

УДК 62-83:621.33
© 2010

О.В. КОВАЛЬОВ,
інженер

*Таврійський державний
агротехнологічний університет*

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТА ВИБОРУ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА В ПРИВОДІ МОТОБЛОКА

Проведено порівняльну оцінку властивостей електродвигунів постійного і змінного струму та наведено методику розрахункового визначення потужності й вибору тягового електродвигуна мотоблока з централізованим електропостачанням.

Постановка проблеми. В аграрному секторі України нині налічується близько 43 тис. фермерських і майже 5 млн приватних підсобних господарств, рівень механізації яких нижче 20 %, що суттєво знижує ефективність виробництва сільськогосподарської продукції. За останнє десятиріччя для вирішення цієї проблеми було налагоджено виробництво мобільних енергетичних засобів малої механізації у вигляді міні-тракторів, мотоблоків та інших агрегатів, в основному з приводом від двигунів внутрішнього згоряння. Крім власного виробництва, значно розширився ринок цієї техніки зарубіжного виробництва. При цьому помітний великий інтерес до мобільних агрегатів з електроприводом, з причин більш високої надійності в роботі електродвигунів, ніж ДВЗ, та відносно невисокої вартості електроенергії. Відомо багато прикладів заміни в мотоблоках і міні-тракторах двигунів внутрішнього згоряння на електродвигуни з централізованим і автономним живленням. Активізувався також процес виготовлення мотоблоків в умовах фермерських та приватних господарств. У зв'язку з відсутністю змістовних посібників з конструювання мотоблоків з електроприводом їх виготовлення на малих підприємствах і у фермерських господарствах практично не підвищується. Перш за все це пов'язано з проблемою обґрунтованого вибору тягового електродвигуна і пристрою управління та регулювання з огляду на специфіку технологічного процесу.

Аналіз досліджень за проблемою. Наголосимо, що нам не відомі публікації з питань розробки електроприводу мотоблоків, поді-

бні до розробок Ю.М. Андрєєва зі співавт. [4] та І.С. Єфремова [5]. Їхні дослідження присвячені системному викладенню теорії, розрахунку та конструюванню електроприводу мобільних транспортних засобів. Заслугує на велику увагу робота М. Корчемного [1], в якій наведено результати дослідження мотоблоків з тяговими асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором і фазним ротором та двигунами постійного струму з незалежним і послідовним збудженням. Заміна в мотоблоках ДВЗ регульованим електроприводом дозволяє використовувати мотоблок без коробки перемикачів передач і тим самим значно знизити його собівартість, підвищити маневреність та надійність у роботі. Встановлено, що момент швидкості на валу двигуна при оранці ґрунту відрізняється нестабільністю і змінюється в часі на 40–50 %. Крім того, спостерігається коливання моменту опору з амплітудою ± 20 % від середнього значення. Ефективність мотоблоків з електроприводом постійного струму підтверджено і в нашій роботі [3], яка присвячена порівняльній техніко-енергетичній оцінці технічного рівня мотоблоків за паспортними даними для мотоблоків з ДВЗ і електроприводом. У роботі Т.Т. Кусова [2], наведено результати системних досліджень багатопольових мотоблоків, що отримали найбільше поширення, у тому числі й з електроприводом; обговорюються дані щодо доцільного діапазону робочих швидкостей пересування мотоблока під час оранки ґрунтів: 0,3; 0,6; 0,9 та 1,2 м/с. Зроблено акцент на визначенні оптимальної конструкції і розмірів металевих зварних коліс мотоблоків, зокрема звар-

них коліс шириною 170 і діаметром 520 мм з 8 шпорами на поверхні висотою 60 мм, що розташовані в два ряди у шаховому порядку, утворюють тягове зусилля: без додаткових вантажів – 1090 Н, з одним вантажем (20 кг) – 1250 Н, з двома вантажами (2×20 кг) – 1490 Н. Зазначено, що застосування металевих коліс замість резинових 4×10^6 покращує тягово-зчіпні властивості мотоблоків більш ніж удвічі. Результати досліджень переконують у доцільності створення уніфікованих шасі зі змінними приводними електродвигунами потужністю 1,5; 3,5 та 5,0 кВт.

