

ТЯГОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПАРАМЕТРИ КЕРУВАННЯ МОТОБЛОКУ З ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Ковальов О. В., Назар'ян Г. Н.

Таврійський державний агротехнологічний університет

Обґрунтовані тягові характеристики, що визначають закон регулювання двигуном постійного струму в приводі мотоблоку. Отримані аналітичні залежності параметрів керування для реалізації закону регулювання тяговим електродвигуном.

Постановка проблеми. Сучасний агропромисловий комплекс України характеризується значним зростанням чисельності малих фермерських господарств, сімейних ферм, садово-городних кооперативів, а також зростанням об'єму виробництва овочів в спорудах закритого ґрунту (парниках та теплицях). Однак рівень механізації трудомістких процесів в указаних структурах не перевищує 20%, що істотно знижує ефективність виробництва сільськогосподарської продукції. Для вирішення даної проблеми було налагоджено масове виробництво мобільних енергетичних засобів малої механізації в вигляді малогабаритних мотоблоків, міні-тракторів, мотокультиваторів та інших мобільних агрегатів з двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ), технічні характеристики яких наведені в [1,2]. В останній час підвищена увага приділяється мотоблокам з електроприводом, які, як відмічено в [4, 5], мають ряд переваг в порівнянні з мотоблоками з ДВЗ, наприклад, легкістю керування, надійністю та економічністю в роботі та ін. В той же час питання теорії та практики мотоблоків з електроприводом не отримали належного розвитку та відображення в технічній літературі. Тому питання, що розглядаються в даній роботі є досить актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З останніх публікацій присвячених мотоблокам з електроприводом заслуговує увагу робота Т.Т. Кусова [4] в якій приведено результати експериментальних досліджень найбільш розповсюджених багатоцільових мотоблоків з ДВЗ МТЗ-05, МБ-1, Супер-610 та ін., в тому числі і при роботі з електроприводом. Дослідження проводились в НВО ВІСХОМ (Росія). Дослідження показали, що завдяки використанню металевих коліс зі шпорами замість резинових коліс тягово-зчіпні властивості мотоблоків покращуються більше чим в два рази. Встановлено оптимальний діапазон робочих швидкостей мобільних агрегатів при оранці ґрунту: 0,3; 0,6; 0,9; та 1,2 м/с або відповідно – 1,08; 2,16; 3,24; 4,32 км/год. Для оцінки ефективності роботи мотоблоків з електроприводом були проведені випробування мотоблоків КМП-1 та МТЗ-05 з тяговими електродвигунами. Відмічена доцільність створення єдиного уніфікованого шасі зі змінними ДВЗ та електродвигунами потужністю 1,5 кВт для оранки легких ґрунтів, 3,5 кВт – для середніх та 5 кВт – для важких ґрунтів. При цьому віддається перевага агрегатам з електроприводом, оскільки електродвигуни більш надійні в порівнянні з ДВЗ та не потребують дорогих пально-мастильних матеріалів.

Цікаві результати та корисні рекомендації також містяться в роботі Н.А. Корчемного [5], присвяченій дослідженню електроприводу мобільних агрегатів, як проводились на базі ІМЕСГ УААН (Україна). В роботі відмічено, що заміна в мотоблоках ДВЗ регульованим електроприводом дозволяє використовувати мобільні агрегати без коробки переключення швидкостей і тим самим знизити його собівартість та значно підвищити маневреність та надійність в роботі. На основі проведених досліджень встановлено, що момент опору на валу тягового двигуна при оранці ґрунту характеризується нестабільністю і змінюється в часі на рівному полі на 40-50%. Крім того, спостерігається періодичне коливання моменту опору з амплітудою $\pm 20\%$ від середнього значення. З цієї причини з урахуванням вимог до забезпечення діапазону швидкості руху на основних польових роботах 2,2:1 зроблено висновок, що оптимальною механічною характеристикою тягового двигуна мотоблоку є характеристика, що наближується до гіперболи, при якій потужність що споживається двигуном при зміні моменту на валу та швидкості руху залишиться незмінною. Порівняльні дослідження в якості тягових асинхронних двигунів з к.з. та фазним ротором а також двигунів постійного струму з незалежним та послідовним збудженням на базі шасі мотоблоку "Січ" показали, що найбільш повно відповідає вимогам що пред'являються до тягових двигунів в приводі мотоблоку, є двигун постійного струму послідовного збудження. В роботі наведена принципова схема безкоштовного регулювання частоти обертання двигуна постійного струму з реверсом.

