

УДК 621.3.067: 681.51 (045)

Красношарпа Н.Д., к. т. н.

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПУСКОМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Національний авіаційний університет

Розглянуто питання побудови системи управління частотно-регульованим асинхронним електроприводом при живленні статора двигуна стабілізованим струмом, яка забезпечує пуск із постійною величиною електромагнітного моменту без використання спеціальних датчиків.

Вступ

В сучасних умовах постійного зростання цін на енергоносії технічне переоснащення виробництва є однією з найважливіших задач, що стоять перед економікою України. Для підвищення конкурентоспроможності продукції необхідно не тільки покращувати якість, але й мінімізувати витрати на її виробництво. Зниження енергоспоживання в Україні навіть при збільшенні обсягів виробництва дозволить скоротити енергозалежність держави від зовнішніх енергоресурсів.

Значна частина генерованої електроенергії перетворюється в механічну роботу за допомогою електроприводних пристроїв, тому проблема покращення енергетичних показників таких пристроїв є актуальною. В більшості електроприводів застосовуються асинхронні двигуни, енергетичні показники яких в динамічних режимах роботи невисокі. Окрім того, струм, що споживається асинхронним двигуном (АД) в процесі пуску в 6-8 разів перевищує номінальний, тому у випадках, коли потужність електропривода порівняна із потужністю енергосистеми, необхідно вживати додаткових заходів щодо обмеження пускових струмів.

Аналіз досліджень і публікацій

З метою вирішення питання обмеження величини струмів під час пуску доводиться застосовувати спеціальні пристрої. В нерегульованих електроприводах все частіше використовують пристрої плавного пуску. Це напівпровідникові перетворювачі, які шляхом зміни кута відкриття тиристора обмежують величину струму під час пуску [1]. Такий спосіб зменшує навантаження на електричну мережу, проте призводить до суттєвого погіршення динамічних та енергетичних показників.

Живлення регульованих асинхронних електроприводів здійснюється, як правило, від перетворювачів частоти [2]. Такі системи обмежують величину споживаного струму, але в них достатньо складно реалізувати пуск із підтриманням високого значення моменту без застосування додаткових спеціальних датчиків.

В Інституті електродинаміки НАН України були розроблені асинхронні електроприводи із струмово-частотним управлінням (СЧУ) [3, 4]. В даних електроприводах реалізована функція джерела струму (ДС) регульованої величини.

При живленні обмотки статора АД з короткозамкненим ротором ДС постійної частоти властивості і характеристики двигуна істотно відрізняються від тих, що властиві йому при традиційній схемі живлення від джерела напруги постійної частоти. У разі живлення АД від джерела напруги величина струму статора залежить від величини навантаження на валу двигуна, а величина струму намагнічення із зміною навантаження практично не змінюється. При живленні двигуна від ДС, що забезпечує постійність струмів контуру статора АД, істотні варіації струму ротора, які визначаються зміною моменту навантаження на валу і ковзанням ротора, призводять до зміни в широкій межі струму контуру намагнічування. Зміна магнітного потоку двигуна, що живиться від ДС, при зміні навантаження істотним чином позначається на законах зміни струму ротора і електромагнітного моменту при зміні величини ковзання.

Живлення АД від джерела струму приводить до істотного зменшення пускового моменту двигуна. Для забезпечення ефективного пуску електроприводу з моментом навантаження на валу за умови обмеження струму статора АД на заданому рівні в процесі пуску, його слід живити від ДС регульованої частоти.

Задаючи необхідну величину струму статора АД у поєднанні з необхідною швидкістю наростання частоти джерела живлення в процесі пуску, можна реалізувати найбільш сприятливий режим пуску асинхронного електроприводу.

Метою даної роботи є розробка системи управління АД в складі електропривода із СЧУ, яка дозволить реалізувати пуск із максимальною величиною моменту.

Особливості механічних характеристик АД в складі електропривода з СЧУ

При аналізі статичних характеристик АД, що живиться від ДС змінної частоти, можна скористатися схемою заміщення (рис. 1).

