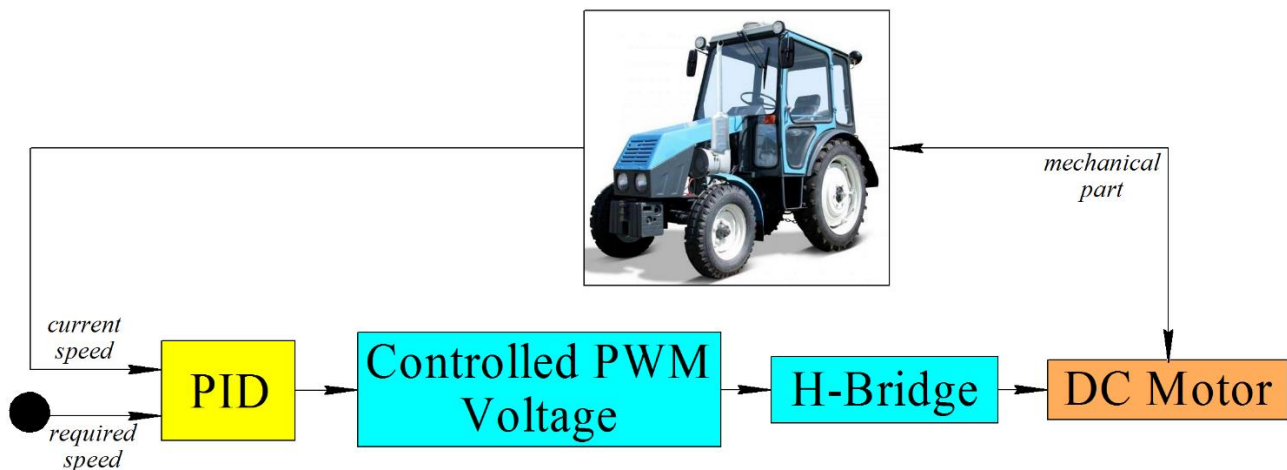
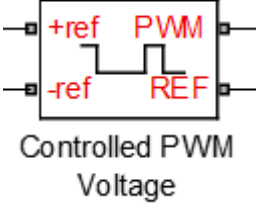
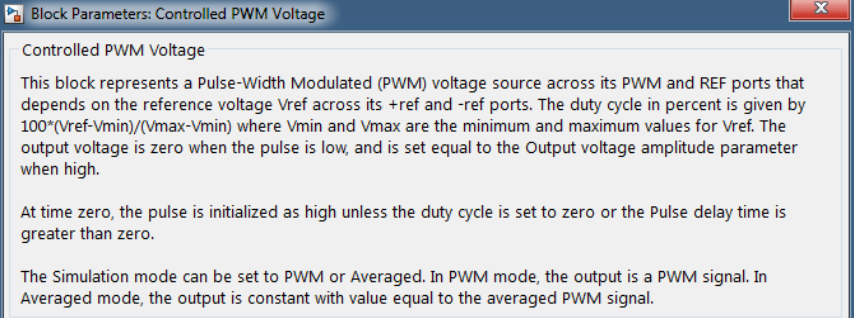
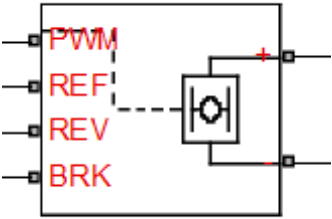
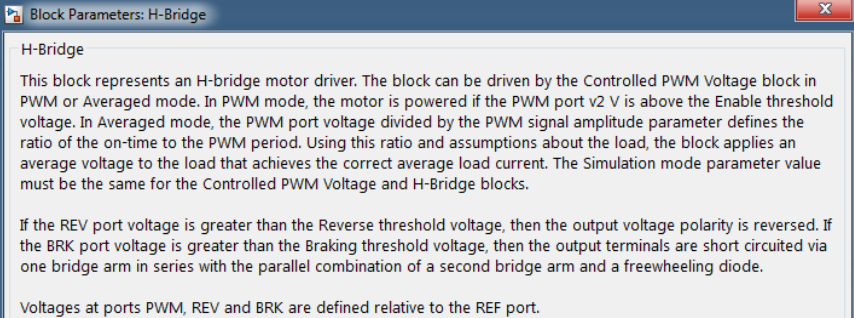
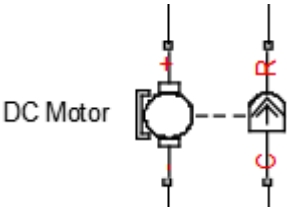
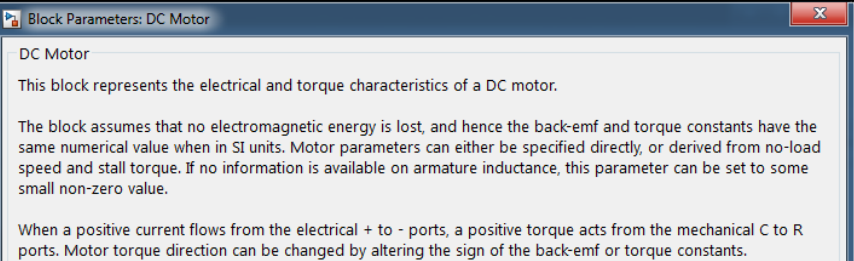


