

І. П. НАЗАРЕНКО, О. В. КОВАЛЬОВ

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ НА БАЗІ ЕЛЕКТРОМОТОБЛОКА

В Україні за останні роки значно збільшилась кількість фермерських господарств, приватних землекористувачів та споруд захищеного ґрунту. Для підвищення ефективності виробництва овочів широке застосування отримали малогабаритні мобільні агрегати у вигляді мотоблоків з двигунами внутрішнього згорання вітчизняного і зарубіжного виробництва. Однак під час роботи мобільних агрегатів з двигунами внутрішнього згорання в теплицях і парниках підвищується рівень шуму і загазованість повітря, які негативно впливають не тільки на людей, але й на рослини. До недоліків мотоблоків з двигунами внутрішнього згорання також слід віднести досить високі питомі витрати рідкого палива, що має високу вартість, складнощі при пуску і зупинці агрегату, а також відносно невисоку надійність роботи двигунів внутрішнього згорання. Більш перспективними для роботи в спорудах захищеного ґрунту є мобільні агрегати з тяговими електродвигунами, що отримали назву електромоблоків, як екологічно чисті агрегати, що не мають названих недоліків. В роботі наведено основні технічні характеристики експериментального зразку малогабаритного електрифікованого ґрунтообробного мотоблока. Обґрунтовано структурну схему силового енергетичного каналу електромоблока, що наочно демонструє процеси перетворення енергії в ньому. Отримано рівняння енергетичного балансу електромоблока та основних енергетичних співвідношень, що визначають властивості тягового електродвигуна в приводі електромоблока. Обґрунтовано алгоритм оптимального керування тяговим електродвигуном постійного струму за максимумом коефіцієнту корисної дії для двигунів постійного струму послідовного та змішаного збудження. Представлено результати польових випробувань дослідного зразку електромоблока. Аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень електрифікованого ґрунтообробного мотоблока з приводом від двигуна постійного струму послідовного збудження свідчить про зниження питомих енерговитрат на основні види обробітку ґрунту на 12–15 %.

Ключові слова: електричний мотоблок, тяговий двигун, енергетичний баланс, алгоритм керування, тягове зусилля, енергоємність, польові випробування.

І. П. НАЗАРЕНКО, А. В. КОВАЛЕВ

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ГРУНТА НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОМОТОБЛОКА

В Украине за последние годы значительно увеличилось количество фермерских хозяйств, частных землепользователей и сооружений защищенного ґрунта. Для повышения эффективности производства овощей широкое применение получили малогабаритные мобильные агрегаты в виде мотоблоков с двигателями внутреннего сгорания отечественного и зарубежного производства. Однако во время работы мобильных агрегатов с двигателями внутреннего сгорания в теплицах и парниках повышается уровень шума и загазованность воздуха, которые негативно влияют не только на людей, но и на растения. К недостаткам мотоблоков с двигателями внутреннего сгорания также следует отнести достаточно высокие удельные расходы жидкого топлива, которое имеет высокую стоимость, сложности при пуске и остановке агрегата, а также относительно невысокую надежность работы двигателей внутреннего сгорания. Более перспективными для работы в сооружениях защищенного ґрунта являются мобильные агрегаты с тяговыми электродвигателями, получившие название электромоблоков, как экологически чистые агрегаты, не имеющие названных недостатков. В работе приведены основные технические характеристики экспериментального образца малогабаритного электрифицированного почвообрабатывающего мотоблока. Обоснована структурная схема силового энергетического канала электромоблока, которая наглядно демонстрирует процессы преобразования энергии в нем. Получено уравнение энергетического баланса электромоблока и основных энергетических соотношений, определяющих свойства тягового электродвигателя в приводе электромоблока. Обоснован алгоритм оптимального управления тяговым электродвигателем постоянного тока по максимуму коэффициента полезного действия для двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения. Представлены результаты полевых испытаний опытного образца электромоблока. Анализ полученных результатов экспериментальных исследований электрифицированного почвообрабатывающего мотоблока с приводом от двигателя постоянного тока последовательного возбуждения свидетельствует о снижении удельных энергозатрат на основные виды обработки на 12–15 %.

Ключевые слова: электрический мотоблок, тяговый двигатель, энергетический баланс, алгоритм управления, тяговое усилие, энергоёмность, полевые испытания.

I. NAZARENKO, O. KOVALOV

ENERGY EFFICIENT ELECTROMECHANICAL SOIL TREATMENT SYSTEM BASED ON ELECTRIC MOTORBLOCK

In Ukraine, the number of farms, private land users and protected soil structures has increased significantly in recent years. To increase the efficiency of vegetable production, small-sized mobile units in the form of motoblocks with internal combustion engines of domestic and foreign production have been widely used. However, during the operation of mobile units with internal combustion engines in greenhouses and hotbeds, the noise level and air pollution increase, which negatively affect not only people but also plants. The disadvantages of motoblocks with internal combustion engines should also include a fairly high specific consumption of liquid fuel, which has a high cost, difficulties in starting and stopping the unit, as well as the relatively low reliability of the internal combustion engine. More promising for work in protected soil structures are mobile units with traction motors, called electric motors, as environmentally friendly units that do not have these shortcomings. The main technical characteristics of the experimental sample of a small-sized electrified soil-cultivating motoblock are given in the work. The structural scheme of the power energy channel of the electric motor unit is substantiated, which clearly demonstrates the processes of energy conversion in it. The equation of energy balance of the electric motor unit and the main energy ratios that determine the properties of the traction motor in the drive of the electric motor unit are obtained. The algorithm of optimal control of a direct current traction motor by the maximum efficiency for direct current motors of serial and mixed excitation is substantiated. The results of field tests of the prototype of the electric motor unit are presented. The analysis of the obtained results of experimental researches of the

electrified tillage motor-drive driven by the direct current motor of sequential excitation testifies to the reduction of specific energy consumption for the main types of tillage by 12-15%.

