

УДК 62-83:621.33

## РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ТА ВИБІР ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПРИВОДУ МОТОБЛОКА

Куценко Ю.М., к.т.н,

Назар'ян Г.Н., к.т.н.,

Ковальов О.В., інж.

*Таврійський державний агротехнологічний університет*

Тел. (0619) 42-31-59

**Анотація** – в роботі проведено порівняльну оцінку властивостей електродвигунів постійного та змінного струму та наведено методику розрахункового визначення потужності і вибору тягового електродвигуна мотоблока з централізованим електропостачанням.

**Ключові слова** – мотоблок, тягова характеристика, вибір електродвигуна, оранка ґрунту, питомий опір, тягове зусилля, розрахунок потужності.

*Постановка проблеми.* В наш час в аграрному секторі України нараховується близько 43 тис. фермерських господарств і майже 5 млн. приватних підсобних господарств, рівень механізації яких менше 20%, що суттєво знижує ефективність виробництва сільськогосподарської продукції. За останнє десятиріччя для вирішення цієї проблеми було налагоджено виробництво мобільних енергетичних засобів малої механізації в вигляді міні-тракторів, мотоблоків та інших агрегатів в основному з приводом від двигунів внутрішнього згорання. Крім власного виробництва значно розширився ринок цієї техніки зарубіжного виробництва. Однак у зв'язку зі зростанням за останній час вартості паливо-мастильних матеріалів і низькою надійністю мобільних агрегатів з ДВЗ, процес механізації трудомістких робіт в господарствах став помітно гальмуватися. При цьому помітна велика цікавість до мобільних агрегатів з електроприводом, з причини більшої надійності в роботі електродвигунів ніж ДВЗ та з причини відносно невисокої вартості електроенергії. Відомо багато прикладів заміни в мотоблоках і міні-тракторах двигунів внутрішнього згорання на електродвигуни з централізованим і автономним живленням.

Активізувався також процес виготовлення мотоблоків в умовах фермерських та приватних господарств. При цьому у зв'язку з відсутністю повноцінних посібників по конструюванню мотоблоків з електроприводом, їх виготовлення на малих підприємствах і в фермерських господарствах практично не збільшується. Перш за все це пов'язано з проблемою обґрунтованого вибору тягового електродвигуна і пристрою управління та регулювання з урахуванням специфіки технологічного процесу. Тому питання, що розглядаються в даній роботі, на наш погляд, є досить актуальними.

*Аналіз останніх досліджень.* Необхідно зауважити, що нам не відомі публікації по питанням розробки електроприводу мотоблоків, подібні роботам Ю.М. Андрєєва та ін. [4] та І.С. Єфремова [5], присвячені системному викладенню теорії, розрахунку та конструюванню електропривода мобільних транспортних засобів. Заслугове великої уваги робота М. Корчемного [1], в якій приведено результати дослідження мотоблоків з тяговими асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором і фазним ротором та двигунами постійного струму з незалежним і послідовним збудженням. При цьому відмічається, що заміна в мотоблоках ДВЗ регульованим електроприводом дозволяє використовувати мотоблок без коробки перемикачів передач і тим самим значно знизити його собівартість та значно підвищити маневреність та надійність в 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  $\pm 20\%$  від середнього значення. Також відмічено, що оптимальною механічною характеристикою тягового двигуна є характеристика, що наближена до гіперболи. В роботі приведено принципову електричну схему безконтактного регулювання частоти обертання приводного двигуна постійного струму мотоблока. Висновок в роботі про ефективність мотоблоків з електроприводом постійного струму підтверджено також і в нашій роботі [3], яка присвячена порівняльній техніко-енергетичній оцінці технічного рівня мотоблоків за паспортними даними для мотоблоків з ДВЗ і електроприводом. Заслугове також увагу робота Т.Т. Кусова [2], в якій приведено результати системних досліджень багатоцільових мотоблоків, що отримали найбільше розповсюдження, в тому числі і з електроприводом. В роботі приведено данні по доцільному діапазону робочих швидкостей пересування мотоблоку при оранці ґрунтів: 0,3; 0,6; 0,9 та 1,2 м/с. Велику увагу при випробування мотоблоків приділено визначенню оптимальної конструкції і розмірів металевих зварних коліс мотоблоків. Наведено данні, що металеві зварні колеса шириною 170 мм і діаметром 520 мм з 8 шпорами на поверхні висотою 60 мм, що розташовані в два ряди в