Рис. 1 – Спрощена схема електротрактора

Будова електроприводу ґрунтується на бібліотеках системи динамічного моделювання MatLab, а саме Simulink та Simscape. Бібліотека Simulink використовується передусім для будови математичного апарату, який описує механічну частину електротрактора. Бібліотека Simscape, безпосередньо використовується для будови електроприводу. Оскільки дана робота є базовою та направленою на формування взаємодії електроприводу в сільськогосподарських

умовах експлуатації, то силовим агрегатом приймемо електричний двигун постійного струму (типу 4ПФМ200SYXЛ4). Складові частини електроприводу розглянуті в табл. 1.

Таблиця 1 – Складові частини електроприводу, що реалізуються в MatLab/Simscapе

Складові електроприводу	Блок в MatLab/Simscapе
 <p>Controlled PWM Voltage</p>	 <p>Block Parameters: Controlled PWM Voltage</p> <p>Controlled PWM Voltage</p> <p>This block represents a Pulse-Width Modulated (PWM) voltage source across its PWM and REF ports that depends on the reference voltage Vref across its +ref and -ref ports. The duty cycle in percent is given by $100 \cdot (V_{ref} - V_{min}) / (V_{max} - V_{min})$ where Vmin and Vmax are the minimum and maximum values for Vref. The output voltage is zero when the pulse is low, and is set equal to the Output voltage amplitude parameter when high.</p> <p>At time zero, the pulse is initialized as high unless the duty cycle is set to zero or the Pulse delay time is greater than zero.</p> <p>The Simulation mode can be set to PWM or Averaged. In PWM mode, the output is a PWM signal. In Averaged mode, the output is constant with value equal to the averaged PWM signal.</p>
 <p>H-Bridge</p>	 <p>Block Parameters: H-Bridge</p> <p>H-Bridge</p> <p>This block represents an H-bridge motor driver. The block can be driven by the Controlled PWM Voltage block in PWM or Averaged mode. In PWM mode, the motor is powered if the PWM port v2 V is above the Enable threshold voltage. In Averaged mode, the PWM port voltage divided by the PWM signal amplitude parameter defines the ratio of the on-time to the PWM period. Using this ratio and assumptions about the load, the block applies an average voltage to the load that achieves the correct average load current. The Simulation mode parameter value must be the same for the Controlled PWM Voltage and H-Bridge blocks.</p> <p>If the REV port voltage is greater than the Reverse threshold voltage, then the output voltage polarity is reversed. If the BRK port voltage is greater than the Braking threshold voltage, then the output terminals are short circuited via one bridge arm in series with the parallel combination of a second bridge arm and a freewheeling diode.</p> <p>Voltages at ports PWM, REV and BRK are defined relative to the REF port.</p>
 <p>DC Motor</p>	 <p>Block Parameters: DC Motor</p> <p>DC Motor</p> <p>This block represents the electrical and torque characteristics of a DC motor.</p> <p>The block assumes that no electromagnetic energy is lost, and hence the back-emf and torque constants have the same numerical value when in SI units. Motor parameters can either be specified directly, or derived from no-load speed and stall torque. If no information is available on armature inductance, this parameter can be set to some small non-zero value.</p> <p>When a positive current flows from the electrical + to - ports, a positive torque acts from the mechanical C to R ports. Motor torque direction can be changed by altering the sign of the back-emf or torque constants.</p>

