

Література

1. Биологическое действие ультрафиолета. М.-Наука.-1975.-280 с.
2. В.Ф.Рой, К.К.Намиатов. Высоочастотные свойства газоразрядной плазмы низкого давления. // Вопросы атомной науки и техники.-ННЦ «ХФТИ» НАНУ.-Харків 1998.-№5.-С.151-152.
3. Намиатов К.К., Пахомов П.Л., Харин С.Н. Излучение газоразрядной плазмы.-Алма-Ата, Наука.-1994.-304 с.
4. В.Ю.Дадонов, В.И.Рыков. Исследование функции распределения электронов по энергиям в положительном столбе разрядных ламп // Электрические источники света.-в.12.-М.-1981.-С.25-32.

Проведено аналіз стану сучасного автоматизованого електропривода, розглянуто тенденції його розвитку. Розроблені рекомендації щодо використання електродвигунів в частотно-керованих приводах. Приведені основні напрямки досліджень електроприводів, показані нові можливості керування

Ключові слова: електропривод, електричний двигун, редуктор, напівпровідниковий перетворювач, система керування, IGBT-транзистор

Проведен анализ состояния современного автоматизированного электропривода, рассмотрены тенденции его развития. Разработаны рекомендации по применению электродвигателей в частотно-регулируемых приводах. Приведены основные направления исследования электроприводов, показаны новые возможности управления

Ключевые слова: электропривод, электрический двигатель, редуктор, полупроводниковый преобразователь, система управления, IGBT-транзистор

The analysis of modern automated electric-drive, examined trends of its development. The recommendations on the use of electric motors in variable-speed drives. The main directions of research drives, shows the new capabilities control

Key words: electric, electric motor, gearbox, solid converter, control system, IGBT-transistor

УДК 621.313

ДЕЯКІ АСПЕКТИ РОЗВИТКУ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Ю. О. Крисан

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра електропривода та автоматизації промислових установок

Запорізький національний технічний університет
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, Україна, 69063
Контактний тел.: 097-198-66-25
E-mail: krisan@rambler.ru

У наш час зберігається тенденція стрімкого зростання промислового виробництва, ефективність якого визначається досягненнями в галузі регульованого і глибокорегульованого електропривода, функціональними можливостями його систем керування та економічністю.

Отже, електроприводи продовжують поглиблювати свою роль основних засобів інтенсифікації техноло-

гічних процесів. Ними споживається до 49% виробленої електроенергії. Таке широке їх розповсюдження обумовлене рядом чинників. До таких відноситься, по-перше, доступність електричної енергії: вона виробляється багатьма способами, у великих кількостях і з порівняно невисокими витратами транспортується на великі відстані. По-друге – властивості самих перетворювачів електричної енергії в механічну (елек-

тричних двигунів). Вони характеризуються високим коефіцієнтом корисної дії (ККД), досить простою конструкцією, високою керованістю і екологічністю. Крім того, вартість електричних двигунів значно нижча, ніж двигунів інших типів (наприклад: теплових, внутрішнього згорання або реактивних).

Велике різноманіття сучасних електроприводів вимагає всебічного аналізу усіх чинників їх вибору, в першу чергу таких як:

- технологічні вимоги;
- вимоги відносно безпечності і екологічності;
- економічна доцільність.

У регульованих електроприводах частота обертання і момент на валу змінюються відповідно до вимог технологічного процесу. У таких приводах одним з основних елементів є силовий перетворювач характеристики і властивості якого забезпечують дотримання усіх особливостей технології. Для глибокорегульованих електроприводів важливим є їх динамічні характеристики, швидкодія.

Природно, що регульовані електроприводи складніші і дорожчі нерегульованих. У зв'язку з цим останні поширеніші, складають майже 90% з усього числа використовуваних у світовому промисловому виробництві. Проте з початку 90-х років двадцятого століття ситуація стала істотно мінятися у бік використання регульованих електроприводів. У промислово розвинених країнах їх доля вже зараз близько 60% і продовжує рости.

Найпоширенішим типом електродвигуна є асинхронний двигун з короткозамкненим ротором і, за прогнозом переважної більшості спеціалістів, в найближчі роки він таким і останеться. Альтернативою до нього може бути керований і некерований електропривод на базі синхронного двигуна. Природно, що асинхронний двигун удосконалюватиметься і змінюватиметься як за будовою, так і за використанням.

