Оптимізація керування електродвигунами для підвищення енергоефективності

Праміт Нанді (Pramit Nandy), Microchip Technology Inc.
Переклад: Андрій Середін, асистент каф. ПРЕ, РТФ, PhD, КПІ ім. І. Сікорського

У сучасному світі електродвигуни використовуються повсюдно: вони забезпечують роботу всього — від побутової техніки до промислового обладнання. Важливість оптимізації керування електродвигунами для підвищення енергоефективності важко переоцінити враховуючи, що на них припадає значна частка світового споживання енергії. У цій статті розглядається будова електродвигунів, застосування частотно-регульованих приводів (ЧРП) та рішення для керування двигунами, включно з апаратною підтримкою та передовими сучасними алгоритмами.

ПОШИРЕНІСТЬ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Електродвигуни є неодмінною частиною нашого повсякденного життя, вони використовуються у побутових приладах, таких як пральні, сушильні, посудомийні машини та насоси для басейнів. Вони також відіграють важливу роль в автомобілебудуванні: сучасні автомобілі містять від 40 до 100 електричних двигунів залежно від моделі та комплектації. Промислові підприємства значною мірою покладаються на електродвигуни, особливо в галузі робототехніки та автоматизації виробництва. На рисунку 1 показано спектр застосування електродвигунів — від побутової техніки до автомобілебудування та промисловості.

ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ

За даними Energy Information Administration приблизно 50% світового енергоспоживання припадає на електричні двигуни. Для промисловості цей показник може перевищувати 80%. Наприклад, у Сполучених Штатах Америки загальне енергоспоживання у 2022 році становило 4.07 трильйона кіловат-годин, що дорівнює щоденному споживанню 11.2 мільярда кіловат-годин. Підвищення ефективності роботи двигунів лише на 1% могло б заощадити 56 мільйонів кіловат-годин енергії щодня.

ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ В НАПРЯМКУ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

На рисунку 2 показано чотири напрямки підвищення енергоефективності двигунів: енергоефективні двигуни, використання частотно-регульованіих приводив та вдосконаленої електроніки, сучасні алгоритми та інтеграція Інтернету речей (IoT). У цьому розділі ми розглянемо ці чотири теми та зупинимося на них детальніше.

1. Енергоефективні електродвигуни

Однією з основних тенденцій у напрямкуі підвищення ефективності електродвигунів є перехід від традиційних

Рис. 1. Спектр застосування електродвигунів

двигунів, таких як асинхронні електродвигуни змінного струму, до більш ефективних типів — безщіткових двигунів постійного струму (*Brushless DC, BLDC*), синхронних двигунів з постійними магнітами (*Permanent Magnet Synchronous Motors, PMSM*) та двигунів із внутрішніми постійними магнітами (*Interior Permanent Magnet, IPM*). Ці двигуни забезпечують вищу ефективність та покращені експлуатаційні характеристики. Крім того, прогрес у матеріалознавстві, зокрема використання аморфних металів і рідкоземельних магнітів, ще більше підвищив ефективність електродвигунів.

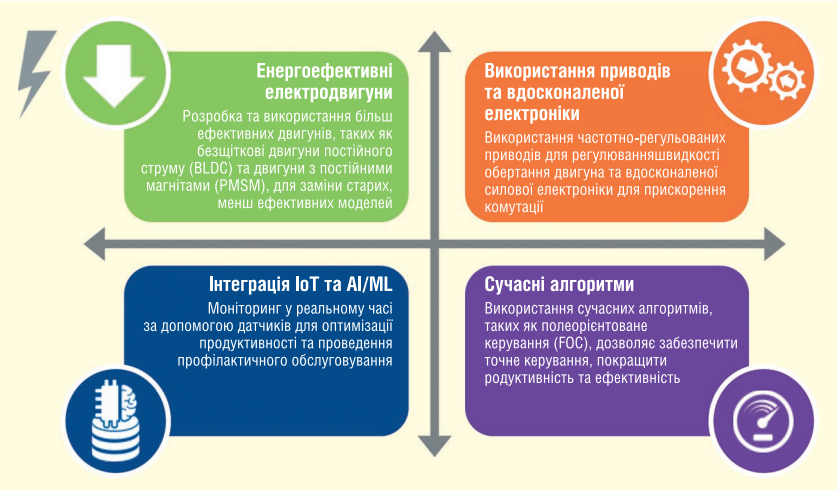

Рис. 2. Шляхи підвищення ефективності двигунів: енергоефективні двигуни, використання частотно-регульованих приводів та вдосконаленої електроніки, інтеграція Інтернету речей та сучасні алгоритми