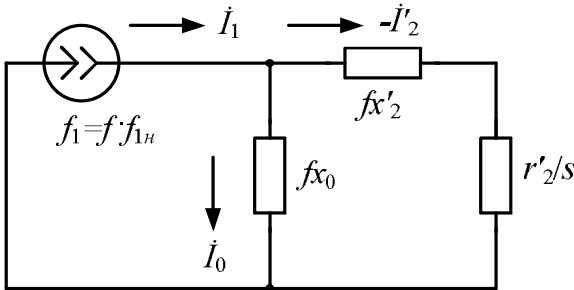


Рис. 1. Схема заміщення АД

де $f=f_1/f_{1н}$ – відносна величина частоти ДС; $f_{1н}$ – номінальна частота живлення АД; $s=f_2/f_{1н}$ – величина ковзання ротора АД при частоті живлення f_1 .

Якщо параметри схеми заміщення привести до номінальної частоти ДС, то параметр r'_2/fs можна позначити як r'_2/s_a , де s_a – ковзання на природній характеристиці АД. Якщо на довільній частоті f_2 джерела живлення ковзання ротора в рушійному режимі роботи АД змінюється в діапазоні $0 < s \leq 1,0$, то при приведенні його до значення s_a , воно змінюватиметься в діапазоні $0 < s_a \leq f_1$. Величина s_a пропорційна абсолютній швидкості ковзання ротора АД щодо магнітного поля при довільній частоті.

Скориставшись схемою заміщення АД (рис. 1), можна отримати вирази для визначення струму намагнічування і приведеного до статора роторного струму для довільної відносної частоти f у вигляді:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 \frac{jx'_2 f + r'_2/s}{j(x_0 + x'_2)f + r'_2/s} = \dot{I}_1 \frac{jx'_2 + r'_2/s_e}{j(x_0 + x'_2) + r'_2/s_e};$$

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}_1 \frac{jx_0 f}{j(x_0 + x'_2)f + r'_2/s} = \dot{I}_1 \frac{jx_0}{j(x_0 + x'_2) + r'_2/s_e}.$$

Електромагнітний момент АД через значення роторного струму при довільній частоті джерела живлення визначається відомим співвідношенням [5]

$$M_{ем} = \frac{m_1 I_2'^2 r'_2}{\omega_0 f s},$$

де m_1 – число фаз обмотки статора;

$$\omega_0 f = \frac{2\pi f_{1н}}{P} f = \omega_0 f,$$

тому:

$$M = \frac{m_1 I_1^2 r'_2}{\omega_0 s_a} \cdot \frac{x_0^2}{(x_0 + x'_2)^2 + (r'_2/s_a)^2}.$$

Величини критичного ковзання ($s_{кр}$) і максимального моменту АД ($M_{макс}$), а також величину пускового моменту при довільній частоті ДС f_i ($M_{пн}$) можна розрахувати за допомогою співвідношень:

$$s_{кр_i} = \pm \frac{r'_2}{f_i(x_0 + x'_2)}, \quad (1)$$

$$M_{макс} = \frac{m_1 I_1^2}{2\omega_0} \cdot \frac{x_0^2}{x_0 + x'_2}, \quad (2)$$

$$M_{пн} = \frac{m_1 I_1^2 r'_2}{2\omega_0} \cdot \frac{f_i x_0^2}{f_i^2 (x_0 + x'_2)^2 + r_2'^2}. \quad (3)$$

Як впливає з виразів (1) – (3) величина критичного ковзання збільшується із зменшенням частоти, а величина максимального моменту АД при живленні від ДС не залежить від рівня частоти. Величина пускового моменту досягає максимального значення $M_{пн} = M_{макс}$ при частоті $f_i = r'_2/(x_0 + x'_2)$, що відповідає значенню моменту на природній механічній характеристиці двигуна ($f = 50$ Гц) при $s_a = s_{а кр}$.

Із зміною частоти ДС для заданої кратності струму статора величини фазної напруги при ковзаннях $s_i = s_{кр_i}$ змінюються практично пропорційно зміні частоти ДС. Монотонний характер збільшення фазної напруги на обмотці статора АД при розгоні двигуна в діапазоні ковзань $s_{н} < s_i \leq s_{кр_i}$ при різних значеннях частоти і величини струму ДС (рис. 2) дозволяє використовувати величину фазної напруги як керуючий чинник зміни частоти ДС при частотному пуску двигуна. Залежності електромагнітного моменту АД і величини фазної на-

пруги від ковзання на рис. 2 розраховані для кратностей струму статора $I_1=I_{1н}$, $I_1=2I_{1н}$ і

$I_1=3I_{1н}$ при частоті ДС 25 Гц, де $I_{1н}$ – номінальний струм АД.

