

В.Д. ДАНИЛЕНКО, В.Ю. ТКАЧОВ, А.П. КОЖУШКО, О.М. ГОРБОВ

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНОГО ВИБОРУ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОТРАКТОРА

Технічно обґрунтовано вибір електричного двигуна та конструкційної схеми силової установки при побудові електротрактору малого тягового класу. Використано методіку, яка дозволила проаналізувати існуючі електричні двигуни, що використовуються в електричних приводах суміжних галузей промисловості, а також виконано технічне обґрунтування схемного рішення силової установки електричного трактора. Результатом є обґрунтований вибір синхронного двигуна з постійними магнітами, синхронного реактивного двигуна та асинхронного двигуна, як тих що доцільно впроваджувати в електротрактор. Практична значимість роботи полягає у технічному обґрунтуванні вибору схемного рішення для формування електричної силової установки для малопотужних тракторів.

Ключові слова: колісний трактор, електричний двигун, трансмісія, механічна характеристика, ефективність, конструкційна схема.

V. DANYLENKO, V. TKACHOV, A. KOZHUSHKO, O. HORBOV

JUSTIFICATION OF THE DESIGN CHOICE THE ELECTRIC TRACTOR POWER PLANT

In the conditions of deterioration of the environment due to emissions and reduction of fossil fuel reserves in various industrial sectors, the transfer of funds to alternative clean energy is a promising way. This development encourages the modernization not only of automobiles, but also of other specialized vehicles, such as wheeled tractors. In agriculture, tractors of various traction classes are used for traction and transport work. Today, the development of electric drive construction technology is advisable to implement in small-class tractors, which are intended for inter-row processing of row crops, plowing light soils in gardens and greenhouses, for working with a mower, as well as for small transport works. Therefore, the material of this article aims to provide a technical justification for the choice of an electric motor and a structural scheme of a power plant when building an electric tractor of a small traction class. When solving the set goal, a technique was used that allowed to analyze the existing electric motors used in electric drives of related industries, as well as a technical substantiation of the schematic solution of the power plant of an electric tractor was performed. The result is a justified choice of a synchronous motor with permanent magnets, a synchronous jet motor and an asynchronous motor, as those that should be implemented in an electric tractor. The practical significance of the work lies in the technical justification of the choice of a circuit solution for the formation of an electric power plant for low-power tractors.

Key words: wheeled tractor, electric motor, transmission, mechanical characteristics, efficiency, design.

Вступ. В умовах погіршення навколишнього середовища викидами та зменшенням запасів вичопного палива в різних промислових галузях перспективним шляхом є переведення засобів на альтернативну чисту енергію. Такий розвиток спонукає до модернізації не тільки автомобільною, а й інших спеціалізованих засобів, таких як колісні трактори. В сільському господарстві використовуються трактори різних тягових класів для виконання тягових і транспортних робіт. Сьогодні розвиток технології побудови електроприводу доцільно впроваджувати в трактори малих класів, які призначені для міжрядної обробки просапних культур, оранки легких ґрунтів в садах і теплицях, для роботи з косаркою, а також для дрібних транспортних робіт.

У порівнянні з традиційними (оснащеними двигунами внутрішнього згорання) тракторами виключно електричні трактори мають компактну структуру, максимальний крутний момент на низьких обертах та високу ефективність роботи. Електрифікація досягла високої позначки в автомобільній промисловості, що стало поштовхом для поширення її і на тракторобудівну галузь. Виробники обладнання по всьому світу експериментують із різноманітними технологіями електричного приводу для вдосконалення сучасної техніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день більшість виробників сільськогосподарських тракторів запропонували концепти на електричній (або гібридній) тязі [1]: Fendt, John Deere; Kramer, Escorts Farmtrac, Case, Rigitrac, JCB, ХТЗ і т.і. Більшість з цих

виробників впроваджують електричний привод на малопотужні трактори, що, на їх думку, повинно надати стрімкого розвитку фермерського господарства.

Впровадження електричного приводу в засоби автомобільної галузі більш широко окреслено, ніж для тракторної. Так, в роботі [2] надано характеристики існуючих електричних двигунів в розрізі їх впровадження в електромобіль. В роботі [3] представлена концепція проектування та моделювання електричної силової установки, враховуючи електромагнітні, теплові та механічні складові. Що стосується керування електричної установки, то робота [4] вигідно відрізняється від класичних, адже в ній на основі їздових циклів показана узгоджена робота двох електричних двигунів.

Огляд сучасного стану електричних силових установок тракторів і сільськогосподарських машин наведено в роботі [5], де представлено, що використання електричних приводів машин призводить до підвищення енергоефективності, а також забезпечує універсальність сільської діяльності. Зростає кількість робіт, в яких відбувається підбір електричних двигунів для заміни двигуна внутрішнього згоряння в малопотужних тракторах. Так, в роботах [6, 7] розглядається можливість експлуатації сільськогосподарських малопотужних тракторів, що працюють з використанням двигуна постійного струму; асинхронного двигуна [8, 9]; безщіткового двигуна постійного струму [10 – 12]; синхронного двигуна [13 – 16].