Таким чином наведено основні постулати створення імітаційної моделі роботи електричного двигуна постійного струму зі скалярним управлінням.

Загальна модель руху колісного трактора. При описі математичного апарату використовується апробована в роботах [10] методика визначення динамічних показників одиночного ведучого колеса в процесі розгону:

$$J_{\Sigma ij} \cdot \frac{d\omega_{ij}}{dt} = M_{kij} - M_{xij} - M_{fij}, \quad (1)$$

де $J_{\Sigma ij}$ – момент інерції пов'язаних з колесом мас, що обертаються; i – правий ($i = r$) або лівий борт ($i = l$); j – передня ($j = 1$) або задня вісь ($j = 2$); $d\omega_{ij}/dt$ – кутове прискорення колеса; ω_{ij} – кутова швидкість колеса $\omega_{ij} = V / [(1 - \delta_{ij}) \cdot r_{dij}]$; V – швидкість руху машинно-тракторного агрегату; δ_{ij} – буксування коліс; r_{dij} – динамічний радіус коліс; M_{kij} – крутний момент, що підведений до піввісі; M_{xij} – момент, що створюється реакцією в подовжній площині колеса; M_{fij} – момент опору коченню колеса.

При визначенні моменту опору кочення колеса, враховують нормальну реакцію дороги, динамічний радіус коліс та коефіцієнт опору кочення [10]

$$M_{fij} = R_{zij} \cdot f_{ij} \cdot r_{dij} \quad (2)$$

де R_{zij} – нормальна реакція дороги в контакті коліс; f_{ij} – коефіцієнт опору коченню.

В процесі розгляду математичної моделі розгону трактора на тяговому діапазоні, враховувались такі параметри, як сила тяги на гаку F_{kp} , буксування δ_{ij} та зсув колеса відносно опорної поверхні S_{ij} .

Буксування та зсув колеса відносно опорної поверхні значною мірою впливає на тягово-зчіпні властивості колісного трактора, які в свою чергу напряму пов'язані з фізичними характеристиками ґрунту, конструктивними параметрами, зчіпною вагою, розміром рушіїв, тиском повітря в шинах та ін. Слід зазначити, що значення нормальної реакції дороги R_{zij} також впливають на тягово-зчіпні властивості.

Сумарна нормальна реакція дороги R_{zij} в процесі розгону машинно-тракторного агрегату визначається наступним чином (схема сил, що діє на машинно-тракторний агрегат з сільськогосподарським знаряддям при рівномірному русі на критичному підйомі, наведена на рис. 2) [10]

– на передні колеса R_{zi1} ($R_{zr1} = R_{zi1}$):

$$R_{zi1} = \left(G \cdot b \cdot \cos \alpha - F_b \cdot h_b - F_j \cdot h - G \cdot h \cdot \sin \alpha - F_{kp} \cdot h_{kp} - \sum_{i,j} R_{zctij} \cdot f_{ij} \cdot r_{dij} \cdot \cos \alpha \right) / 2 \cdot (a + b) \quad (3)$$

– на задні колеса R_{zi2} ($R_{zr2} = R_{zi2}$):

$$R_{zi2} = \left(G \cdot a \cdot \cos \alpha + F_b \cdot h_b + F_j \cdot h + G \cdot h \cdot \sin \alpha + F_{kp} \cdot h_{kp} + \sum_{i,j} R_{zctij} \cdot f_{ij} \cdot r_{dij} \cdot \cos \alpha \right) / 2 \cdot (a + b) \quad (4)$$

де G – вага трактора; a, b, h – координати центру мас машинно-тракторного агрегату; α – кут підйому; F_b – сила опору повітря; h_b – відстань від опорної поверхні до сили опору повітря; F_j – сила опору прискорення; F_{kp} – сила тяги на гаку; h_{kp} – відстань від опорної поверхні до сили тяги на гаку; R_{zctij} – статичне навантаження на колеса машинно-тракторного агрегату.