Перед нами постала **мета** розробити порівняно просту та надійну методику розрахункового визначення потужності двигуна для приводу мотоблока багатоцільового використання на основі значення питомих опорів різних за твердістю ґрунтів у спорудах закритого ґрунту та приватних фермерських господарствах.

Обґрунтування типу електродвигуна за родом струму. Основне призначення тягового електродвигуна (ТЕД) у приводі мотоблока полягає в забезпеченні сумісно з пристроєм керування завданої тягової характеристики мотоблока з високими енергетичними показниками і потрібною надійністю. Узагальнена тягова характеристика мотоблока та інших енергетичних засобів являє собою залежність тягового зусилля F_m від швидкості руху V за незмінності приєднаної потужності приводного електродвигуна P_i (рис. 1). За тяговою характеристикою може бути побудована механічна характеристика ТЕД $M = f(\omega)$ з використанням таких співвідношень:

$$M = \frac{R_k \cdot F_m}{i_{mn} \cdot \eta_p \cdot \eta_{\sigma} \cdot \eta_k};$$

$$\omega = \frac{i_p \cdot v}{R_k},$$

де M – електромагнітний момент ТЕД, Нм; R_k – радіус ведучого колеса мотоблока, м; ω – кутова швидкість, рад/с; i_p – передаточне співвідношення редуктора; η_p – ККД редуктора; η_{σ}, η_k – ККД, що враховує втрати відповідно на буксування та на опір коченню.

Механічна характеристика $M = f(\omega)$ являє

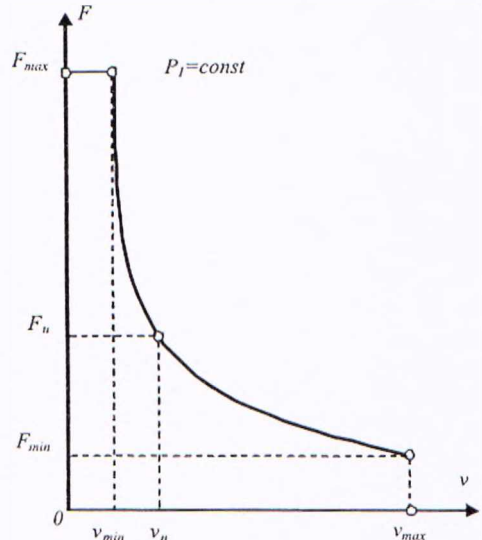


Рис. 1. Узагальнена тягова характеристика мотоблока

себою закон регулювання тягового електродвигуна мотоблока. Для практичної реалізації цього закону як ТЕД мотоблока з централізованим електропостачанням можуть бути використані й електродвигуни змінного струму, і двигуни постійного струму з керованими вентильними перетворювачами. Однак використання електродвигунів постійного струму, і особливо двигунів послідовного збудження, має низку суттєвих переваг:

1. Механічні характеристики двигунів послідовного збудження $M = f(\omega)$ (природна та штучні) за будь-якого способу регулювання швидкості наближені до гіперболи, тобто у цих двигунів, у разі зміни моменту опору навантаження, кутова швидкість ω змінюється автоматично, забезпечуючи потужність $P_i = const$, що добре узгоджується із законом регулювання ТЕД мотоблока (рис. 2). При цьому для керування двигуном постійного струму під час живлення від централізованої мережі змінного струму можна застосовувати порівняно простий керований напівпровідниковий випрямлювач, який має невеликі габарити та вартість. Для реалізації цього ж закону регулювання, у випадку застосування як приводний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором, потрібно використати трифазний вентильний перетворю-

вач частоти, який за вартістю в декілька разів перевищує вартість двигуна.

2. Електродвигуни постійного струму, на відміну від асинхронних і синхронних електродвигунів, забезпечують регулювання швидкості в широкому діапазоні як вниз від номінальної, так і вгору від номінальної шляхом ослаблення магнітного поля з використанням простих технічних засобів. При цьому коефіцієнт зміни максимальної швидкості, що характеризує регулювальні властивості двигуна, $K_\omega = \omega_{max} / \omega_n = 2-4$. Для збільшення швидкості вище номінальної у асинхронних та синхронних двигунів необхідно підвищити живлячу напругу в 2-2,5 раза вище номінальної, що обумовлює інтенсивне нагрівання двигуна та перетворювача, істотне збільшення втрат і зниження ККД.