Таким чином, незважаючи на збільшення робіт щодо пошуку альтернатив для заміни звичайних тракторів з двигуном внутрішнього згоряння на електричні аналоги, цей аспект все ще залишається не розкритим, що змушує до додаткових досліджень у цій галузі. Крім того, серед прототипів немає жодного підходу до проектування схемного рішення силової установки електротрактора.

Мета дослідження, постановка задачі. Метою роботи є технічне обґрунтування вибору електричного двигуна та конструкційної схеми силової установки при побудові електротрактора малого тягового класу. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

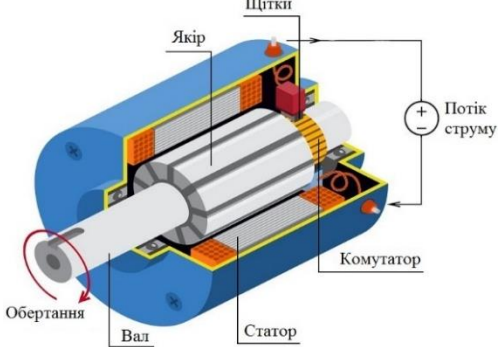
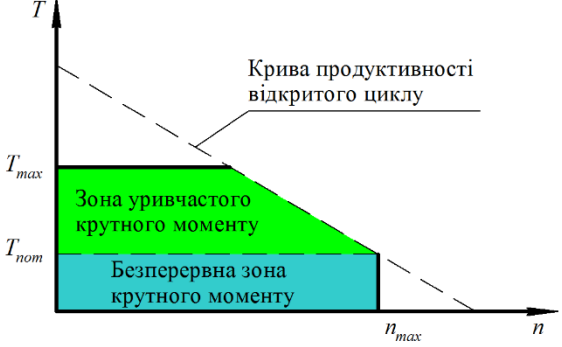

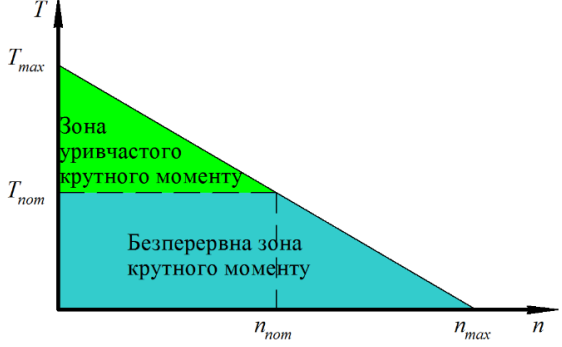

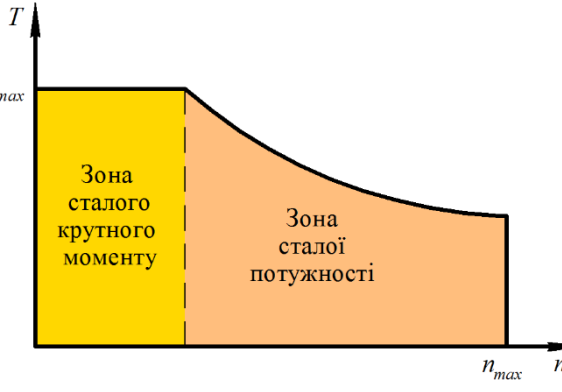
- аналіз видів електричних двигунів;
- обґрунтування вибору схемного рішення силової установки електротрактора.

Вибір електричного двигуна. Розвиток технологій електричного приводу дозволив підвищити технічний рівень таких складових, як: твердотільні пристрої накопичення енергії; використання високоякісних матеріалів при побудові двигунів; силових мікроконтролерів. Це сприяло створенню нових енергоефективних і високопродуктивних електроприводів. Основною частиною електроприводу є електричний двигун, який, для автомобілебудування, повинен відповідати таким основним вимогам [17]:

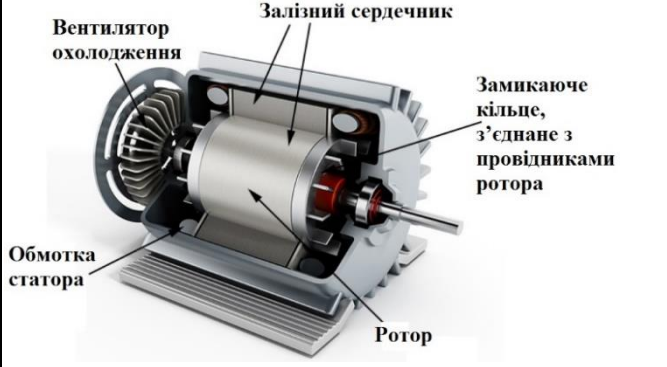
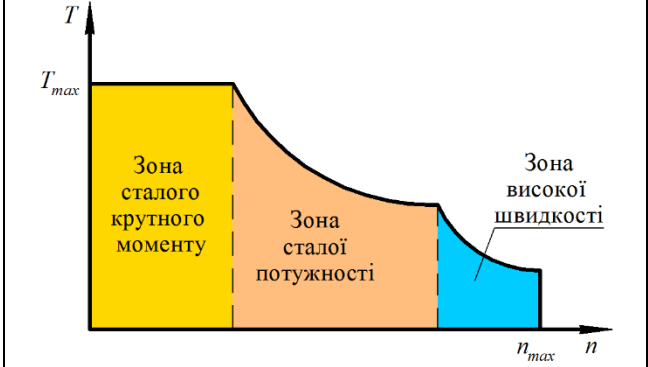

