

Механіка, машинознавство та електропостачання

УДК 621.314.572

621.313.33

Б.Т. Кононов, А.О. Нечаус, Н.М. Рябуха

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НА БАЗІ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА

В статті обґрунтовується структурна схема системи векторного керування частотно-регульованого асинхронного електроприводу.

Ключові слова: асинхронний електричний двигун з короткозамкненим ротором, частотно-регульований електропривод, векторне керування, інвертор струму, інвертор напруги, широтно-імпульсна модуляція.

Вступ

Постановка науково-технічної задачі. В Збройних Силах України для приводу антен радіолокаційних станцій частіше за все використовують асинхронні електричні двигуни з короткозамкненим або з фазним ротором. Управління такими двигунами зводиться до здійснення пуску, регулювання частоти обертання й підтримання режиму роботи приводу відповідно до вимог, які ставляться до приводу під час пошуку або супроводження повітряних цілей. Серед перерахованих задач управління найбільш складною є задача регулювання частоти обертання. Такий висновок слідує з того, що кутова частота обертання ротора асинхронного двигуна ω визначається кутовою частотою обертання магнітного поля ω_1 й ковзанням s , тобто

$$\omega = \omega_1 (1 - s). \quad (1)$$

З співвідношення (1) маємо, що змінювати кутову частоту обертання двигуна ω можливо шляхом зміни кутової частоти обертання магнітного поля

$$\omega_1 = \frac{2\pi f}{p}, \quad (2)$$

де f – частота живлячої напруги; p – кількість пар полюсів обмотки статора, або змінною ковзання s .

Величина ω_1 може змінюватися при зміні частоти живлячої напруги f або при зміні кількості пар полюсів обмотки статора двигуна. Зміна ковзання s досягається при зміні величини живлячої напруги або при зміні активного чи реактивного опору статорного або роторного кола. Найбільш поширений спосіб регулювання частоти електроприводу пов'язаний зі змінною частоти напруги, що підводиться

до статора двигуна. Цей спосіб може бути реалізований, якщо є джерело напруги зі змінною частотою.

В якості такого джерела можливо використовувати синхронний генератор з регульованою частотою обертання або перетворювач частоти: електромашинний чи статичний.

Разом з тим, слід враховувати те, що момент асинхронного двигуна M залежить від частоти f живлячої напруги та її діючого значення U

$$M = CU^2/f^2, \quad (3)$$

де C – постійний коефіцієнт.

З (3) маємо, що при змінній частоті f живлячої напруги U змінюється й величина моменту M . Це означає, що в процесі регулювання частоти електроприводу для забезпечення заданої перенавантажувальної здатності двигуна, необхідно одночасно зі змінною частоти змінювати й величину напруги U відповідно з законом

$$U = U_{\text{ном}} (f/f_{\text{ном}})^\alpha, \quad (4)$$

де значення ступеня α визначається характером навантаження споживачів.

Таким чином, відповідно до наведених міркувань, система регулювання частоти обертання електроприводу радіолокаційних станцій є двоканальною системою автоматичного управління, у якій в каналі регулювання частоти обертання необхідно забезпечувати пропорційне управління, а в каналі управління величиною живлячої напруги слід враховувати можливі нелінійності, пов'язані зі змінною моменту опору, що є визначальним при значних вітрових навантаженнях, які діють на антену при несприятливих погодних умовах.

Аналіз літератури. В сучасній літературі [1 – 3] в якості основного типу регульованого асинхронного електроприводу з двигунами з короткозамкненим ротором розглядається частотно-регульований електропривод, який дозволяє задовольнити вимоги як по діапазону, так і по якості регулювання частоти обертання й відпрацювати задані закони руху. Основними елементами частотно-регульованого

електроприводу є випрямляч, інвертор, асинхронний чи синхронний двигун та програмований мікроконтролер.

Крім цього, використовуються індуктивності і ємності для стабілізації напруги виходу випрямляча та зменшення рівня вищих гармонік.

Узагальнена функціональна схема частотно-регульованого електроприводу зображена на рис. 1.