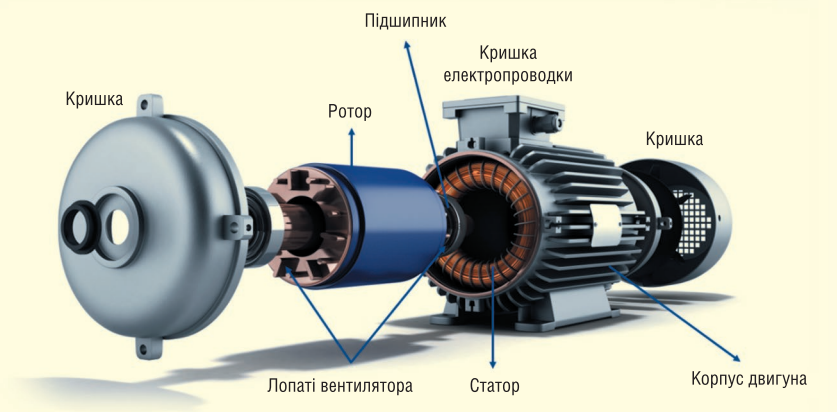

Рис. 3. Основна конструкція двигуна, в якому матеріали обмоток ротора та статора замінено з алюмінію на мідь

Удосконалення конструкції та матеріалів двигунів

За останнє століття досягнення в галузі технології двигунів, зокрема в області матеріалів та конструкції, значно підвищили їхню ефективність та продуктивність. Розуміння основних компонентів двигуна та змін, які були здійснені, дає цінні уявлення про ці досягнення.

Як показано на рисунку 3, типовий двигун складається з торцевих кришок, ротора, підшипників й статора з обмотками. З роками матеріали, що використовуються в цих компонентах, еволюціонували. Наприклад, перехід від алюмінію до міді в роторі та котушках статора покращив провідність і ефективність. Крім того, удосконалення виробничих допусків зменшило рівень шуму та ще більше підвищило ефективність.

Однією з помітних тенденцій в технології двигунів є використання аморфних матеріалів у роторах і статорах. Традиційно застосовувалась кремнієва сталь, але вона мали значні втрати на вихрові струми та гістерезис. Зараз її замінюють аморфними матеріалами, які мають менші втрати й, відповідно, вищу ефективність.

У сфері електродвигунів із постійними магнітами також відбулися значні покращення. Потужніші магніти, виготовлені з рідкоземельних матеріалів, наприклад, сплави неодиму, заліза та бору, забезпечують більший крутний момент і ефективність. Однак через проблеми з безпекою для довкілля досліджуються альтернативи, такі як магніти на основі алюмінію, нікелю, хрому та фериту, які мають хороші властивості в широкому діапазоні температур і сильних магнітних полів.

Перехід від підшипників ковзання до кулькових підшипників відіграв важливу роль у зменшенні тертя та покращенні допусків, що, своєю чергою, підвищило ККД двигунів. За минуле століття двигуни стали значно меншими, зберігаючи при цьому ту саму потужність. Наприклад, як показано на рисунку 4, сучасний трифазний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором потужністю 5 кінських сил є суттєво меншим і важить приблизно 20% від того, що важив двигун з такою ж потужністю у 1910 році. Це зменшення розмірів пояснюється використанням легших та ефективніших матеріалів, а також удосконаленням теплової та електричної ізоляції. Легші двигуни особливо корисні для застосування в автомобілебудуванні, де зменшення ваги сприяє підвищенню ефективності та дає змогу компактніше інтегрувати електродвигуни. Вплив цих технологічних удосконалень є значним, адже вони забезпечують створення більш ефективних систем двигунів, здатних забезпечувати кращу продуктивність та економію енергії.