Keywords: electric motorblock, traction engine, energy balance, control algorithm, traction force, energy consumption, field tests.

Вступ. Сучасне сільськогосподарське виробництво в Україні та за кордоном характеризується масовим застосуванням мобільних енергетичних засобів малої механізації у вигляді малогабаритних мотоблоків (МБ), міні-тракторів та різноманітних спеціалізованих агрегатів в основному з двигунами внутрішнього згорання [1]. В той же час проведені порівняльні випробування виявили, що електрифіковані мотоблоки з тяговими електродвигунами постійного та змінного струму мають ряд переваг в порівнянні з мотоблоком з двигуном внутрішнього згорання, наприклад, легкість керування, простота пуску та зупинки, надійність та економічність у роботі, відсутність загазованості навколишнього середовища [2–5].

Про ефективність мотоблоків з електроприводом свідчать і проведена порівняльна техніко-енергетична оцінка найбільш розповсюджених моделей мотоблоків [6]. При цьому слід відмітити, що питання енергетики та керування мотоблоків з електроприводом не отримали чинного розвитку і відображення в технічній літературі.

Мета роботи. Метою роботи є отримання рівняння енергетичного балансу електромоблока та основних енергетичних співвідношень, що визначають властивості тягового електродвигуна в приводі електромоблока, обґрунтування алгоритму оптимального керування тягового електродвигуна постійного струму по максимуму ККД та аналіз результатів польових випробувань електромоблока.

Матеріали дослідження. Електромоблоки можуть бути класифіковані за наступними ознаками: по виду джерела електропостачання – з централізованим або автономним, по роду струму тягового електродвигуна – постійного або змінного, а також по конструктивному виконанню механічної передачі та ведучих коліс та ін.

Дослідний зразок електромоблока (рис. 1) з тяговим електродвигуном постійного струму послідовного збудження був виготовлений в лабораторії кафедри електротехніки і електромеханіки імені професора В. В. Овчарова Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного і передбачає централізоване електроживлення від однофазної мережі змінного струму через гнучкий кабель і керований вентильний перетворювач.

Основні технічні характеристики дослідного зразку електромоблока наведені в табл. 2.

Процес перетворення енергії при роботі мотоблока з електроприводом та централізованим електропостачанням наочно може бути представлено у вигляді структурної схеми енергетичного каналу мотоблока (див. рис. 2).

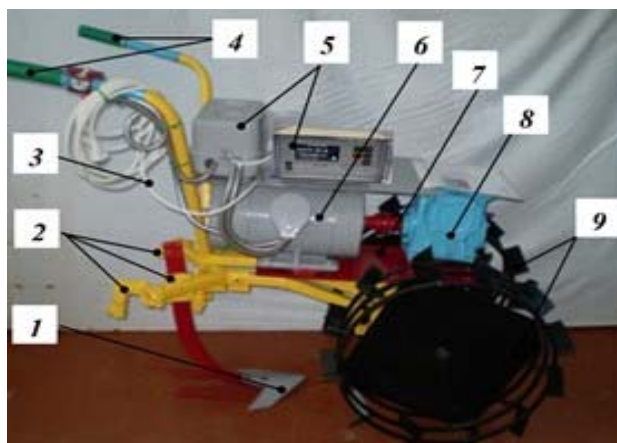


Рисунок 1– Загальний вигляд дослідного зразка електромоблока:

- 1 – робочий орган; 2 – обійми для кріплення робочих органів; 3 – гнучкий кабель; 4 – важелі (рукоятки) керування; 5 – система керування і захисту; 6 – тяговий електродвигун; 7 – корпус (рама); 8 – редуктор; 9 – ходові колеса.

Таблиця 1 - Технічна характеристика електромоблока

| Тяговий електродвигун | Д-12 |
|---|--|
| Потужність, кВт | 2,5 |
| Номинальна напруга живлення, В. | 220 |
| Номинальний струм, А | 15 |
| Частота обертання, об./хв. | 1175 |
| Механічна передача | Черв'ячний редуктор і ланцюгова передача |
| Продуктивність при оранці ґрунту, га/год. | 0,25 |
| Ширина захвату, см. | 18...50 |
| Глибина оранки, см. | до 20 |
| Робоча швидкість, км/год. | 1,0...7,0 |
| Кількість передач: вперед / назад | 5/2 |
| Габаритні розміри, мм: | |
| довжина | 1250 |
| ширина | 550 |
| висота | 940 |
| Маса, кг | 100 |