Заслужують також увагу представлені в [6] дані порівняльної техніко-енергетичної оцінки ефективності найбільш розповсюджених мотоблоків вітчизняного та зарубіжного виробництва з ДВЗ, а також мотоблоку МБ-КЭП з електроприводом, що виготовлений на кафедрі АЕП ТДАТУ. В роботі відмічено, що найбільше значення коефіцієнту ефективності має мотоблок МБ-КЭП з електроприводом постійного струму. Також достатньо високим технічним рівнем характеризуються мотоблоки М-3 та "Січ-Д" виробництва України, а також мотоблоки "Исеки" КЕЗ (Японія) та МБ "Луч" (Росія).

Мета статті. Пропонується обґрунтування тягових характеристик, що визначають закон регулювання двигуна постійного струму в приводі мотоблока, а також отримання аналітичних залежностей основних параметрів керування для реалізації закону регулювання тяговим двигуном.

Основні матеріали дослідження. Основне призначення тягового двигуна в приводі мотоблока полягає в забезпеченні формування заданої тягової характеристики мотоблока з необхідними енергетичними показниками та надійністю. Тяговою характеристикою мотоблока з електроприводом і централізованим електропостачанням (як і інших енергетичних засобів) є залежність тягового зусилля (F_m) від швидкості пересування (V) при незмінності приєднаної потужності приводного електродвигуна (P_1). Узагальнена гранична тягова характеристика транспортних засобів наведена на рис. 1 [3].

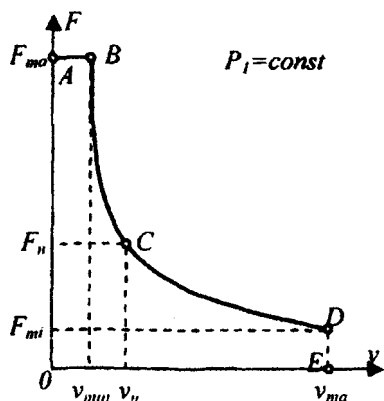


Рисунок 1 – Узагальнена тягова характеристика мотоблока

З урахуванням можливих режимів роботи тягового електродвигуна на характеристиці можна виділити три основних ділянки, що відповідають сталості максимальної сили тяги (F_{max}) (лінія AB), сталості приєднаної потужності (P_1) (ділянка BCD) та сталості максимальної швидкості (V_{max}) (лінія DE). При цьому ділянка, на якій забезпечується режим сталості потужності ($P_1 = const$) представляє собою гіперболу та має дві характерні зони: короткочасної роботи в режимі сталості незмінності потужності P_1 (лінія BC) та зони тривалої роботи при $P_1 = const$ (лінія CD). Точки B і D є граничними на характеристиці, в яких відбувається перехід мотоблока на режим підтримання незмінності потужності (B) та незмінність максимальної швидкості (D).

Слід відмітити, що за номінальне значення тягового зусилля F_n приймається сила, що забезпечує рух мотоблока з повною розрахунковою масою з заданою номінальною швидкістю V_n . При цьому діапазони зміни тягових зусиль від F_{max} до F_{min} та швидкості руху від V_{min} до V_{max} залежать від багатьох факторів, зокрема, від глибини оранки ґрунту, величини необхідної тягової потужності для оранки важких (P_v), середніх (P_s) та легких ґрунтів (P_l), та ін.