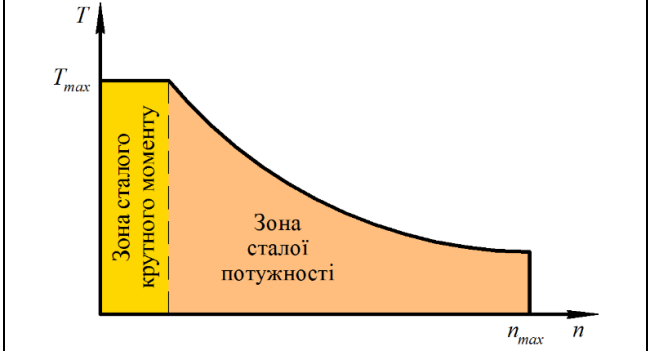

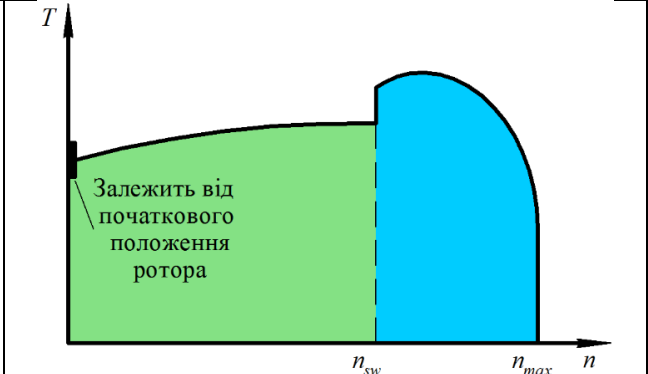
- висока миттєва потужність і висока щільність потужності (час передачі енергії);
- низька пульсація крутного моменту;
- висока ефективність (ККД) у повному діапазоні швидкостей;
- надійність і міцність на різних режимах роботи;
- низька вартість.

Впровадження електричного приводу в електричні та гібридні автомобілі значним чином відрізняється від тракторних (або промислового спрямування). Відмінності полягають у галузевих обмеженнях транспортних засобів та експлуатаційних характеристиках. Електричні двигуни, які використовуються в електричних та гібридних автомобілях вимагають частих пусків та зупинок, високих динамічних показників (прискорення і уповільнення), високого крутного моменту при розгоні або при подоланні підйому, низького крутного моменту на високій швидкості руху, а також зміни в широкому діапазоні швидкостей. Сьогодні існує декілька технологій впровадження електроприводу, які різняться за ефективністю та ціною, що впливає на вибір електродвигунів виробниками. В табл. 1 представлено найцікавіші архітектури електродвигунів у сучасній автомобільній промисловості, які можливо розглянути при впровадженні їх в тракторобудівну галузь.

Таблиця 1 – Види електродвигунів у сучасній промисловості

Конструкційні особливості	Механічна характеристика
1	2
Щітковий двигун постійного струму (Brushed DC Motor)	
	
<p><i>Перевагою</i> цих двигунів є здатність забезпечувати максимальний крутний момент на низьких швидкостях; лінійна механічна характеристики. <i>Недоліком</i> є масо-габаритні характеристики; низька теплопровідність; ефективність. Тепло важко відводити, оскільки воно утворюється в центрі ротора, через ці причини щіткові двигуни постійного струму більше не використовуються на автомобілях.</p>	
Безщітковий двигун постійного струму (Brushless DC Motor)	
	
<p><i>Переваги:</i> високий пусковий момент, високий ККД (близько 95 – 98%) і придатні для проектування з високою щільністю потужності. Безщіточні двигуни є найбільш переважними двигунами для застосування в електромобілях малого класу завдяки своїм тяговим характеристикам. <i>Недоліком</i> є короткий постійний діапазон потужності, зменшення крутного моменту зі збільшенням швидкості, висока вартість через наявність в постійних магнітів.</p>	
Синхронний двигун з постійними магнітами (Permanent Magnet Synchronous Motor)	
	
<p><i>Перевага</i> цього двигуна полягає в тому, що він може працювати в різних діапазонах швидкостей без використання редукторної системи; має високий ККД та щільність потужності; компактний; може застосовуватись в колесах. Він має високий крутний момент навіть на дуже низьких швидкостях. <i>Недоліком</i> є його вартість.</p>	

закінчення таблиці 1

1	2
Асинхронні двигуни (Induction Motor)	
	
<p><i>Переваги:</i> ефективність (ККД 92 – 95%); низька вартість; висока щільність потужності; надійність, що дозволяє працювати в агресивному середовищі. <i>Недолік</i> полягає в тому, що для отримання високої ефективності потрібна складна інверторна схема, окрім цього керування двигуном ускладнено.</p>	
Імпульсний реактивний двигун (Switched Reluctance Motor)	
	
<p><i>Переваги:</i> низька вартість; широкий діапазон швидкостей; висока ефективність; проста і надійна конструкція; простота управління; відмовостійка робота перетворювача; нечутливий до високих температур. Найбільшими <i>недоліками</i> двигуна є висока пульсація крутного моменту; складність керування та певні проблеми з шумом.</p>	
Синхронний реактивний двигун (Synchronous Reluctance Motor)	
	
<p><i>Переваги:</i> низька вартість; висока ефективність (ККД 92 – 96%); високий крутний момент; нечутливий до високих температур; простота керування та легка можливість ослаблення магнітного поля; короткий час перевантаження; проста і надійна конструкція. <i>Недоліки:</i> низький коефіцієнт потужності; низький діапазон швидкості; пульсації крутного моменту.</p>	

* T – крутний момент; n – частота обертання.