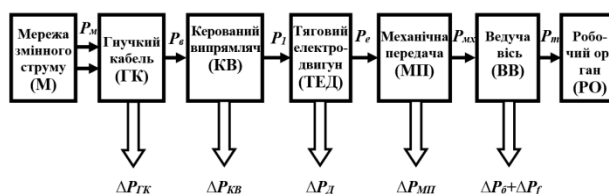


Рисунок 2 – Структурна схема енергетичного каналу електромоблока

На структурній схемі енергетичного каналу електромоблока позначено:

P_M – електрична потужність що споживана з мережі;

P_e – електрична потужність на ввіді електромоблока;

P_l – приєднана потужність тягового електродвигуна;

P_e – ефективна або корисна потужність тягового електродвигуна;

P_{mx} – механічна потужність що подається на ведучу вісь електромоблока;

P_m – тягова потужність на робочому органі;

$\Delta P_{ГК}$ – електричні втрати в живлячому гнучкому кабелі;

$\Delta P_{КВ}$ – втрати в керованому випрямлювачі;

$\Delta P_{Д}$ – сумарні втрати в тяговому електродвигуні;

$\Delta P_{МП}$ – втрати в механічній передачі;

ΔP_{σ} – втрати на буксування коліс;

ΔP_f – втрати на перекочування коліс;

$\Delta P_{\sigma} + \Delta P_f$ – втрати в ходовій системі електромоблока на буксування та перекочування коліс.

У відповідності з наведеною на рис. 2 структурою схемою енергетичного каналу, ефективність електромоблока може бути оцінена рівнянням енергетичного балансу в наступному вигляді

$$P_e = P_l - \Delta P_{\sigma} = \Delta P_{МП} + \Delta P_{\sigma} + \Delta P_f + \Delta P_m. \quad (1)$$

Рівняння (1) відображає режим роботи електромоблока при незмінності P_l та P_m , а також швидкості руху v . В реальних умовах роботи, наприклад при оранці, величина P_m постійно змінюється, що призводить до нестабільності енергетичного балансу МБ.

Оцінку тягових властивостей електромоблока можна провести за величиною його тягового ККД

$$\eta_m = \frac{P_m}{P_e}. \quad (2)$$

З урахуванням втрат енергії в механічній передачі ($\Delta P_{МП}$) та в ходовій системі електромоблока на буксування (ΔP_{σ}) та перекочування коліс (ΔP_f) тяговий ККД буде визначений рівнянням

$$\eta_m = \eta_{МП} \cdot \eta_{\sigma} \cdot \eta_f, \quad (3)$$

де $\eta_{МП}$ – ККД механічної передачі;

η_{σ} – ККД буксування;

η_f – ККД перекочування.

Величина тягового зусилля пов'язана з тяговою потужністю рівнянням

$$F_m = \frac{P_m}{v}. \quad (4)$$

З урахуванням рівнянь (2) та (3) маємо

$$F_m = \frac{P_m}{v} \cdot \eta_{МП} \cdot \eta_{\sigma} \cdot \eta_f. \quad (5)$$

Згідно рівнянь (2) та (5), величина тягової потужності та тягового зусилля електромоблока при

завданій швидкості залежать від v та незмінній величині ефективної потужності залежать від тягового ККД.

$$P_m = F_m \cdot v = P_e \cdot \eta_m = P_e \cdot \eta_{МП} \cdot \eta_{\sigma} \cdot \eta_f. \quad (6)$$

В [4] для визначення тягової потужності електромоблока запропоноване рівняння виду

$$P_m = \frac{(F_m + f \cdot G_{мб}) \cdot v}{\eta_{МП} \cdot \eta_{\sigma} \cdot \eta_f}, \quad (7)$$

де f – коефіцієнт опору пересуванню електромоблока;

$G_{мб}$ – експлуатаційна вага електромоблока, кН.

В межах оптимального режиму роботи залежність між швидкістю руху та тяговим зусиллям електромоблока повинна мати гіперболічний характер. Дійсно, згідно рівняння (5) ідеальна тягова характеристика може бути виражена співвідношенням

$$P_m = F_m \cdot v = P_e \cdot \eta_m = const. \quad (8)$$

При використанні в якості тягового двигуна постійного струму послідовного збудження, співвідношення (8) може дотримуватися автоматично.

Тяговий момент що створює електромоблок визначається рівнянням

$$M_m = F_m \cdot R_k = M \cdot i_{МП} \cdot \eta_m, \quad (9)$$

де F_m – тягове зусилля, Н;

R_k – радіус кочення колеса, м;

M – електромагнітний момент ТЕД, Нм;

$i_{МП}$ – передаточне відношення механічної передачі.

Електромагнітний момент тягового двигуна електромоблока

$$M = \frac{R_k \cdot F_m}{i_{МП} \cdot \eta_{МП} \cdot \eta_{\sigma} \cdot \eta_f}, \quad (10)$$

та кутова швидкість

$$\omega = \frac{i_{МП} \cdot v}{R_k}. \quad (11)$$

Тягова характеристика електромоблока, як і інших мобільних енергетичних засобів представляє собою залежність

$$F_m = f(v) \text{ при } P_l = const. \quad (12)$$

По наведеній механічній характеристиці $F_m = f(v)$ можливо побудувати механічну характеристику ТЕД $M = f(\omega)$ з використанням співвідношень (10) та (11). Гранична механічна характеристика ТЕД наведена в [7].

