

3. Другий період.

Математичний вираз щодо розрахунку вологості шламу для другого періоду сушки представлений формулою:

$$W = \frac{U_{\text{серед}} + 0,63(U_{t_2} - U_{\text{серед}}) \cdot e^{-0,2410^8 \cdot D \cdot t}}{1 + U_{\text{серед}} + 0,63(U_{t_2} - U_{\text{серед}}) \cdot e^{-0,2410^8 \cdot D \cdot t}}, \quad (4.8)$$

де $U_{\text{серед}}$ – вологовміст середовища;

U_{t_2} – вологовміст у точці початку другого періоду;

$$[D] = \frac{M^2}{c}, \quad D \in [10^{-10} \div 10^{-8}];$$

$t = \Delta t$ – від початку другого періоду сушки.

Згідно з математичними залежностями, які викладені у формулах (4.3 – 4.5), графічно побудовані теоретичні криві змін вологості шламу з часом в процесі його сушки при різних температурних режимах. Зіставлення теоретичних та експериментальних кривих сушки шламу підтверджує адекватність математичної моделі кінетики процесу щодо даних, які отримані в експерименті з термічної обробки відходів.

Згідно з математичними залежностями, які викладені у формулах (4.3 – 4.5), графічно побудовані теоретичні криві змін вологості шламу з часом в процесі його сушки при різних температурних режимах. Зіставлення теоретичних та експериментальних кривих сушки шламу підтверджує адекватність математичної моделі кінетики процесу щодо даних, які отримані в експерименті з термічної обробки відходів.

Отже, процес висушування шламу водоочищення ТЕЦ розподіляється на три часові періоди, які характеризуються певними часовими залежностями вологовмісту матеріалу. Детальний математичний аналіз класичних комплексних задач масопереносу щодо термічного процесу зневоднення шламу ТЕЦ підтверджує вибір найбільш ефективного режиму обробки шламу – сушки його у нагрітому газовому потоці в кондукторі, який обертається, тобто барабанній сушарці [11, с. 37 – 38].

За рекомендованою технологічною схемою з урахуванням незначної кількості водяної пари, що утворюється в процесі сушки шламових відходів у барабанній сушарці (~ 40 кг/год. води при висушуванні 2,5 т/доб шламу 30 – 50 % вологості), у технологічний процес їх зневоднення не вводять обладнання для утилізації енергії пари та відведення конденсату із сушильної установки, тому що це технічно нераціонально й економічно недоцільно.

Використання на підприємстві теплоенергетики вторинних енергоресурсів – низькопотенційної енергії відпрацьованих димових газів ТЕЦ для висушування шламових відходів водоочищення в технології отримання добрива-меліоранта дозволяє підприємству щорічно економити в обігових коштах за рахунок виключення закупівлі природного палива на процес термічного зневоднення шламу. Впровадження розробленої технології утилізації шламових відходів водоочищення ТЕЦ та реалізація у торгівельній мережі отриманого кальцієвмісного матеріалу як заміника вапна дозволяє підприємству отримувати додаткові обігові кошти, які направляються на оновлення та модернізацію технологічного обладнання основного виробництва.

Отриманий у розглянутій енергозберігаючій технології ресурс оцінний кальцієвмісний товарний продукт придатний для реалізації в мережі збуту товарів сільськогосподарського призначення. Технологія забезпечує агропромисловий сектор якісним з невисокою вартістю добривом-меліорантом для проведення агрохімічних заходів щодо підвищення родючості кислих ґрунтів.

4.5. Енергозберігаюча система обробки ґрунту на базі електрифікованого мотоблоку

© Ковальов О. В.

ст. викладач кафедри електротехніки і електромеханіки ім. професора В. В. Овчарова, Таврійський державний агротехнологічний університет, м. Мелітополь, Україна

Для підвищення ефективності виробництва овочів в спорудах захищеного ґрунту широке застосування отримали малогабаритні мобільні агрегати у вигляді мотоблоків з двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ) потужністю 1 – 7 кВт вітчизняного і зарубіжного виробництва. Під час роботи мобільних агрегатів з ДВЗ в теплицях і парниках підвищується рівень шуму і загазованості повітря, які негативно впливають не тільки на людей, але й на рослини. Причина цього – продукти неповного згорання рідкого палива, які осідаючи на застелену або плівкову поверхню даху і стін зменшують їх світлопроникність і, як наслідок, знижують ріст і розвиток рослин. До недоліків мотоблоків з ДВЗ також відносяться досить високі питомі витрати рідкого палива, що має високу вартість, труднощі при пуску і зупинці агрегату, а також невисока надійність ДВЗ.