З тягової характеристики $F_m(V)$ на рис. 1 легко може бути побудована механічна характеристика тягового електродвигуна мотоблока, що представляє залежність електромагнітного моменту від кутової швидкості $M = f(\omega)$ з використанням наступних співвідношень:

$$M = \frac{R_k}{i_p \cdot i_n \cdot \eta_p \cdot \eta_n \cdot \eta_k} \cdot F_m; \quad (1)$$

$$\omega = \frac{i_p \cdot i_n}{R_k} \cdot V, \quad (2)$$

де F_m – тягове зусилля, Н;

V – лінійна швидкість пересування мотоблока, м/с;

R_k – радіус кочення колеса мотоблока, м;

i_p, η_p – передатне відношення та ККД редуктора;

i_n, η_n – передатне відношення та ККД ланцюгової передачі;

η_k – ККД колеса.

Механічна характеристика $M(\omega)$ тягового електродвигуна мотоблока наведена на рис. 2.

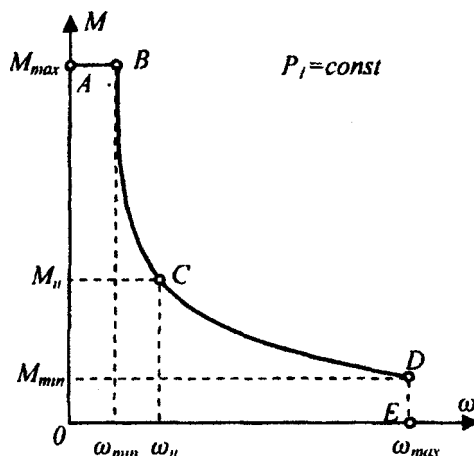


Рисунок 2 – Механічна характеристика тягового електродвигуна з регулятором в приводі мотоблока

Також слід відзначити на характеристиці $M(\omega)$ точки B, C та D, що розмежовують характерні режими роботи двигуна: пусковий режим (лінія AB), режим незмінності потужності P_1 (ділянка BCD) з зонами короткочасної роботи (BC) та тривалої роботи (CD) та режиму максимальної кутової швидкості ω_{max} (лінія DE).

Механічна характеристика тягового електродвигуна з регулятором є законом регулювання тягового двигуна мотоблока. При реалізації граничних залежностей $F_m(V)$ та $M(\omega)$, тяговий електродвигун споживатиме номінальну приєднану потужність P_{1n} . Для практичної реалізації закону регулювання тяговим електродвигуном, що визначається характеристикою $M(\omega)$ на рис. 2, доцільно використовувати в якості тягового - електродвигун постійного струму (ДПС) послідовного збудження, механічні характеристики якого при будь-якому способі керування наближені до гіперболічної залежності.

Розглянемо питання керування напругою та магнітним потоком при формуванні закону регулювання $M(\omega)$ ДПС послідовного збудження. Властивості ДПС в сталому режимі роботи повністю можуть бути описані наступною системою рівнянь:

$$U = E_a + I_a R_a; \quad (3)$$

$$E_a = k \cdot \Phi \cdot \omega; \quad (4)$$

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_a; \quad (5)$$

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{M \cdot R_a}{k^2 \cdot \Phi^2}, \quad (6)$$

де U – напруга, що підключається до обмотки якоря;

E_a – ЕРС якоря;

I_a, R_a – струм та опір мережі якоря;

Φ - основний магнітний потік збудження;
 k - постійний коефіцієнт;
 M - електромагнітний момент електродвигуна;
 ω - кутова швидкість двигуна.

Рівняння (3)...(6) дозволяють визначити умови змінення параметрів керування ДПС в приводі мотоблока для реалізації закону регулювання $M(\omega)$ на всіх інтервалах кутових швидкостей. На основі рівнянь (5)...(8) ДПС, можна перетворити механічну характеристику $\omega(M)$, що представлена на рис. 2 в залежність напруги від струму $U=f(I)$ двигуна, що приведена на рис. 3.