Властивості ТЕД постійного струму в сталому режимі можуть бути описані наступною системою рівнянь

$$U = E_a + I_a R_a; \quad (13)$$

$$E_a = k \cdot \Phi \cdot \omega; \quad (14)$$

$$M = k \cdot \Phi \cdot I; \quad (15)$$

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{M \cdot R_a}{k^2 \cdot \Phi^2} \quad (16)$$

де U – напруга, що підключається до обмотки якоря;

E_a – ЕРС якоря;

I_a, R_a – струм та опір кола якоря;

Φ – основний магнітний потік збудження;

k – постійний коефіцієнт, що визначає параметри якоря ДПС;

M – електромагнітний момент електродвигуна;

ω – кутова швидкість двигуна.

$$R_a = R_{я} + R_{дп} + R_{опз} + R_{щ}, \quad (17)$$

де $R_{я}, R_{дп}, R_{опз}, R_{щ}$ – відповідно, опори обмотки якоря, додаткових полюсів, обмотки послідовного збудження та в щітковому контакті колектора.

ККД ТЕД визначається співвідношенням

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad (18)$$

або через втрати

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_0 + k_3^2 \cdot \Delta P_{ен}}{k_3^2 P_2 + \Delta P_0 + k_3^2 \cdot \Delta P_{ен}}, \quad (19)$$

де ΔP_0 – постійні втрати в ТЕД;

$\Delta P_{ен}$ – змінні навантажувальні втрати при номінальному навантаженні;

k_3 – коефіцієнт завантаження двигуна.

При цьому

$$\Delta P_0 = \Delta P_{мх} + \Delta P_{мг} + \Delta P_{д}; \quad (20)$$

$$\Delta P_{ен} = \Delta P_{еа} + \Delta P_{зб} + \Delta P_{щ}; \quad (21)$$

$$k_3 = \frac{P_2}{P_{2н}}, \quad (22)$$

де $\Delta P_{мх}$ – механічні втрати на тертя в підшипниках;

$\Delta P_{мг}$ – магнітні втрати на віхрові струми та гістерезис в магнітопроводі ЕД від основного магнітного поля;

$\Delta P_{д}$ – додаткові електричні та магнітні втрати від полів вищих гармонік;

$\Delta P_{еа}$ – електричні втрати в колі обмотки якоря;

$\Delta P_{зб}$ – електричні втрати в обмотці збудження;

$\Delta P_{щ}$ – електричні втрати в щітковому контакті на колекторі.

При цьому

$$\Delta P_{еа} = I^2 \cdot R_a; \quad \Delta P_{зб} = \beta_{оп}^2 \cdot I^2 \cdot R_{опз};$$

$$\Delta P_{щ} = \Delta U_{щ} \cdot I; \quad \Delta P_{мх} = \Delta P_{мхн} \cdot \omega^{1,5};$$

$$\Delta P_{мг} = \Delta P_{мгн} \cdot \Phi^2 \cdot \omega^{1,5}; \quad \Delta P_{д} = 0,01 P_{1н},$$

де $\Delta U_{щ}$ – падіння напруги в щітковому контакті,

$\Delta P_{мхн}, \Delta P_{мгн}$ – механічні та магнітні втрати при номінальному навантаженні. Розрахунок втрат $\Delta P_{мхн}$ та $\Delta P_{мгн}$ наведено в [7].

Умовою отримання максимального ККД в ТЕД у відповідності з (19) є рівність постійних та змінних втрат, тобто

$$\Delta P_0 = k_{зм}^2 \Delta P_{ен}, \quad (23)$$

де $k_{зм}$ – коефіцієнт завантаження, при якому ККД ТЕД буде максимальним.

Рівняння (13), (14) та (23) з урахуванням (20) та (21) дозволяють визначити умови та режими керування ТЕД постійного струму в приводі електродвигуна для реалізації закону регулювання $M(\omega)$ на всіх інтервалах кутових швидкостей. Розділивши рівняння (13) зліва та справа на U_n з урахуванням (14) отримаємо рівняння, що визначає керування ТЕД зміною магнітного потоку на напруги у відн. од.

$$U_* = (1 - \Delta U_n) \cdot \Phi_* \cdot \omega_* \cdot \Delta U_{н*} \cdot I_*, \quad (24)$$

де $U_* = \frac{U}{U_n}$; $\Phi_* = \frac{\Phi}{\Phi_n}$; $\omega_* = \frac{\omega}{\omega_n}$; $I_* = \frac{I}{I_n}$;

ΔU_n – падіння напруги в якірному колі двигуна при номінальному струмі.

При цьому для ДПС послідовного та змішаного збудження

$$\Delta U_{н*} = \frac{1}{U_n} [(R_{я} + R_{дп}) + \beta_{оп} R_{опз}], \quad (25)$$