Робота сучасного електродвигуна у складі тягових електроприводів вимагає використання сучасних інверторів та контролерів. Такі засоби будуються на базі силового транзистору типу

IGBT (біполярні транзистори з ізольованим затвором). Його основною метою є запобігання виникненню перевантажень в електричній системі, адже він застосовується при роботі з високими напругами (більше 1000 В). Використання IGBT в системах керування тяговими електроприводом забезпечує високий ККД, високу плавність ходу машини і можливість застосування рекуперативного гальмування практично на будь-якій швидкості. Аналізуючи механічну характеристику популярних електродвигунів (табл. 1), які використовуються в сучасних тягових електроприводах, виділяється синхронний двигун з постійними магнітами (PMSM), висока ефективність та питома потужність якого дозволяє його широко використовувати у силовому приводі електротрактора. Але використання таких двигунів обмежується високою ціною, що надає підстави до знаходження економічної та/або технічної його доцільності. Завдяки оптимальній комутації двигуна PMSM він характеризується більшою щільністю крутного моменту в порівнянні з безщітковими двигунами постійного струму (BLDC). Крім того, завантажувальна здатність BLDC на вищій швидкості нижча порівняно з асинхронні двигуни (IM) та PMSM, але його щільність потужності висока на відмінно від IM і дешевша порівняно з PMSM. Також слід виділити те, що BLDC і PMSM мають високий акустичний шум.

Також слід виокремити двигуни IM, які мають широку зону сталого крутного моменту двигуна (як і PMSM). Дані двигуни є найбільш апробованими та дослідженими, адже близько 80% електродвигунів в індустріальному світі є асинхронними. І якщо вартість двигуна є прийнятною, то використання сучасного інвертора (який дозволяє перейти з постійного струму на змінний DC-AC) значно підвищує вартість такого приводу. Позитивним чином виділяється синхронний реактивний двигун (SynRM) або вентильний реактивний двигун, який має високе співвідношення крутного моменту до струму та низьку вартість. Порівнюючи окреслені вище двигуни відзначимо, що врахування вимог до тягових засобів передбачає наступні показники: високий крутний момент і питому потужність; низьку пульсацію крутного моменту; широкий діапазон швидкостей (якщо усунути трансмісію); мати компактний розмір та меншу масу. Зіставляючи характеристики SynRM можна відмітити, що при відсутності магнітів запуск і керування електроприводом забезпечується силовою електронікою, яка спрощується на відміно від PMSM та BLDC шляхом простішого векторного управління. Це обумовлено наявністю в SynRM одного вектора поля статора, який керується залежно від кута положення ротора, а також немає необхідності в ослабленні потоку шляхом введення негативної складової струму. Усунення магнітів в SynRM дозволяє позбутися напруги зворотної ЕДС, що індукуються в статорі. Також необхідно відмітити, що SynRM має набагато сильнішу вібрацію, ніж PMSM. В порівнянні з IM в SynRM при зменшенні втрат в роторній клітці досягається підвищення ефективності та габаритні якості. IM та SynRM мають найнижчу щільність потужності, ніж PMSM [18].

Таким чином, впровадження того або іншого типу електричного двигуна обумовлюється перш за все вимогами до тягового засобу. Згідно з огляду типів електричних двигунів доцільно використовувати IM, SynRM та PMSM, як силову установку електротрактора.

Схемне рішення силової установки електротрактора. Впровадження електричного приводу в тягово-транспортну машину (якою є трактор) обумовлюється перш за все значно вищою ефективністю електричного двигуна в порівнянні з двигуном внутрішнього згорання. Проте така модернізація зумовлює певні перешкоди, які пов'язані з накопиченням енергії, тому сьогодні проводяться поглиблені дослідження щодо збільшення якості акумуляторних батарей в електричних транспортних засобах. За своїм функціоналом колісний трактор повинен виконувати тягові операції, на основі цього йде поділ на малопотужні (класи тяги: 0,2; 0,6 та 0,9), середньопотужні (класи тяги: 1,4; 2,0 та 3,0) та великопотужні (класи тяги: 4,0 і більше). З огляду на сьогоднішній розвиток впровадження електроприводу доцільно його проводити на малопотужних тракторах.

