

УДК 681.527.2:621.941.21/.28

**О.О. Азюковський, канд. техн. наук, А.В. Бакутін**

*(Україна, Дніпропетровськ, Державний ВНЗ "Національний гірничий університет")*

### **АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПРИВОДУ ГОЛОВНОГО РУХУ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ**

**Вступ.** Металооброблювальні верстати є найчисельнішою групою промислових механізмів, що працюють з електроприводами. До них відносяться верстати для обробки деталей, матеріалів та виробів методами різання, штампування, кування, шліфування та ін. Зупинимося на металорізальних верстатах. До них належать технологічні машини, які шляхом зняття стружки із заготовки отримують деталь з заданими розмірами, формою, взаємним розташуванням поверхонь. Процес різання відбувається за умови

безперервного відносного переміщення заготовки та різального інструмента, яке здійснюється за допомогою виконавчих механізмів станка, тобто приводами, у якості яких можуть використовуватись гідравлічний, пневматичний та електричний привод. Найбільш розповсюдженим є електропривід, який дозволяє в широкому діапазоні, з високою точністю та швидкодією регулювати швидкість виконавчого органа.

Основну функцію електропривода – перетворення електричної енергії в механічну – виконують електричні двигуни. Параметри електричних двигунів визначають такі технічні показники привідного механізму, як продуктивність роботи, точність виконання технологічних операцій, надійність, ремонтно-придатність та ін. Двигунами для приводів металорізальних верстатів можуть бути загальнопромислові двигуни постійного струму та асинхронні двигуни, а також спеціальні типи електричних машин: високомоментні та малоінерційні двигуни постійного струму, вентильні двигуни.

Розробка ефективних систем керування двигунами зумовлює зміну структури приводу головного руху та подачі. Загальною тенденцією на сучасному етапі розвитку верстатобудування є перехід до безступеневого регулювання швидкості різання та подачі зі скороченням та спрощенням кінематичної структури приводів, що також дозволить підвищити продуктивність та якість обробки металу за рахунок вибору найбільш раціональних режимів різання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** свідчить, що на даний час в якості приводу верстатів у країнах СНД найбільш широкого розповсюдження набули електромеханічні приводи з двигунами постійного струму (ДПС), які живляться від тиристорних перетворювачів (ТП) [1]. Однак за кордоном з 80-х рр. почали розроблятися керовані електроприводи на основі сучасної елементної бази, які за багатьма показниками мають перевагу у порівнянні з електроприводами постійного струму – приводи з двигунами змінного струму. Розвиток мікропроцесорної техніки дає можливість реалізовувати складні алгоритми керування системами електропривода. Найбільш розповсюдженим є привід змінного струму на основі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором [2]. Крім того, останнім часом більшого впровадження у регульованому електроприводі малої та середньої потужності набувають вентильні двигуни зі збудженням від високоенергетичних постійних магнітів [3]. Сучасний етап розвитку металооброблювальних верстатів характеризується початком широкого використання глибокорегульованих приводів змінного струму в механізмах головного руху та подачі.

**Мета роботи** – обґрунтування вибору найбільш раціонального типу електропривода головного руху металорізальних верстатів.

**Матеріали досліджень.** Залежно від призначення розрізняють приводи головного руху, подач та допоміжні приводи. Головний електропривід виконує процес різання, електропривід подач – переміщення заготовки або інструмента до зони різання, чим забезпечується обробка всієї необхідної поверхні. Допоміжний привід безпосередньої участі у реалізації та підтримці процесу різання не бере, а виконує різноманітні підготовчі операції, такі як переміщення деталей, обертання інструментальних магазинів, подачу змащувальної рідини, вентиляцію та ін.

До кожного типу приводу висуваються згідно з його призначення відповідні вимоги. Автоматизація технологічних процесів у машинобудуванні, створення та широке впровадження у промисловість верстатів з ЧПК призвело до висунення жорстких вимог до приводів головного руху та подачі (таблиця) [1]. Так, якщо в універсальних верстатах та простих верстатах з ЧПК основною функцією приводу є стабілізація швидкості, що зумовлювало обмеження на динамічні характеристики за збуренням, то в сучасних багатоопераційних верстатах головний привід використовується для позиціонування шпинделя та різьбонарізання. Характеристики приводу залежать від технологічних режимів обробки деталей, стійкості інструменту, необхідності розширення діапазону регулювання, скорочення часу перехідних процесів пуску-гальмування. У сучасних верстатах з ЧПК динамічні характеристики приводу головного руху за керуванням у значній мірі визначають продуктивність роботи верстата.