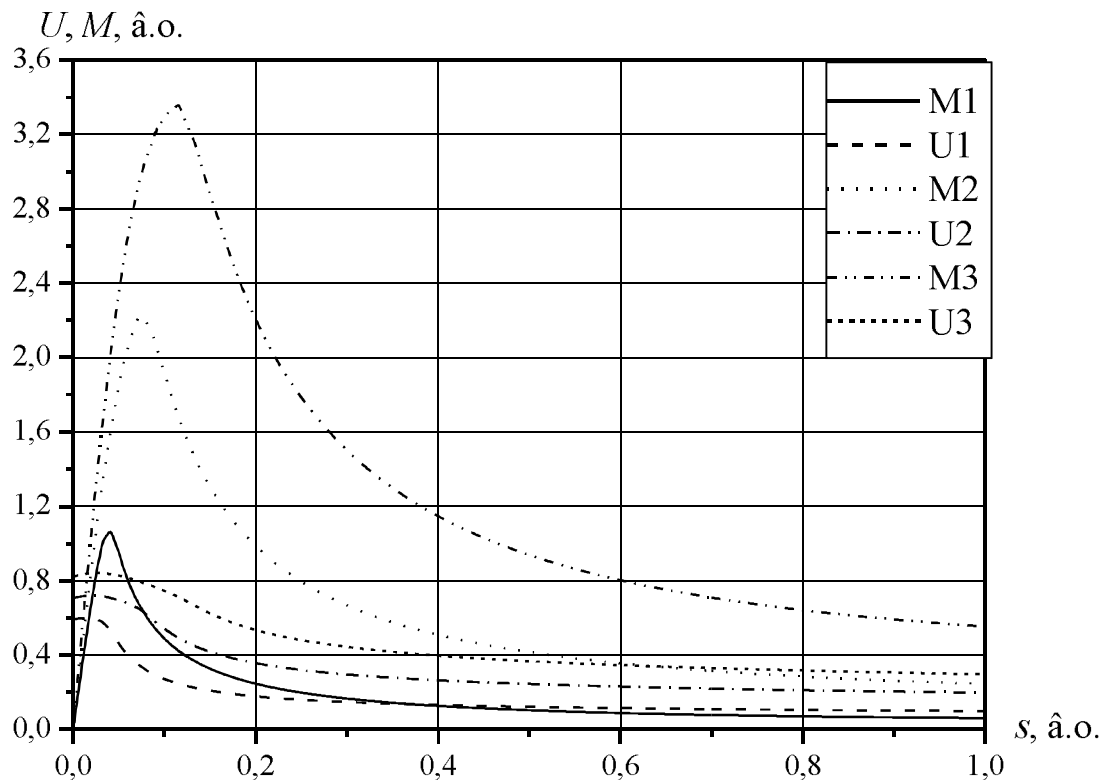


Рис. 2. Залежності моменту і фазної напруги АД від ковзання

Індексами 1, 2 і 3 при маркіруванні моменту (M) і фазної напруги (U) позначені їх залежності від ковзання для значень струму статора $I_{1н}$, $2I_{1н}$ і $3I_{1н}$ відповідно. Оскільки АД живиться від ДС, то за одиничне значення напруги прийнята величина номінальної фазної напруги двигуна 220 В.