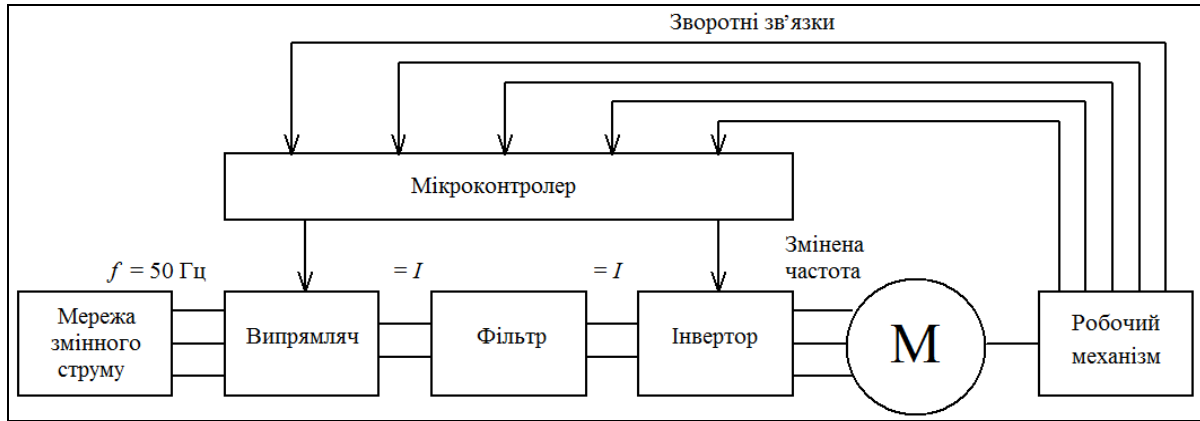


Рис. 1. Функціональна схема частотно-регульованого електроприводу

Частотно-регульований електропривод може бути реалізований з інвертором струму або з інвертором напруги.

Крім цього, використовуються схеми з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). У цих схемах застосовується некерований випрямляч, а змінний струм з регульованою частотою і регульованим рівнем напруги формується інвертором. ШІМ зменшує вміст гармонік на виході інвертора струму шляхом покращення форми кривої струму інвертора або форми кривої напруги на виході інвертора напруги.

В відомій літературі не визначено, яким чином потрібно змінювати момент двигуна при регулюванні його частоти обертання.

Метою статті є обґрунтування структурної схеми системи керування електроприводу радіолокаційної станції, в якому використовується асинхронний електричний двигун з короткозамкненим ротором.

Основний матеріал

Для керування не тільки частотою обертання, а й моментом на валу двигуна необхідно мати в системі електроприводу перетворювач частоти з регульованою напругою по частоті й амплітуді. При цьому, потрібно використовувати закон керування, що забезпечує певне співвідношення напруги і частоти U/f , що визначає значення магнітного потоку в машині. Однак, таке керування не дозволяє одержати значну швидкодію реакції двигуна в перехідних процесах, що обмежує застосування асинхронних двигунів з таким регулюванням в якості виконавчих механізмів з позиційним керуванням.

Для забезпечення достатньої швидкодії електроприводу в перехідних процесах пропонується використовувати метод просторового векторного керування поля. Цей метод заснований на керуванні двома складовими статорного поля, одна з яких забезпечує потік у повітряному проміжку двигуна, а інша – момент на його валу. У результаті стає можливим швидко змінювати значення моменту в широкому діапазоні частот обертання. Електричний двигун при такому способі керування стає подібним двигуну постійного струму з незалежним збудженням.

Керованими компонентами при реалізації методу є складові струму статора в системі обертових координат. Просторовий вектор обчислюється мікроконтролером з використанням моделі, що враховує параметри конкретного типу двигуна, наприклад, активних опорів ротора й статора, індуктивності розсіювання тощо. Одночасно враховується інформація, що надходить з датчика частоти обертання двигуна.