Більш перспективними для роботи в спорудах захищеного ґрунту є мобільні агрегати з тяговими електродвигунами (ТЕД), що отримали назву електромоблоків, як екологічно чисті агрегати, що не мають названих недоліків [1, с. 32; 5, с. 30].

Електропривод мотоблока являє собою послідовне з'єднання елементів в енергетичній частині, що утворюють силовий канал, який показує процеси передачі та перетворення енергії. Структура такого електроприводу наведена на рис. 4.12, а). В його складі – силові елементи, які беруть безпосередню участь в процесі перетворення електричної енергії в механічну, і елементи, що перетворюють інформацію, необхідну для управління процесом перетворення енергії. Інформаційна частина представлена без поділу на блоки і в загальному випадку вона може бути пов'язана з усіма силовими елементами.

На рис. 4.12, б) зображено приклад фізичної реалізації послідовного силового каналу електроприводу мотоблока. Розглянемо “зліва-направо” елементи силового каналу, які беруть участь в перетворенні енергії.

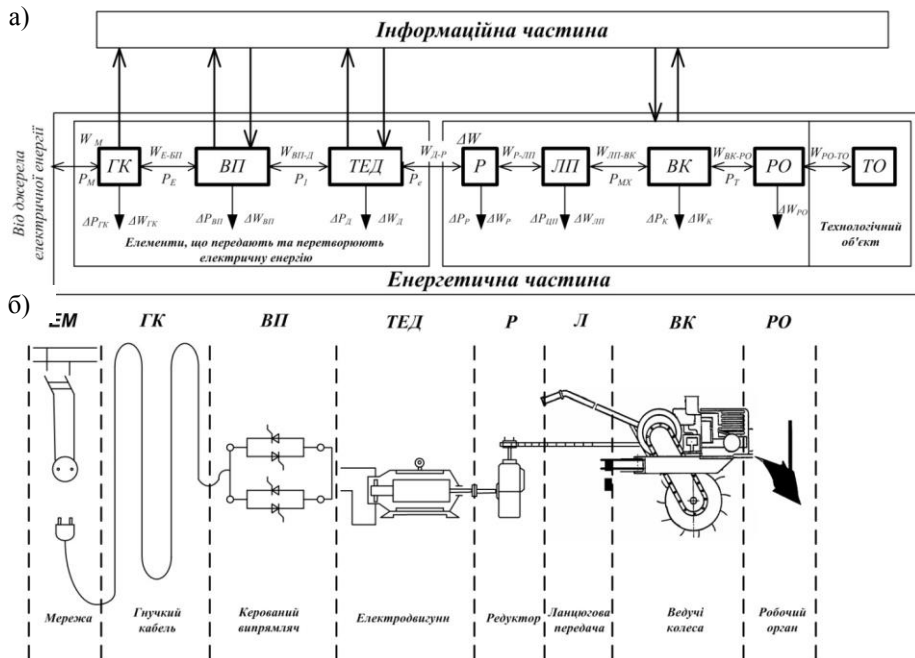


Рис. 4.12. Структурна а) електромеханічна б) схеми енергозберігаючої системи обробітку ґрунту на базі електрифікованої мотоблока

Джерело: узагальнено автором

Першим показаний елемент силового каналу, який представляє собою гнучкий кабель (ГК), за яким здійснюється підведення електроенергії з мережі змінного струму (ЕМ). Будемо вважати, що з ГК пов'язані характеристики напруги живлення – частота, величина падіння напруги при зміні споживаного струму і т. ін. Вентильний перетворювач (ВП) перетворює електричну енергію змінного струму в електричну енергію постійного струму, необхідну для подальшого електромеханічного перетворення в ТЕД, крім того, ВП виконує роль пристрою управління рівнів потоків енергії до ТЕД. У ВП в процесі перетворення електричної енергії виникають втрати енергії $\Delta W_{\text{ВП}}$.

Тяговий електродвигун перетворюючи електричну енергію в механічну, задає з урахуванням параметрів і навантажень механічної частини, характер механічного руху і змінні, що визначають цей рух: електромагнітний момент M і кутову швидкість ω при обертальному русі, силу тяги F і лінійну швидкість V при поступальному русі робочого органу (РО). При електромеханічному перетворенні енергії в ТЕД виникають втрати енергії $\Delta W_{\text{д}}$. Стосовно до електромоблоку, змінні, задані ТЕД, перетворюються до вигляду і параметрів, необхідних на робочому органі, наприклад плузі при оранці ґрунту. Тому в складі силової частини енергетичного каналу передбачається передавальний механізм (ПМ), що зв'яже ТЕД з виконавчим механізмом (ВМ). У розглянутому прикладі в якості ПМ використовується редуктор, що знижує швидкість і збільшує момент, отриманий на виході ТЕД до величини, необхідної виконавчого механізму. Цю роль виконують ведучі колеса (ВК), що обертаються на осі і переміщуються по ґрунту з необхідною швидкістю V . При цьому в ПМ, ВК і РО в робочому режимі виникають втрати $\Delta W_{\text{ПМ}}$, $\Delta W_{\text{ВК}}$ та $\Delta W_{\text{РО}}$ (рис. 4.12, а).