шаховому порядку, утворюють тягове зусилля: без додаткових вантажів – 1090 Н, з одним вантажем (20 кг) – 1250 Н, з двома вантажами (2x20 кг) – 1490 Н. При цьому відмічено, що застосування металевих коліс замість резинових  $4 \times 10''$  покращують тягово-зчіпні властивості мотоблоків більше чим вдвічі. За результатами досліджень відмічена доцільність створення уніфікованих шасі із змінними приводними електродвигунами потужністю 1,5; 3,5 та 5,0 кВт.

*Формулювання цілей статті.* Обґрунтування типу електродвигуна по роду струму та розробка порівняно простої та надійної методики розрахункового визначення потужності двигуна для приводу мотоблока на основі вихідних даних по питомому опору різних за твердістю ґрунтів в спорудах закритого ґрунту та приватних фермерських господарствах.

*Основна частина.* Обґрунтування типу електродвигуна по роду струму. Основне призначення тягового електродвигуна (ТЕД) в приводі мотоблока складається в забезпеченні сумісно з пристроєм управління, завданої тягової характеристики мотоблока з високими енергетичними показниками і потрібною надійністю. Узагальнена тягова характеристика мотоблока та інших енергетичних засобів представляє собою залежність тягового зусилля  $F_T$  від швидкості руху  $V$ , при незмінності приєднаної потужності приводного електродвигуна  $P_1$  (рис. 1). По тяговій характеристиці може бути побудована механічна характеристика ТЕД  $M=f(\omega)$  при (рис. 2) з використанням наступних співвідношень:

$$M = \frac{R_{\epsilon} \cdot F_{\delta}}{i_{i1} \cdot \eta_{\delta} \cdot \eta_a \cdot \eta_{\epsilon}}; \quad (1)$$

$$\omega = \frac{i_{\delta} \cdot v}{R_{\epsilon}}, \quad (2)$$

- де  $M$  – електромагнітний момент ТЕД, Нм;  
 $R_{\epsilon}$  – радіус ведучого колеса мотоблока, м;  
 $\omega$  – кутова швидкість, рад/с;  
 $i_{\delta}$  – передаточне співвідношення редуктора;  
 $\eta_{\delta}$  – ККД редуктора;  
 $\eta_a$  – ККД, що враховує втрати на буксування;  
 $\eta_{\epsilon}$  – ККД, що враховує втрати на опір коченню.

Докладний аналіз тягової та механічної характеристик мотоблока з ТЕД постійного струму приведені в [7]. Механічна характеристика  $M=f(\omega)$  являє собою закон регулювання тягового електродвигуна мотоблока.

Для практичної реалізації цього закону в якості ТЕД мотоблока з централізованим електропостачанням можуть бути використані як електродвигуни змінного струму, так і двигуни постійного струму з керованими вентиляними перетворювачами. Однак використання для цих цілей електродвигунів постійного струму, і особливо двигунів послідовного збудження, має ряд суттєвих переваг:

1. Механічні характеристики двигунів послідовного збудження  $M=f(\omega)$  природна та штучні при будь-якому способі регулювання швидкості наближені до гіперболи, тобто у цих двигунів при зміні моменту опору навантаження, кутова швидкість  $\omega$  змінюється автоматично, забезпечуючи потужність  $P_1=\text{const}$ , що гарно узгоджується з законом регулювання ТЕД мотоблока (рис. 2). При цьому для управління двигуном постійного струму при живленні від централізованої мережі змінного струму, може бути застосовано порівняно простий керований напівпровідниковий випрямлювач, який має невеликі габарити та вартість. Для реалізації цього ж закону регулювання в випадку застосування в якості приводного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, буде потрібно використання трифазного вентиляного перетворювача частоти, який за вартістю в декілька разів перевищує вартість двигуна.