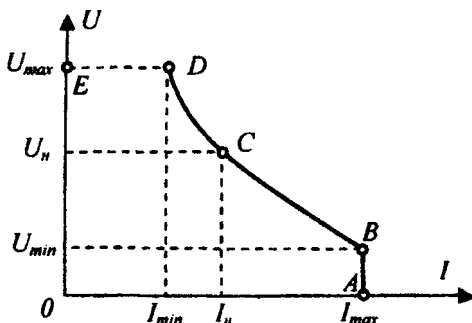


Рисунок 3 – Залежність $U(I)$ тягового електродвигуна постійного струму

Спільне розглядання характеристик $\omega(M)$ та $U(I)$ ДПС на рис. 2 та 3 дозволяє визначити параметри тягового двигуна у вузлових точках B, C та D. У відповідності з рівняннями (2) та (3), маємо

$$U_B = U_{B \min} = E_{aB} + I_{B \max} \cdot R_a = k \Phi_B \cdot \omega_{B \min} + I_{B \max} \cdot R_a \quad (7)$$

$$U_D = U_{D \max} = E_{aD} + I_{D \min} \cdot R_a = k \Phi_D \cdot \omega_{D \max} + I_{D \min} \cdot R_a \quad (8)$$

або після перетворення рівнянь (7) та (8) та представлення величин в відносних одиницях, отримаємо:

$$U_{\min}^* = (1 - \Delta U_n^*) \omega_{\min}^* \cdot \Phi_* + I_{\max}^* \cdot \Delta U_n^*; \quad (9)$$

$$U_{\max}^* = (1 - \Delta U_n^*) \omega_{\max}^* \cdot \Phi_* + I_{\min}^* \cdot \Delta U_n^*; \quad (10)$$

При цьому

$$\begin{aligned} U_{\min}^* &= \frac{U_{B \min}}{U_n}; & U_{\max}^* &= \frac{U_{D \min}}{U_n}; \\ I_{\max}^* &= \frac{I_{B \max}}{I_n}; & I_{\min}^* &= \frac{I_{D \min}}{I_n}; \\ \omega_{\min}^* &= \frac{\omega_{B \min}}{\omega_n}; & \omega_{\max}^* &= \frac{\omega_{D \max}}{\omega_n}; \\ \Delta U_n^* &= \frac{I_n \cdot R_a}{U_n}; & \Phi_{B^*} &= \frac{\Phi_B}{\Phi_n}; \Phi_{D^*} = \frac{\Phi_D}{\Phi_n} \end{aligned} \quad (11)$$

де ω - кутова швидкість ДПС, що відповідає переходу до режиму сталості потужності;
 I_n^* - кратність пускового струму двигуна;
 $\Delta U_n^* = I_n \cdot R_a$ - падіння напруги в якорній ланці ДПС.

В каталогах ДПС, як правило, наведені данні опору обмоток, що входять до ланки якоря. Точка C характеризується параметрами:

$$U_{C^*} = \frac{U_C}{U_n} = 1; I_{C^*} = \frac{I_C}{I_n} = 1; P_{C^*} = \frac{P_1}{P_{1n}} = 1.$$

Під умовами зміни параметрів U_* та Φ_* розуміємо статичні залежності $U_*(\omega_*)$, $\Phi_*(\omega_*)$ або $U_*(I_*)$, $\Phi_*(I_*)$ при $P_{1^*} = const$, які необхідно сформувати для виконання граничної та часткових характеристик $M_*(\omega_*)$ мотоблока. При цьому у ДПС послідовного збудження регулювання Φ_* виконується зміною коефіцієнту ослаблення магнітного поля $\beta_{o.n.}$ шляхом шунтування послідовної обмотки збудження деяким опором, що регулюється.