Отже, процес передачі і перетворення енергії в силовому каналі супроводжується її частковою втратою в кожному з елементів. Всі елементи силового каналу електроприводу мотоблока здатні

накопичувати енергію в тому чи іншому вигляді в залежності від типу елемента. Ця здатність визначається наявністю в силовому каналі індуктивних елементів-накопичувачів електричної енергії і магнітного поля, і ємностей-накопичувачів енергії електричного поля, пружних елементів, що накопичують потенційну механічну енергію, обертових і рухомих лінійних мас, здатних акумулювати кінетичну енергію. Тому складаючи баланс потужностей потоків енергії для силового каналу електроприводу мотоблоку, обмежимося урахуванням кінетичної енергії рухомих мас, вважаючи, що зміна потенційної енергії в системі не відбувається. Тоді в загальному випадку вказаний баланс потужностей можна записати у вигляді:

$$P_e = \sum_i J_i \omega_i \frac{d\omega_i}{dt} + \sum_j m_j V_j \frac{dV_j}{dt} + \sum_k \Delta P_k + M\omega + FV, \quad (4.9)$$

де P_e – потужність потоку електричної енергії, споживаної з мережі;

$$\sum_i J_i \omega_i \frac{d\omega_i}{dt} \text{ та } \sum_j m_j V_j \frac{dV_j}{dt} \quad (4.10)$$

– потужності, пов’язані із збільшенням або зменшенням мас, що обертаються або лінійно переміщуються;

$\sum_k \Delta P_k$ – сумарні втрати потужності у всіх елементах силового кола;

$M\omega$, FV – потужності механічної енергії, пов’язані з обертовим або лінійним рухом.

При цьому сумарна потужність втрат в силовому каналі складає:

$$\sum_k P_k = \Delta P_{ГК} + \Delta P_{ВП} + \Delta P_{Д} + \Delta P_{МП} + \Delta P_{К}, \quad (4.11)$$

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

$\Delta P_{ВП}$ – втрати в керованому випрямному перетворювачі;

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

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

$\Delta P_{К} = \Delta P_{\sigma} + \Delta P_{f}$ – втрати в ходовій частині на буксування коліс ΔP_{σ} та перекачування коліс ΔP_{f} .

У зв’язку з цим є дуже важливим формування таких режимів управління тяговим двигуном мотоблоку, які забезпечують оптимальне регулювання стосовно кожного інтервалу кутових швидкостей характеристики $M_*(\omega_*)$ по мінімуму втрат двигуна за допомогою порівняно простих по конструкції і керуванню вентильних перетворювачів (ВП) при централізованому електропостачанні [4, с. 146].

При розгляді ККД тягового електродвигуна [3, с. 83] були приведені розрахункові рівняння для визначення складових постійних та змінних втрат. З урахуванням цих рівнянь втрати можна представити у вигляді:

$$\Delta P_c = \Delta P_{МХ.Н} \cdot \omega_*^n + \Delta P_{МГ.Н} \cdot \omega_*^\beta \cdot \Phi^2 + \Delta P_{Д.Н}; \quad (4.12)$$

$$\Delta P_v = \Delta P_{а.Н} \cdot I_*^2 + \Delta P_{3\phi.Н} \cdot I_{3\phi}^2 + \Delta P_{Щ.Н} \cdot I_*^2, \quad (4.13)$$

де $\Delta P_{МХ.Н}$; $\Delta P_{МГ.Н}$; $\Delta P_{Д.Н}$; $\Delta P_{а.Н}$; $\Delta P_{3\phi.Н}$; $\Delta P_{Щ.Н}$ – потужності окремих видів втрат при номінальному навантаженні.

Для оцінки сумарних втрат ΔP_c і ΔP_v , а також окремих видів втрат в тяговому двигуні доцільно їх представити у вигляді відношення до сумарних номінальних втрат $\Delta P_{\Sigma Н}$:

$$\begin{aligned} \Delta P_{v*} &= \Delta P_{vН*} / \Delta P_{\Sigma Н*}; & \Delta P_{c*} &= \Delta P_{cН*} / \Delta P_{\Sigma Н*}; \\ a_1 &= \Delta P_{МХ.Н} / \Delta P_{\Sigma Н}; & a_2 &= \Delta P_{МГ.Н} / \Delta P_{\Sigma Н}; & a_3 &= \Delta P_{Д.Н} / \Delta P_{\Sigma Н}; \\ a_4 &= \Delta P_{а.Н} / \Delta P_{\Sigma Н}; & a_5 &= \Delta P_{3\phi.Н} / \Delta P_{\Sigma Н}; & a_6 &= \Delta P_{Щ.Н*} / \Delta P_{\Sigma Н}. \end{aligned} \quad (4.14)$$

При цьому:

$$\Delta P_{\Sigma Н} = P_H \frac{1 - \eta_H}{\eta_H}, \quad (4.15)$$

визначається за паспортними даними.