2. Електродвигуни постійного струму, у відмінності 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 регульовальні властивості двигуна  $K_\omega=\omega_{\text{max}}/\omega_{\text{н}}=2\dots 4$ . Для збільшення швидкості вище номінальної у асинхронних та синхронних двигунів необхідно підвищення живлячої напруги в 2...2,5 рази вище номінальної, що обумовлює інтенсивне нагрівання двигуна та перетворювача, істотне збільшення втрат і зниження ККД.

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

		АД	ДПС
- кратність пускового струму	$K_i=I_{\text{п}}/I_{\text{н}}$	5...7	2...3
- кратність пускового моменту	$M_{\text{п}}=M_{\text{п}}/M_{\text{н}}$	1,2...1,5	2...3
- перевантажувальна здатність	$M_{\text{м}}=M_{\text{max}}/M_{\text{н}}$	1,5...2,0	2...3

3. В двигунах послідовного збудження електромагнітний момент має квадратичну залежність від струму якоря  $I_a$  а значить і від струму навантаження  $I$

$$\dot{I} \sim I_a^2; \dot{I} \sim I^2, \text{ тобто } \dot{I} \sim I_a^2; I \sim \sqrt{\dot{I}}.$$

Тому ці двигуни застосовують в приводах установок, де необхідні великі моменти при пуску і спостерігаються часті перевантаження по моменту. Згідно механічної характеристики (рис. 2) кутова швидкість двигуна  $\omega \sim 1/\sqrt{I}$ , внаслідок чого корисна потужність

$$P_2 = M\Omega = C\sqrt{M}.$$

Тому при зміні навантажувального моменту в широких межах, потужність  $P_2$  і струм  $I_a$  у двигуна послідовного збудження змінюється пропорційно  $\sqrt{M}$ . Це означає, що при одному і тому ж моменті навантаження на валу, двигуни послідовного збудження можуть мати меншу встановлену потужність у порівнянні з іншими електродвигунами. Ця обставина особливо важлива для мотоблоків з централізованим електропостачанням.

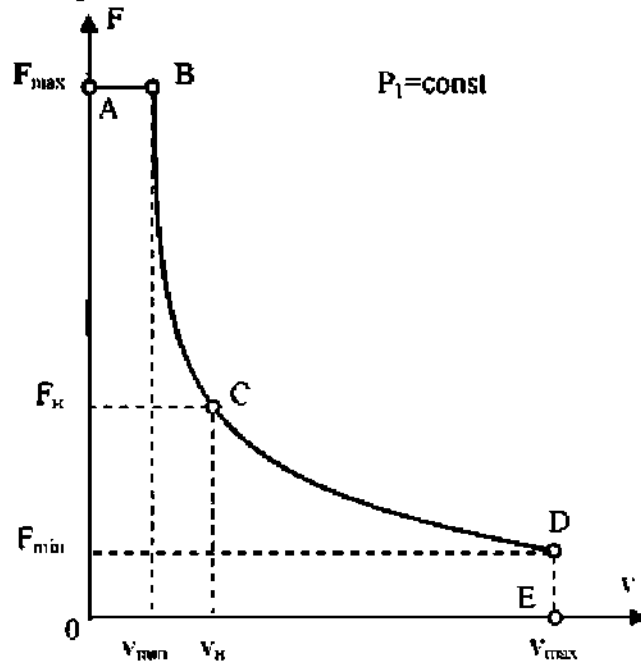


Рис.1. Узагальнена тягова характеристика мотоблока.