Характеристики $U_*(\omega_*)$ та $\Phi_*(\omega_*)$ або $U_*(I_*)$ та $\Phi_*(I_*)$ є основоположними для ДПС та визначають режим його роботи в тяговому електроприводі мотоблока.

Раніше відмічалось, що гранична механічна характеристика $M_*(\omega_*)$ містить три основних ділянки: незмінності пускового моменту $M_* = M_{\max}$, незмінності потужності $P_1 = I$ та ділянка обмеження кутової швидкості $\omega_* = \omega_{\max}$. Для режиму $M_* = M_{\max}$ коефіцієнт ослаблення магнітного поля $\beta_{o.n.} = 1$, а струм двигуна досягає значення $I_* = I_{\max}$. Таким чином в розглянутому діапазоні швидкостей $0 \leq \omega_* \leq \omega_{\min}^*$, маємо

$$\Phi_* = \Phi_{B^*} = 1; \quad (12)$$

$$U_{\min}^* = (1 - \Delta U_n^*) \cdot \omega_{\min}^* \cdot \Phi_* + I_{\max}^* \cdot \Delta U_n^*; \quad (13)$$

Кутова швидкість $\omega_{B \min}$ визначається з рівняння (13) з урахуванням $U_{\min} = 0,1$ та $I_{\max}^* = I_{\text{пуск}}^* = 2$

$$\omega_{B \min}^* = \frac{U_* - I_{\max}^* \cdot \Delta U_n^*}{(1 - \Delta U_n^*) \cdot \Phi_*}. \quad (14)$$

В інтервалі кутових швидкостей $\omega_{\min}^* \leq \omega_* \leq I$ регулювання ДПС здійснюється при незмінності $P_{1^*} = 1$ без ослаблення магнітного поля, тобто при $\beta_{o.n.} = 1$. Величина напруги в даному інтервалі змінюється зворотно-пропорційно струму $U = I / I_*$, а магнітний потік у відповідності з кривою намагнічування $\Phi_* = \Phi_*(I_*)$. В інтервалі кутових швидкостей $I \leq \omega_* \leq \omega_{\max}^*$,

$$U_{\max}^* = (1 - \Delta U_n^*) \cdot \omega_{\max}^* \cdot \Phi_* + I_{\min}^* \cdot \Delta U_n^*; \quad (15)$$

$$\Phi_* = \Phi_*(\beta_{o.n.}, I_*); \beta_{o.n.} = \beta_{o.n.}(I_*); P_{1^*} = 1. \quad (16)$$

Кутову швидкість $\omega_{B \max}$ визначаємо з рівняння (15)

$$\omega_{B \max}^* = \frac{U_{\max}^* - I_{\min}^* \cdot \Delta U_n^*}{(1 - \Delta U_n^*) \cdot \Phi_*}. \quad (17)$$

В табл. 1 систематизовані данні режиму керування, що забезпечують реалізацію закону регулювання $M_*(\omega_*)$ двигуном постійного струму послідовного збудження в приводі мотоблока.

Таблиця 1 – Режими керування ДПС послідовного збудження

Інтервал кутових швидкостей	Вимоги механічної характеристики	Умови зміни параметрів керування	Режим керування
$0 \leq \omega_* \leq \omega_{min}^*$	$M_* = M_{max}^*$ $I_* = I_{max}^* = 2$ $U_{min}^* = 0, 1$	$\Phi_* = \Phi_{H^*} = 1$ $U_{min}^* = (1 - \Delta U_{H^*}) \cdot \omega_{min}^* \cdot \Phi_* + I_{max}^* \cdot \Delta U_{H^*}$ $\omega_{min}^* = \frac{U_* - I_{max}^* \cdot \Delta U_{H^*}}{(1 - \Delta U_{H^*}) \cdot \Phi_*}$	1
$\omega_{min}^* \leq \omega_* \leq 1$	$P_{I^*} = 1$	$U = 1 / I_*; \beta_{o.n.} = 1; \Phi_* = \Phi_*(I_*)$	2
$1 \leq \omega_* \leq \omega_{max}^*$	$P_{I^*} = 1$	$\Phi_* = \Phi_*(\beta_{o.n.}; I_*)$; $\beta_{o.n.} = \beta_{o.n.}(I_*)$ $U_{max}^* = (1 - \Delta U_{H^*}) \cdot \omega_{max}^* \cdot \Phi_* + I_{min}^* \cdot \Delta U_{H^*}$ $\omega_{max}^* = \frac{U_{max}^* - I_{min}^* \cdot \Delta U_{H^*}}{(1 - \Delta U_{H^*}) \cdot \Phi_*}$	3

