

канд. техн. наук, доцент, докторант Д. О. Кулагін  
Запорізький національний технічний університет

### **Визначення особливостей побудови тягових електроприводів промтранспорту**

*Досліджено особливості побудови систем тягових електроприводів для різних видів та конструкцій рухомих електротехнічних комплексів. Проведено аналіз практичного досвіду побудови систем тягових електроприводів та узагальнення методики визначення структури та параметрів при заданих вимогах з боку рухомого електротехнічного комплексу.*

**Ключові слова:** *електротехнічний комплекс, тяговий привод, методика, автономна система, рух*

**1. Вступ.** Використання тягового електроприводу в порівнянні з гідромеханічними або гідро-об'ємними дозволяє отримати ряд істотних переваг з точки зору використання рухомих електротехнічних комплексів:

- коефіцієнт корисної дії (ККД) на рівні до 90%, який мало залежить від швидкості руху самого електротехнічного комплексу (рис. 1) [1];
- необхідність проведення мінімального обсягу регулярних технічних робіт – перевірка стану вузлів, технічних рідин;
- відсутність необхідності попереднього прогріву системи до певної робочої температури;
- висока паливна економічність;
- можливість вирішення проблеми боксування за рахунок регулювання параметрів електромеханічної трансмісії;
- висока ремонтпридатність – можливо виконувати ремонт заміною блоків та вузлів, а вартість самого ремонту визначається лише вартістю замінюваного блоку;
- дизель в поєднанні з електричною трансмісією працює завжди в майже постійному режимі, що дозволяє забезпечити роботу на економічній паливній характеристиці і тим самим досягти оптимального рівня витрат палива;
- можливість забезпечення оптимальної тягової характеристики за рахунок регулювання засобами електричної трансмісії;

- можливість виконання вільної компоновки частини вузлів електричної трансмісії дозволяє досягти більш раціонального розміщення елементів тягових електроприводів та забезпечити оптимальний розподіл маси по довжині рухомого електротехнічного комплексу;
- зменшені експлуатаційні витрати [2].

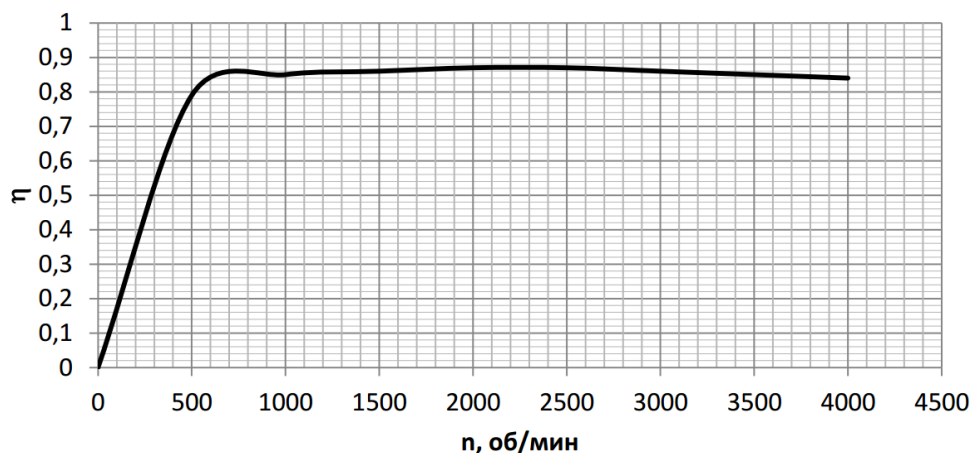


Рис. 1. Залежність ККД тягового двигуна від швидкості обертання вала двигуна

При використанні тягового електроприводу на рухомих електротехнічних комплексах в якості основного механічного рушія з'являються характерні особливості, які зумовлені технологічним призначенням самого комплексу – перевезення пасажирів або перевезення вантажів чи виконання механічної роботи за допомогою навісного обладнання. В обох видах перевозок задаються:

- маса рухомого комплексу;
- максимальна швидкість руху;
- вимоги щодо електричного гальмування;
- умови руху та особливості рушання з місця.