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

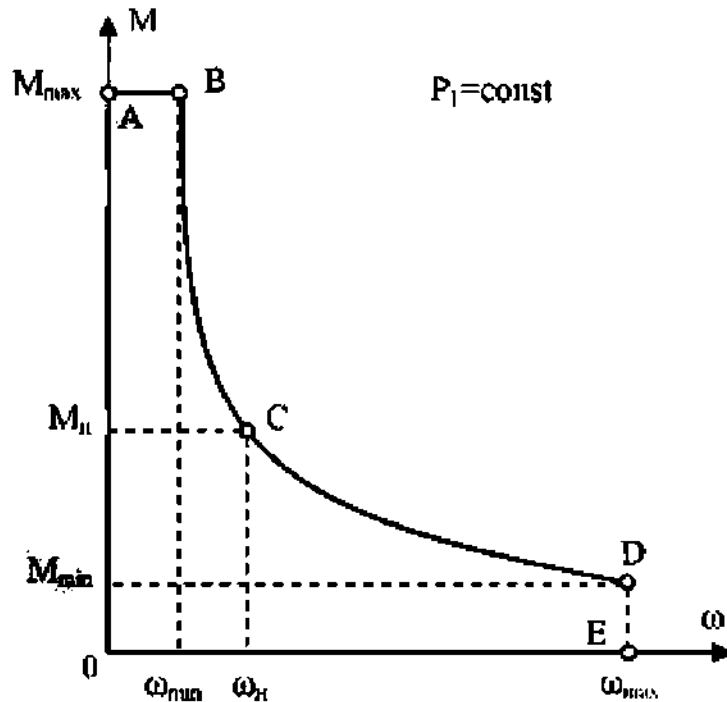


Рис.2. Механічна характеристика тягового електродвигуна з регулятором в приводі мотоблока.

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

Основною вимогою і критерієм вірного вибору електродвигуна є відповідність його потужності і параметрів умовам технологічного процесу робочих машин, агрегатів і установок.

Первинна обробка ґрунту в спорудах закритого ґрунту є найбільш енергоємною технологічною операцією, тому потужність тягового електродвигуна слід обирати з умови забезпечення необхідного тягового зусилля на крію мотоблока  $F$  для виконання оранки важких ( $F_v$ ), середніх ( $F_c$ ) або легких ( $F_l$ ) ґрунтів.

При цьому

$$F = \hat{E} \cdot a \cdot \hat{a}, \quad (3)$$

де  $a, \hat{a}$  – відповідно, глибина оранки і ширина захвата плугу, м;  
 $\hat{E}$  – питомий опір ґрунту, кПа.

У відповідності з даними НВО ВІСГОМ [2] приймається:

$$\hat{E}_a = 90 \text{ кПа}; \quad \hat{E}_c = 60 \text{ кПа}; \quad \hat{E}_l = 30 \text{ кПа}. \quad (4)$$

В приватних підсобних господарствах та спорудах закритого ґрунту в основному застосовуються плуги ПЛ-1, ПЦ-1-18 та ін. з характеристикою плужних корпусів  $\hat{a}/a=1,2\dots1,5$ . Оранка ґрунту виконується на глибину  $a=10, 15, 18$  і  $20$  см. Як правило застосовують плуги з шириною захвату  $b=18$  см., тоді приймаючи глибину підкопу пласта  $a=15$  см, по (3) визначаємо значення тягових зусиль для оранки різних ґрунтів:

$$F_{\hat{a}} = 2,43 \hat{e}^{\hat{a}} ; F_c = 1,62 \hat{e}^{\hat{a}} ; F_g = 0,81 \hat{e}^{\hat{a}} . \quad (5)$$

Для реалізації тягових зусиль необхідно, щоб при оранці ґрунту зчіпна вага  $G = m \cdot g$  мотоблока масою  $m$  була визначеної величини, в залежності від характеристики ґрунту.

При цьому

$$G = F / (\lambda \cdot \varphi_c - \xi \cdot f), \quad (6)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт навантаження коліс мотоблока;

$\varphi_c$  – коефіцієнт зчеплення коліс з ґрунтом;

$\xi$  – коефіцієнт, що враховує внутрішні втрати в ходовій системі;

$f$  – коефіцієнт опору перекочування коліс.