де $\beta_{оп}$ – коефіцієнт ослаблення магнітного поля шляхом шунтування деяким опором обмотки послідовного збудження

$$\beta_{оп} = \frac{I_{зб*}}{I_{збн*}}.$$

Потужність, що споживає ТЕД

$$P_{1*} = U_* \cdot I_*. \quad (26)$$

З урахуванням того, що $P_{1*} = \frac{P}{P_{1н}} = 1$, то

$$I_* = \frac{1}{U_*}. \quad (27)$$

Згідно з (18) потужність на валу ТЕД

$$P_{2*} = \frac{\eta \cdot P_{2*}}{\eta_n}. \quad (28)$$

Згідно з (15) електромагнітний момент

$$M_* = \Phi_* \cdot I_*. \quad (29)$$

Корисний момент на валу ТЕД

$$M_{2*} = \frac{P_{2*}}{\omega_*} \quad (30)$$

Струм паралельної обмотки збудження ДПС

$$I_{36*} = \frac{I_{36}}{I_{36H}}$$

Зупинимося більш докладніше на умові керування ТЕД в приводі МБ по максимуму ККД. Принцип регулювання електричних машин по мінімуму електромагнітних втрат було обґрунтовано в [8]. У відповідності з цим принципом магнітний потік при його регулюванні визначається виразом

$$\Phi_* = \frac{E_*}{\omega_*} = \sqrt{M_*} \quad (31)$$

Стосовно до ТЕД постійного струму принцип регулювання магнітного потоку можна використовувати тільки в обмеженому інтервалі швидкостей АД, а саме $I \leq \omega_* \leq \omega_{I*}$, де кутова швидкість, що відповідає виходу ТЕД на режим постійного значення напруги U_{max*} . В інших діапазонах швидкостей його застосування не забезпечує формування механічної характеристики $M(\omega)$ при високому електромагнітному ККД. Співвідношення (23) дозволяє отримати простий для реалізації на практиці закон керування ТЕД по максимуму ККД. Згідно з (23) коефіцієнт завантаження, що забезпечує максимум ККД буде дорівнювати

$$k_{3M}^2 = \frac{\Delta P_{MX} + \Delta P_{MG} + \Delta P_D}{\Delta P_{ea} + \Delta P_{36} + \Delta P_{\text{ц}}} \quad (32)$$

Окремі види втрат в (32) можна представити в вигляді

Таблиця 2 – Програма реалізації закону оптимального керування по умові максимуму ККД тягового двигуна постійного струму в приводі електромотоблока

| Інтервал кутової швидкості | Вимоги задавної механічної характеристики | ДПС послідовного збудження | | ДПС змішаного збудження | |
|--------------------------------------|--|--|-------------------|--|-------------------|
| | | Закон керування | Варіант керування | Закон керування | Варіант керування |
| $0 \leq \omega_* \leq \omega_{min*}$ | $M_* = M_{max*};$ $I_* = I_{max*} = 2;$ $U_{min*} = 0,1$ | $\Phi_* = 1; \beta_{оп} = 1;$ $U_{min*} = (1 - \Delta U_{H*})\omega_{min*}\Phi_* +$ $+ I_{max*}\Delta U_{H*}$ | 1 | $\Phi_* = \Phi_{max*}; \beta_{оп} = 1; I_{36*} = 1;$ $U_{min*} = (1 - \Delta U_{H*})\omega_{min*}\Phi_* +$ $+ I_{max*}\Delta U_{H*}$ | 4 |
| $\omega_{min*} \leq \omega_* \leq 1$ | $P_{1*} = 1;$ $I_* = \frac{1}{U_*}$ | $\Phi_* = \Phi(I_*); \beta_{оп} = 1;$ $k_{3M} = 0,7 \dots 0,8;$ $U_* = k_{3M} \times$ $\times \left(\frac{a_1 \omega_*^{1,5} + a_2 \Phi_*^2 \omega_*^{1,5} + a_3 P_{1*}}{a_4 P_{1*}^2 + a_5 \beta_{оп}^2 P_{1*}^2 + a_6 P_{1*}} \right)^{0,5}$ | 2 | $\Phi_* = \Phi(I_*, I_{36*}); \beta_{оп} = 1;$ $k_{3M} = 0,7 \dots 0,8; U_* = \frac{1}{I_*};$ $U_* = k_{3M} \times$ $\times \left(\frac{a_1 \omega_*^{1,5} + a_2 \Phi_*^2 \omega_*^{1,5} + a_3 P_{1*}}{a_4 P_{1*}^2 + a_5 \beta_{оп}^2 P_{1*}^2 + a_6 P_{1*}} \right)^{0,5}$ | 5 |
| $1 \leq \omega_* \leq \omega_{max*}$ | $P_{1*} = 1;$ $I_* = \frac{1}{U_*}$ | $\Phi_* = \Phi(\beta_{оп}, I_*); \beta_{оп} = 0,9;$ $U_* = k_{3M} \times$ $\times \left(\frac{a_1 \omega_*^{1,5} + a_2 \Phi_*^2 \omega_*^{1,5} + a_3 P_{1*}}{a_4 P_{1*}^2 + a_5 \beta_{оп}^2 P_{1*}^2 + a_6 P_{1*}} \right)^{0,5}$ | 3 | $\Phi_* = \Phi(I_*, I_{36*}); \beta_{оп} = 1;$ $I_{36*} = I_{36*}(I_*); U_* = \frac{1}{I_*};$ $U_* = k_{3M} \times$ $\times \left(\frac{a_1 \omega_*^{1,5} + a_2 \Phi_*^2 \omega_*^{1,5} + a_3 P_{1*}}{a_4 P_{1*}^2 + a_5 \beta_{оп}^2 P_{1*}^2 + a_6 P_{1*}} \right)^{0,5}$ | 6 |