**2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Натепер відсутні готові рішення щодо створення інтелектуальних транспортних технологій та систем. З'являється необхідність удосконалення організації руху транспорту та створення більш продуктивних систем управління транспортом. Потрібен новий узагальнений підхід, нові методи та засоби, що ґрунтуються на безперервному спостереженні за станом усіх підсистем і ланок транспортного комплексу. Доцільним є інтелектуалізація саме транспортних засобів. Це дозволить ефективно вирішувати задачі управління рухом на транспортних сполученнях з урахуванням підготовки завдань розвитку відповідної маршрутної мережі наземного транспорту [3].

Можна виділити три послідовні етапи інформатизації транспортних систем:

- виконання комп'ютерних обчислень для вирішення окремих складових проблем та задач

транспортного типу;

- створення галузевих автоматизованих систем управління рухом, транспортними підприємствами й організаціями, впровадження інформаційних технологій на транспорті;

- обладнання транспортних засобів мехатронними вузлами, агрегатами та системами, розвиток транспортної телематики, інтелектуалізація транспортних машин, систем та шляхів сполучення.

Швидкий розвиток засобів та методів інформатизації складних об'єктів та систем, уніфікація і стандартизація рішень не узгоджуються з гетерогенним характером існуючих підсистем та ланок транспортного комплексу, його інформаційним забезпеченням [3].

**3. Об'єкт, мета та задачі дослідження.** Проведені дослідження ставили за мету визначення особливостей побудови систем тягових електроприводів для різних видів та конструкцій рухомих електротехнічних комплексів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- аналіз практичного досвіду побудови систем тягових електроприводів;

- узагальнення методики визначення структури та параметрів тягових електроприводів при заданих вимогах з боку рухомого електротехнічного комплексу.

**4. Матеріали та методика дослідження.** Зазвичай, параметри рушання з місця для першого виду рухомих електротехнічних комплексів задаються з умови створення максимального прискорення. Параметри рушання другого типу комплексів задаються з умови повного використання зчіпної ваги комплексу: сума всіх навантажень від рушійних чи зчіпних коліс електротехнічного комплексу на відповідний йому шлях використовується для створення сили зчеплення між колесами і шляхом, і дозволяє перетворити кругове зусилля на ободі рухомих коліс в зовнішню силу тяги або гальмівну силу (при дії гальм). Зчіпна вага є важливою складовою характеристикою експлуатаційних якостей електротехнічного комплексу. Максимум результуючого дотичного тягового і гальмівного зусиль пропорційний зчіпній вазі, і характеризується коефіцієнтом зчеплення. Зчіпна вага розраховується без врахування її можливої зміни під час руху, оскільки при русі вона лише перерозподіляється по рухомих осях. При цьому ланки головного енергетичного ланцюга та кіл керування повинні забезпечувати всі експлуатаційні режими роботи рухомого електротехнічного комплексу при повній надійності роботи окремих елементів структури.

До електричних машин, трансформаторів та тягових перетворювачів частоти встановлюються наступні вимоги [4]:

- вони не повинні втрачати робочого стану при допустимих в експлуатації відхиленнях напруги живлення від номінальних параметрів;

– вони повинні мати найменш можливу масу, бо вони встановлюються на рухомих об'єктах, проте розміри їх повинні бути повністю узгоджені з компоновкою екіпажної частини.

Необхідний пусковий момент двигуна зазвичай перевищує номінальний в 1,5–2 рази, а в умовах роботи на лінії короткочасна потужність двигуна може перевищувати в 1,5–2 рази його номінальну годинну потужність, що призводить до необхідності забезпечення роботи двигуна при значних величинах струмів [5]. Зазвичай двигуна автономних електротехнічних комплексів хоча і працюють без перевантажень за потужністю, проте мають значні перевантаження за струмом та моментом [6].