**Вимоги до приводів головного руху та подачі**

Параметр	Привід	
	головного руху	подачі
Діапазон частот обертання, об/хв	До 1:1000	До 1:30000
Діапазон потужностей, кВт	2-300	0,05-11
Закон регулювання при зміні частоти обертання	Постійність потужності та моменту	Постійність моменту
Похибка частоти обертання відносно встановленої, %		
$n$	2	2
$0,1n$	5	10
$0,01n$	15	15
$0,001n$	30	25

0,0001n	-	35
---------	---	----

За технологічними вимогами відносно обробки металу різанням швидкість головного електропривода має регулюватися при постійній потужності, оскільки силове різання виконується на менших частотах обертання шпинделя, а чистове різання – на високих частотах обертання з меншими зусиллями. Приводи подачі регулюються при постійному моменті. Вони повинні мати широкий діапазон регулювання швидкості для забезпечення високої точності та малої шорсткості обробки, крім того, високу швидкість та швидкодію під час розгону-гальмування та накидання-скидання навантаження.

У сучасних верстатах з ЧПК використовують електроприводи як з однозонним, так і двозонним регулюванням швидкості обертання. Однозонне регулювання використовується переважно у верстатах, потужність на максимальній швидкості яких не перевищує 5 кВт [1]. У більшості верстатів використовується двозонне регулювання. Діапазон двозонного регулювання швидкості приводу головного руху за умови постійної потужності можна розбити на три зони (рис. 1). У першій зоні швидкість регулюється від 0 до  $\omega_H$ . При цьому обертальний момент не змінюється, а потужність зменшується пропорційно швидкості. У другій зоні швидкість регулюється від  $\omega_H$  до  $\omega_{max}^I$  з одночасним послабленням магнітного потоку. При цьому максимальна потужність не змінюється, а обертальний момент знижується зворотно пропорційно швидкості. У перших двох зонах привід може працювати з номінальним струмом. У третій зоні швидкість регулюється від  $\omega_{max}^I$  до  $\omega_{max}^{II}$  за подальшого послаблення магнітного потоку, що зумовлює зниження максимального обертального моменту та потужності приводу.

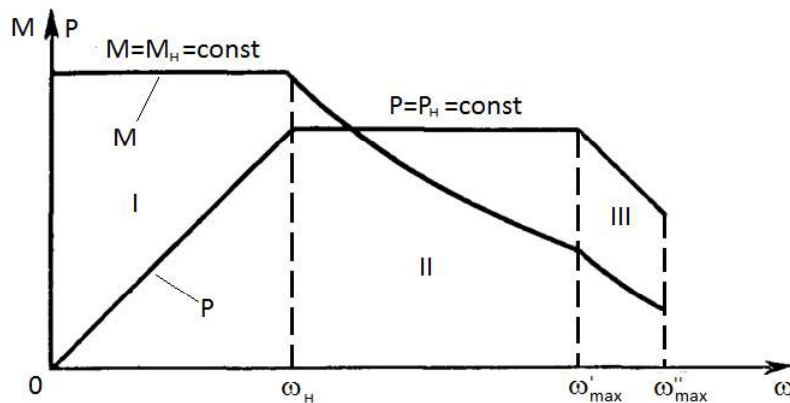


Рис. 1. Залежність максимальної потужності та обертального моменту від швидкості

Основним параметром головного приводу є номінальна потужність, яка характеризує роботу двигуна в другій зоні. Зазвичай вона складає 5-50 кВт [4]. Збільшення потужності приводу зумовлено вдосконаленням технології обробки та розробкою нових високопродуктивних інструментів для обробки металу різанням. Значною мірою на характеристики приводу впливає максимальна частота обертання, яка вибирається за граничним режимом обробки металевої заготовки при роботі приводу у третій зоні, та може сягати 6000 об/хв.

Навантаження приводу головного руху визначається силою різання, яка залежить від механічних властивостей оброблювального матеріалу та матеріалу інструмента, геометрії різального інструмента, змащувальної рідини та режиму обробки. Відносно фізичних властивостей оброблювального матеріалу, його твердості та в'язкості залежність сили різання від швидкості різання носить різний характер (рис. 2), що зумовлене схильністю пластичних матеріалів до наростотворення [5].