В роботі [10] сила опору повітря визначається з рівняння

$$F_b = k_b \cdot F \cdot V^2 \quad (5)$$

де k_b – коефіцієнт опору повітря; F – площа лобового опору;

При математичному описі сили опору прискорення машинно-тракторного агрегату враховується вага трактора, прискорення шинно-тракторного агрегату та коефіцієнт урахування мас двигуна внутрішнього згорання і трансмісії, ходової системи [10]

$$F_j = \frac{G \cdot \ddot{X} \cdot k_t}{g} \quad (6)$$

де \ddot{X} – прискорення трактора щодо координатної осі X ; k_t – коефіцієнт урахування мас двигуна і трансмісії, ходової системи, що обертаються; g – прискорення вільного падіння.

Для визначення прискорення трактора щодо координатної осі X застосовується вираз (рис. 2) [10]

$$\ddot{X} = \frac{\left[\left(\sum_{i,j} R_{zij} \right) - F_b - G \cdot \sin \alpha - F_{kp} \right] \cdot g}{G \cdot k_t} \quad (7)$$

де R_{zij} – реакція в подовжній площині колеса.

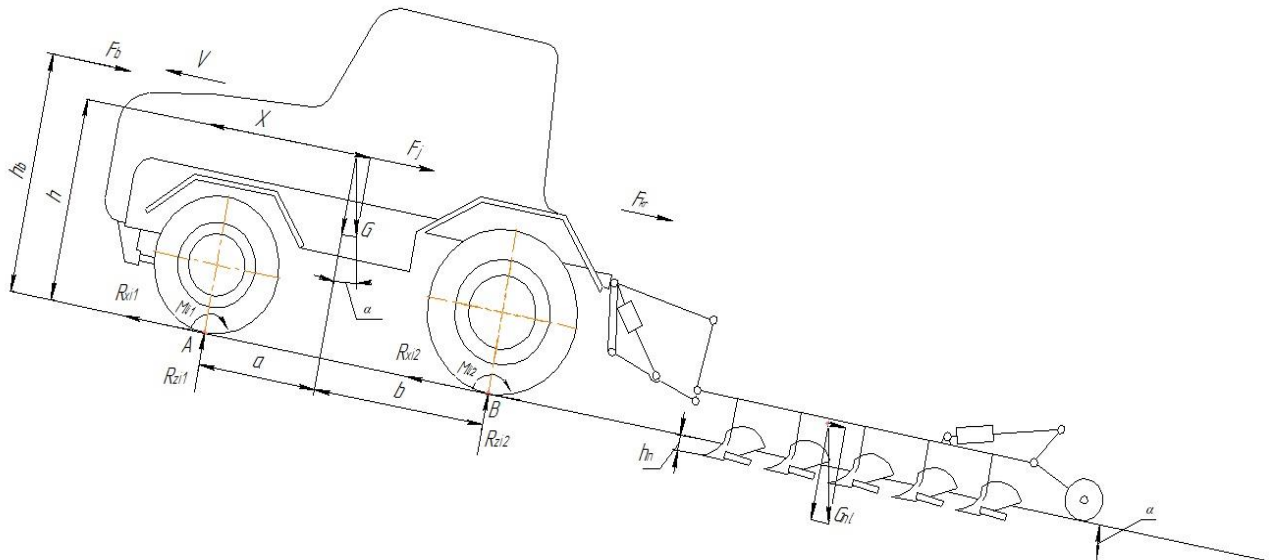


Рис. 2 – Схема сил, діючих на машинно-тракторний агрегат в процесі розгону з сільськогосподарським знаряддям на критичному підйомі

