

УДК 621.314.5:681.5:621.313.3

## ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ДЛЯ ПОБУДОВИ СИСТЕМ РУХОМИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

Д.О. Кулагін, Б.С. Чернецький

## ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ПОДВИЖНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Д.А. Кулагин, Б.С. Чернецкий

## THE CHOICE OF TRACTION MOTORS FOR BUILDING SYSTEMS FOR MOBILE ELECTRICAL SYSTEMS

D.O. Kulagin, B.S. Chernetskiy

*Досліджено особливості вибору тяговий електродвигунів для різних видів та конструкцій рухомих електротехнічних комплексів. Проведено аналіз практичного досвіду побудови систем тягових електроприводів на основі обраного тягового двигуна та узагальнення методики визначення параметрів двигунів при визначених вимогах щодо показників руху з боку електротехнічного комплексу.*

*Ключові слова: тяговий двигун, електротехнічний комплекс, тяговий привод, методика*

*Исследованы особенности выбора тяговых электродвигателей для различных видов и конструкций подвижных электротехнических комплексов. Проведен анализ практического опыта построения систем тяговых электроприводов на основе выбранного тягового двигателя и обобщена методика определения параметров двигателей при определенных требованиях относительно показателей движения со стороны электротехнического комплекса.*

*Ключевые слова: тяговый двигатель, электротехнический комплекс, тяговый привод, методика*

### 1. Вступ

Вибір того або іншого тягового електродвигуна для побудови системи тягових електроприводів насамперед, залежать від області застосування рухомого електротехнічного комплексу і вимог, поставлених до нього з боку основного технологічного процесу.

Незважаючи на те, що кожна тяговий електропривод має свої власні вимоги до системи керування й має оптимальні характеристики лише в певному діапазоні частот обертання, до неї пред'являються наступні основні вимоги:

– простота виготовлення;

- надійність;
- зручність обслуговування;
- легкість регулювання показників роботи та системних параметрів;
- простота системи керування;
- високий обертовий момент у всьому діапазоні частот обертання;
- можливість здійснення рекуперативного гальмування;
- високий коефіцієнт корисної дії (ККД).

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Завдяки широкому застосуванню результатів досліджень з мехатроніки сьогодні на транспорті можна виділити спеціальний напрям розвитку цієї галузі науки – транспортну мехатроніку [1]. Вона присвячена аналізу проблем сполучення та організації взаємодії транспортних електромеханічних й електронних вузлів, агрегатів та телематичних приладів та систем у процесі експлуатації транспортних машин для отримання синергетичного ефекту [2]. Тому мехатроніка та телематика на основі синергетики транспортних машин та систем є основною складовою новітніх інформаційно-комунікаційних технологій.

Проте, на сьогодні майже відсутні сучасні дослідження щодо особливостей побудови різних типів тягових електроприводів для рухомих об'єктів з урахуванням останніх досягнень у побудові тягових перетворювачів.

Електричні передачі знаходять застосування в основному на машинах великої потужності. Застосовуються електромеханічні трансмісії постійного і змінного струму. Електромеханічні трансмісії мають наступні переваги:

- можливість плавної, безступінчастої зміни крутного моменту;
- спрощена механічна частина приводу;
- більша екологічна безпечність (для машин з гідروпередачами, механічними передачами частою є ситуація з витіканням мастила, яке потрапляючи у ґрунт створює значну небезпеку для сільськогосподарських угідь);
- первинний двигун працює в оптимальному, майже сталому, режимі роботи;
- можливість використання електричних способів гальмування, що дозволяє зменшити знос механічних частин гальмівної системи машини;
- менша маса трансмісії на одиницю маси машини для комплексів з двигуном потужністю понад 700 кВт.

## **3. Об'єкт, ціль та задачі дослідження**

Проведені дослідження ставили за мету визначення особливостей вибору тягових двигунів для різних видів рухомих електротехнічних комплексів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- аналіз практичного досвіду вибору тягових двигунів;
- узагальнення методики визначення виду та параметрів тягових двигунів при заданих вимогах з боку рухомого електротехнічного комплексу.

#### **4. Матеріали та методика дослідження особливостей вибору виду тягових електродвигунів**

При порівнянні різних варіантів тягових електроприводів електротехнічних комплексів їх ККД поряд із власною масою є одним з вирішальних факторів, тому що застосовувані первинні джерела енергії – тягові акумуляторні батареї, дизельні установки чи конденсаторні системи мають обмежений запас енергії й значну масу.

При всіх перевагах тягових електроприводів з тяговими електродвигунами постійного струму відзначимо їхній основний і помітний недолік – наявність механічного контакту в щітково-колекторному вузлі тягового електродвигуна.