Основний напрям конструктивного розвитку асинхронних короткозамкнених двигунів змінного струму – покращення енергетичних і масогабаритних показників. Впровадження високоефективних електродвигунів стимулюється прагненням скоротити шкідливі викиди в атмосферу, передбачені Кіотським протоколом. Відомо, що ККД виробництва, передачі і розподілу електроенергії в середньому дорівнює 33%. Це означає, що кожна кіловат-година, заощаджена електроприводом, заощаджує три кіловат-години первинної енергії. У розвинених індустриальних країнах вже зараз посилюються нормативні вимоги відносно ККД електродвигунів, в першу чергу – саме асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Наприклад, в частотно-регульованих приводах рекомендується застосовувати тільки спеціальні електродвигуни з наступними параметрами:

- вища нагрівостійкість ізоляції статорної обмотки, розрахованої на вищу напругу;
- підвищені значення обертового моменту у всьому діапазоні регулювання;
- відповідність підвищеним вимогам відносно електричної, магнітної і конструктивної симетрії;
- відповідність підвищеним вимогам відносно нерівномірності повітряного проміжку;
- відповідність особливим вимогам відносно величини активного і індуктивного опору ротора і статора;

- наявність примусової вентиляції;
- наявність вбудованих датчиків положення і швидкості.

Крім того, перспективним є застосування в короткозамкнених електричних двигунах обмотки ротора зі знизеним активним опором на основі мідних сплавів. У вказаних двигунах застосовуватиметься якісніша тонколистова електротехнічна сталь, а також шихтовка роторів «ялиночкою» з проміжним короткозамкненим кільцем. Усе це говорить про те, що вартість асинхронних двигунів з короткозамкненими кільцями тільки збільшуватиметься. При цьому обсяги виробництва також збільшуватимуться.

Застосування асинхронних двигунів з фазним ротором нині скорочується. Вони використовувалися в основному в підійомно-транспортних механізмах, проте зараз саме в цій сфері відбувається масовий перехід на частотнокеровані короткозамкнені електродвигуни. Швидше за все, застосування вищезазначених двигунів обмежиться асинхронно-вентильними каскадами середньої і великої потужності. Крім того, у зв'язку з розвитком напівпровідникових перетворювачів частоти і знизенням їх вартості можливий прогрес у використанні двигунів з фазним ротором які є повністю керованими машини подвійного живлення. Це привабливо завдяки можливості отримати подвійний діапазон регулювання швидкості при номінальному або навіть підвищеному обертовому моменті на валу електродвигуна. Натомість це зажадає розробки спеціальних алгоритмів керування двигуном в пускових і гальмівних режимах.

Застосування електричних двигунів постійного струму, які ще зовсім нещодавно були найбільш вживані в галузі регульованих електроприводів, поступово скорочується. У діапазоні малих і середніх потужностей вони витісняються частотнокерованими асинхронними короткозамкненими електродвигунами. Це не означає, що електродвигуни постійного струму зникнуть повністю. Існують технології і виробництва, де їх застосування виправдане технічно і економічно (наприклад, системи транспортування довгомірних виробів).

Все більше поширюються високомоментні синхронні двигуни магнітоелектричного збудження з використанням високоефективних магнітотвердих матеріалів на базі рідкоземельних металів (неодим-залізо-бор або самарій-кобальт та інші). Разом з головною перевагою двигунів з постійними магнітами – відсутністю щіткового контакту, – вони мають і ряд інших позитивних якостей: високою перевагують здатністю, малим моментом інерції ротора, наявністю фіксованого моменту в знеструмленому стані, високою швидкодією. У поєднанні з високою статичною стійкістю і широким діапазоном регулювання ці властивості часто є вирішальними аргументами на користь магнітоелектричного синхронного двигуна, незважаючи на його більш високу, порівняно з асинхронним короткозамкненим двигуном, вартість.

Необхідно відмітити також зростаючу популярність вентильно-індукторних двигунів (англ. switched reluctance motor, SRM) [1]. Вентильно-індукторний двигун є окремим випадком синхронного реактивного двигуна з явно вираженими полюсами статора, на які надягнуті котушки збудження, подібні до котушок по-

люсів електричних машин постійного струму. Ротор виконаний у вигляді зубчастого колеса, без обмотки. При цьому число полюсів ротора, тобто зубців, не дорівнює числу явно виступаючих полюсів статора. На відміну від асинхронних і синхронних двигунів, в вентильно-індукторному двигуні електромагнітний момент створюється не завдяки взаємодії між обертовим магнітним полем статора і струмами ротора, а за рахунок несиметричної магнітної системи. Простота конструкції, надійність, технологічність у виготовленні, висока ремонтпридатність роблять його реальним конкурентом асинхронного короткозамкненого двигуна змінного струму в регульованих приводах потужністю від одиниць до сотень кВт. Вже зараз двигуни цього типу достатньо широко використовуються у вибухонебезпечних установках, електромобілях, електровозах і, навпаки, в агрегатах, де вимагаються наднизька (до десятків обертів в хвилину) частота обертання.