Малопотужні трактори призначені для механізації трудомістких робіт у комплексі зі змінними навісними, напівнавісними та причіпними сільськогосподарськими знаряддями та

агрегатами (передпосівна обробка ґрунту, посів, догляд за посівами, посадка овочів, міжрядна обробка польових культур та садів, збирання сіна тощо), транспортування різних вантажів, під монтаж вантажного обладнання для механізації вантажно-розвантажувальних робіт у сільському господарстві, промисловості, будівництві та комунальному господарстві. Зважаючи на такий широкий спектр робіт виникає необхідність обґрунтування вибору схемного рішення силової установки електротрактора. На рис. 1 показані можливі варіації конструкційної будови силової установки трактора на електричній тязі.

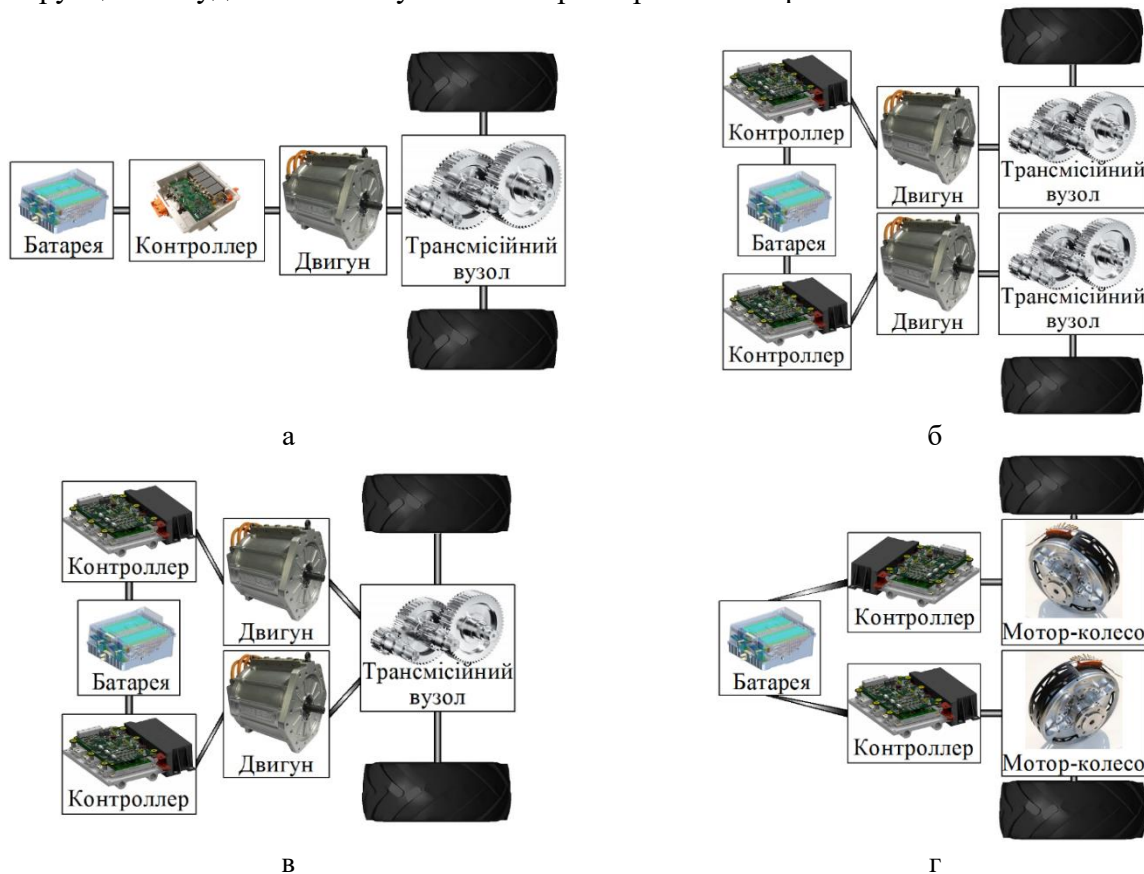


Рисунок 1 – Можливі схемні рішення силової установки малопотужних тракторів (4К2):
а – схема №1; б – схема №2; в – схема №3; г – схема №4;

Обґрунтування вибору:

- **Схема №1.** Окреслена варіація є найбільш очікуваною та простою, вона не вимагає поглиблених конструкційних рішень. Така схема є найбільш розповсюджена і дає можливість використовувати електричний двигун будь-якого типу [11, 19 – 21]. *Переваги:* легкість розробки (підбір електричного двигуна ґрунтується на характеристиках двигуна внутрішнього згоряння); легка адаптивність до виконання сільськогосподарських робіт; наявність заднього валу відбору потужності (ВВП). *Недоліки:* за рахунок широкого діапазону швидкостей і швидкій реакції електричних двигунів на крутний момент з'являється недоцільність використання багатоступеневих трансмісій; заміна елементів двигуна внутрішнього згоряння на компоненти електричної силової установки не завжди урівноважуються за масою, що сприяє збільшенню габаритних розмірів та ваги; така конструкція унеможлиблює встановлення класичного переднього ВВП.

- **Схема №2.** Дана конструкція відома завдяки інтеграції її на автомобілі Tesla Model S. *Переваги:* підвищені показники надійності та простота конструкції за рахунок зменшення кількості механічних складових [22]; адаптованість роботи трактора, оскільки дозволяє незалежно контролювати швидкість і крутний момент кожного колеса; встановлення менш потужних електричних двигунів на відмінно від Схеми №1. *Недоліки:* неможливість роботи ВВП, як переднього, так і заднього; складність керування електричними двигунами.