Тому, незважаючи на складну й дорогу систему регулювання тягового електропривода з тяговим електродвигуном змінного струму (асинхронними й синхронними) тягові електроприводи постійного струму виявляються більш надійними, легкими й довговічними.

Переваги асинхронних тягових електродвигунів були реалізовані фірмою General Motors, яка першою використовувала їх на своїх дослідних електромобілях [3].

Тягові електроприводи із синхронними тяговими електродвигунами виконуються за схемою вентильного двигуна, у якому легко забезпечується робота з  $\cos\phi=1$  і, більше того, при необхідності, з  $\cos\phi<1$ .

Можливість безконтактного варіанта тягового електропривода, мінімізація втрат, надійність системи ставлять завдання застосування в зазначених тягових електроприводах двигунів зі збудженням від постійних магнітів за структурою вентильного електропривода.

Для забезпечення мінімальних маси й габаритів вентильного двигуна зі збудженням від постійних магнітів необхідно вибирати багатополосний ротор з  $2p \geq 6$  (де  $2p$  – число полюсів ротора), при цьому найкращого результату, у змісті зазначеного вище мінімуму, одержимо застосуванням для збудження висококоерцитивних постійних магнітів, до яких відносяться магніти з фериту барію або стронцію, рідкісноземельних елементів плюс кобальт і неодим-залізо-бор. Для таких постійних магнітів встановлено, що їх доцільно застосовувати в конструкціях ротора з паралельним включенням постійних магнітів по магнітному потоку: у кігтьоподібному роторі або з колекторним розміщенням постійних магнітів [4].

#### **5. Результати дослідження вимог щодо вибору тягових двигунів**

Порівняння робочих характеристик двигунів показує, що двигун постійного струму показує більш вигідні для рухомих електротехнічних комплексів характеристики ніж асинхронний лише при тривалій роботі на низьких швидкостях і для широкого діапазону швидкостей при постійній потужності, що є більш характерним для вантажоперевезення та виконання важкої механічної роботи. Перевантажувальна здатність у короткочасному режимі залежить не тільки від параметрів двигуна, але у значній степені від характеристик перетворювача частоти. Чим ширшим є діапазон швидкостей, у якому двигун може видати максимальну потужність, тим оптимальніше такий двигун може бути адаптований

до процесів, що вимагають забезпечення постійного моменту у всім діапазоні швидкостей [5].

Двигуни постійного струму мають значно меншу висоту осі обертання і масу ротора, ніж асинхронні двигуни [6], і отже мають більш низький момент інерції ротора, що є істотною перевагою у динамічних системах, тому що це впливає на час розгону і динамічний відгук двигуна у всіх чотирьох квадрантах роботи під час розгінних та гальмівних процесів.

Більш низькі маса й габарити двигунів постійного струму (стандартний ступінь захисту IP 23) у порівнянні з асинхронними двигунами (стандартний ступінь захисту IP 54) особливо важливі для електротехнічних комплексів, у яких двигун повинен переміщатися разом з вантажем в системах, де важливо компактне розміщення.

Основним недоліком аналогових електроприводів постійного струму є низька завадостійкість, складність у настроюванні й нестабільність параметрів. У якості датчика зворотного зв'язку по швидкості застосовується тахогенератор, що має ті ж недоліки, що і звичайний колекторний двигун.

Для реверсивних тягового електроприводу після тахогенератора доводиться встановлювати спеціальну діодну систему на основі містка, що обмежує діапазон регулювання на малих швидкостях через особливості сигналу зворотного зв'язку [7].

Сучасні мікроконтролери, що управляють частотним перетворювачем та тяговим електродвигуном, дозволяють обробляти дані за період у кілька десятків мікросекунд, що дозволило розширити діапазон регулювання зі зворотним зв'язком до 1:1000 з точністю підтримки швидкості 0,2 оберту у всім діапазоні. Це наближає частотні приводи за якістю характеристик до сервоприводів. Основу інформаційних підсистем сучасних тягового електроприводу, як правило, складають мікроконтролерні пристрої, що мають ряд істотних переваг в порівнянні з аналоговими пристроями керування, які реалізують типові арифметичні і логічні функції, обробку масивів, регулювання електромагнітних і механічних змінних, стабілізацію, корекцію і компенсацію нелінійностей, спостереження, імітацію об'єкта керування і обробку законів роботи.

Сучасні мікроконтролери є однокристальними електронно-обчислювальними машинами, цифровими сигнальними процесорами, адаптованими до завдань керування в реальному часі з цілим рядом інтегрованих пристроїв:

- аналого-цифрові перетворювачі для введення сигналів аналогових давачів;
- формувачі вихідних широтно-імпульсних сигналів для прямого цифрового керування силовими перетворювачами;
- порти для сполучення з системами керування більш високого рівня.