В роботі [10] відзначається, що при математичному описі динаміки одиночного ведучого колеса в процесі розгону необхідно для більшої коректності врахувати буксування. Тому, визначаючи значення крутного моменту M_{kij} , необхідно вирішити систему рівнянь, що наведена нижче

$$\left[\left[\sum_{i,j} \frac{-M_{kij} - R_{zij} \cdot f_{ij} \cdot r_{dij} - J_{\Sigma ij} \cdot \frac{d\omega_{ij}}{dt}}{r_{dij}} - F_b - G \cdot \sin \alpha - F_{kp} \right] \cdot g \right] - \ddot{X} = 0; \quad (8)$$

$$M_{kr1} = M_{kl1}; \quad M_{kr2} = M_{kl2}; \quad \frac{M_{kr1} + M_{kl1}}{M_{kr2} + M_{kl2}} = \frac{R_{zr1} \cdot r_{dr1} + R_{zl1} \cdot r_{dl1}}{R_{zr2} \cdot r_{dr2} + R_{zl2} \cdot r_{dl2}}.$$

Загальна дотична сила тяги ведучих коліс знаходиться з виразу [10]

$$P_k = \sum_{ij} \frac{M_{kij}}{r_{dij}} = \left[\left[\sum_{ij} R_{zij} \cdot f_{ij} + \frac{J_{\Sigma ij} \cdot \frac{d\omega_{ij}}{dt}}{r_{dij}} \right] + F_b + G \cdot \sin \alpha + F_{kp} \right]. \quad (9)$$

Визначаючи тягові властивості колісного рушія, в роботах [11] відзначається, що необхідно знайти такі параметри, як динамічний радіус колеса, площі плями контакту колеса з опорною поверхнею та зсувом ґрунту, котрі, в свою чергу, залежать від прогину шин ведучих коліс

$$f_{uij} = \frac{c_{2ij} \cdot R_{zij}}{2 \cdot (p_{uij} + p_{0ij})} + \sqrt{\left(\frac{c_{2ij} \cdot R_{zij}}{2 \cdot (p_{uij} + p_{0ij})} \right)^2 + c_{1ij} \cdot R_{zij}}, \quad (10)$$

де c_{1ij} , c_{2ij} – коефіцієнти для даної шини; p_{uij} – тиск всередині шини; p_{0ij} – коефіцієнт, який залежить від розмірів шини та її норми шаровості [11]

$$p_{0ij} = \left(16,7 \cdot (n_{cij} - 1) \cdot \sqrt{\frac{D_{ij}}{b_{ij}} - 1,4} \right) - 28, \quad (11)$$

де n_{cij} – норма шаровості шини; D_{ij} , b_{ij} – зовнішній діаметр та ширина профілю шини.

Динамічний радіус коліс визначається з наступного рівняння [11]

$$r_{dij} = \frac{D_{ij}}{2} - f_{uij}. \quad (12)$$

Площа плями контакту колеса з опорною поверхнею представляється як площа еліпсу та визначається наступним чином [11]

$$F_{kij} = \frac{\pi}{4} \cdot a_{kij} \cdot b_{kij}, \quad (13)$$

де a_{kij} , b_{kij} – більша та менша піввісі еліпсу.

Зсув колеса відносно опорної поверхні визначається за допомогою рівняння дотичної сили тяги на ведучих колесах

$$P_{kij} = (c_c \cdot F_{kij} + R_{zij} \cdot \operatorname{tg} \varphi_c) \cdot \left[1 - \frac{k_c}{S_{ij}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{S_{ij}}{k_c}} \right) \right], \quad (14)$$

де c_c – напруга тертя між частинками ґрунту унаслідок їх злипання; F_{kij} – площа плям контакту ведучих коліс з ґрунтом; φ_c – кут внутрішнього тертя між частинками ґрунту; k_c – показник інтенсивності напруги в ґрунті.