Для мотоблоків з шинами  $\lambda=1$ ;  $\varphi_c=0,5\dots0,7$ ;  $\xi=1$  і  $f=0,1\dots0,12$  та зчіпна вага  $G_{\hat{a}}=4,05$  кН;  $G_c=2,7$  кН і  $G_g=1,35$  кН.

Для мотоблоків з металевими колесами, що мають шипи

$$G_{\hat{a}}=2,05 \text{ кН}; G_c=1,8 \text{ кН} \text{ і } G_g=0,9 \text{ кН}, \quad (7)$$

тобто при використанні металевих коліс зчіпна вага  $G$  потребується меншої величини.

Корисна потужність тягового електродвигуна мотоблока визначається за рівнянням:

$$P = \frac{\hat{E}_c (F - f \cdot G) \cdot V}{\eta_{\delta} \cdot \eta_{\hat{a}} \cdot \eta_{\varepsilon}}, (\hat{e}^{\hat{a}}) \quad (8)$$

де  $\hat{E}_c=1,1\dots1,2$  – коефіцієнт запасу, що враховує динамічні режими ТЕД, коли він працює з підвищеними моментами;

$F$  – тягове зусилля, приймається при розрахунку потужності в залежності від характеристики ґрунту по (5), кН;

$G$  – зчіпна вага, також приймається з урахуванням характеристики ґрунту по (7), кН;

$V$  – швидкість руху мотоблоку при оранці ґрунту, м/с;

$\eta_{\delta}$  – ККД редуктора;

$\eta_{\hat{a}}=0,93$  – коефіцієнт, що враховує втрати на буксування;

$\eta_{\varepsilon}=0,95$  – коефіцієнт, що враховує втрати на подолання опору коченню.

Величина  $\eta_{\delta} = \eta_{\delta} \cdot \eta_{\alpha} \cdot \eta_{\epsilon}$  отримала назву тягового ККД агрегату. В попередніх розрахунках приймається  $\eta_{\delta} = 0,74 \dots 0,76$ . Для більш точних розрахунків корисної потужності за рівнянням (8) необхідно тяговий ККД визначати з урахуванням реальної компоновки механічної передачі мотоблока: типу редуктора, можливого використання додаткової ланцюгової передачі, та ін. Швидкість руху мотоблока  $V$  при підстановці в рівняння (8), приймається у відповідності з доцільним діапазоном швидкостей, що встановлені на основі досліджень та спостережень за роботою мобільних агрегатів, що керуються операторами чоловічої та жіночої статі [2].

$$V = 0,3; 0,6; 0,9; 1,2 \text{ м/с або } V = 1,08; 2,16; 3,24; 4,32 \text{ км/год.} \quad (9)$$

На рис. 3 наведені графіки корисної потужності  $P = f(V)$  при  $K = \text{const}$  тягових двигунів мотоблоків за результатами розрахунків за рівнянням (8) при  $\eta_{\delta} = 0,75$ ;  $K_{\zeta} = 1,05$  для легких ґрунтів,  $K_{\zeta} = 1,1$  для середніх ґрунтів і  $K_{\zeta} = 1,2$  для важких ґрунтів. Значення  $F$  і  $G$  приймаються за (5) та (7).

Графіки потужності (рис. 3) можуть бути використані на практиці для визначення розрахункової потужності тягових електродвигунів в приводі мотоблоків, що призначені для обробки ґрунтів з різними характеристиками за питомим опором  $K$  (4).