Серед переваг мікроконтролерів слід назвати:

- гнучкість (можливість оперативної зміни структури, законів і параметрів системи керування);
- можливість реалізації разом з традиційними законами керування, прийнятими в аналогових системах, складніших методів для використання в

адаптивних, самоналагоджувальних, взаємозв'язаних і багатоконтурних системах керування;

– оперативне тестування і діагностика поточного стану системи автоматичного керування та її елементів, що сприяє ранньому виявленню несправностей та попередженню аварій;

– висока точність обробки інформації (в цифрових системах похибки, характерні для аналогових керуючих пристроїв, відсутні);

– можливість фіксації, зберігання і візуалізації масивів параметрів процесів керування, оперативної взаємодії з обслуговуючим персоналом;

– висока надійність, зменшена маса та габарити мікроконтролерних і комп'ютерних систем керування в порівнянні з аналоговими системами.

Наявність в складі мікроконтролерів великого об'єму пам'яті дозволяє реалізувати складні послідовності обробки даних і робити енергетичні об'єкти доступними за широким комплексом інформації з мікроконтролерів, що може характеризувати дані об'єкти. При цьому, навіть за використання відомих методів прямого вимірювання необхідних для керування величин, стає можливим, маючи невелике число давачів (переважно електричних величин) і, відповідно, каналів збору первинної інформації, визначати необхідну додаткову інформацію за допомогою обчислень в реальному часі. Така тенденція підкріплюється наявністю недоліків підходу прямого використання значної кількості давачів для вирішення завдань регулювання в системах змінного струму:

– високі вимоги до роздільної здатності первинних вимірювачів;

– необхідність побудови додаткових гальванічних розв'язок для підключення давачів;

– складність сполучення різних систем давачів в одному контурі регулювання.

Перехід до цифрового керування відкриває можливості реалізації складних законів керування, які раніше було практично неможливо застосовувати.

Інші типи електродвигунів змінного струму (синхронні, індукторні), у багатьох аспектах поступаються асинхронному двигуну за якістю характеристик, проте продовжують вивчатися стосовно до використання в тягових системах

Виконаємо порівняльний аналіз різних типів двигунів однієї потужності (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняльні характеристики тягових електродвигунів

Тип двигуна	Маса, кг	Середній ККД	Відносна вартість
Колекторний, постійного струму	99	0,84	1,0
Асинхронний, з коротко замкненим ротором	45	0,935	0,26
Синхронний з електромагнітним порушенням	55	0,93	0,32
Синхронний з постійними магнітами	45	0,935	0,26

Синхронний дисковий з постійними магнітами	34	0,96	0,20
--	----	------	------

З наведеної таблиці видно, що за однієї встановленої потужності тягового двигуна двигуни змінного струму мають значно меншу масу та вартість при більш високому ККД, ніж двигун постійного струму.

## **6. Обговорення результатів дослідження вимог щодо побудови тягових електроприводів**

Згідно з існуючими рекомендаціями щодо проектування тягових систем [3, 5, 8-10], потужність тягового привода визначають виходячи з умови забезпечення заданого середнього прискорення до певної швидкості.

Далі на підставі розрахунків середньоквадратичного струму на еквівалентній ділянці шляху визначають потужність тривалого режиму роботи тягових електроприводів.

Слід звернути увагу на наступне: основний режим роботи рухомого електротехнічного комплексу – це рух з експлуатаційною або близькою до неї швидкостями. Тому на такому електротехнічному комплексі слід застосовувати привод, який забезпечує оптимальні енергетичні показники в зазначеному режимі роботи.

При виборі потужності тягового привода також слід приділяти увагу конфігурації електротехнічного комплексу. Закордонний досвід показує, що техніко-економічні й споживчі властивості рухомих електротехнічних комплексів визначаються умовами їх експлуатації.

Як правило, компанії купують невеликі по чисельності серії певних електротехнічних комплексів. Однак ці системи сконструйовані й обладнані з врахуванням всіх специфічних вимог замовника.

В таких умовах для істотного зменшення капітальних витрат була запропонована й одержала широкий розвиток концепція модульних платформ, коли рухомий електротехнічний комплекс фактично комбінується зі стандартного ряду уніфікованих модулів різного призначення. Сьогодні це типовий розв'язок, пропонований практично всіма провідними світовими виробниками електротехнічних комплексів для перевезення пасажирів, вантажу, виконання сільськогосподарських робіт, тощо.