Вихідними параметрами електродвигуна є частота обертання і обертовий момент на вихідному валу. Номінальна частота обертання вихідного вала більшості розглянутих вище електродвигунів знаходиться в діапазоні від 500 до 6000 об/хв. При цих частотах обертання вони мають практично найкращі масогабаритні енергетичні показники. Обертовий момент на вихідному валу електродвигуна прямо пропорційний його номінальній потужності і зворотній пропорційний його номінальній кутовій швидкості. В багатьох виробничих агрегатах необхідний діапазон частот обертання лежить істотно нижче вказаного для електричних двигунів. Для узгодження характеристик електродвигуна і виробничого агрегату до складу електропривода вводиться редуктор. Найбільшого поширення в електроприводах набули циліндричні, планетарні і черв'ячні редуктори. Останнім часом достатньо широко застосовуються високоефективні хвильові редуктори з проміжними тілами кочення.

Часто редуктор і електродвигун об'єднуються в єдиний пристрій – мотор-редуктор. Промисловість у великих кількостях випускає мотор-редуктори різної конструкції. Натомість тенденція створення спеціалізованих електромеханічних модулів, в яких двигун і редуктор виконуються як елемент конкретної робочої машини.

У зв'язку з появою тихохідних моментних двигунів (наприклад, синхронних електродвигунів з постійними магнітами, а також реактивних двигунів як таких, що перемикаються) мають місце спроби повністю виключити редуктор із складу електропривода, що обумовлює суттєве скорочення механічної частини, зменшується маса, момент інерції, об'єм, усуваються люфти, механічні пружні зв'язки і таке інше.

У нерегульованих електроприводах маніпуляції з потоком електроенергії відбуваються в основному за допомогою електромагнітних контакторів. При цьому усі операції по керуванню зводяться до пуску і гальмування електродвигуна. В деяких випадках здійснюються реверс і примусове гальмування електродвигуна. При функціонуванні амплітуда струму у фазах стартарної ланки електродвигунів контролюється тепловими і електромагнітними реле захисту. Реле захисту налаштовуються на допустимі дискретні значення струмів, досягнувши яких вони відключають

живлення котушок пускових електромагнітних контакторів, внаслідок чого двигуни відключаються від мережі. Поєднання електромагнітних контакторів і реле захисту також називають «пускозахисним пристроєм електродвигуна».

Вдосконалення пускозахисних пристроїв в нерегульованих електроприводах йде шляхом застосування мікропроцесорних реле керування і захисту, а також так званих софтстартерів (пристроїв плавного пуску).

Як приклад електронних реле керування і захисту електродвигунів можливо привести пристрої системи SIMOCODE компанії Siemens [2] і TeSys T компанії Schneider Electric [3]. Вони дозволяють керувати електродвигунами по послідовному інтерфейсу, а також надійно захищати їх не лише від струмів короткого замикання і струмів перевантаження, але і від обривів і перекосів фазної напруги, невірнього порядку чергування фаз мережі живлення.

Софтстартери для керування нерегульованими електроприводами на базі асинхронних короткозамкнених електродвигунів використовуються з електродвигунами потужністю 5 кВт і більше. У деяких промислово розвинених країнах застосування софтстартерів обумовлене нормативними документами. Вони дозволяють плавно підвищувати напругу на статорі електродвигуна практично з будь-яким темпом і за будь-яким законом, внаслідок чого обмежуються пускові струми і кидки момента. Софтстартери виконуються на базі звичайних одноопераційних тиристорів з імпульсно-фазовим керуванням, тому їх вартість відносно невисока.

У регульованих електроприводах для керування потоком електроенергії використовуються статичні напівпровідникові перетворювачі різних типів. Їх основою є сучасні силові напівпровідникові прилади, такі як:

- одноопераційні тиристири (SCR);
- тиристири, що замикаються (GTO, IG CT, MCT);
- біполярні транзистори з ізолюваним затвором (IGBT);
- потужні польові транзистори (MOSFET).

Одноопераційні тиристири є традиційним і поширеним силовим напівпровідниковим приладом. Одноопераційні тиристири, які випускаються промисловістю, розраховані на напругу до 8500В при струмах до 1800А і на струми до 5500А при напрузі до 2800В. Ці напівпровідникові прилади витримують великі ударні струми і характеризуються порівняно малим падінням напруги у відкритому стані. До недавнього часу одноопераційні тиристири використовувалися в усіх типах перетворювачів для регульованих електроприводів.

На базі одноопераційних тиристорів виконувалися:

- керовані випрямлячі;
- широко-імпульсні перетворювачі постійного струму;
- регулятори змінної напруги;
- безпосередні перетворювачі автономні інвертори струму і напруги.

У зв'язку з появою в останні два десятиліття повністю керованих тиристорів, потужних польових транзисторів і модулів на основі IGBT -транзисторів застосування одноопераційних тиристорів неухильно скорочується. Зараз вони найбільш поширені в софт-

стартерах і інших пускових пристроях потужністю від одиниць до тисяч кіловат.