На рис. 2 наведена узагальнена схема векторного керування, де СК – система керування інверто-

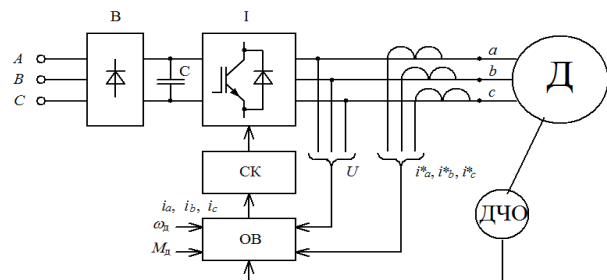


Рис. 2. Схема векторного керування електроприводу

ром; ОВ – обчислювач вектора керування; ДЧО – датчик частоти обертання; Д – двигун; В – випрямляч; І – інвертор.

За будь-якого способу керування за допомогою значення напруги і частоти в системі електроприводу необхідно мати перетворювач частоти, що може бути виконаний на основі різних схем. До появи нового покоління приладів силової електроніки з цією метою можливо було використовувати тиристорні перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком з мережею електроживлення (циклоконвертори) і рідше – перетворювачі з вираженою ланкою постійного струму зі структурою випрямляч-інвертор.

При використанні звичайних тиристорів інвертор напруги слід виконувати за схемою з примусовою комутацією. Разом з тим, тиристорні перетворювачі мають ряд значних недоліків, що істотно знижують техніко-економічні показники електроприводу в цілому. До таких недоліків слід віднести, насамперед, вкрай низькі масогабаритні питомі характеристики широтно-імпульсної модуляції, оскільки вона ускладнюється частотними характеристиками тиристорів. Тому для ефективного керування асинхронним електроприводом малої і середньої потужності потрібно використовувати інвертори напруги на IGBT-транзисторах з робочою частотою, що лежить за межами звукового діапазону. Власне в якості силової схеми використовується класична структура (рис. 3), що містить у своєму складі трифазний мостовий некерований (нерегульований) випрямляч В, LC-фільтр Ф ланки постійного струму, трифазний мостовий автономний інвертор напруги АІН із широтно-імпульсною модуляцією. В силовому каналі використовуються: КА – комутаційний апарат системи управління; БД – блок датчиків. У системі керування використовуються: ДЖ – джерело живлення; МК – мікроконтролер; ВЗ – вузол захисту; ФІ – формувач керуючих імпульсів.

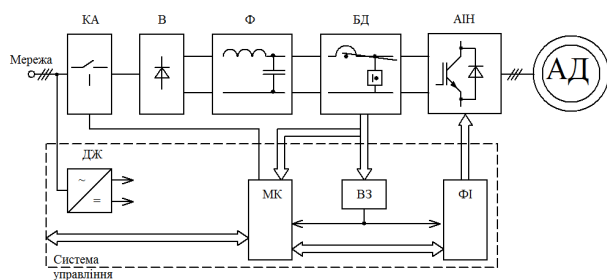


Рис. 3. Силовая схема электропривода

Некерований режим роботи випрямляча і властивості силових керування ключів інвертора знімають питання обмеження похідних струму та напруги di/dt і du/dt у колах вентилів шляхом застосування громіздких снабберів керуючих імпульсів.

Ефективність застосування частотно-регульованих асинхронних електроприводів на основі

IGBT-інверторів з мікроконтролерною системою управління (МСУ) забезпечує:

- енерго- і ресурсозбереження;
- істотне зниження споживання реактивної потужності з мережі;
- збільшення ресурсу роботи електричного, механічного і гідравлічного устаткування;
- автоматизацію й оптимізацію керування технологічними процесами.

Крім власне двоступеневого перетворення електричної енергії – випрямлення й інвертування, силовий канал забезпечує оперативні вмикання і вимкнення електроприводу; аварійні відключення електроприводу від мережі й автоматичні повторні ввімкнення; електромагнітну сумісність електроприводу з мережею, у тому числі в частині індустриальних радіоперешкод; захист елементів перетворювача й електродвигуна від неприпустимих струмів і напруг; реалізацію гальмівних режимів електроприводу.