- **Схема №3.** За основу цієї конструкції взято двопоточні трансмісії, де як «Трансмісійний вузол» виступає планетарний механізм [23]. *Переваги:* широкий діапазон зміни швидкостей; швидка реакція двигунів за крутним моментом; зменшення розмірів трансмісійного вузла, що призводить до зменшення ваги та витрати енергії; наявність заднього валу відбору потужності ВВП. *Недоліки:* складність керування електричними двигунами; наявність циркуляції потужності, що обумовлена конструкційними особливостями двопоточними трансмісіями з диференціалом на виході; така конструкція унеможливує встановлення класичного переднього ВВП.

- **Схема №4.** На даний момент така конструкція не дуже широко представлена в тракторобудуванні. Більш широко воно окреслена в автомобілебудуванні [24]. *Переваги:* простота конструкції і висока надійність системи приводу за рахунок усунення трансмісійного вузла; незалежне керування колесами; незалежний контроль буксування коліс, що покращує стійкість та зменшує гальмівний шлях. *Недоліки:* збільшення невіднесеної маси трактора, що впливає на комфортабельність та керованість; неможливість роботи ВВП, як переднього, так і заднього; оскільки експлуатація трактора передбачає рух у важких умовах, то можливе зменшення ресурсу роботи двигунів.

Таким чином, найбільш перспективними схемами для формування електричної силової установки для малопотужних тракторів є Схема №1 та №3. Такий вибір обумовлено конструкційною можливістю роботи заднього ВВП. Але в такому випадку Схема №3 матиме складну систему керування, що збільшить вартість силової установки. Схема №2 має перспективу лише на тракторах, які використовуються тільки на транспортних роботах. Загальний конструкційний недолік схем силової установки електротрактора є неможливість встановлення переднього ВВП, що зумовлює до його майбутнього проектування.

Висновки. З огляду на проведений аналіз електричних двигунів, які використовуються в електроприводах, найбільш раціонально з точки зору характеристик є синхронний двигун з постійними магнітами (PMSM). Його основним недоліком є ціна, тому як альтернатива можна розглянути синхронний реактивний двигун (SynRM), який в останні часи набуває популярності, та асинхронний двигун (IM), ціна якого разом з керуючими пристроями також висока. Зважаючи на універсальність малопотужних тракторів, адже використовуються у комплексі зі змінними навісними, напівнавісними та причіпними сільськогосподарськими агрегатами, тому конструкція електричного трактора повинна враховувати роботу ВВП.

Список літератури

1. 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.* 2022. № 2. С. 118 – 131. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2022.2.13>.
2. Sreeram k., Preetha P.K., Poornachandran P. Electric Vehicle Scenario in India: Roadmap, Challenges and Opportunities," *2019 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, Coimbatore, India, 2019. pp. 1 – 7. <https://doi.org/10.1109/ICECCT.2019.8869479>.
3. Domingues-Olavarría G., Márquez-Fernández F.J., Fyhr P., Reinap A., Andersson M., Alaküla M. Optimization of Electric Powertrains Based on Scalable Cost and Performance Models. *IEEE Transactions on Industry Applications.* 2019. vol. 55. № 1, pp. 751 – 764. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2864943>.
4. Hu X., Li Y., Lv C., Liu Y. Optimal Energy Management and Sizing of a Dual Motor-Driven Electric Powertrain. *IEEE Transactions on Power Electronics.* 2019. vol. 34. № 8, pp. 7489 – 7501. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2879225>.
5. Moreda G.P., Muñoz-García M.A., Barreiro P. High voltage electrification of tractor and agricultural machinery – A review. *Energy Conversion and Management.* 2016. Vol. 115. pp. 117 – 131. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.018>.
6. Volpato C.E.S., de Paula V.R., Barbosa J.A., Volpato E.L. Evaluation of the operational viability of the use of electricity as a source of power in agricultural tractors. *American Society of Agricultural and Biological Engineers.* 2016. p. 1. <https://doi.org/10.13031/aim.20162458121>.
7. Ткачов В.Ю., Кожушко А.П. Імітаційне моделювання руху електротрактора з урахуванням експлуатаційних режимів роботи. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Автомобіле- та тракторобудування.* 2023. № 1. С. 83 – 90. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2023.1.06>.
8. Rodrigues D.E., Teixeira M.M., Fernandes H.C., Modolo A.J., Rodrigues G.J. Desempenho de um microtrator