де $a_1 \dots a_6$ – представляють собою співвідношення складових втрат в ДПС в номінальному режимі до сумарних номінальних втрат двигуна

$$a_1 = \frac{\Delta P_{MXH}}{\sum \Delta P_H}; a_2 = \frac{\Delta P_{MGH}}{\sum \Delta P_H}; a_3 = \frac{\Delta P_{ДH}}{\sum \Delta P_H};$$

$$a_4 = \frac{\Delta P_{eaH}}{\sum \Delta P_H}; a_5 = \frac{\Delta P_{\text{е36H}}}{\sum \Delta P_H}; a_6 = \frac{\Delta P_{\text{цH}}}{\sum \Delta P_H} \quad (34)$$

При цьому

$$\sum \Delta P_H = P_H \frac{1 - \eta}{\eta} \quad (35)$$

З урахуванням згідно з (27) $I_* = \frac{1}{U_*}$, то після підстановки в (32), будемо мати

$$U_* = k_{3M} \sqrt{\frac{a_1 \omega_* + a_2 \Phi_*^2 \omega_*^{1,5} + a_3 P_{1*}}{a_4 P_{1*}^2 + a_5 \beta_{оп}^2 P_{1*}^2 + a_6 P_{1*}}} \quad (36)$$

Рівняння (36) визначає закон оптимального керування ТЕД постійного струму з умовою забезпечення максимального ККД двигуна при $P_I = const$ при зміні швидкості від ω_{min} до ω_{max} .

Слід ввести поняття закону керування ТЕД в приводі МБ. Стосовно до ДПС закон керування представляє собою сукупність умов зміни параметрів в вигляді напруги (U_*) та магнітного потоку (Φ_*) в визначеному інтервалі зміни швидкості обертання (ω_*), що забезпечує реалізацію механічної характеристики двигуна $M(\omega)$ з урахуванням вимог до неї.

Згідно табл. 2, всі діапазони зміни кутової характеристики можуть бути реалізовані сполученням конкретних умов зміни параметрів керування двигуна (U_* , Φ_*). Пусковий режим двигуна з метою зниження величини пускового струму забезпечується значенням живлячої напруги $U_* = 0,1$ та пускового струму $I_{n,max} = 2$ при $\beta_{on} = 1$. Також слід підкреслити важливу обставину, що в табл. 2 наведена програма зміни параметрів керування (U_* ; Φ_* ; β_{on}) в діапазоні зміни кутової швидкості $\omega_{min} \leq \omega_* \leq \omega_{max}$ при потужності $P_{I*} = 1$, що забезпечує закон керування ТЕД по максимуму ККД.

В табл. 2 наведено програму реалізації закону оптимального керування по максимуму ККД ТЕД постійного струму в приводі електромоблока.

Польові випробування дослідного зразку мотоблока МБ-КЕП оснащеного тяговим

електродвигуном постійного струму послідовного збудження проводилась згідно методики [9, 10] на контрольних ділянках ФГ «СНІСЕЙ-7» (с. Ботієве Мелітопольського району Запорізької області) при оранці ґрунту. Попередніми культурами були картопля та огірки. Робота проводилась при весняній оранці, рельєф ділянок – рівний, за механічними властивостями ґрунт представляв собою дерновий глинисто-піщаний.

При проведенні польових випробувань контролювалися значення напруги, струму якоря та частоти обертання тягового двигуна, глибини обробки ґрунту, швидкості пересування мотоблоку, та витрати електричної енергії.

Результати польових випробувань електромоблока представлено в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати польових випробувань електромоблока

| Найменування показника, розмірність | Склад агрегату | | | | | | | | | |
|---|---|------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--|
| | Мотоблок «МБ-КЕП» + плуг П1-20/2 | | | | | | | | | |
| Умови проведення випробувань | | | | | | | | | | |
| Дата проведення випробувань | 20.10.2018 р. (27.10.2018 р.) | | | | | | | | | |
| Місце проведення випробувань (господарство) | Фермерське господарство «СНІСЕЙ-7» смт Ботієве Призовського району Запорізької області. | | | | | | | | | |
| Вид роботи | Основна обробка ґрунту | | | | | | | | | |
| Попередня обробка ґрунту | - | | | | | | | | | |
| Характеристика поля | Уклін 0° | | | | | | | | | |
| Вологість ґрунту, % | 19,4 (19,8) | | | | | | | | | |
| Твердість ґрунту, МПа | 0,8 (1,0) | | | | | | | | | |
| Режими роботи електромоблока | | | | | | | | | | |
| - робоча ширина захвату, м | 0,2 | | | | | | | | | |
| - швидкість руху, км/год. | 2,0 | 2,2 | 2,4 | 2,6 | 2,8 | 3,0 | 3,2 | 3,4 | 3,6 | |
| - глибина обробки (середня), м | 0,188 (0,184) | 0,192 (0,191) | 0,201 (0,201) | 0,198 (0,197) | 0,21 (0,205) | 0,21 (0,2) | 0,192 (0,19) | 0,204 (0,21) | 0,208 (0,22) | |
| Енергетичні показники роботи електромоблока | | | | | | | | | | |
| - потужність двигуна, кВт | 0,88 (1,0) | 1,05 (1,3) | 1,24 (1,84) | 1,43 (2,1) | 1,6 (1,72) | 1,75 (1,94) | 2,02 (2,18) | 2,47 (2,4) | 2,5 (2,6) | |
| - питома енергоємність, 10 ⁻³ кВт·год/м ³ | 41,2 (45,07) | 41,9 (46,5) | 42,3 (47,7) | 42,6 (48,6) | 43,1 (49,5) | 43,6 (50,6) | 44,1 (51,9) | 44,6 (53,3) | 51,0 (54,01) | |
| - буксування коліс, % | 20,6 (20,7) | 22,0 (22,3) | 22,2 (22,5) | 24,0 (24,2) | 24,1 (24,4) | 24,8 (25,1) | 25,1 (25,3) | 25,2 (25,5) | 25,4 (25,6) | |