Кожна з перерахованих задач має, як правило, кілька варіантів розв'язання, що відрізняються схемним і апаратним виконанням відповідних вузлів силового каналу. Застосування тієї чи іншої схеми ввімкнення визначається системою електропостачання електроприводу на об'єкті експлуатації, характеристиками мережі, складом і характеристиками комутаційного обладнання.

Електромагнітна сумісність електроприводу з мережею живлення повинна забезпечуватися зарядкою ємності фільтрів при підключенні до мережі живлення без небезпечних для випрямляча надструмів і перенапруг, режимами споживання активної потужності з мережі та її генерації в мережу живлення до встановлених стандартами значень, а також, струмообмеженням при аваріях у випрямлячі і ланці постійного струму.

Найбільш кращим варіантом забезпечення неприпустимих значень вхідного коефіцієнту потужності є застосування вхідних реакторів і реакторів у колі заряду фільтруючого конденсатора. Мінімізація коефіцієнту несинусоїдності напруг і струмів мережі забезпечується вибором вхідних дроселів та дроселя фільтру ланки постійного струму.

На рис. 4 наведена структурна схема векторного керування електроприводом, яка пропонується.

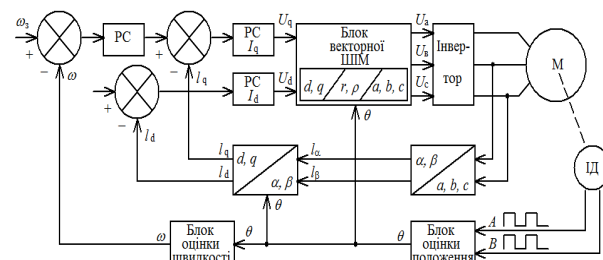


Рис. 4. Структурна схема системи керування електроприводом

В якості силового перетворювача слід використовувати інвертор на IGBT-ключачах або інтелектуальних силових модулях. Драйвери ключів інвертора підключені безпосередньо до виходів ШІМ-генератора мікроконтролера, працюючого в режимі широтно-імпульсної модуляції базових векторів (векторної ШІМ-модуляції). Це забезпечує максимально високий ступінь використання напруги ланки постійного струму і мінімізацію динамічних втрат в інверторі.

Структура на рис. 4 припускає використання імпульсного датчика положення ротора двигуна. Сигнали з датчика вводяться безпосередньо в контролер і обробляються в блоці оцінки положення, що може бути реалізований на основі спеціального периферійного пристрою – таймера з “квадратичним” режимом роботи. Код механічного положення ротора програмно перетворюється в код електричного положення ротора всередині полюсного розподілу машини по осі q . Для реалізації блоку оцінки частоти обертання можуть застосовуватися або спеціальні периферійні пристрої мікроконтролера, принцип дії яких заснований на вимірюванні часового інтервалу відпрацювання двигуном заданого відрізка шляху (естиматори частоти обертання), або периферійні пристрої загального призначення, як, наприклад, процесори подій. В останньому випадку таймер, що працює в “квадратурному” режимі, є базовим для одного з каналів порівняння.

При відпрацюванні двигуном заданого відрізка шляху виникне переривання, центральний процесор визначає часовий інтервал з моменту попереднього переривання і виконує розрахунок поточної частоти обертання приводу. Бажано, щоб таймер, що працює в “квадратурному” режимі, допускав початкову ініціалізацію відповідно до кількості міток на оберт імпульсного датчика положення, а також мав режим автоматичної корекції свого стану за реперним датчиком. Естиматор частоти обертання повинен працювати з регульованим як за числом імпульсів на період вимірювання частоти обертання (від 1 до 255), так і регульованим розділенням за часом (максимальне розділення 50 – 100 нс при діапазоні регулювання 1:128).