Постійне вдосконалення матеріалів та конструкції двигунів призвело до значного підвищення їхньої ефективності та продуктивності. Від використання аморфних матеріалів і потужніших магнітів до вдосконалення підшипників та зменшення розмірів двигунів — ці інновації формують майбутнє технології двигунів. Завдяки постійному пошуку нових матеріалів та конструкцій перспективи подальшого підвищення ефективності та продуктивності двигунних систем залишаються дуже обнадійливими.

2. Вплив частотно-регульованих приводів

Частотно-регульовані приводи стали дедалі популярнішими для керування швидкістю двигунів та підвищення їхньої ефективності. ЧРП регулюють швидкість обертання двигуна відповідно до вимог навантаження, що зменшує енергоспоживання. Перехід від біполярних транзисторів із ізольованим затвором (*Insulated Gate Bipolar Transistors, IGBT*) до технології карбіду кремнію (*Silicon Carbide, SiC*) у ЧРП також сприяв підвищенню ефективності та швидшому перемиканню.

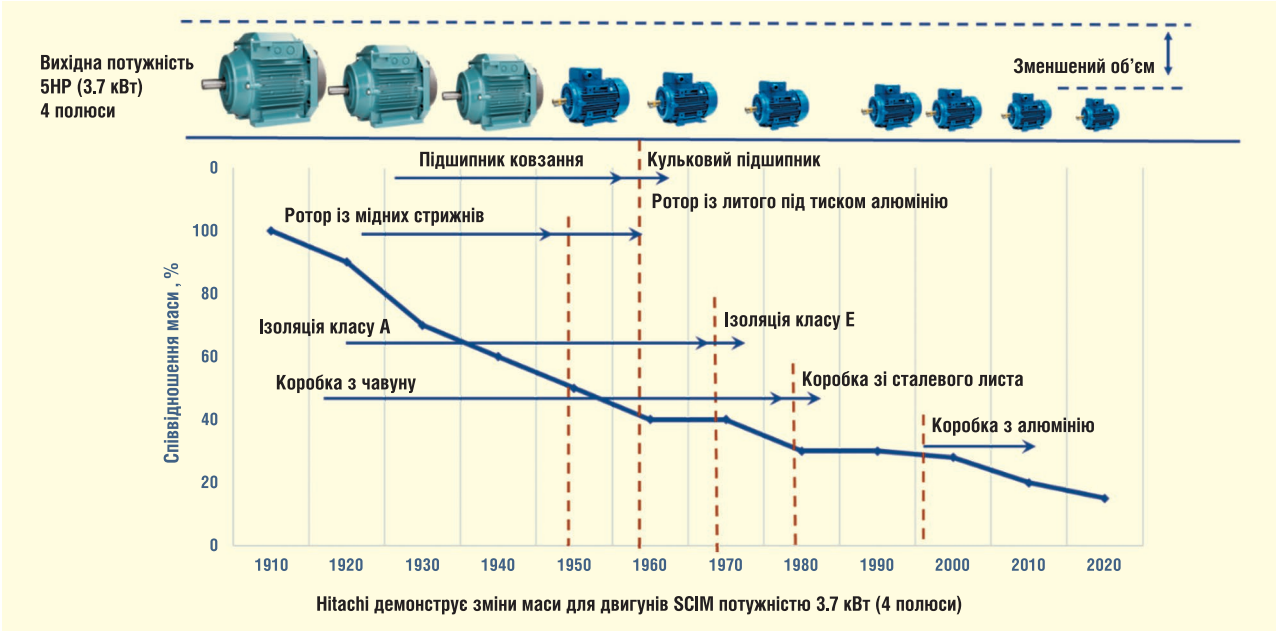

Рис. 4. Графік зменшення маси двигуна SCIM потужністю 3.7 кВт у період з 1910 по 2020 рік

Частотно-регульовані приводи

Частотно-регульовані приводи здійснили справжню революцію в керуванні двигунами, адже вони дозволяють точно регулювати швидкість і крутний момент. Ця технологія оптимізує роботу двигуна та суттєво підвищує ефективність системи. ЧРП змінює частоту й напругу, що подаються на двигун, завдяки чому він може працювати в найбільш ефективному режимі для конкретного навантаження.