Проведення польових випробувань виконувалося на різних швидкостях пересування агрегату та глибинах обробки ґрунту (заглибленнях плуга). Мінімальна швидкість при оранці регламентувалась керівництвом по експлуатації мотоблока при роботі з плугом П1-20/2, та складала 2 км/год. Максимальне значення швидкості обмежувались виходячи із значення твердості ґрунту та фізичними можливостями оператора.

Для визначення питомої енергоємності процесу основного обробки ґрунту електромоблоком з плугом використаємо залежність

$$E_{\text{пит}} = \frac{P}{Q_V}, \quad (37)$$

де $E_{\text{пит}}$ – питома енергоємність, кВт·год./м³;
 Q_V – об'ємна продуктивність мотоблока, м³/год.
 Значення об'ємної продуктивності мотоблоку визначаємо за рівнянням

$$Q_V = b v_n h \cdot 10^3, \quad (38)$$

де b – ширина захвату агрегату, м;
 v_n – лінійна швидкість переміщення мотоблоку, км./год.;
 h – глибина обробки ґрунту, м.

Отримані залежності споживаної потужності електродвигуна привода електромоблока для оранки ґрунту від швидкості руху (рис. 4), що характеризують умови польових випробувань.

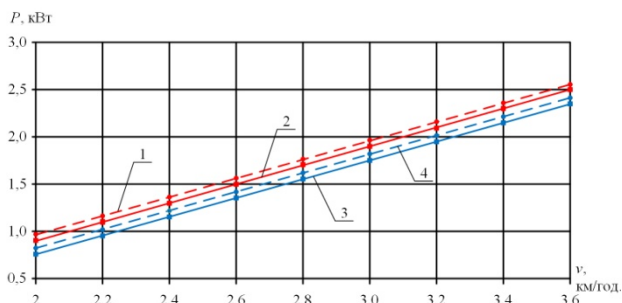


Рисунок 4 – Залежність потужності оранки ґрунту P від швидкості руху v електромоблока масою 100 кг при твердості ґрунту $H=1,0$ МПа: експериментальна (1) і розрахункова (2); при твердості ґрунту $H=0,8$ МПа: розрахункова (3) і експериментальна (4)

Залежність питомої енергоємності оранки ґрунту від швидкості руху електромоблока представлені на рис. 5.

Висновки. Запропоновано структурну схему енергетичного каналу електромоблока, що наочно представляє процеси перетворення енергії при його роботі, а також отримано алгоритм керування ТЕД постійного струму по максимуму ККД. Запропоновано програму реалізації оптимального керування ДПС послідовного та змішаного збудження.

Аналіз залежностей потужності свідчить про зростання її значень при збільшенні швидкості руху:

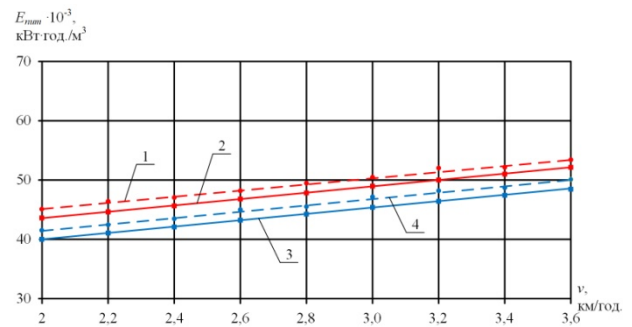


Рисунок 5 – Залежність питомої енергоємності Епит оранки ґрунту від швидкості руху v електромоблока масою 100 кг при твердості ґрунту $H=1,0$ МПа: експериментальна (1) і розрахункова (2); при твердості ґрунту $H=0,8$ МПа: розрахункова (3) і експериментальна (4)

при твердості ґрунту $H=1,0$ (0,8) МПа при зростанні швидкості від 2,0 до 3,6 км/год. (у 1,8 рази), потужність збільшується у 2,6 рази з 1,0 (0,9) кВт до 2,6 (2,4) кВт за лінійною залежністю. Інтенсивність зростання потужності перевищує інтенсивність зростання швидкості пересування електромоблока в 1,44 рази.

Аналіз залежностей питомої енергоємності $E_{\text{пит}}$ оранки ґрунту від швидкості руху v електромоблока свідчить про зростання енергоємності за лінійним законом: при твердості ґрунту $H = 1,0$ (0,8) МПа при зростанні швидкості від 2,0 до 3,6 км/год., питома енергоємність збільшується у 1,2 рази: з $45 \cdot 10^{-3}$ ($42 \cdot 10^{-3}$) до $54 \cdot 10^{-3}$ ($51 \cdot 10^{-3}$) кВт год./м³, що складає ($9 \cdot 10^{-3}$) кВт год./м³.