Далі за величиною розрахункової потужності  $P$  по довіднику або каталогу електрообладнання [6] обирається електродвигун з найближчою номінальною потужністю  $P_n$  і по можливості з більшою номінальною частотою обертання  $n_n$ , що має більш високий ККД та менші габарити, але з обов'язковим виконанням вимог за кратністю максимальної швидкості  $K_{\omega} = \omega_{\max} / \omega_i = n_{\max} / n_i = 2 \dots 2,5$ , де  $n_{\max}$  також наведено в каталогах. Крім того, 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 масою двигуна

$$q = G_a / D_{\delta i \zeta}, \text{ (кг/кВт)}, \quad (10)$$

де  $G_a$  – маса двигуна за каталогом, кг;

$D_{\delta i \zeta}$  – розрахункова потужність, кВт.

При цьому розрахункова потужність двигуна визначається по рівнянню:  $D_{\delta i \zeta} = D_i \cdot \hat{E}_{\omega} \cong \hat{I}_i \cdot \omega_{\max}$ , (11)

де  $\hat{I}_i$  – номінальний момент двигуна, Нм. Наведено в каталогах.



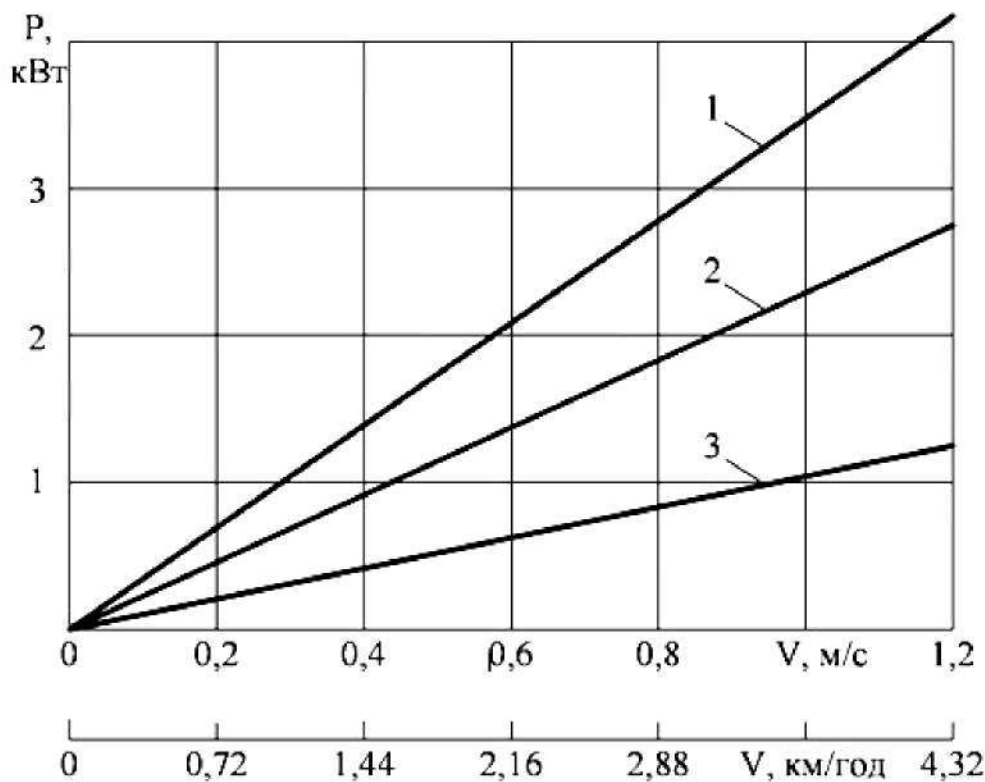


Рис. 3. Графіки корисної потужності тягового електродвигуна мотоблока при оранці ґрунтів: 1-важких,  $K_B=90$  кПа; 2-середніх,  $K_C=60$  кПа; 3-легких,  $K_D=30$  кПа.

Вибір передаточного відношення редуктора. Передаточне відношення редуктора в приводі мотоблока визначається співвідношенням:

$$z_{\delta} = \frac{\omega_{\max} \cdot R_{\epsilon}}{V_{\max}}, \quad (12)$$

де  $R_{\epsilon}$  – радіус ведучого колеса мотоблока, м.