За пусковими властивостями та переважувальній здатності двигуни постійного струму також мають беззаперечну перевагу перед асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором. Про це свідчать такі порівняльні дані:

		АД	ДПС
- кратність пускового струму	$K_i = I_n / I_n$	5-7	2-3
- кратність пускового моменту	$M_n = M_n / M_n$	1,2-1,5	2-3
- переважувальна здатність	$M_n = M_{max} / M_n$	1,5-2,0	2-3

3. У двигунах послідовного збудження електромагнітний момент має квадратичну залежність від струму якоря, а значить, і від струму навантаження: $M \sim I_a^2$; $M \sim P$, тобто $M \sim I_a^2$; $I \sim \sqrt{M}$. Це дає підставу застосовувати ці двигуни в приводах установок, де необхідні великі моменти при пуску і спостерігаються часті перевантаження по моменту. Згідно з механічною характеристикою (рис. 2), кутова швидкість двигуна $\omega \sim I / \sqrt{M}$, унаслідок чого корисна потужність становить $P_2 = M\omega = C\sqrt{M}$.

Отже, у разі зміни навантажувального моменту в широких межах потужність P_a і струм I_a у двигуна послідовного збудження змінюється пропорційно \sqrt{M} . Це означає, що

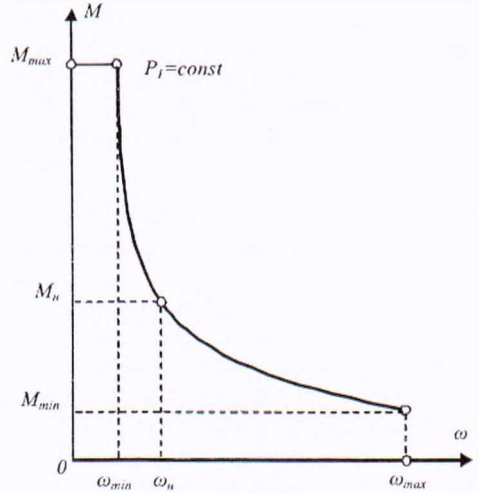


Рис. 2. Механічна характеристика тягового електродвигуна з регулятором у приводі мотоблока

за такого самого моменту навантаження на валу двигуни послідовного збудження можуть мати меншу встановлену потужність порівняно з іншими електродвигунами. Ця обставина особливо важлива для мотоблоків з централізованим електропостачанням.

Поряд з перевагами тягових електродвигунів постійного струму є також істотні недоліки: порівняно великі габарити і маса, наявність щітково-колекторного вузла. Великою перевагою асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором під час використання як ТЕД є надійність в роботі, відносно малі маса та габарити. Однак наявність перетворювачів частоти істотно ускладнює тяговий електропривод та значно підвищує його вартість. За приблизно однакової керованості асинхронні електродвигуни легше двигунів постійного струму в 2,5-3 рази та дешевше в 3-4 рази, але перетворювач частоти для їх керування важче та дорожче керованого випрямлювача в 4-5 разів.

Вибір потужності тягового електродвигуна є однією з найбільш складних і відповідальних задач, що виникає в процесі створення тягового електроприводу будь-яких мобільних агрегатів і транспортних систем, у тому числі і мотоблоків на початковій стадії їх розробки.

Основною вимогою і критерієм правиль-

ного вибору електродвигуна є відповідність його потужності і параметрів умовам технологічного процесу робочих машин, агрегатів і установок.

Первинний обробіток ґрунту в спорудах закритого ґрунту є найбільш енергоємною технологічною операцією, тому потужність тягового електродвигуна обирають з огляду на забезпечення необхідного тягового зусилля на крію мотоблока F для виконання оранки важких (F_a), середніх (F_c) або легких (F_s) ґрунтів.

При цьому

$$F = K \cdot a \cdot b, \quad (1)$$

де a , b – відповідно глибина оранки і ширина захвату плуга, м; K – питомий опір ґрунту, кПа.