Наприклад, традиційні системи двигунів часто працюють на повну потужність, а витрата регулюється індуктивними дроселями, що призводить до значних втрат енергії. На відміну від цього ЧРП усувають потребу в дроселюванні, регулюючи швидкість двигуна відповідно до необхідної витрати, тим самим зменшуючи енергоспоживання та підвищуючи загальну ефективність системи.

Як показано на рисунку 5, проведені дослідження довели, що перехід на ЧРП може більш ніж удвічі підвищити ефективність системи з двигуном, приблизно з 31 % до 72 %.

Рішення від Microchip Technology

Компанія Microchip Technology пропонує широкий спектр рішень для систем керування двигунами, у тому числі апаратну підтримку та сучасні алгоритми. Асортимент продукції компанії містить мікроконтролери, драйвери затворів, силову електроніку та датчики, розроблені для оптимізації роботи двигунів.

Апаратна підтримка

Повний спектр апаратної підтримки, що пропонує компанія Microchip Tech-

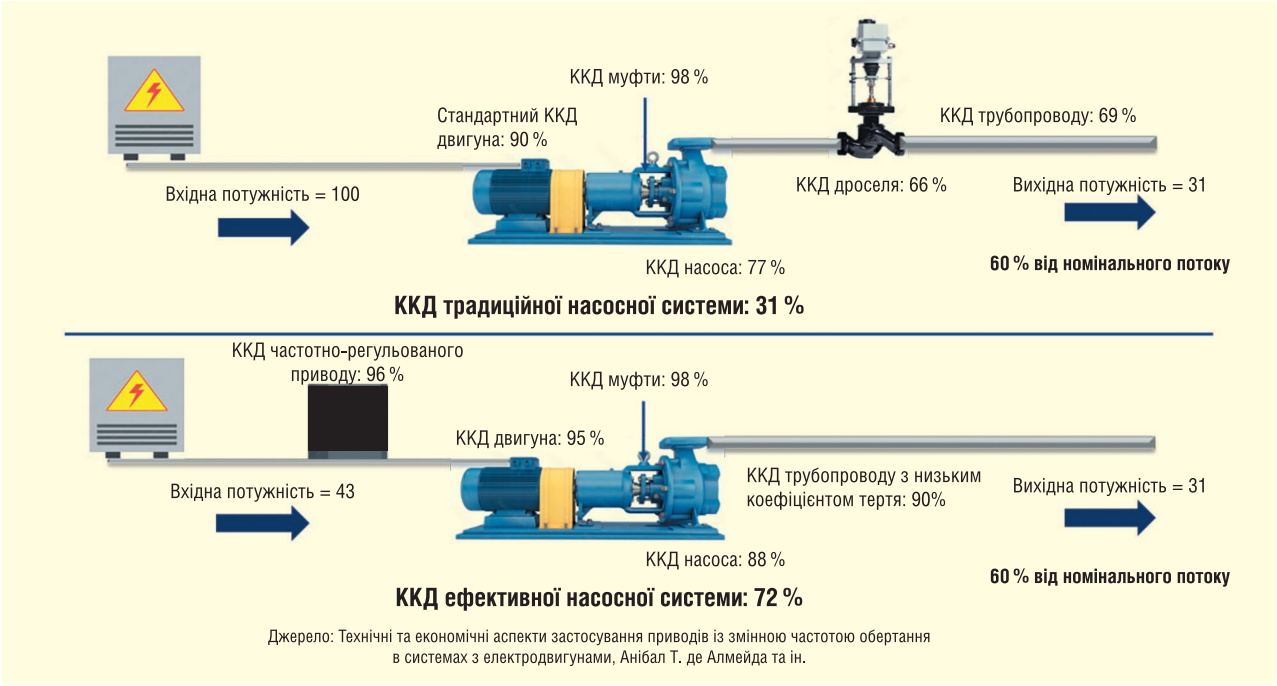

Рис. 5. Перехід на ЧРП дозволяє більш ніж удвічі підвищити ефективність системи з двигуном, приблизно з 31 до 72%