Тиристори, що замикаються, мають нижчі межові параметри за напругою і струмом, ніж одноопераційні (6000В і 4000А). Крім того, для них характерні високі динамічні втрати і, як наслідок, досить вузький діапазон комутованих частот (500-600Гц). Проте здатність до керованого запирання забезпечує цим приладам свою сферу застосування. Вони використовуються у високовольтних перетворювачах частоти.

Біполярні транзистори з ізольованим затвором IGBT і модулі на їх основі наразі є найпопулярнішими силовими напівпровідниковими приладами в галузі електромеханіки. За останні 20 років вони істотно потіснили на ринку енергетичної електроніки одноопераційні тиристори і зараз домінують. Сучасні IGBT-транзистори здатні комутувати струми до 600А при напрузі до 6500В і струми до 2400А при напрузі до 1700В при частоті комутації струму до 20кГц. При напрузі до 600В і струмах в декілька десятків ампер частота комутації може досягати 150кГц [4]. Це істотно спрощує фільтрацію струмів і напруг на вході і виході перетворювачів.

Вдосконалення IGBT-транзисторів йде шляхом збільшення струмів комутації, напруг і частот. Крім того, компанії-виробники працюють над створенням ще більш широкої номенклатури інтелектуальних силових модулів, включаючи багатоключові силові схеми, керуючі драйвери, давачі струму і напруги, схеми захисту від перенапруг, пристрої гальванічного розв'язування.

На основі IGBT-транзисторів можуть виконуватися перетворювачі будь-якого типу з перерахованих вище, які розраховані на досить широкий діапазон потужностей. Проте найефективніше використання вказаних приладів в перетворювачах з ШІМ-модуляцією струму і напруги. Наприклад, в широтно-імпульсних перетворювачах постійного струму, в автономних інверторах струму і напруги з ШІМ.

Перспективним вважається застосування IGBT-транзисторів в активних випрямлячах, багаторівневих інверторах і матричних перетворювачах частоти.

Потужні польові транзистори (MOSFET) завдяки ряду позитивних властивостей (потенційне керування і висока швидкодія) також знайшли використання в регульованих електроприводах. Вони використовуються в основному в сервоприводах малої і середньої потужностей.

Аналіз існуючих систем керування електроприводами показує, що фактично завершився масовий перехід на застосування цифрової елементної бази. Універсальні і спеціалізовані мікроконтролери використовуються практично в усіх розробках електроприводів, у тому числі і загальнопромислового призначення. При цьому багато проблем синтезу систем керування розробляються за допомогою нових алгоритмів, що дозволяють реалізовувати практично будь-які складні закони керування, які раніше вважалися нераціональними.

Останніми роками серед напрямів дослідження алгоритмів керування електроприводами найбільш помітні такі:

- розробка методів адаптивного керування, у тому числі із застосуванням нечіткого (fuzzy-) керування;
- розробка методів керування з прогнозуванням координат;
- розробка самонавчальних і самоналагоджувальних систем, у тому числі з використанням штучних нейронних мереж.

Значний розвиток отримують принципи побудови систем керування із спостерігачами стану, які являють собою динамічну модель об'єкта керування. Використання спостерігачів дозволяє істотно поліпшити керування, реалізувати «бездавачеве» керування в складних динамічних системах за рахунок автоматичної ідентифікації параметрів електропривода в процесі його функціонування. Для керування процесами, однозначна модель яких не може бути отримана, використовуються:

- розривне керування і рух в режимі ковзання;
- принцип керування з глибоким зворотним зв'язком, який забезпечує інваріантний рух системи при всіх можливих змінах неконтрольованих збурень;
- адаптивне керування з використанням еталонної моделі;
- введення в контур регулювання нечіткого (fuzzy-) керування, застосування нейронних мереж і генетичних алгоритмів.

Таким чином, електроприводи, незважаючи на більш ніж вікову історію їх активного використання і розвитку, продовжують удосконалюватися. Розробка і впровадження нових рішень визначаються такими критеріями, як керованість і гнучкість в застосуванні, розширення можливостей, підвищення надійності і довговічності, відповідність вимогам по безпеці і екології, економічність.

Література

1. Фирого Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б.И.Фирого, Л.Б. Павлячик. – Мн.: Техноперспектива, 2006. – 363с.
2. SIMOCODE pro. Руководство по проектированию, вводу в эксплуатацию, ремонту и обслуживанию. – 2007. – №1.
3. Многофункциональное реле TeSys T // Мир Автоматизации. – 2008. – №1. – С. 17-19.
4. Дьяконов В.П. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах / В.П. Дьяконов, А.М. Ремнев, В.Ю. Смердов. – Москва: Солон-Р, 2002. – 512 с.