Система управління пуском АД

Принципи організації управління частотою ДС при частотному пуску АД можна пояснити з використанням рис. 2. Якщо в початковий момент пуску двигуна задати частоту 2 Гц при двократному струмі статора, то він розвине пусковий момент, рівний максимальному $2,2 M_{н}$, де $M_{н}$ – номінальний момент двигуна. У цей момент часу напруга на фазі обмотки статора дорівнюватиме 0,142 в.о. Під дією електромагнітного моменту двигун почне розганятися і напруга на обмотці статора буде наростати. Якщо вслід за зростанням напруги почати збільшувати частоту ДС за певним законом у функції напруги на обмотці статора АД, то в процесі розгону можна забезпечити постійність s_a , а отже, і електромагнітного моменту. Якщо забезпечити постійне

значення s_a на рівні $s_{aкр}$, то і розгін АД відбуватиметься з величиною електромагнітного моменту близькою до максимальної. Як відомо, в зоні низьких частот істотно зростає частка активного опору в повному еквівалентному опорі АД, що при живленні двигуна від джерела напруги вимагає збільшення відношення U/f з пониженням частоти. При живленні АД від ДС відбувається автоматична корекція рівня фазної напруги з пониженням частоти. Завдяки цьому явищу закон зміни напруги із зменшенням частоти наближається до лінійного.

При підборі відповідного закону зміни частоти у функції фазної напруги статора АД в частотному діапазоні від 2 до 10 Гц, коли найбільшою мірою позначається нелінійність контуру управління частотою, можна забезпечити узгодження темпів зміни частоти і напруги при розгоні двигуна. Добитися такого результату можна завдяки використанню в контурі управління частотою ДС за рівнем фазної напруги двигуна нелінійного функціонального перетворювача. При узгодженні темпів наростання частоти з рівнем зміни напруги на статорі АД, що живиться від ДС регульованої

частоти, в процесі його пуску можна забезпечити розгін двигуна з бажаною постійною величиною електромагнітного моменту в діапазоні:

$$M_c < M \leq M_{\text{макс.}}$$

Таким чином, використання фазної напруги на обмотці статора АД в якості керуючого чинника в контурі управління частотою ДС дозволяє здійснити пуск двигуна із заданим значенням електромагнітного моменту або величини ковзання s_a , безпосереднє вимірювання яких з метою управління частотою ДС ускладнено.

Для практичної реалізації пропонуваного способу управління частотою ДС в процесі частотного пуску асинхронного електроприводу слід використовувати згладжену величину випрямленої трифазної напруги статора АД. Усереднювання величини напруги, що підводиться до статора АД від ДС з поточними значеннями частоти від приблизно 2 Гц до

50 Гц, за допомогою трифазного двонапівперіодного випрямляча з ємнісним фільтром пульсацій дозволяє знизити вплив несинусоїдності кривої напруги на виході ДС на закон управління частотою. Це особливо актуально для асинхронних електроприводів з малим часом пуску.

На рис. 3 приведена структурна схема асинхронного електропривода з ТЧУ на базі АІС [6], в яку додатково включений вузол завдання частоти інвертора, що забезпечує реалізацію частотного пуску залежно від величини напруги на статорі АД. До складу електроприводу входять стабілізатор струму (СС), випрямляч, ключовий елемент (КЕ), АІС і АД. Вузол захисту (ВЗ) забезпечує захист від холостого ходу інвертора, а вузол завдання шпаруватості (ЗШ) і вузол управління ключовим елементом (ВУКЕ) формують сигнал управління КЕ відповідно до величин частоти на виході АІС за необхідним алгоритмом.