Одночасне вирішення двох задач – створення значного тягового зусилля та забезпечення високої конструкційної швидкості є можливим шляхом використання редуктора з перемиканням на два передаточних числа або використанням двигуна з компенсаційною обмоткою, який допускає значне ослаблення поля для розширення меж регулювання частоти обертання. Вибір оптимального передаточного числа тягового редуктора значним чином впливає на конструктивні параметри елементів тягових електроприводів і є вихідним моментом при проектуванні будь-якої одиниці рухомого електротехнічного комплексу. Хоча, на сьогодні існують конструкції редукторів з багатоступінчатою зміною передаточного числа. Даний тип приводу широко використовується на об'єктах електротранспорту Швейцарії і припускає використання двосторонньої зубчастої передачі з вибором більшого передаточного числа, ніж звичайний тяговий редуктор, що є особливо важливим для вантажних локомотивів, вантажівок, тракторів з тяговою електричною передачею.

Для електротехнічних комплексів, орієнтованих в основному на перевезення вантажів чи виконання механічної роботи за допомогою навісного обладнання з використанням опорно-осьових двигунів бажаним є використання зубчастої передачі з найбільшим передаточним числом [7]. Завдяки цьому тяговий двигун встановлюється більш бистрохідний, меншої маси та габаритів. Обмежують значення передаточного числа, з одного боку, величина кліренсу при прийнятому діаметрі приводного колеса, а з другого боку, механічна напруга в тілі шестерні та на кінці вала двигуна. Значення кліренсу для рейкового транспорту – тобто величина перевищення кожуха зубчастої передачі над головою рейки – є величиною нормованою. Для нерейкового транспорту дана величина визначається конструктивними особливостями та компоновкою тягових електроприводів. Найбільше передаточне число отримують при найбільшому можливому діаметрі великого зубчастого колеса по колу ділення та при найменшому діаметрі шестерні.

Рухомі електротехнічні комплекси класифікують за видами тягової передачі (електрична, гідравлічна або механічна), а також в залежності від конструкційної швидкості [8]. На

автономному залізничному транспорті розповсюджених серій, важких вантажних автомобілях та тракторах використовується, як правило, гідравлічна або електрична тягова передача. Передача потужності від дизеля до колісної пари повинна мати високу надійність і довговічність, мінімальні розміри, масу й вартість, високий коефіцієнт корисної дії ККД в усіх режимах роботи, мінімальні витрати на обслуговування й ремонт. Для сучасних електричних передач характерне збільшення потужності при збереженні майже тих же габаритних розмірів і зменшенні питомих мас елементів передачі. На електричному транспорті застосовують електричні передачі потужності на постійному, змінно-постійному і змінному струмах [9]. Переважне поширення у світовій практиці має тяговий електропривод на постійному струмі. Це пов'язано з тим, що ККД електричної передачі постійного струму при тривалому режимі роботи на швидкості до 160 км/год складає 84-86 %. Але при швидкості роботи понад 160 км/год передача постійного струму поступається передачі змінного струму за ККД та енергетичними показниками. Передача постійного струму має більшу перевантажувальну здатність, дозволяє легко й порівняно просто автоматизувати процеси регулювання й керування силою тяги та швидкістю руху. Передача складається з тягового генератора постійного струму й тягових двигунів постійного струму. Такі передачі найбільш прості за своєю конструкцією, не мають проміжних перетворювальних ланок (за виключенням систем, які працюють від тягового генератора змінного струму), мають високий ККД. Проте, при збільшенні потужності дизеля під час модернізації такі системи потребують збільшення розмірів тягових машин, що значно ускладнює вписування їх у габарити тягової електропередачі. Крім того, підвищення потужності тягових генераторів постійного струму приводить до різкого зниження їх надійності. Передачі постійного струму застосовуються на тепловозах, що мають секційну потужність до 2200 кВт (тепловози ТЭ1, ТЭ2, ТЭМ1, ТЭМ2, ЧМЭЗ, ТЭЗ, ТЭ10 і ін.), на електромобілях, електротракторах (ДЭТ-250, ДЭТ-320), автобусах з електричною трансмісією (ГМС, ЗИС), важких кар'єрних самоскидах «БЕЛАЗ». Передача змінно-постійного струму використовується на вантажному транспорті великої потужності [4]. У передачах змінно-постійного струму в якості тягового генератора застосовується синхронний генератор змінного струму, який при таких же розмірах, що і генератор постійного струму, має більшу потужність і надійність.