Список літератури

- Ангилев О. Г. Повышение эффективности электрифицированного оборудования в фермерских и крестьянских хозяйствах. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2002. № 10. С. 30–33.
- Kovalov O., Nazarenko I., Kvitka S. et al. Electric Drive of Small-Sized Soil-Cultivating Motoblock. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. Kremenchuk, Ukraine, 2020. P. 1–4. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240884.
- Корчменний М., Савченко І., Гусаков С. Електропривод мобільного агрегату. *Електрифікація*. 1997. № 8. С. 30–31.
- Залигин О. Г., Гусаков С. О., Забарский В. П. и др. *Малая механизация в приусадебных и фермерских хозяйствах*. Киев: Урожай, 1996. 367 с.
- Бондарь В. Н., Кондаков С. В., Новосельский А. Е. Рациональное совмещение характеристик двигателя внутреннего сгорания и электрического привода постоянного тока промышленного трактора. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. 2006. Вып. 8. № 11(66). С. 85–90.
- Ковальов О. В., Назар'ян Г. Н., Куценко Ю. М. Аналітичне визначення оптимальних експлуатаційних показників електрифікованого ґрунтообробного мотоблоку. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*. 2011. Вип. 116. С. 108–111.
- Ковальов О. В. Тягові характеристики та керування мотоблоком з електроприводом по максимуму ККД. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2008. № 30. С. 509–510.
- Кусов Т. Т. Создание энергетических средств с электромеханическим приводом. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 1988. № 10. С. 12–15.

9. Хайлис Г. А., Ковалев М. М. *Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных*. Москва: Колос, 1994. 169 с.
10. Юхимчук С. Ф. *Випробування та сертифікація сільськогосподарської техніки*. Луцьк: Луцький НТУ, 2017. 136 с.

References (transliterated)

1. Angileev O. G. Povyshenie jeffektivnosti jelektrificirovannogo oborudovanija v fermerskih i krest'janskijh hozjajstvah [Improving the efficiency of electrified equipment in farms and peasant households]. *Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva*. 2002, no. 10, pp. 30–33.
2. Kovalov O., Nazarenko I., Kvitka S. et al. Electric Drive of Small-Sized Soil-Cultivating Motoblock. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. Kremenčuk, Ukraine, 2020, pp. 1–4. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240884.
3. Korchemnij M., Savchenko I., Gusakov S. Elektroprivod mobil'nogo agregatu [Electric drive of a mobile unit]. *Elektrifikacija*. 1997, no. 8, pp. 30–31.
4. Zalignin O. G., Guskov S. G., Gusakov S. O., Zabarsky V. P. et al. *Malaja mehanizacija v priusadbenijh i fermerskijh hozjajstvah* [Small-scale mechanisation in households and farms]. Kiev: Urozhay Publ., 1996. 367 p.
5. Bondar V. N., Kondakov S. V., Novoselsky A. E. Racional'noe sovmeshhenie harakteristik dvigatelja vnutrennego sgoranija i jelektricheskogo privoda postojannogo toka promyshlennogo traktora [Rational combination of characteristics of an internal combustion engine and an industrial tractor DC electric drive]. *Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Mashinostroenie*. 2006, vol. 8, no. 11(66), pp. 85–90.
6. Kovalov O. V., Nazaryan G. N., Kutsenko Y. M. Analitичne vyznachennja optimal'nyh ekspluatacijnyh pokaznykiv elektryfikovanogo g'runtoobrobnogo motobloku [Analytical determination of optimum operating indicators of electrified tillage power tiller]. *Visnyk Harkivs'kogo nacional'nogo tehničnogo universytetu sil's'kogo gospodarstva imeni Petra Vasylenka. Tehnični nauky*. 2011, vol. 116, pp. 108–111.
7. Kovalov O. V. Tjagovi harakterystyky ta keruvannja motoblokom z elektroprivodom po maksimumu KKD. [Traction characteristics and control of a power tiller with electric drive for maximum efficiency]. *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «Harkivs'kyj politehničnyj instytut»*. 2008, no. 30, pp. 509–510.
8. Kusov T. T. Sozdanie jenergeticheskijh sredstv s jelektromechanicheskim privodom [Creation of power means with electromechanical drive]. *Traktory i sel'skohozjajstvennyje mashiny*. 1988, no. 10, pp. 12–15.
9. Hailis G. A., Kovalev M. M. *Issledovanija sel'skohozjajstvennoj tehniki i obrabotka opytnyh dannyh* [Research on agricultural machinery and the processing of experimental data]. Moscow: Kolos Publ., 1994. 169 p.
10. Yukhymchuk S. F. *Vyprobuvannja ta sertyfikacija sil's'kogospodars'koi' tehniki* [Testing and certification of agricultural machinery]. Lutsk: Lutsk NTU Publ., 2017. 136 p.

Надійшла (received) 20.05.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Назаренко Ігор Петрович (Назаренко Игорь Петрович, Nazarenko Ihor) – доктор технічних наук, професор, декан факультету електроенергетики та комп'ютерних технологій Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного, м. Мелітополь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6365-6777>; e-mail: ihor.nazarenko@tsatu.edu.ua.

Ковальов Олександр Вікторович (Ковалев Александр Викторович, Kovalov Oleksandr) – старший викладач кафедри електротехніки і електромеханіки імені професора В. В. Овчарова Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного, м. Мелітополь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5822-5494>; e-mail: alekstdaty1979@gmail.com.