nology (рис. 6), допомагає прискорити проєктування та розробку систем керування двигунами, одночасно оптимізуючи їхню продуктивність та ефективність. Для частотно-регульованих приводів вона пропонує AC/DC перетворювачі та інвертори з використанням високоефективних MOSFET на основі карбіду кремнію, а також сучасні драйвери затворів для точного перемикання. Інвертори, керовані цифровими сигнальними контролерами dsPIC® (*Digital Signal Controllers, DSC*), перетворюють постійний струм у змінний із регульованою частотою для ефективної роботи двигуна. Вбудовані датчики забезпечують зворотний зв'язок у реальному часі стосовно струму, напруги та температури, підвищуючи надійність системи. Крім того, Microchip Technology надає тестувальні плати розробника, еталонні проєкти, програмні бібліотеки та інструменти розробки для підтримки створення й впровадження складних алгоритмів керування двигунами.

Рис. 6. Повний спектр апаратної підтримки від Microchip Technology для систем керування електродвигунами

3. Сучасні алгоритми керування

Алгоритми відіграють ключову роль в оптимізації систем керування двигунами. Традиційні методи, такі як керування за співвідношенням V/F (напругою-частотою) для асинхронних двигунів змінного струму, є економічними та простими, але не завжди забезпечують найвищу ефективність. Більш вдосконалені алгоритми, наприклад шестиступеневе комутування для BLDC та PMSM двигунів, забезпечують кращий контроль крутного моменту й можуть бути як із датчиками, так і без них. Найефективнішим алгоритмом є керування за полем (*Field-oriented Control, FOC*), яке забезпечує високу ефективність, низький рівень шуму та відмінні характеристики крутного моменту й швидкості. FOC може реалізовуватися як із використанням датчиків, так і без них, залежно від типу двигуна та вимог застосування. На рисунку 7 показано зразок блок-схеми алгоритму FOC для двигуна, що використовує мінімальні ресурси FPGA для виконання повного алгоритму керування двигуном.

Рішення компанії Microchip для керування двигунами містять передові алгоритми, такі як керування за полем, алгоритм максимального крутного моменту на ампер (*Maximum Torque per Ampere, MTPA*) та ослаблення магнітного поля, що дозволяють максимально підвищити ефективність і продуктивність (табл. 1). Ці алгоритми підтримуються такими інструментами, як MPLAB® motorBench® Development Suite, що спрощує впровадження та налаштування алгоритмів керування. Крім того, Microchip пропонує можливості машинного навчання для профілактичного технічного обслуговування, що забезпечує роботу двигунів з максимальною ефективністю та знижує ризик несподіваних відмов.

Алгоритм керування Zero-Speed/Maximum-Torque (ZS/MT) є новою варіацією бездатчикового алгоритму FOC, яка дозволяє застосовувати бездатчикові методи керування в системах керування двигунами з високим крутним моментом або низькою швидкістю. ZS/MT усуває потребу в датчиках Холла, використовуючи надійний метод визначення початкового положення (*Initial Position Detection, IPD*), що базується на високочастотному інжектуванні (*High-Frequency Injection, HFI*), для точного визначення положення ротора на нульових та низьких швидкостях. Це робить його ідеальним для таких застосувань, як бурові машини, приводи гаражних воріт, автомобільні стартери та електровелосипеди.

4. Інтеграція з IoT та AI/ML

Інтеграція технологій Інтернету речей (*Internet of Things, IoT*) та штучного інтелекту (*Artificial Intelligence, AI*) кардинально змінила підхід до керування двигунами. Датчики відіграють ключову роль у системах керування двигунами.