З наступного рівняння визначається буксування коліс δ_{ij} за допомогою залежності від зсуву ґрунту [11]

$$S_{ij} = \frac{\delta_{ij} \cdot a_{kij}}{1 - \delta_{ij}}. \quad (15)$$

Автори в роботі [11] зауважують, що між відносними швидкостями руху в плямі контакту коліс з опорною поверхнею з'являється кінематична невідповідність, яка викликана наступними чинниками:

- неможливість підібрати передавальне число в приводах мостів, щоб забезпечити рівність лінійних швидкостей в плямі контакту, для колісних тракторів з різними розмірами коліс;
- для тракторів, в яких однаковий розмір коліс, існує імовірність різного зносу шин, а також різного навантаження та тиску в шинах мостів, що значно впливає на значення динамічного радіусу коліс.

Кінематична невідповідність визначається з наступного виразу [11]

$$k_n = \frac{r_{di1}}{r_{di2}} \cdot \frac{u_{i2}}{u_{i1}}, \quad (16)$$

де u_{i1} , u_{i2} – передавальне число ділянок трансмісії приводу переднього та заднього мостів.

Отримані значення буксування з рівняння (15) не будуть узгоджені, так як визначались виключно з властивостей опорної поверхні та характеристик рушія. Для виконання умов узгодженості буксування мостів колісного трактора необхідно щоб виконувалось наступне рівняння

$$\delta_{i2} = 1 - k_n \cdot (1 - \delta_{i1}). \quad (17)$$

Таким чином, наведено загальну математичну модель руху колісного трактора в процесі виходу на технологічну або транспортну швидкість.

Подальшим кроком проведемо імітаційне моделювання електротрактора на базі колісного трактора 4К2 ХТЗ-2511. Вихідні дані: передні шини – 7,5 R16; задні шини – 230/95 R32; загальне передавальне число трансмісії – 54,8; ємність батареї – 20А·год; кут підйому дорожнього полотна – 0 град; сила тяги на гаку – 0 Н. Результати моделювання представлено на рис. 4.