У передачах змінно-постійного струму використовуються тягові двигуни постійного струму, тому між генератором і двигунами встановлюють перетворювальну ланку постійного струму. Випрямлячі, зібрані на основі некерованих напівпровідникових силових діодів, задовольняють більшість вимог щодо умов роботи на автономному залізничному транспорті, більшості рухомих електротехнічних комплексів даної категорії. У зв'язку з встановленням випрямляча ККД передачі зменшується, однак висока експлуатаційна

надійність синхронного генератора і тягового випрямляча компенсує це зниження. Такі передачі застосовуються на електротехнічних комплексах з потужністю дизеля 1470 – 4400 кВт (тепловози ТЭМ7, 2ТЭ116, ТЭП70 і ін.).

На електротехнічних комплексах постійного та змінно-постійного струму застосовують тягові електродвигуни постійного струму з послідовним збудженням. Використання цих двигунів забезпечує автоматичне регулювання оборотів якоря від величини прикладеної напруги і потоку збудження, та не залежать від частоти обертання вала дизельної установки. Застосування двигунів постійного струму незалежного збудження, поліпшує використання зчіпної ваги комплексу, підвищує коефіцієнт зчеплення зі шляхом, але при цьому виникає потреба у встановленні спеціального обладнання, що дозволяє регулювати силу тяги залежно від швидкості руху.

В умовах модернізації рухомого складу залізниць світу та нових підходів до побудови рухомих електротехнічних комплексів, збільшення швидкостей руху понад 160 км/год все частіше використовується тяговий електропривод змінного струму [4, 6]. До того ж електротехнічні комплекси з тяговою передачею змінного струму за тої ж маси що й з іншими видами передач розвивають більшу силу тяги, що дозволяє використовувати менше число моторизованих осей за тієї ж маси всього комплексу. Найбільш оптимальною тяговою характеристикою, що максимально наближається до ідеальної характеристики, мають рухомі електротехнічні комплекси з електричною передачею (трактори, тепловози, дизель-поїзди, автобуси, комбайни, важкі вантажні автомобілі) в порівнянні з аналогічними машинами, на яких встановлено механічну або гідравлічну передачу потужності.

Незважаючи на високу вартість, велику вагу, значну витрату кольорових металів, складність в обслуговуванні електричною передачею обладнано близько 80% світового парку тепловозів та майже 98% парку електромобілів, електротракторів та комбайнів. Це пояснюється тим, що такий тип тягової передачі за багатьма показниками є найбільш ефективним для виконання широкого кола технічних задач, що ставляться перед вказаними комплексами:

- забезпечує високий ККД і надійність в експлуатації;
- забезпечує більші міжремонтні пробіги, повне використання потужності дизеля в широкому діапазоні швидкостей руху;
- дозволяє здійснювати автоматичне регулювання сили тяги та швидкості руху.

Основою надійної, безпечної та ефективної роботи електротехнічних комплексів є правильна робота не тільки тягового обладнання, але й різних допоміжних систем. Рухомі електротехнічні комплекси мають порівняно високі витрати енергії на допоміжні потреби.