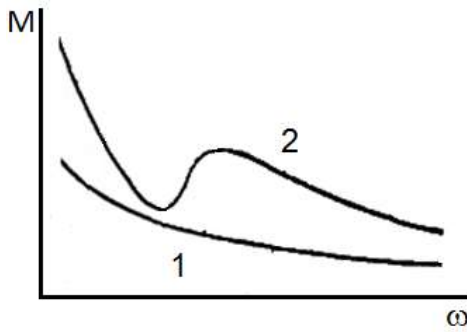


Рис. 2. Залежність моменту опору від швидкості різання для матеріалів несхильних (1) та схильних (2) до наростоутворення

Основними номінальними режимами роботи електродвигунів приводу головного руху є тривалий режим роботи (S1), короткочасний (S2), повторно-короткочасний (S3) та періодичний безперервний режим з короткочасним навантаженням (S6) [6]. Діаграма навантаження залежить від кількості та послідовності переходів інструмента, глибини зрізання матеріалу, подачі, сили різання та швидкості. Наприклад, при обробці тіла обертання (рис. 3, а) діаграма навантаження (рис. 3, б) відповідає режиму S6 [1]. У верстатах, режим навантаження яких змінюється та має повторно-короткочасний характер (свердлувальний верстат), електродвигуни можуть працювати зі значними перевантаженнями  $2 - 3M_{\text{н}}$ . При врізанні інструмента в деталь спостерігається ударне прикладення навантаження, особливо при обробці матеріалів з міцним поверхневим припуском. Крім того, під час фрезування, яке супроводжується постійною зміною площі поверхні різання, виникають коливання моменту опору [5].

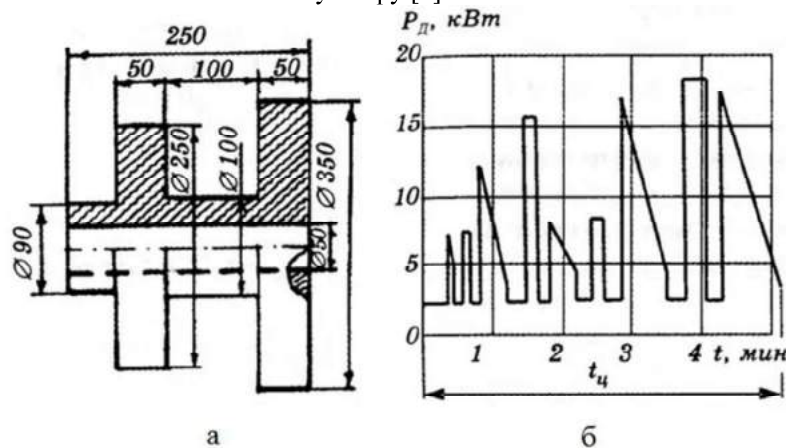


Рис. 3. Ескіз оброблювальної деталі та діаграма навантаження приводу головного руху

Перевантажувальна здатність  $M_{\text{max}}$  для приводу головного руху характеризує можливість роботи у форсованих режимах, наприклад, при необхідності зрізання великого шару металу або при обробці металу зі значною поверхневою міцністю припуску. У пускових режимах перевантажувальна здатність визначає час перехідного процесу розгону або гальмування на великі швидкості. Діапазон регулювання швидкості головного приводу складає 100, але може досягати 1000 і більше при роботі у режимі орієнтації шпинделя [4]. Розширення діапазону регулювання пов'язане з підвищенням максимальної та зменшенням мінімальної швидкості, що зумовлено розширенням технологічних завдань та можливістю забезпечення спеціальних режимів роботи (орієнтація шпинделя для виводу інструмента).

Розглянемо більш детально переваги та недоліки різних типів двигунів в умовах використання їх як приводів металорізальних верстатів. Двигуни постійного струму (ДПС) розрізняють за:

- типом системи збудження – з електромагнітним збудженням та від постійних магнітів;
- швидкістю – нормальної та підвищеної;
- інерційністю – з великим та малим власним моментом інерції;
- типом конструкції – традиційні, високомоментні, малоінерційні.