З табл. 1 видно, що в діапазоні зміни кутової швидкості у відповідності з механічною характеристикою $M_*(\omega_*)$ реалізуються сполученням конкретних умов зміни керованих параметрів. В даному випадку, пусковий режим двигуна з метою зниження пускового струму може бути забезпечено зниженням параметру керування U_* до величини $U_* = 0, 1$, що забезпечить максимальне значення струму $I_{max}^* = 2$ при $\beta_{o.n.} = 1$. Слід також відмітити важливу обставину, що при різних режимах керування, тобто сполучень умов зміни параметрів керування Φ_* , U_* та $\beta_{o.n.}$, електромагнітні характеристики в ДПС будуть різні. У зв'язку з цим є можливість визначити такі програми зміни параметрів Φ_* , U_* та $\beta_{o.n.}$, які забезпечать регулювання тяговим електродвигуном по мінімуму втрат при якісній реалізації закону регулювання $M_*(\omega_*)$, а також дозволять визначити оптимальні відхилення параметрів керування від екстремальних значень, відомості про які необхідні для розробки схеми автоматизації керування мотоблоком.

Висновки.

1. Обґрунтована тягова характеристика мотоблока з електроприводом, що є законом регулювання електродвигуном в приводі мотоблока.

2. Отримані аналітичні залежності, що визначають умови змінення параметрів керування для реалізації закону регулювання тяговим двигуном постійного струму.

3. Складено таблицю режимів керування тяговим двигуном в приводі мотоблока, де визначено сукупність законів регулювання та умов змінення параметрів керування для трьох інтервалів швидкостей обертання двигуна.

Список використаних джерел

1. Малая механизация в приусадебных и фермерских хозяйствах. / О.Г. Залигин, С.О. Гусаков, В.П. Забарский и др.; Под ред. И. П. Масло. – К.: Урожай, 1996. – 367 с.
2. Механизация и электрификация сельскохозяйственного производства/ В.М. Баудин и др.; Под ред. В. М. Баудина – М.: Колос, 2000. – 506 с.

3. Электрические трансмиссии пневмоколесных транспортных средств. /И. С. Ефремов, А. П., Пролыгин, Ю. М. Андреев и др. – М.: Энергия, 1976. – 256 с.

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

5. Корчемный М., Савченко П., Юсупов Н., Гусаков С. Электропривод мобильного агрегату.// Электрификация, 1977. - № 8. – С.30-31.

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

Аннотация

ТЯГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ УПРАВЛЕНИЯ МОТОБЛОКА С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ковалев А. В., Назарьян Г. Н.

Обусловлены тяговые характеристики, определяющие закон регулирования двигателем постоянного тока в приводе мотоблока. Получены аналитические зависимости параметров управления для реализации закона регулирования тяговым электродвигателем.

Abstract

TRACTION CHARACTERISTICS AND PARAMETERS OF MANAGEMENT OF THE MOTOR-BLOCK WITH THE DC DRIVE

A. Kovalyov, G. Nazaryan

The traction characteristics defining the law of regulation by the engine of a direct current in a drive of the motor-block are caused. Analytical dependences of parameters of management for realization of the law of regulation by the traction electric motor are received.