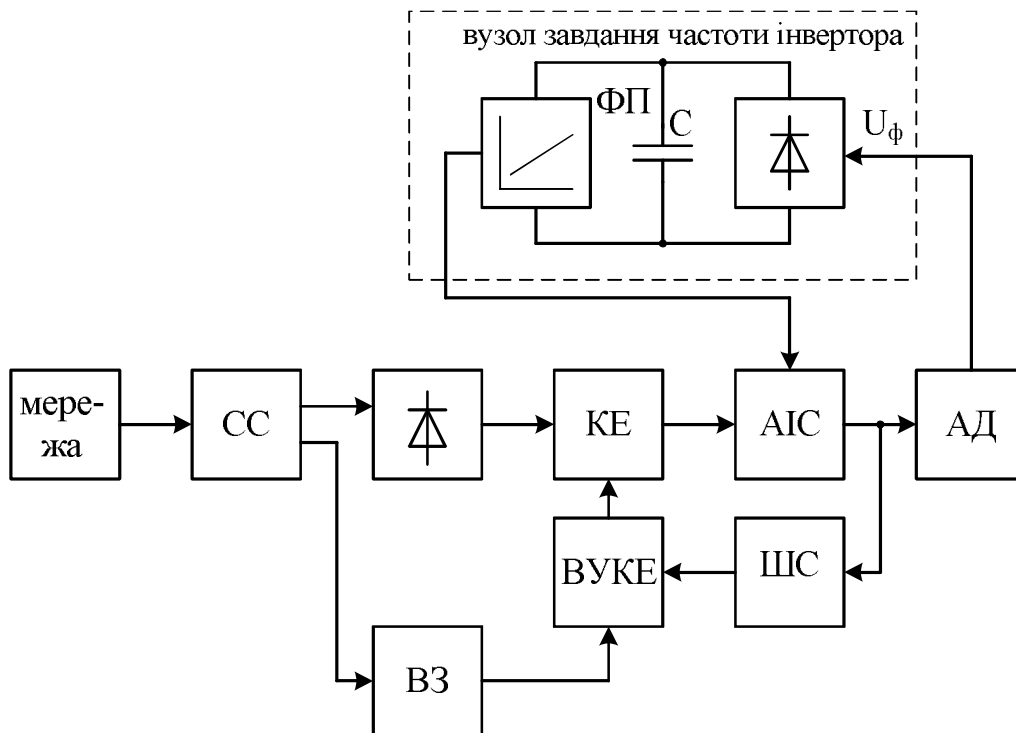


Рис. 3. Структурна схема електропривода

Управління частотою забезпечується системою управління АІС відповідно до сигналу, що поступає від вузла завдання частоти інвертора, згідно із законом, що формується функціональним перетворювачем (ФП), залежно від рівня напруги на статорі АД у функції поточного значення $s_{ai} = f_i s_i$.

Величина s_{ai} є мультиплікативним показником, що однозначно визначає величину фазної напруги статора АД як у функції поточного значення частоти, так і величини ковзання ротора АД відносно поля на заданій частоті. Реалізація частотного пуску АД від ДС регульованої частоти може бути здійснена і на

базісхемотехнічних рішень автономних інверторів напруги (АІН) [4]. В цьому випадку стабілізація на заданому рівні струму статора АД здійснюється широтно-імпульсним регулятором струму у функції величини випрямленого струму, а управління частотою ДС – комутацією транзисторів АІН відповідно до сигналу вузла завдання частоти інвертора (рис. 3) у функції випрямленої і згладженої напруги фази статора АД.

Для оцінки динамічних властивостей та

енергетичних характеристик частотного пуску електропривода з двигуном 4А160S2У3 при живленні від джерела струму із струмом статора АД $2I_n$, моментом інерції $J_\Sigma=4 J_{об}$ і управлінні частотою перетворювача за лінійним законом в діапазоні від 2 до 50 Гц проведено розрахунки режиму пуску з моментом навантаження $M_c=M_n$. Результати розрахунку наведені в табл. 1. В чисельнику для порівняння наведено параметри при прямому пуску електропривода.

Таблиця 1.

Порівняння характеристик прямого і частотного пуску

$t_{п}$, с	$W_{п}$, кДж	$\Delta P_{сер}$, кВт	$S_{1сер}$, кВ·А	η , в.о.	$\cos\phi_1$
3,203	158,8	49,59	108,3	0,051	0,47
1,085	56,43	5,201	22,17	0,602	0,586

У таблиці позначені: $t_{п}$ – час розгону приводу від нерухомого стану до частоти 50 Гц; $W_{п}$ – втрати енергії в електродвигуні за час пуску; $\Delta P_{сер}$ – середня величина потужності втрат, що виділяються в двигуні за час пуску; $S_{1сер}$, кВ·А – середнє значення повної потужності, споживаної електроприводом з мережі в процесі пуску; η – ККД процесу пуску; $\cos\phi_1$ – середнє значення коефіцієнта потужності за час пуску.

Як впливає з даних, наведених в табл. 1, при частотному пуску з обмеженням струму статора АД на рівні $I=2I_n$ і вибраному законі зміни частоти в процесі розгону асинхронного електропривода досягаються найменші значення часу пуску, втрат енергії при пуску, а

отже, максимальні значення ККД процесу пуску. Високі середні значення коефіцієнта потужності, рівні обумовлюють відносно малу величину повної потужності, споживаної від джерела живлення $S_{1сер}$.