- utilizando-se motores com diferentes alternativas energéticas. *Acta Sci. Technol.* 2006. № 28, (1). pp. 55 – 63.
9. Dar A.L. An introduction to electric tractor. *Technical Report*. 2022. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29165.26087>.
 10. Plizga K. Analysis of energy consumption by electric agricultural tractor model under operating conditions. *Agricultural Engineering*. 2021. Vol. 25. pp. 1 – 12. <https://doi.org/10.2478/agriceng-2021-0001>.
 11. Liu M., Xu L., Zhou Zh. Design of a Load Torque Based Control Strategy for Improving Electric Tractor Motor Energy Conversion Efficiency. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016. Vol. 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/2548967>.
 12. Слободян В. М. Обґрунтувати параметри та режими роботи електротрактора класу 0,6 на основних сільськогосподарських роботах : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.11 / Володимир Миколайович Слободян; наук. керівник Мироненко В. Г. ; Національна академія аграрних наук України національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства». Глеваха, 2017. 134 с.
 13. Seo J.-M., Kim Y.-K., Jung I.-S., Jung H.-K. Permanent magnet synchronous motor for electric tractor of 35 horsepower. *IEEE ECCE Asia DownUnder*. 2013. pp. 560 – 565. <https://doi.org/10.1109/ECCE-ASIA.2013.6579153>.
 14. Jani S.N., Jamnani J.G. A comparative study of electric motor for low-power density electric vehicles. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26320-x>.
 15. Rachcha A., Mishra A., Shinde K. Smart Electric Tractor. *Ijrasat Journal For Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2022. Vol. 10 (7). pp. 1145 – 1149. <https://doi.org/10.22214/ijrasat.2022.46374>.
 16. Bianchi N., Bolognani S., Carraro E., Castiello M., Fornasiero E. Electric Vehicle Traction based on Synchronous Reluctance Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016. Vol. 52(6). pp. 1 – 8, <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2599850>.
 17. Taghavi S. Design of synchronous reluctance machines for automotive applications. *Engineering*, 2015, 195 p.
 18. Осадчук Ю.Г., Козакевич І.А., Ільченко Р.А. Порівняльний аналіз асинхронних, синхронних машин з постійними магнітами та вентилями реактивних двигунів для гібридних транспортних засобів. Вісник Криворізького національного університету. 2016. № 42. С. 104–109.
 19. Gade C.R., Wahab R.S. Conceptual framework for modelling of an electric tractor and its performance analysis using a permanent magnet synchronous motor. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(19). 14391. <https://doi.org/10.3390/su151914391>.
 20. Dhond R., Srivastav U., Patil B.T., Vaishnav H. Comparative study of electric tractor and diesel tractor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1168 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1168/1/012003>.
 21. Jurca F.N., Mircea R., Martis C., Martis R., Florin P.P. Synchronous reluctance motors for small electric traction vehicle. *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*. 2014. pp. 317 – 321. <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2014.6969920>.
 22. Melo R.R., Antunes F.L.M., Daher S., Vogt H.H., Albiero D., Tofol F.L. Conception of an electric propulsion system for a 9 kW electric tractor suitable for family farming. *IET Electric Power Applications*. 2019. Vol. 13. Iss. 12. pp. 1993 – 2004. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0353>.
 23. Li T., Xie B., Li Z., Li J. Design and optimization of a dual-input coupling powertrain system: a case study for electric tractors. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10(5). 1608. <https://doi.org/10.3390/app10051608>.
 24. Jneid M.S., Harth P., Ficzer P. In-wheel-motor electric vehicles and their associated drivetrains. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*. 2020. Vol. 10(4). pp. 415 – 431. [https://doi.org/10.7708/ijtte.2020.10\(4\).01](https://doi.org/10.7708/ijtte.2020.10(4).01).

References (transliterated)

1. Kozhushko A.P., Danylenko V.D., Selevych S.H. Analiz rozvytku transmissiinykh ustanovok suchasnykh kolisnykh traktoriv [Analysis in development of transmissions for modern wheeled tractors]. *Visnyk NTU "KhPI". Ser. : Avtomobile-ta traktorobuduvannia* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Automobile and tractor building]. Kharkiv, NTU "KhPI". 2022. no 2. pp. 118 – 131.
2. Sreeram K., Preetha P.K., Poornachandran P. Electric Vehicle Scenario in India: Roadmap, Challenges and Opportunities," *IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies*. 2019. pp. 1 – 7. <https://doi.org/10.1109/ICECCT.2019.8869479>.
3. Domingues-Olavarria G., Márquez-Fernández F.J., Fyhr P., Reinap A., Andersson M., Alakula M. Optimization of Electric Powertrains Based on Scalable Cost and Performance Models. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2019. vol. 55. № 1, pp. 751 – 764. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2864943>.
4. Hu X., Li Y., Lv C., Liu Y. Optimal Energy Management and Sizing of a Dual Motor-Driven Electric Powertrain. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019. vol. 34. № 8, pp. 7489 – 7501. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2879225>.
5. Moreda G.P., Muñoz-García M.A., Barreiro P. High voltage electrification of tractor and agricultural machinery – A review. *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 115. pp. 117 – 131. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.018>.
6. Volpato C.E.S., de Paula V.R., Barbosa J.A., Volpato E.L. Evaluation of the operational viability of the use of electricity as a source of power in agricultural tractors. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2016. p. 1. <https://doi.org/10.13031/aim.20162458121>.