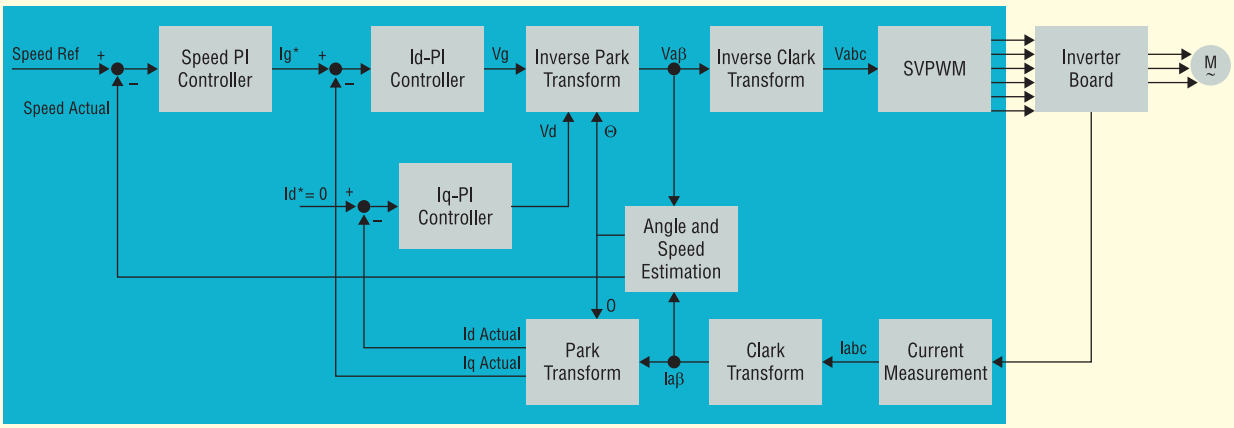

Рис. 7. Блок-схема модульного алгоритму керування бездатчиковим двигуном BLDC з використанням цифрового обчислювача обертання координат (CORDIC) із синусно-косинусним перетворенням, необхідного для FOC двигунів

Таблиця 1. Алгоритми керування для різних типів двигунів (PMSM, BLDC, ACIM)

Алгоритм	Відповідні двигуни	Примітки
Відкритий контур (V/F)	ACIM	Низька вартість
Шестиступеневий трапецієподібний (з датчиком зворотного зв'язку)	PMSM, BLDC	Хороший контроль крутного моменту на всіх швидкостях
Шестиступеневий синусоїдальний	PMSM	Низький рівень шуму
Шестиступеневий трапецієподібний (безсенсорний BEMF)	PMSM, BLDC	Низька вартість Хороший контроль крутного моменту на середніх і високих швидкостях
Керування за полем (з датчиком зворотного зв'язку)	PMSM, BLDC	Висока ефективність Відмінне регулювання крутного моменту
Керування за полем (з безсенсорним зворотним зв'язком)	Синхронний двигун з постійними магнітами (PMSM), безщітковий двигун постійного струму (BLDC), асинхронний двигун змінного струму (ACIM)	Висока ефективність Відмінне регулювання крутного моменту Низька вартість

Вони необхідні для вимірювання струму, крутного моменту та положення ротора, а також інших параметрів. Ці датчики передають дані до мікроконтролерів, здатних обробляти отриману інформацію. Завдяки інтеграції алгоритмів машинного навчання такі системи можуть здійснювати профілактичне технічне обслуговування, аналізуючи дані датчиків для передбачення можливих відмов двигуна або потреби у технічному обслуговуванні. Ця можливість особливо корисна в промислових умовах, де несподівані відмови двигунів можуть призвести до значних простоїв і фінансових втрат. Профілактичне технічне обслуговування забезпечує роботу двигунів з максимальною ефективністю та продуктивністю, зменшуючи ймовірність несподіваних поломок.

Профілактичне обслуговування

Профілактичне технічне обслуговування використовує датчики та алгоритми машинного навчання для моніторингу стану двигуна й виявлення потенційних проблем ще до того, як вони призведуть до відмов. Постійний аналіз таких параметрів, як струм, крутний момент і вібрація, забезпечує ефективну роботу двигуна та мінімізує простої. Такий підхід особливо вигідний у промислових умовах, де несподівані відмови двигунів можуть спричинити значні виробничі втрати.

