

Кулагін Д. О.,
Чернецький Б. С.

ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ДЛЯ ПОБУДОВИ СИСТЕМ РУХОМИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

Досліджено особливості вибору тягових 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.

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 кожний тяговий електропривод має свої власні вимоги до системи керування й має оптимальні характеристики лише в певному діапазоні частот обертання, до нього 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).

Дослідження питання побудови систем тягових приводів з різними типами двигунів є актуальними з точки зору досягнення максимального рівня енергоощадності за рахунок виконання всіх перелічених вимог. Засоби підвищення енергетичної ефективності та продуктивності рухомих електротехнічних комплексів в умовах складної ситуації на ринку енергетичних ресурсів дозволяють забезпечити зростання незалежності вітчизняної транспортної галузі від цілої низки економічних та політичних чинників, що мають значний вплив на основні показники роботи багатьох підприємств та бюджет приватних власників транспортних засобів та забезпечують оптимальне проектування та більш ефективну роботу різних галузей господарства. Енергозбереження та раціональне використання енергії під час виконання технологічних процесів у всіх службах та господарствах транспорту є основним резервом розвитку та забезпечення стабільності багатьох суміжних галузей в найближчій перспективі.

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 гідропередачами, 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

Об'єктом дослідження є тягові двигуни систем електроприводів рухомих електротехнічних комплексів.

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 відзначаємо їхній основний і помітний недолік — наявність механічного контакту в щітково-колекторному вузлі тягового електродвигуна.

Тому, незважаючи на складну й дорожу 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 багатополісний ротор з $2p \geq 6$ (де $2p$ — число полюсів ротора), при цьому найкращого результату, у змісті зазначеного вище мінімуму, одержимо застосуванням для збудження високо коерцитивних 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 низь-

ких 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 налаштуванні 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 електропривода 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 електропривода, 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 здавачів (переважно електричних величин) і, відповідно, каналів збору первинної інформації, визначити 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 можливість 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 табл. 1 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, пропонується 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 [Text] / O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, K. A. Corzine, J. L. Tichenor, P. C. Krause, I. G. Hansen, L. M. Taylor // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 1998. — Vol. 13, № 2. — P. 163–169. doi:10.1109/60.678980
2. Petrov, L. P. Die Modellierung der Energieverluste in Asynchronmotoren unter Beachtung der elektromagnetischen Übergangsprozesse [Text] / L. P. Petrov // Elektr. — 1980. — Vol. 34, № 7. — P. 375–379.

3. Florentsev, S. N. Traction Electric Equipment Set for AC Electric Transmission Various Vehicles [Text] / S. N. Florentsev // 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 [Текст]: монографія / Д. О. Кулагін. — Бердянськ: ФО-П Ткачук О. В., 2014. — 154 с.
5. Ali Emadi. Energy-Efficient Electric Motors: Selection and Applications [Text] / Ali Emadi. — New York: Marcel Dekker, 2004. — Ed. 3. — 424 p.
6. Кулагін, Д. О. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення магнітних кіл [Текст] / Д. О. Кулагін // Науковий вісник НГУ. — 2014. — № 6. — С. 103–110.
7. Кулагін, Д. О. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення [Текст] / Д. О. Кулагін // Технічна електродинаміка. — 2014. — № 6. — С. 49–55.
8. Boldea, I. Induction Machines Handbook [Text] / Ion Boldea, Syed A. Nasar. — CRC Press Boca Raton: London, New York, Washington, D. C., 2002. — 845 p.
9. El-Sharkawi, M. A. Fundamental of electric drivers [Text] / Mohamed A. El-Sharkawi. — Brooks: Cole production, 2000. — 400 p.
10. Stone, G. C. Electrical insulation for rotating machines [Text] / Greg C. Stone, Hussein Dhirani, Edwards A. Boulter, Ian Culbert. — A John Wiley & Sons, inc., 2004. — 392 p.

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ПОДВИЖНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Исследованы особенности выбора тяговых электродвигателей для различных видов и конструкций подвижных электро-

технических 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.

Кулагін Дмитро Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, докторант, кафедра електропостачання промислових підприємств, Запорізький національний технічний університет, Україна, e-mail: kulagindo@gmail.com.

Чернецький Богдан Сергійович, аспірант, кафедра електропостачання промислових підприємств, Запорізький національний технічний університет, Україна, e-mail: Bogdan_chernetskiy@yandex.ru.

Кулагин Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, докторант, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Запорожский национальный технический университет, Украина.

Чернецкий Богдан Сергеевич, аспирант, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Запорожский национальный технический университет, Украина.

Kulagin Dmitry, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine, e-mail: kulagindo@gmail.com.

Chernetskiy Bogdan, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine, e-mail: Bogdan_chernetskiy@yandex.ru

УДК 004.942:62-83

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.41406

Курляк П. О.

АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТОКІВ У СИСТЕМАХ РІЗНОЇ ФІЗИЧНОЇ ПРИРОДИ ЕЛЕКТРОПРИВОДНИХ ТУРБОМАШИН

Запропоновано спосіб аналізу енергетичних потоків в системах різної фізичної природи електроприводних турбомашин. Для проведення дослідження єдиного електрогідромеханічного процесу комплексним методом встановлено енергетичний зв'язок між Bond Graph моделями асинхронного двигуна і відцентрового насоса. Проаналізовано ефективність перетворення енергії у кожній фізичній області турбомашини та розроблено рекомендації з ефективного використання енергоресурсів.

Ключові слова: Bond Graph, енергетика, асинхронний двигун, відцентровий насос, турбомашина, миттєві потужності.

1. Вступ

В умовах стрімкого росту ціни на енергоносії вкрай необхідним стратегічним завданням є збереження енергетичної незалежності України. Існують багато шляхів виконання даного завдання, одним із яких є впровадження енергоефективних режимів роботи технологічного обладнання всіх галузей промисловості. Велику частку — більше 70 % від загального об'єму електроприводів (ЕП), що використовуються в промисловості займають ЕП змінного струму на базі асинхронних дви-

гунів з короткозамкненим ротором. Особливо слід відмітити електроприводні турбомашини (ЕПТМ), а саме: насоси, вентилятори, компресори, які є найбільш масовими виробничими механізмами. Встановлення у свій час низьких цін на електроенергію призвело до значного підвищення масогабаритних показників приводних електродвигунів, потужність яких при цьому завищувалась в 1,5–2 рази. В результаті більшість з них працює із значним недонавантаженням від 30 до 70 %, що викликає суттєве зниження ККД ЕП. Вказані процеси також спричиняють значне погіршення коефіцієнту потужнос-