Усереднені дані про співвідношення витрат енергії на забезпечення тягового процесу та власні потреби наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики співвідношення споживання енергії на забезпечення власних потреб та виконання тягової роботи

Тип електротехнічного комплексу	Відсоток споживання загальної потужності на забезпечення тягової роботи (межове значення)	Відсоток споживання загальної потужності на забезпечення власних потреб (межове значення)
Електрорухомий склад залізниць постійного струму	55	45
Електрорухомий склад залізниць змінного струму	60	40
Автономний електрорухомий склад залізниць	70	30
Метрополітен	80	20
Міський електрорухомий склад	80	20
Кар'єрні та шахтні електровози	92,75	7,25
Трактори з електричною трансмісією	70	30
Комбайни з електричною трансмісією	75	25
Електромобілі	85	15
Автобуси з електричною трансмісією	75	25
Важкі самоскиди	90	10
Морські судна	85	15

Подальше збільшення потужності рухомих електротехнічних комплексів можливе тільки при заміні тягових електродвигунів постійного струму на двигуни змінного струму. Передача змінного струму є перспективною завдяки простоті, дешевизні й надійності асинхронних тягових двигунів з короткозамкненим ротором, але для створення оптимальної

тягової характеристики потрібно регулювання напруги й частоти живлячого струму, тобто створення системи керування та встановлення перетворювальної системи.

Характеристики споживання енергії електроустановкам різних груп відображено в табл. 2. В табл. 2 споживачів власних потреб було умовно розділено на три групи:

1. Електродвигуни охолодження холодильної камери, тягових електродвигунів, високовольтної камери, привод мотор-компресора.

2. Системи автоматики та зв'язку, регулювання і діагностики електротехнічного комплексу, живлення допоміжних електричних апаратів, системи освітлення, інші малопотужні споживачі.

3. Загальна шина постійного струму, опалення й кондиціонування.

Таблиця 2

Характеристика споживання потужності власних потреб по групах споживачів

Група споживачів власних потреб	1	2	3
Напруга живлення споживачів	середня у порівнянні з напругою тягової мережі	низька у порівнянні з напругою тягової мережі	висока у порівнянні з напругою тягової мережі
Потужність споживачів	до 30% загальної потужності власних потреб	до 25% загальної потужності власних потреб	до 45% загальної потужності власних потреб
Вимоги до стабільності напруги живлення	відхилення до 20%	відхилення до 5%	відхилення до 30%
Вимоги щодо електромагнітної сумісності	середні	високі	низькі
Вимоги щодо перевантажувальної здатності джерела живлення	перевантаження до 30%	відхилення до 10%	відхилення до 15%

Таким чином, потужність власних потреб становить значну частину від загальної потужності, що відбирається від дизеля.



На електровозах і моторвагонному рухомому складі застосовують наступне допоміжне обладнання:

- мотор-компресори для живлення стисненим повітрям гальмівної системи і електропневматичної апаратури;
- мотор-вентилятори для примусової вентиляції устаткування з метою одержання високих значень потужності локомотива при мінімізації його маси.
- мотор-вентилятори для подачі повітря в пасажирські приміщення з метою опалення (це повітря попередньо нагрівається калориферами опалення);
- генератори для живлення кіл керування та освітлення, зарядки акумуляторних батарей;
- мотор-генератори, що встановлюються на електровозах постійного струму з рекуперативним гальмуванням для живлення обмоток збудження тягових двигунів у режимі рекуперації;
- розщеплювачі фаз для електрорухомого складу змінного струму;
- машинні перетворювачі для живлення трифазних асинхронних двигунів допоміжних машин і інших споживачів трифазного струму;
- масляні та водяні насоси, які забезпечують циркуляцію рідини в системі охолодження тягових трансформаторів, реакторів тягових електроприводів;
- системи живлення бортової керуючої системи;
- дільники напруги для живлення електродвигунів допоміжних машин, розрахованих на меншу напругу, генераторів керування.

На всіх типах електрорухомого складу постійного струму коло опалення підключено безпосередньо до контактної мережі. На пасажирських електровозах змінного струму (ЧС4, ЧС8) передбачена окрема вторинна обмотка головного трансформатора напругою 3 кВ для електричного опалення вагонів. Опалення пасажирських салонів електропоїздів змінного струму ЕР9 здійснюється від окремої обмотки головного трансформатора напругою 600 В. На дизель-поїздах змінного струму передбачена загальна шина постійного струму, до якої підключено систему опалення вагонів. На електромобілях, електротракторах, комбайнах система опалення підключається аналогічно до схеми ввімкнення дизель-поїздів змінного струму.