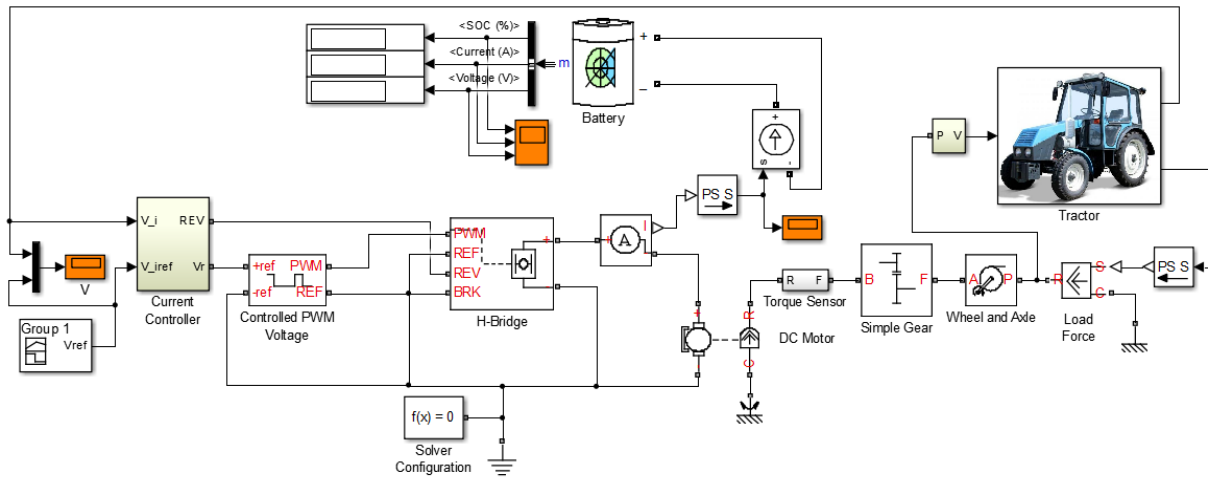


Рисунок 3 – Блок-схема електротрактора в системі MatLab

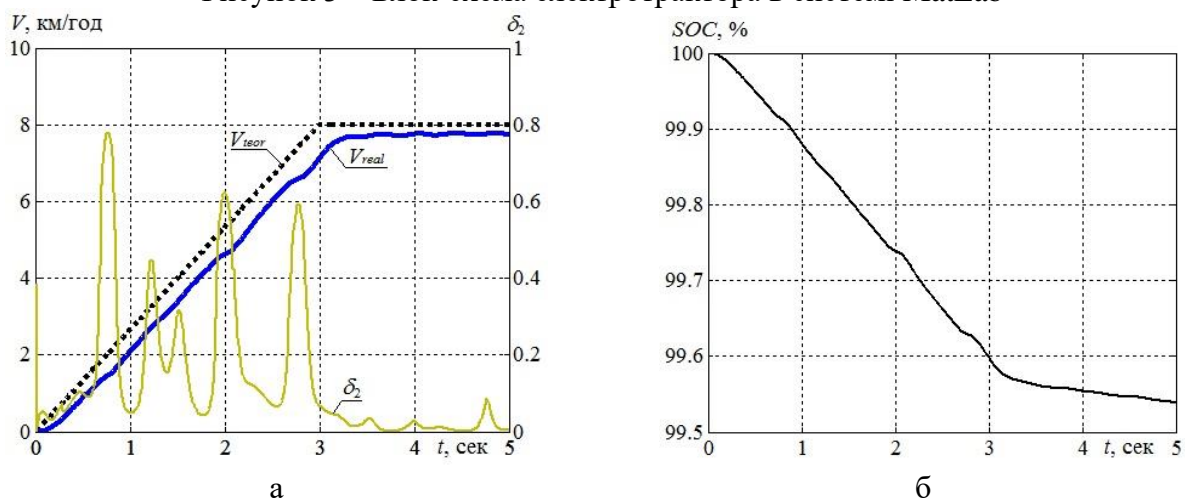


Рисунок 4 – Результати моделювання електротрактора:

а – залежність бажаної (V_{teor}), реальної (V_{real}) швидкостей та буксування задніх колес від часу (t); б – залежність розряду батареї (SOC) від реальної (V_{real}) швидкості

Таким чином, наведено математичний апарат та результати імітаційного моделювання електротрактора в процесі виходу на технологічну або транспортну швидкість (до 8 км/год).

Висновки. В роботі виконано імітаційне дослідження руху сільськогосподарського колісного трактора типу ХТЗ-2511 на електричній тязі. Як силовий агрегат було обрано двигун постійного струму. Представлено алгоритм побудови роботи електричного двигуна зі скалярним управлінням, реалізація якого була виконана в системі MatLab за допомогою бібліотеки Simscare. Наведено математичний апарат, який описує загальний рух колісного трактора в процесі виходу на технологічну або транспортну швидкість. Окреслений апарат враховує взаємодію коліс з ґрунтом в функції конструктивних параметрів та фізико-механічних властивостей опорної поверхні. Представлено результати моделювання руху електротрактора, а саме залежність бажаної та реальної швидкостей від часу розгону; залежність розряду батареї від реальної швидкості руху.

Список літератури

1. Адамчук В. Електрифікація як фактор створення сільськогосподарської техніки нового покоління. *Техніка і технології АПК*. 2013. № 12. С. 12-15.
2. Мельник Р.В. Ефективність роботи мобільних електрифікованих засобів сільськогосподарського призначення. *Збірник наукових праць Кіровоградського Національного технічного університету, техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2015. Вип. 27. Кіровоград.