Двигуни приводів головного руху виконують з електромагнітним збудженням, що дозволяє регулювання з постійною потужністю, яке вимагається для головного руху. ДПС з незалежним збудженням (НЗ) мають лінійні механічну та регульовальну характеристику, що дозволяє регулювати швидкість за лінійним законом  $\omega = k \cdot U$  та забезпечує можливість досягнення великого діапазону регулювання. Головними перевагами двигунів з електромагнітним збудженням є велика теплова стала часу, механічна міцність та висока надійність. Однак вони мають невелику швидкість через значний власний момент інерції та невисоку перевантажувальну здатність, що зумовлено комутаційною спроможністю двигуна. Крім того, наявність щітково-колекторного вузла вимагає частого огляду, ремонту та заміни, а також унеможливає роботу двигуна в агресивному середовищі, вплив якого на колектор знижує надійність двигуна. Під час роботи у неномінальних режимах вносяться певні обмеження на параметри двигуна. Так, при швидкості вище за номінальну погіршуються умови комутації, і тому необхідно обмежувати струм якоря, при

роботі на зниженій швидкості погіршуються умови охолодження двигунів із самовентиляцією, що також вимагає зниження струму якоря.

Як було зазначено вище, для приводу головного руху потужністю до 5 кВт може використовуватись однозонне регулювання швидкості, через що можливе застосування спеціальних типів ДПС. Двигуни зі збудженням від постійних магнітів називають високомоментними. Вони мають високу теплову сталу часу, що дозволяє значні перевантаження за струмом у короткочасних режимах  $(8 - 10)I_{н}$  (ДПС з НЗ –  $(2 - 4)I_{н}$ ), малу чутливість до динамічної зміни навантаження, достатню механічну міцність. Відсутність втрат на збудження знижує рівень та інтенсивність нагрівання. Високомоментні двигуни виконуються багатополюсними, що підвищує рівномірність обертання (зменшує коливання моменту), особливо на малих частотах обертання.

Одним зі спеціалізованих верстатних типів ДПС є малоінерційні двигуни. Вони мають малу електромагнітну та електромеханічну сталу часу, що дозволяє підвищити динамічні струми без погіршення умов комутації та відповідно швидкодію електропривода, що покращує продуктивність верстатів та якість обробки деталей. Проте, через малі інерційності можуть виникнути резонансні явища, і як наслідок, вихід із ладу вузла та поломка інструмента. Високі прискорення викликають у механічних передачах значні динамічні навантаження, внаслідок чого чутливість приводу до динамічної складової навантаження, при цьому зростає нерівномірність обертання двигуна та переміщення механічних вузлів, особливо на малих швидкостях. Також вони мають малу термічну сталу часу та невисоку механічну міцність, що знижує загальну надійність верстата у цілому.

Асинхронні двигуни (АД) із короткозамкненим ротором мають найбільш просту конструкцію та високу надійність. Вони технологічні та ремонтпридатні, що зумовлене відсутністю щіток та контактних кілець. Протягом багатьох років цей тип двигунів використовувався в основному в некерованих електроприводах, хоча теоретичні способи керування були відомі. Із усіх відомих способів регулювання швидкості асинхронного двигуна (регулювання за допомогою зміни напруги живлення статорної обмотки, перемикання числа пар полюсів, уведення додаткового опору або ЕРС в коло ротора) тільки регулювання шляхом зміни частоти напруги живлення статора може скласти конкуренцію із системами на основі ДПС з НЗ, що стало можливим з розвитком напівпровідникових перетворювачів та обчислювальної техніки. Закони частотного регулювання дозволяють отримати регульовальні характеристики, аналогічні ДПС з НЗ, а також двозонне регулювання швидкості з послабленням магнітного потоку.

До недоліків асинхронних двигунів слід віднести чутливість до коливань напруги живлення, обертальний момент двигуна квадратично залежить від напруги живлення, а також спостерігається перегрів статора при підвищенні напруги та ротора – при зниженні. Крім того, на низьких швидкостях погіршується охолодження обмотки ротора, що вимагає застосування примусового охолодження.