Для вимірювання електричних змінних мікроконтролер повинен мати вбудований АЦП з роздільною здатністю не нижче 10 – 12 двійкових розрядів і час перетворення не нижче 5 – 10 мкс. Як правило, восьми каналів АЦП досить для прийому не тільки сигналів зворотних зв'язків за струмом фаз, але і сигналів зворотних зв'язків за напругою і струмом в ланці постійного струму, а також зовнішніх сигналів задання. Додаткові аналогічні сигнали використовуються для реалізації захисту інвертора і двигуна. Робота АЦП буде продуктивнішою, якщо мікроконтролер дозволяє працювати в режимі авто-

матичного сканування і запуску процесу перетворення. Звичайно це виконується або за допомогою окремого периферійного пристрою – процесора периферійних транзакцій, або за допомогою режиму автозапуску АЦП від процесора подій чи генератора ШІМ сигналів. Вибірка як мінімум двох аналогових сигналів повинна бути одночасною.

На основі отриманої інформації про струми I_a і I_b визначається значення струму у фазі $C(I_c)$ і виконується прив'язка струмів до нерухої системи координат, що пов'язана зі статором. Перехід від нерухої системи координат до рухомої, пов'язаної з поточним положенням ротора, дозволяє розрахувати компоненти результуючого вектора струму статора по осях d і q відповідно.

Для мінімізації загального споживаного двигуном струму бажано підтримувати струм по повздовжній осі d рівним нулю. Таким чином, вихід регулятора частоти обертання приводу РС варто підключити на вхід регулятора струму поперечної осі ($PC I_q$), а на регулятор струму по повздовжній осі ($PC I_d$) подати нульовий сигнал. Вихідні сигнали регуляторів струму пропорційні компонентам результуючого вектора напруги статора по осях d і q відповідно. У блоці векторної ШІМ-модуляції виконується спочатку перетворення компонентів вектора напруги до системи координат (q і d), зв'язаної з повздовжньою віссю ротора. Потім, з врахуванням поточного положення ротора q , визначається робочий сектор, внутрішньо секторний кут і розраховуються компоненти базових векторів в абсолютній системі координат, зв'язаній зі статором. Далі формуються напруги, що прикладаються до обмоток двигуна U_a, U_b, U_c .

Усі перераховані перетворення координат (прямі і зворотні перетворення Парка) повинні виконуватися в реальному часі. Бажано, щоб використовуваний для реалізації системи векторного керування мікроконтролер мав вбудовану бібліотеку функцій, адаптованих для ефективного керування двигунами, у тому числі функцій перетворення координат. Час реалізації кожної з цих функцій не повинен перевищувати кількох мікросекунд.

Відмінною рисою системи векторного керування асинхронними двигунами є необхідність використання додаткового обчислювального блоку, у якому виконується оцінка поточного кутового положення вектора потокозчеплення ротора. Це робиться на основі розв'язання в реальному часі системи диференціальних рівнянь, складених відповідно до математичної моделі двигуна.

У випадку використання широтно-імпульсної модуляції для керування частотно-регульованим асинхронним двигуном слід використовувати систему керування, структурна схема якої наведена на рис. 5.