Демонстраційна програма компанії Microchip показує можливості профілактичного технічного обслуговування двигунів із використанням *MPLAB® Machine Learning Development Suite* у поєднанні з *платою керування двигуном dsPIC LVMC*. Ця система застосовує модель класифікації для визначення робочого стану двигуна, виявляючи, чи він працює нормально, чи має аномалії, такі як незбалансоване навантаження або пошкодження підшипника, шляхом моніторингу струму I_q двигуна.

ВИСНОВОК

Оптимізація керування двигунами з метою підвищення енергоефективності має вирішальне значення для скорочення глобального споживання енергії та покращення роботи різних систем. Завдяки переходу на енергоефективні двигуни, використанню частотно-регульованих приводів, впровадженню сучасних алгоритмів керування та інтеграції технологій Інтернету речей і штучного інтелекту можна досягти значної економії енергії. Компанія Microchip Technology пропонує широкий спектр рішень для підтримки цих зусиль, надаючи апаратне та програмне забезпечення, а також експертизу, необхідні для розробки ефективних систем керування двигунами. Оскільки попит на енергоефективні рішення продовжує зростати, прогрес у технології керування електродвигунами відіграватиме важливу роль у задоволенні цих потреб. CN

НОВІ СИЛОВІ МОДУЛІ BZPACK MSIC® ВІД КОМПАНІЯ MICROCHIP TECHNOLOGY

*Компанія **Microchip Technology** оголосила про випуск силових модулів BZPACK mSiC®, розроблених відповідно до суворих стандартів HV-H3TRB (висока вологість, висока напруга, висока температура, зворотне зміщення). Модулі BZPACK забезпечують виняткову надійність, спрощують виробництво та пропонують універсальні можливості інтеграції в системи для найвимогливіших умов перетворення енергії. Вони доступні в широкому діапазоні топологій, включаючи конфігурації напівмоста, повного моста, трифазні та PIM/CIB, що надає розробникам гнучкість для оптимізації продуктивності, вартості та архітектури системи.*

Випробувані на відповідність стандартам HV-H3TRB, які перевищують стандартну норму в 1000 годин, силові модулі BZPACK mSiC забезпечують надійність при застосуванні в промислових системах та системах відновлюваної енергетики. Завдяки індексу порівняльного відстеження (Comparative Tracking Index, CTI) 600 В, стабільному $R_{DS(on)}$ у різних діапазонах температур та варіантам підкладок з оксиду алюмінію (Al_2O_3) або нітриду алюмінію (AlN), ці модулі забезпечують чудову ізоляцію, терморегуляцію та довготривалу надійність.

З метою оптимізації виробництва та зменшення складності системи модулі BZPACK мають компактну конструкцію без опорної пластини, оснащені клемними з'єднувачами Press-Fit, що не потребують паяння, а також можуть бути укомплектовані попередньо нанесеним теплопровідним матеріалом (Thermal Interface Material, TIM). Ці універсальні можливості забезпечують прискорення процесу монтажу, підвищення стабільності виробництва та спрощення використання компонентів від різних постачальників завдяки стандартним розмірам.

Серії mSiC MOSFET MB та MC від Microchip пропонують надійні рішення як для промислових, так і для автомобільних застосувань, у тому числі варіанти, що відповідають стандарту AEC-Q101. Ці пристрої підтримують високі напруги «затвор-витік» (VGS≥15 В) і випускаються у корпусах, що відповідають промисловим стандартам, для спрощення інтеграції. Перевірена технологія HV-H3TRB забезпечує довгострокову надійність, допомагаючи зменшити ризик відмов у процесі експлуатації, спричинених витоком або пробоєм через вплив вологи. Серія MC інтегрує резистор затвора, забезпечуючи покращене керування перемиканням, підтримуючи низьку енергію перемикання та покращену стабільність у конфігураціях модулів з декількома кристалами.

www.microchip.com