Відповідно до даних НВО ВІСГОМ [2] приймається:

$$K_a = 90 \text{ кПа}; K_c = 60 \text{ кПа}; K_s = 30 \text{ кПа}. \quad (2)$$

У приватних підсобних господарствах та спорудах закритого ґрунту в основному застосовують плуги ПЛ-1, ПЦ-1-18 та ін. з характеристикою плужних корпусів $b/a = 1,2-1,5$. Оранку ґрунту виконують на глибину 10, 15, 18 і 20 см. Як правило, застосовують плуги з шириною захвату 18 см, тоді, приймаючи глибину підкопу пласта 15 см, за рівнянням (1) обчислюємо значення тягових зусиль для оранки різних ґрунтів:

$$F_a = 2,43 \text{ кН}; F_c = 1,62 \text{ кН}; F_s = 0,81 \text{ кН}. \quad (3)$$

Для реалізації тягових зусиль необхідно, щоб під час оранки ґрунту зчіпна вага $G = m \cdot g$ мотоблока масою m була певної величини, залежно від характеристики ґрунту.

При цьому

$$G = F / (\lambda \cdot \varphi_s - \xi \cdot f),$$

де λ , φ_s , f – коефіцієнти відповідно навантаження коліс мотоблока, зчеплення коліс з ґрунтом, опору перекочування коліс; ξ – коефіцієнт, що враховує внутрішні втрати у ходовій системі.

Для мотоблоків з шинами: $\lambda = 1$; $\varphi_s = 0,5-0,7$; $\xi = 1$ і $f = 0,1-0,12$ та зчіпна вага $G_a = 4,05 \text{ кН}$; $G_c = 2,7 \text{ кН}$ і $G_s = 1,35 \text{ кН}$.

Для мотоблоків з металевими колесами, що мають шипи,

$G_a = 2,05 \text{ кН}$; $G_c = 1,8 \text{ кН}$ і $G_s = 0,9 \text{ кН}$, (4) тобто в разі використання металевих коліс зчіпна вага G має бути меншої величини.

Корисну потужність тягового електродвигуна мотоблока визначають за формулою

$$P = \frac{K_z (F - f \cdot G) \cdot V}{\eta_p \cdot \eta_b \cdot \eta_k}, \quad (5)$$

де $K_z = 1,1-1,2$ – коефіцієнт запасу, що враховує динамічні режими ТЕД, який працює з підвищеними моментами; F – тягове зусилля; приймається під час розрахунку потужності залежно від характеристики ґрунту по (3), кН; G – зчіпна вага; приймається з огляду на характеристику ґрунту (4), кН; V – швидкість руху мотоблока на оранці ґрунту, м/с; η_p – ККД редуктора; $\eta_b = 0,93$ – коефіцієнт, що враховує втрати на буксування; $\eta_k = 0,95$ – те саме, на подолання опору коченттю.

Величина $\eta_m = \eta_p \cdot \eta_b \cdot \eta_k$ отримала назву тягового ККД агрегату. У попередніх розрахунках приймається $\eta_m = 0,74-0,76$. Для більш точних розрахунків корисної потужності за рівнянням (5) необхідно тяговий ККД визначати з урахуванням реальної компоновки механічної передачі мотоблока: типу редуктора, можливого використання додаткової ланцюгової передачі та ін. Швидкість руху мотоблока V з використанням рівняння (5) приймається відповідно до доцільного діапазону швидкостей, що встановлені на основі досліджень та спостережень за роботою мобільних агрегатів, яким керують оператори

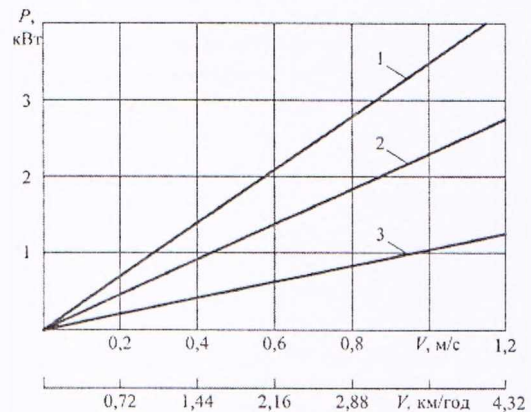


Рис. 3. Графіки корисної потужності тягового електродвигуна мотоблока на оранці ґрунтів: 1 – важких, $K_a = 90 \text{ кПа}$; 2 – середніх, $K_c = 60 \text{ кПа}$; 3 – легких, $K_s = 30 \text{ кПа}$