## **7. Висновки**

В результаті проведеного аналізу отримала подальший розвиток методика визначення типу та параметрів тягових двигунів рухомого електротехнічного комплексу шляхом врахування заданих вимог з боку виконавчого механізму. Зокрема, проведено аналіз практичного досвіду вибору тягових двигунів та узагальнення методики визначення виду та параметрів тягових двигунів при заданих вимогах з боку рухомого електротехнічного комплексу, що дозволяє проводити точний вибір типу та параметрів двигуна в залежності від умов експлуатації електротехнічного комплексу.

## Література

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 Modelierung 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.

## 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 Modelierung der Energieverluste in Asynchronmotoren unter Beachtung der elektromagnetischen Ubergangsprozesse / Petrov L. P. // Elektrische, 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.

*The features selection traction motors for different types and designs of mobile electrical systems. The analysis further developed a method of determining the type and parameters of electrical traction engines rolling complex by taking into account the requirements set by the actuator. In particular, the analysis of practical experience choosing traction engines and synthesis methods determined the type and parameters of traction engines at the set requirements of the first movable electrical complex, allowing for accurate selection of the type and engine parameters depending on the operating conditions of electrical complex. For a significant decrease in capital expenditures was proposed concept of modular platforms when moving electrical complex in fact combined with the standard series of standardized modules for different purposes.*

*Keywords: traction motors, electrical complex, traction drive, method*

Кулагін Дмитро Олександрович  
Кандидат технічних наук, доцент, докторант  
Кафедра «Електропостачання промислових підприємств»  
Запорізький національний технічний університет  
вул. Жуковського 64, м. Запоріжжя, Україна, 69063  
E-mail: kulagindo@gmail.com  
Контактний тел.: 066-236-52-71  
Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 35  
Кількість статей у міжнародних базах даних – 23  
Номер ORCID: [http:// orcid.org/ 0000-0003-3610-4250](http://orcid.org/0000-0003-3610-4250)

Чернецький Богдан Сергійович  
аспірант

Кафедра «Електропостачання промислових підприємств»  
Запорізький національний технічний університет  
вул. Жуковського 64, м. Запоріжжя, Україна, 69063  
E-mail: Bogdan\_chernetskiy@yandex.ru  
Контактний тел.: 050-778-50-09  
Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 1  
Кількість статей у міжнародних базах даних – 0  
Номер ORCID: [http:// orcid.org/ 0000-0002-9864-663X](http://orcid.org/0000-0002-9864-663X)

Кулагин Дмитрий Александрович  
Кандидат технических наук, доцент, докторант  
Кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий»  
Запорожский национальный технический университет  
ул. Жуковского 64, г. Запорожье, Украина, 69063  
E-mail: kulagindo@gmail.com  
Контактный тел.: 066-236-52-71  
Количество статей в общегосударственных базах данных – 35  
Количество статей в международных базах данных – 23  
Номер ORCID: [http:// orcid.org/ 0000-0003-3610-4250](http://orcid.org/0000-0003-3610-4250)

Чернецкий Богдан Сергеевич  
аспирант  
Кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий»  
Запорожский национальный технический университет  
ул. Жуковского 64, г. Запорожье, Украина, 69063  
E-mail: Bogdan\_chernetskiy@yandex.ru  
Контактный тел.: 050-778-50-09  
Количество статей в общегосударственных базах данных – 1  
Количество статей в международных базах данных – 0  
Номер ORCID: [http:// orcid.org/ 0000-0002-9864-663X](http://orcid.org/0000-0002-9864-663X)

Kulagin Dmitro Oleksandrovich  
Candidate of technical Sciences, associate Professor, doctoral student  
The Department "Power Supply of industrial enterprises"  
Zaporizhzhya national technical University  
street Zhukovsky 64, Zaporozhye, Ukraine, 69063  
E-mail: kulagindo@gmail.com  
Contact phone: 066-236-52-71  
The number of articles in national databases – 35  
The number of articles in international databases – 23  
The number ORCID: [http:// orcid.org/ 0000-0003-3610-4250](http://orcid.org/0000-0003-3610-4250)

Chernetskiy Bogdan Sergeevich  
graduate student  
The Department "Power Supply of industrial enterprises"

Zaporizhzhya national technical University  
street Zhukovsky 64, Zaporozhye, Ukraine, 69063

E-mail: Bogdan\_chernetskiy@yandex.ru

Contact phone: 050-778-50-09

The number of articles in national databases – 1

The number of articles in international databases – 0

The number ORCID: [http:// orcid.org/ 0000-0002-9864-663X](http://orcid.org/0000-0002-9864-663X)