Синхронні двигуни, як і двигуни постійного струму, можуть виконуватися з електромагнітним збудженням та збудженням від постійних магнітів. Двигуни з електромагнітним збудженням в основному використовуються в потужних некерованих установках з тривалим режимом роботи. Вони високий ККД, який складає 96–98% [7], що на 1–1,5% більше, ніж ККД аналогічних асинхронних двигунів, можливість регулювання перевантажувальної здатності за допомогою регулювання струму збудження, меншу чутливість до коливань напруги живлення у порівнянні з асинхронним двигуном, можливість роботи з високим та випереджувальним коефіцієнтом потужності. Синхронні двигуни мають абсолютно жорстку механічну характеристику, а регулювання швидкості відбувається шляхом зміни частоти напруги живлення, що дозволяє отримати привід з широким діапазоном регулювання швидкості. До недоліків традиційних синхронних двигунів слід віднести наявність контактних кілець на роторі та значний момент інерції, що погіршує динамічні показники приводу.

Інший вид синхронних двигунів, які мають збудження від постійних магнітів, називають вентильними двигунами. За регульовальними характеристиками вентильний двигун подібний до ДПС, регулювання швидкості здійснюється зміною напруги живлення, але в порівнянні з ДПС у вентильному двигуні відсутній щітково-колекторний комутатор, він має менший момент інерції, кращий відвід тепла, ККД, а також його максимальний момент не залежить від швидкості. Порівнюючи з АД, що живиться від перетворювача частоти, вентильні двигуни мають кращий ККД через відсутність втрат на ковзання, надійне охолодження, більшу швидкодію та керованість. Головним недоліком є велика вартість вентильного двигуна в порівнянні з асинхронним двигуном, через що використання останнього може бути більш раціональним. Хоча вентильні двигуни і мають постійні магніти, що унеможливує безпосереднє регулювання потоку збудження, системи керування дозволяють зменшувати магнітний потік зміною реакції якоря двигуна, тим самим забезпечується двозонне регулювання швидкості, а це є важливим у приводах головного руху. Відсутність перекидання зі зростанням навантаження та зміни кута навантаження при різному навантаженні зумовлюють переваги над синхронними двигунами.

**Висновки.** З наведеного аналізу різних типів електромеханічних перетворювачів можна прийти до висновку, що з підвищенням рівня автоматизації сучасного виробництва та тенденцією до збільшення

швидкостей та потужності різання, для приводу головного руху металорізальних верстатів найбільш перспективним є використання машин змінного струму. Головним недоліком ДПС є наявність щітково-колекторного вузла, який обмежує максимальну швидкість, потужність та перевантажувальну здатність двигуна, крім того, вимагає частого профілактичного огляду та ремонту. Серед двигунів змінного струму найбільш раціональним буде використання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, який у достатній мірі задовольняє усім вимогам приводу головного руху: сучасні системи керування забезпечують двозонне регулювання з необхідним діапазоном швидкості, тривалість роботи з перевантаженням обмежена лише можливим перегрівом двигуна, мінімальне обслуговування та висока надійність.

**Список літератури**

1. Васильков Д.В. Электромеханические приводы металлообрабатывающих станков. Расчет и конструирование [Текст]: учеб. / Д.В. Васильков. – С.Пб.: Политехника, 2010. – 759 с.
2. Лозинський А.О. Електропривід змінного струму. Сучасний стан і перспективи розвитку [Текст] / А.О. Лозинський // ЕЛЕКТРОІНФОРМ: наук.-техн. журн. Тем. вип. "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика" – Л.: ЕКОІнформ, 2009. – С. 102–103.
3. Методика проектування вентильних двигунів з високоенергетичними постійними магнітами / В.І. Ткачук, І.С. Біляковський, Р.О. Біловус // Вісн. Кременчуцького держ. ун-ту ім. Михайла Остроградського. – Кременчук: КДУ, 2010. – Вип. 3/2010 (62), ч. 2. – С. 79–81.
4. Гибкие производственные системы, промышленные роботы, робототехнические комплексы [Текст]: практ. пособие в 14-ти кн. Кн. 14. Современный электропривод станков с ЧПУ и промышленных роботов / О.П. Михайлов, Р.Т. Орлова, А.В. Пальцев; под ред. Б.И. Черпакова. – М.: Высш. шк., 1989. – 111 с.
5. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов [Текст] / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
6. Гаврилин А.М. Расчет и проектирование металлорежущих станков [Текст]: учеб. пособие для вузов / А.М. Гаврилин. – Орел: ОрелГТУ, 2006. – 228 с.
7. Драчев Г.И. Теория электропривода [Текст]: учеб. пособие в 2 ч. / Г.И. Драчев. – Челябинск: ЮУрГУ, 2005. – Ч. 1. – 209 с.