7. Tkachov V.Iu., Kozhushko A.P. Imitatsiine modeliuвання rukhu elektrotraktora z urakhuvanniam ekspluatatsiinykh rezhymiv roboty [Simulation of electric tractor movement taking into account operating modes]. Visnyk NTU "KhPI". Ser.: Avtomobile- ta traktorobuduvannya [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Automobile and tractor building]. Kharkiv, NTU "KhPI". 2023. no 1. pp. 83 – 90.
8. Rodrigues D.E., Teixeira M.M., Fernandes H.C., Modolo A.J., Rodrigues G.J. Desempenho de um microtrator utilizando-se motores com diferentes alternativas energéticas. Acta Sci. Technol. 2006. № 28, (1). pp. 55 – 63.
9. Dar A.L. An introduction to electric tractor. Technical Report. 2022. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29165.26087>.
10. Plizga K. Analysis of energy consumption by electric agricultural tractor model under operating conditions. Agricultural Engineering. 2021. Vol. 25. pp. 1 – 12. <https://doi.org/10.2478/agriceng-2021-0001>.
11. Liu M., Xu L., Zhou Zh. Design of a Load Torque Based Control Strategy for Improving Electric Tractor Motor Energy Conversion Efficiency. Mathematical Problems in Engineering, 2016. Vol. 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/2548967>.
12. Slobodian V. M. Obgruntuvaty parametry ta rezhymy roboty elektrotraktora klasu 0,6 na osnovnykh silskohospodarskykh robotakh : dys. ... kand. tekhn. nauk : spets. 05.05.11 / Volodymyr Mykolaiovych Slobodian; nauk. kerivnyk Myronenko V. H. ; Natsionalna akademiia ahrarnykh nauk Ukrainy natsionalnyi naukovyi tsentr «Instytut mekhanizatsii ta elektryfikatsii silskoho hospodarstva». Hlevakha, 2017. 134 s.
13. Seo J.-M., Kim Y.-K., Jung I.-S., Jung H.-K. Permanent magnet synchronous motor for electric tractor of 35 horsepower. IEEE ECCE Asia DownUnder. 2013. pp. 560 – 565. <https://doi.org/10.1109/ECCE-ASIA.2013.6579153>.
14. Jani S.N., Jammani J.G. A comparative study of electric motor for low-power density electric vehicles. Environmental Science and Pollution Research International. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26320-x>.
15. Rachcha A., Mishra A., Shinde K. Smart Electric Tractor. Ijrasnet Journal For Research in Applied Science and Engineering Technology. 2022. Vol. 10 (7). pp. 1145 – 1149. <https://doi.org/10.22214/ijrasnet.2022.46374>.
16. Bianchi N., Bolognani S., Carraro E., Castiello M., Fornasiero E. Electric Vehicle Traction based on Synchronous Reluctance Motors. IEEE Transactions on Industry Applications. 2016. Vol. 52(6). pp. 1 – 8, <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2599850>.
17. Taghavi S. Design of synchronous reluctance machines for automotive applications. Engineering, 2015, 195 p.
18. Osadchuk Yu.H., Kozakevych I.A., Ilchenko R.A. Porivnialnyi analiz asynkronnykh, synkronnykh mashyn z postiinymy mahnitamy ta ventylnykh reaktivnykh dvyhuniv dlia hibrydnykh transportnykh zasobiv [Comparative Analysis of Asynchronous, Synchronous Permanent Magnet Machines and Valve Jet Engines for Hybrid Vehicles]. Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu [Bulletin of Kryvyi Rih National University]. 2016. no 42. pp. 104–109.
19. Gade C.R., Wahab R.S. Conceptual framework for modelling of an electric tractor and its performance analysis using a permanent magnet synchronous motor. Sustainability. 2023. Vol. 15(19). 14391. <https://doi.org/10.3390/su151914391>.
20. Dhond R., Srivastav U., Patil B.T., Vaishnav H. Comparative study of electric tractor and diesel tractor. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1168 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1168/1/012003>.
21. Jurca F.N., Mircea R., Martis C., Martis R., Florin P.P. Synchronous reluctance motors for small electric traction vehicle. International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering. 2014. pp. 317 – 321. <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2014.6969920>.
22. Melo R.R., Antunes F.L.M., Daher S., Vogt H.H., Albiero D., Tofol F.L. Conception of an electric propulsion system for a 9 kW electric tractor suitable for family farming. IET Electric Power Applications. 2019. Vol. 13. Iss. 12. pp. 1993 – 2004. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0353>.
23. Li T., Xie B., Li Z., Li J. Design and optimization of a dual-input coupling powertrain system: a case study for electric tractors. Applied Sciences. 2020. Vol. 10(5). 1608. <https://doi.org/10.3390/app10051608>.
24. Jneid M.S., Harth P., Ficzer P. In-wheel-motor electric vehicles and their associated drivetrains. International Journal for Traffic and Transport Engineering. 2020. Vol. 10(4). pp. 415 – 431. [https://doi.org/10.7708/ijtte.2020.10\(4\).01](https://doi.org/10.7708/ijtte.2020.10(4).01).

Надійшла (received): 05.12.2023 p.

Відомості про авторів / About the Authors

Даниленко Віталій Дмитрович (Vitalii Danylenko) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри автомобіле- і тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2787-3947>; e-mail: vitalii.ddanylenko@gmail.com

Ткачов В'ячеслав Юрійович (Viacheslav Tkachov) – старший викладач кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском, 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

Горбов Олексій Михайлович (Oleksii Horbov) – кандидат технічних наук, доцент, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри озброєння та стрільби, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8326-9413>, e-mail: alex.gorbov@gmail.com