Середня величина електромагнітного моменту АД в процесі пуску електропривода з двократним (по відношенню до номінального) струмом статора близька до значення критичного моменту двигуна. Дана обставина свідчить про те, що при вибраному законі зміни частоти джерела живлення в процесі розгону асинхронного електропривода абсолютна величина ковзання залишається постійною і близькою до значення $s_{a кр}$.

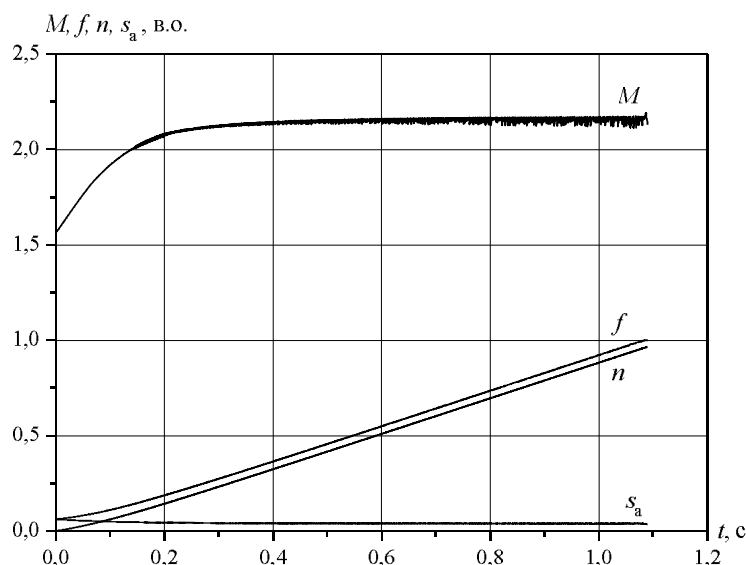


Рис. 4. Оцилограми пуску електропривода

На рис. 4 наведені розрахункові осцилограми пуску асинхронного електропривода. Як видно з осцилограм, початкова величина електромагнітного моменту двигуна декілька менше максимальної, а абсолютна величина ковзання більше критичного на природній механічній характеристиці двигуна $s_a > s_{a\text{кр}}$. Це обумовлено спрощеним лінійним законом зміни частоти у функції фазної напруги АД в процесі розгону, який завищує значення початкової частоти при даній напрузі фази статора обмотки, необхідній для підтримки струму статора на рівні $I=2I_n$. Основна частина процесу розгону приводу протікає при постійній величині ковзання s_a близькому до критичного значення і моменті двигуна близькому до максимального.

Висновки

Таким чином, формування сигналу управління частотою ДС за рівнем фазної напруги АД в процесі його розгону дозволяє забезпечити приводу в процесі пуску властивості джерела моменту (незалежність величини моменту від зміни швидкості обертання в широкому діапазоні) і побічно організувати управління процесом частотного пуску від ДС регульованої частоти при постійній абсолютній швидкості ковзання ротора без використання

датчиків моменту або ковзання.

Список літератури

1. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод (Теорія і практика) / М.Г. Попович, В.В. Кострицький, Л.Ф. Артеменко та інш; За редакцією М.Г. Поповича та В.В.Кострицького. – К.: КНУТД, 2008. – 408 с.
2. Онищенко Г.Б. Электрический привод. – М.: Академия, 2003. – 320 с.
3. Исаков В.Н., Войтех В.А., Красношарпа Н.Д. Характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при питании от источника тока регулируемой частоты // Техническая электродинамика. – 1992. – № 6. – С. 55-60.
4. Электроприводы переменного тока с токово-частотным управлением / И.В. Волков, В.Н. Исаков, В.А. Войтех, Н.Д. Красношарпа, Г.В. Исаков. – К., 1998. – 32 с.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
6. Патент України на винахід 20912. Електропривод змінного струму МПК 7 Н02Р7/44. Акинін К.П., Войтех В.О., Волков І.В., Ісаков В.М., Красношарпа Н.Д., Плугатар О.П., Стяжкін В.П. – Опубл. 17.09.2001. – Бюл. № 8.