На електровозах постійного струму для привода допоміжних машин застосовують електродвигуни постійного струму послідовного збудження, які підключено безпосередньо до контактної мережі напругою 3 кВ. Така система має найпростішу електричну схему, але електродвигуни постійного струму потужністю до 50 кВт при такій напрузі дуже важкі та мають значні габарити.

Для спрощення системи допоміжних машин на електропоїздах постійного струму нових типів використовують мотор-генератор, що містить один електродвигун постійного струму 3 кВ і генератор трифазного змінного струму напругою 380 В. Від цього генератора одержують живлення асинхронні трифазні електродвигуни всіх допоміжних пристроїв.

Трифазні асинхронні машини для привода допоміжних навантажень застосовують також на електровозах і електропоїздах змінного струму. На пасажирських електровозах змінного струму ЧС4 і ЧС8 у якості допоміжних машин використовують електродвигуни постійного струму, що живляться через випрямлячі.

У тепловозах живлення допоміжного електричного устаткування здійснюється за допомогою трифазної мережі живлення, що має назву мережі забезпечення комфорту й призначеної винятково для цього типу обладнання. До цих навантажень забезпечення комфорту відносяться, зокрема, побутові прилади, нагрівальні прилади або кондиціонери.

Допоміжна мережа автономних поїздів живлення одержує через надлишковий вузол із двох окремих перетворювачів забезпечення комфорту, які мають ідентичну конструкцію та кожний з яких забезпечує живлення половини мережі. У випадку несправності одного із двох перетворювачів інший перетворювач бере на себе живлення всієї мережі й забезпечує, таким чином, достатнє живлення для задоволення потреб комфорту пасажирів [10].

## **Висновки**

В результаті проведеного аналізу отримала подальший розвиток методика визначення структури та параметрів тягових електроприводів промтранспорту шляхом врахування заданих вимог з боку виконавчого механізму, внаслідок чого отримано аналітичні вимоги для різних груп рухомих комплексів щодо особливостей побудови тягових електроприводів, вибору виду двигуна тягових електроприводів з урахуванням розподілу потоків енергії на тягові потреби та забезпечення власних потреб, що дозволяє визначити оптимальну структуру тягових приводів, що є важливим для транспортного машинобудування.

## **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Wasynczuk O. A maximum torque per ampere control strategy for induction motor drives. / Wasynczuk O., Sudhoff S. D., Corzine K. A., Tichenor J. L., Krause P. C., Hansen I. G., Taylor L. M. // IEEE Transactions on energy conversion. – 1998. – vol. 13, № 2. – P. 163-169.
2. Petrov L. P. Die Modellierung der Energieverluste in Asynchronmotoren unter Beachtung der elektromagnetischen Ubergangsprozesse / Petrov L. P. // Elektrische. – v34. – №7. – 1980. – P. 375-379.
3. Florentsev S. N. Traction Electric Equipment Set for AC Electric Transmission Various Vehicles // Proceedings of International Exhibition & Conference “Power Electronics, Intelligent Motion. Power Quality (PCIM-2009). 12 – 14 May 2009. Nuremberg, Germany. – P. 625-627.

4. Кулагін Д. О. Проектування систем керування тяговими електропередачами моторвагонних поїздів : монографія / Д. О. Кулагін. – Бердянськ : ФО-П Ткачук О. В., 2014. – 154 с.
5. Ali Emadi, Energy-Efficient Electric Motors: Selection and Applications / Ali Emadi. – New York. – NY : Marcel Dekker, 2004. – 424 p.
6. Кулагін Д. О. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення магнітних кіл / Кулагін Д. О. // Науковий вісник НГУ. – 2014. – № 6. – С. 103–110.
7. Кулагін Д. О. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення / Кулагін Д. О. // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 6. – С. 49–55.
8. Boldea I. Induction Machines Handbook. / Ion Boldea, Syed A. Nasar. – CRC Press Boca Raton : London, New York, Washington, D.C, 2002. – 845 p.
9. El-Sharkawi Mohamed A. Fundamental of electric drivers / Mohamed A. El-Sharkawi. – Brooks : Cole production, 2000. – 400 p.
10. Greg C. Stone, Electrical insulation for rotating machines / Greg C. Stone, Hussein Dhirani, Edwards A. Boulter, Ian Culbert. – A John Wiley & Sons, inc., 2004. – 392 p.