чоловічої та жіночої статі [2].

$$V = 0,3; 0,6; 0,9; 1,2 \text{ м/с або}$$

$$V = 1,08; 2,16; 3,24; 4,32 \text{ км/год.}$$

На рис. 3 наведені графіки корисної потужності $P = f(V)$ при $K = const$ тягових двигунів мотоблоків за результатами розрахунків (5) при $\eta_m = 0,75$; $K_v = 1,05$ для легких ґрунтів, $K_v = 1,1$ для середніх і $K_v = 1,2$ для важких ґрунтів. Значення F і G приймаються за рівняннями (3) та (4). Графіки потужності можуть бути використані на практиці для визначення розрахункової потужності тягових електродвигунів у приводі мотоблоків, що призначені для обробітки ґрунтів з різними характеристиками за питомим опором K (2).

Далі за величиною розрахункової потужності P з каталогу електрообладнання [6] обирають електродвигун з найближчою номінальною потужністю P_n і найбільшою номінальною

частотою обертання n_n , що має більш високий ККД та менші габарити, але з обов'язковим виконанням вимог за кратністю максимальної швидкості $K_\omega = \omega_{max} / \omega_i = n_{max} / n_n = 2,0-2,5$, де n_{max} також наведено в каталогах. Двигун обирається за ступенем захисту не менше IP44, кліматичним виконанням та категорією розташування О4. Важливим параметром при виборі двигуна, крім ККД, є показник якості машини, що визначається вагою двигуна

$$q = G_d / P_{розр} \quad (6)$$

де G_d – вага двигуна за каталогом, кг; $P_{розр}$ – розрахункова потужність, кВт.

При цьому розрахункова потужність двигуна визначається

$$P_{розр} = P_n \cdot K_\omega \cong M_n \cdot \omega_{max} \quad (7)$$

де M_n – номінальний момент двигуна (наведено в каталогах), Нм.

Висновки

1. У результаті порівняльної оцінки енергетичних показників, регульованих і пускових властивостей двигунів постійного та змінного струму рекомендується для приводу мотоблоків з централізованим електропостачанням використовувати переважно двигуни постійного струму послідовного збудження в комплекті з керованим випрямлячем.

2. Запропоновано порівняно просту й надійну методику розрахункового визначення потужності та вибору тягового двигуна в приводі мотоблока багатопільового призна-

чення. Як базовий технологічний процес для розрахунку потужності приймається найбільш енергоємний процес оранки ґрунту. Вихідними даними є питомий опір ґрунту K в приватних підсобних господарствах та спорудах закритого ґрунту на оранці важких (В), середніх (С) та легких (Л) ґрунтів: $K_n = 90$ кПа; $K_c = 60$ кПа; $K_n = 30$ кПа.

3. Наведено зручні для практичного використання графіки корисної потужності приводного електродвигуна у функції швидкості руху на оранці ґрунтів з різним питомим опором.

Бібліографія

1. Корчемний М. Електропривід мобільного агрегату / М. Корчемний, І. Савченко, С. Гусаков // Електрифікація. – 1997. – С. 30–31.

2. Кусов Т.Т. Создание энергетических средств с электромеханическим приводом / Т.Т. Кусов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1988. – № 10. – С. 12–17.

3. Ковальов О.В. Аналітичний метод порівняльної техніко-енергетичної оцінки ефективності і технічного рівня мотоблоків / О.В. Ковальов, А.А. Катюха, Г.Н. Назар'ян // Праці ТДАТА. – Мелітополь : ТДАТА, 2007. – Вип. 7, т. 3. – С. 93–99.

4. Электрические машины в тяговом автономном электроприводе / [Андреев Ю.М., Исаакян К.Г., Машихин А.Д. и др.]; под ред. А.П. Пролыгина. – М. : Энергия, 1979. – 240 с.

5. Электрические трансмиссии пневмоколесных транспортных средств / [Ефремов И.С., Пролыгин А.П., Андреев Ю.М., Миндалин А.Б.]. – М. : Энергия, 1976. – 256 с.

6. Каталог электрооборудования 01.60.05-91 – Машины постоянного тока типа 4ПБМ, 4ПНМ и 4ПНМС. – М.: Изана, 1991. – 32 с.