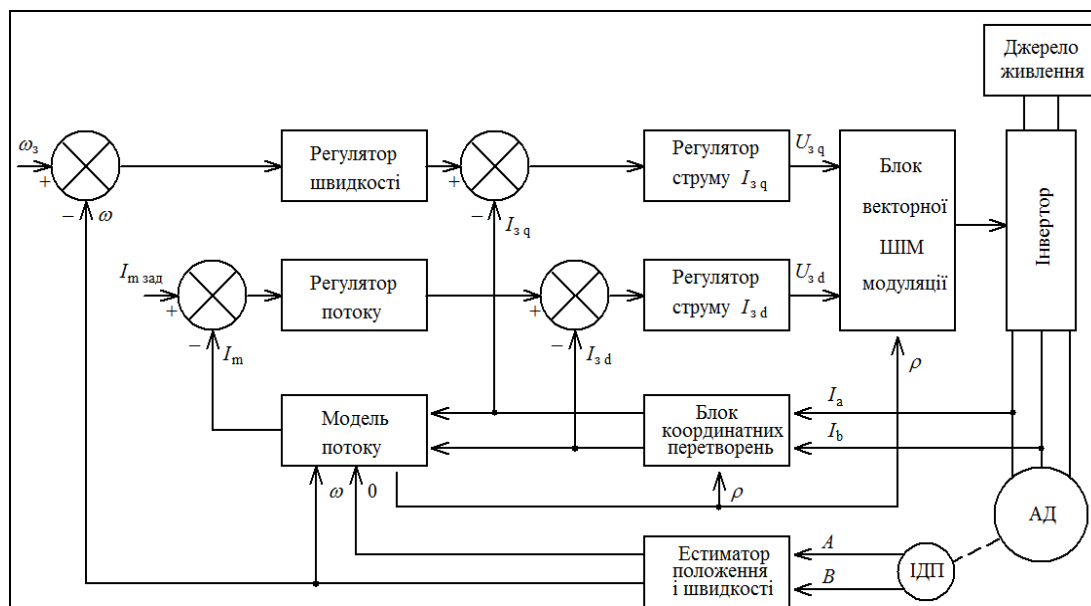


Рис. 5. Структурна схема системи з векторним керуванням

Для реалізації векторного керування, перш за все, потрібно отримати інформацію про координати відповідного вектора в нерухомій системі координат, у якій виконується вимірювання, та про орієнтацію оберткової системи координат, у якій виконуються незалежне регулювання електромагнітних і механічних змінних. Далі виконується векторне перетворення. В якості первинних вимірювальних перетворювачів слід використовувати вимірювачі струму і положення ротора.

Висновки

1. При регулюванні частоти обертання асинхронного електричного двигуна для підтримання на заданому рівні величини обертального моменту необхідно одночасно зі зміною частоти змінювати й величину живлячої напруги.

2. Частотно-регульований електропривод можливо реалізувати з використанням інверторів струму, інверторів напруги або циклоконверторів, які здійснюють широтно-імпульсну модуляцію.

3. Для керування частотно-регульованим електроприводом необхідно до складу електроприводу

ввести перетворювач частоти з регульованою по частоті й амплітуді напругою.

4. Для забезпечення заданої швидкодії електроприводу в перехідних процесах потрібно використовувати метод просторового векторного керування.

5. Запропоновані структурні схеми систем з векторним керуванням забезпечують енерго- та ресурсозбереження, збільшення ресурсу роботи електроприводу та значне зниження споживання реактивної потужності.

Список літератури

1. Системы управления электроснабжением и электроприводом: учебн. / Б.Ф. Самойленко, Б.Т. Кононов, П.М. Гушков и др. – МО СССР, 1990. – 415 с.
2. Системы автономного электроснабжения / Б.Ф. Самойленко, Б.Т. Кононов, Ю.А. Скворцов и др. – МО СССР, 1990. – 327 с.
3. Электропостачання і електрообланання військових об'єктів: підруч. Ч. 1 / В.Б. Толубко, Б.Т. Кононов, Б.Ф. Самойленко, М.І. Григоров. – МО України, 1998. – 374 с.

Надійшла до редколегії 16.07.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Більчук, Харківський університет Повітряних Сил імені І. Кожедуба, Харків.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

Б.Т. Кононов, А.А. Нечаус, Н.Н. Рябуха

В статье обосновывается структурная схема системы векторного управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода.

Ключевые слова: асинхронный электрический двигатель с короткозамкнутым ротором, частотно-регулируемый электропривод, векторное управление, инвертор тока, инвертор напряжения, широтно-импульсная модуляция.

THE CONTROL SYSTEM OF FREQUENCY-REGULATED ELECTRIC DRIVE ON THE BASIS OF THE ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR

B.T. Kononov, A.O. Nechaus, N.M. Ryabukha

The block diagram of system of vector management locates in article is frequency rogation asynchronous electric drive

Keywords: asynchronous electric engine with the kshort-circuit rotor, frequency-managed electric drive, vectorial management, inverting of current, inverting of tension, latitudinal-impulsive modulation.