3. Клепиков В. Б., Моисеев А. Н., Семиков А. В. Исследование режима работы асинхронного генератора с самовозбуждением при ненасыщенной магнитной цепи. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2011. – № 03 (79). С. 286-288.
4. Клепиков В. Б., Семиков А. В., Моисеев А. Н., Гончар А. С. и др. Из опыта создания электропривода электромобиля с супер- конденсаторным накопителем энергии. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2015. Вип. 112 (1121). С. 195-198.
5. Кожушко А. П., Даниленко В. Д., Селевич С. Г. Аналіз розвитку трансмісійних установок сучасних колісних тракторів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Автомобіле- та тракторобудування*. Харків : НТУ «ХПІ». 2022. № 2. С. 118-131.
6. Weymann S. Electric drivelines for tractors and agricultural machinery. Part 2. *Agricultural, Horticultural and Forest Engineering*. 2016, 61(5), P. 8 – 10.
7. Kalociński T. Modern trends in development of alternative powertrain systems for non-road machinery. *Combustion Engines*. 2022, № 188(1), P. 42 – 54. <https://doi.org/10.19206/CE-141358>.
8. Mocera F., Somà A. A Review of Hybrid Electric Architectures in Construction, Handling and Agriculture Machines. *New Perspectives on Electric Vehicles*. 2022. <http://doi.org/10.5772/intechopen.99132>.
9. Самородов В.Б., Краснокутський В.М., Ткачов В.Ю. Розвиток електротракторів в Україні. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Автомобіле- та тракторобудування*. 2020. № 2. С. 19 – 23.
10. Кожушко А.П. Особливості роботи колісних тракторів з гідрооб'ємно-механічними трансмісіями. *Сільськогосподарські машини*. 2015. №31. С. 70 – 82.
11. Самородов В.Б., Ребров А.Ю. Развитие классических методов тягового расчета трактора с учетом основных технико-экономических показателей МТА. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2008. № 58. С. 11 – 20.

References (transliterated)

1. Adamchuk V. Electricity as a factor in the development of new generation technology / *Technique and technology AIC*, 2013, No. 12, P. 12-15.
2. Melnik R.V. Efficiency of the robots of mobile electrical communications. *Zbirnik naukovykh prac Kirovogradskogo National Technical University, technical school in the city of viral education, Galuzev machine, automation*. 2015. Vip. 27. Kirovograd
3. Klepikov V. B., Moiseev A. N., Semikov A. V. Study of the operating mode of an asynchronous generator with self-excitation with an unsaturated magnetic circuit. *Electrical and computer systems*, 2011, No. 03 (79), P. 286-288.
4. Klepikov V. B., Semikov A. V., Moiseev A. N., Gonchar A. S. et al. From the experience of creating an electric drive of an electric car with a super-condenser energy storage. *Newsletter of the National Technical University "KhPI"*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2015, VIP. 112 (1121). P. 195-198.
5. Kozhushko A. P., Danylenko V. D., Selevich S. G. Analysis of the development of transmission systems of modern wheeled tractors. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Ser. : Automobile and tractor construction, 2022, No. 2, P. 118-131.
6. Weymann S. Electric drivelines for tractors and agricultural machinery. Part 2. *Agricultural, Horticultural and Forest Engineering*. 2016, 61(5), P. 8 – 10.
7. Kalociński T. Modern trends in development of alternative powertrain systems for non-road machinery. *Combustion Engines*. 2022, № 188(1), P. 42 – 54. <https://doi.org/10.19206/CE-141358>.
8. Mocera F., Somà A. A Review of Hybrid Electric Architectures in Construction, Handling and Agriculture Machines. *New Perspectives on Electric Vehicles*. 2022. <http://doi.org/10.5772/intechopen.99132>.
9. Samorodov V.B., Krasnokutsky V.M., Tkachev V. Yu. Development of electric tractors in Ukraine. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Ser. : Automobile and Tractor Construction. 2020. - № 2. - P. 19-23.
10. Kozhushko A.P. Peculiarities of operation of wheeled tractors with hydraulic-volumetric-mechanical transmissions. *Agricultural machinery*, 2015, No. 31, P. 70-82.
11. Samorodov V.B., Rebrov A.Yu. Development of classic methods of tractor traction calculation taking into account the main technical and economic indicators of the MTA. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. 2008, No. 58, P. 11-20.

Надійшла (received): 15.05.2023 p.

Відомості про авторів / About the Authors

Ткачов В'ячеслав Юрійович (Viacheslav Tkachov) – аспірант кафедри автомобіле- та тракторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4619-5758>; e-mail: engineer.viacheslav@gmail.com

Кожушко Андрій Павлович (Andrii Kozhushko) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автомобіле- та тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4725-5911>; e-mail: Andreykozhushko7@gmail.com