#### **Кулагин Д.А. Определение особенностей построения тяговых электроприводов промтранспорта**

*Исследованы особенности построения систем тяговых электроприводов для различных видов и конструкций подвижных электротехнических комплексов. Проведен анализ практического опыта построения систем тяговых электроприводов и обобщения методики определения структуры и параметров при заданных требованиях со стороны подвижного электротехнического комплекса.*

**Ключевые слова:** электротехнический комплекс, тяговый привод, методика, автономная система, движение

#### **Kulagin D. O. The defining features of construction of the traction electric industrial transport**

*The paper investigates features of electric traction systems for different types and designs of mobile electrical systems. The analysis of practical experience in building electric traction systems and synthesis methods for determining the structure and parameters for given requirements by moving electrical industry. The analysis further developed a method of determining the structure and parameters of electric traction rolling electrical complex by taking into account the*

*requirements set by the actuator, so that the analytical requirements for different groups of mobile systems on the specifics of building electric traction, traction engine of choice in electric distribution based energy flows on traction needs and their own needs, to determine the optimal structure of such traction motors.*

**Keywords:** *Electrical Complex, traction drive, methodology, autonomous system, motion*

## REFERENCES

1. Wasynczuk O. (1998) A maximum torque per ampere control strategy for induction motor drives. / Wasynczuk O., Sudhoff S. D., Corzine K. A., Tichenor J. L., Krause P. C., Hansen I. G., Taylor L. M. // IEEE Transactions on energy conversion, 2, 163–169.
2. Petrov L. P. (1980) Die Modellierung der Energieverluste in Asynchronmotoren unter Beachtung der elektromagnetischen Übergangsprozesse / Petrov L. P. // Elektrie, 7, 375-379.
3. Florentsev S. N. (2009) Traction Electric Equipment Set for AC Electric Transmission Various Vehicles // Proceedings of International Exhibition & Conference “Power Electronics, Intelligent Motion. Power Quality (PCIM-2009). 12 – 14 May 2009. Nuremberg.Germany, 625–627.
4. Kulagin D. O. (2014) Proektuvannia system keruvannia tiahovymy elektroperedachamy motorvahonnykh poizdiv : monohrafiia / D. O. Kulahin. – Berdiansk : FO-P Tkachuk O. V.
5. Ali Emadi (2004), Energy-Efficient Electric Motors: Selection and Applications / Ali Emadi. – New York. – NY : Marcel Dekker.
6. Kulagin D. O. (2014) Matematychna model tiahovoho asynkhronnoho dvyhuna z urakhuvanniam nasychennia mahnitnykh kil / Kulahin D. O. // Naukovyi visnyk NHU, 6, 103–110.
7. Kulagin D. O. (2004) Matematychna model tiahovoho asynkhronnoho dvyhuna z urakhuvanniam nasychennia / Kulahin D. O. // Tekhnichna elektrodynamika, 6, 49–55.
8. Boldea I. (2002) Induction Machines Handbook. / Ion Boldea, Syed A. Nasar. – CRC Press Boca Raton : London, New York, Washington, D.C.
9. El-Sharkawi Mohamed A. (2000) Fundamental of electric drivers / Mohamed A. El-Sharkawi. – Brooks : Cole production.
10. Greg C. Stone (2004), Electrical insulation for rotating machines / Greg C. Stone, Hussein Dhirani, Edwards A. Boulter, Ian Culbert. – A John Wiley & Sons, inc.