Звичайно ведуче колесо для класу мотоблоків що розглядається, виконується радіусом  $R_{\epsilon}=250\dots300$  мм. Оскільки максимальна частота обертання  $n_{\max}$  сучасних двигунів знаходиться в межах від 1850 до 4000 об/хв [6], що відповідає максимальній кутовій швидкості  $\omega_{\max}=196,3\dots418,7$  рад/с, то при швидкості  $V_{\max} \leq 1,5$  м/с, рівняння (9), передаточне відношення редуктора  $z_{\delta}$  може бути рівним або більшим 80. Такі редуктори мають порівняно великі габарити і масу, що обмежує їх застосування в мобільних агрегатах. Тому механічну передачу в мотоблоках доцільно виконувати з використанням редуктора з  $z_{\delta} \leq 40$  і ланцюговою передачею з  $z_{\epsilon T} = 2$ .

В такому випадку передаточне відношення механічної передачі визначається

$$i_{\text{дв}} = i_{\text{д}} \cdot i_{\text{в}} = \frac{\omega_{\text{max}} \cdot R_{\text{г}}}{V_{\text{max}}} \quad (13)$$

У відповідності з обґрунтуванням в [2] оптимальних розмірів металевих коліс мотоблоків, в розрахунках слід приймати радіус колеса  $R_{\text{г}} = 260$  мм.

#### Висновки.

1. В результаті порівняльної оцінки енергетичних показників, регульовальних і пускових властивостей двигунів постійного та змінного струму, рекомендується для привода мотоблоків з централізованим електропостачанням використовувати переважно двигуни постійного струму послідовного збудження в комплекті з керованим випрямлювачем.

2. Запропоновано порівняно просту та надійну методику розрахункового визначення потужності та вибору тягового двигуна в приводі мотоблока багатocільового призначення. В якості базового технологічного процесу для розрахунку потужності приймається найбільш енергоємний процес оранки ґрунту. Вихідними даними є питомий опір ґрунту  $K$  в приватних підсобних господарствах та спорудах закритого ґрунту при оранці важких (В), середніх (С) та легких (Л) ґрунтів:  $\hat{E}_{\text{в}} = 90 \text{ кДж/м}^2$ ;  $\hat{E}_{\text{с}} = 60 \text{ кДж/м}^2$ ;  $\hat{E}_{\text{л}} = 30 \text{ кДж/м}^2$ .

3. Приведено зручні для практичного використання графіки корисної потужності приводного електродвигуна  $P$  в функції швидкості руху  $V$  при оранці ґрунтів з різним питомим опором.

#### Література

1. Корчемний М. Електропривод 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. – Випуск 7. – Том 3. – Мелітополь: ТДАТА, 2007. – С. 93-99.
4. Электрические машины в тяговом автономном электроприводе / [Ю.М. Андреев, К.Г. Исаакян, А.Д. Машихин и др.]: под ред. А.П. Пролыгина. – М.: Энергия, 1979. – 240 с.

5. *Ефремов И.С.* Электрические трансмиссии пневмоколесных транспортных средств/ *И.С. Ефремов, А.П. Пролыгин, Ю.М. Андреев, А.Б. Миндалин.* – 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.

## **РАСЧЕТ МОЩНОСТИ И ВЫБОР ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИВОДА МОТОБЛОКА**

А. Ковалев, Ю. Куценко, Г. Назарьян

*Аннотация* - в работе проведена сравнительная оценка свойств электродвигателей постоянного и переменного тока и представлена методика расчетного определения мощности и выбора тягового электродвигателя мотоблока с централизованным электропитанием.

## **POWER CALCULATIONS AND CHOICE OF HAULING ELECTRIC MOTOR FOR THE MOTOBLOCKS DRIVE**

A. Kovalyov, J. Kutsenko, G. Nazaryan.

### *Summary*

The comparative estimation of properties of direct and alternating current electric motors of is in-process conducted and the method of calculation determination of power and choice of hauling electric motor for motoblock is resulted with centralized energy supply.