Рівняння втрат ΔP_c (4.12) та ΔP_v (4.13) з урахуванням (4.14) приймуть вид:

$$\Delta P_{c^*} = a_1 \cdot \omega_*^n + a_2 \cdot \omega_*^\beta \cdot \Phi_*^2 + a_3; \quad (4.16)$$

$$\Delta P_{v^*} = a_4 \cdot I_*^2 + a_5 \cdot I_{36}^2 + a_6 \cdot I_*^2. \quad (4.17)$$

З урахуванням того, що $I_* = M_* / \Phi_*$; $I_* = 1 / U_*$, то змінні втрати в тяговому двигуні можна представити в функції потоку і напруги:

$$\Delta P_{v^*} = a_4 \cdot M_*^2 / \Phi_*^2 + a_5 \cdot \beta_{\text{ОП}}^2 M_*^2 / \Phi_*^2 + a_6 M_*^2 / \Phi_*^2; \quad (4.18)$$

$$\Delta P_{v^*} = a_4 \cdot 1 / U_*^2 + a_5 \cdot 1 / U_*^2 + a_6 \cdot 1 / U_*^2. \quad (4.19)$$

При роботі електроприводу необхідно задати координати механічного руху M і ω , тому параметрами, що дозволяють змінити величину втрат в ТЕД є напруга живлення U_* та магнітний потік Φ_* , створюваний струмом I_{36}^* в обмотці збудження двигуна.

Зв'язок між магнітним потоком Φ_* та струмом збудження I_{36}^* визначається кривою намагнічування магнітного кола двигуна $\Phi_* = f(F_{36}^*)$, наведеною на рис. 4.13 Якщо ТЕД працює на лінійні ділянці кривої намагнічування, то $I_{36}^* = \Phi_*$, і потік, при якому втрати мінімальні визначається за умовою:

$$d\Delta P_{\Sigma^*} / d\Phi_* = 0 \text{ або } d\Delta P_{c^*} / d\Phi_* = d\Delta P_{v^*} / d\Phi_*. \quad (4.20)$$

Зазначимо, що в загальному випадку згідно рис. 4.13 магнітний потік Φ_* є нелінійною функцією струму збудження:

$$I_{36}^* = \Phi_* / K_\mu, \quad (4.21)$$

де K_μ – коефіцієнт насичення магнітного кола ДПС.

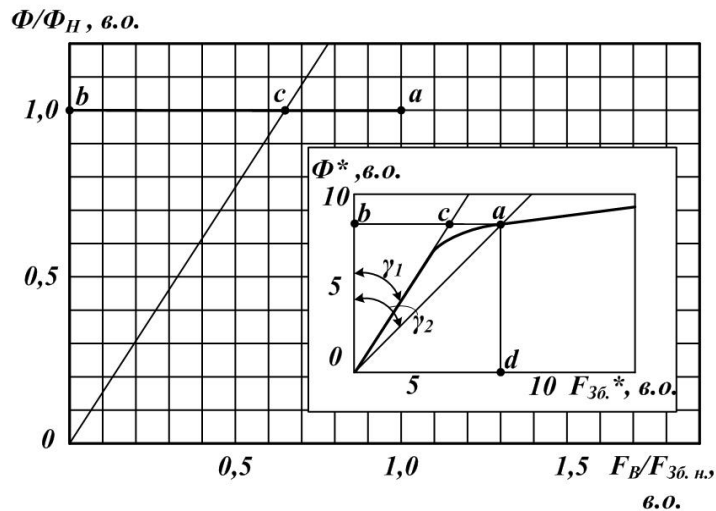


Рис. 4.13. Універсальна магнітна характеристика ДПС

Джерело: розрахунки автора

Згідно кривої намагнічування в точці a коефіцієнт K_μ визначається як відношення відрізків або магніторухійних сил:

$$K_\mu = \frac{\overline{ab}}{\overline{bc}} = \frac{F_{ax}}{F_{c^*}}. \quad (4.22)$$

У відповідності з (4.20) визначимо мінімальні сумарні втрати в ТЕД при припущенні, що магнітний потік Φ_* лінійно залежать від струму збудження I_{36}^* . Похідні по потоку від сумарних постійних втрат ΔP_{c^*} (4.16) і змінних втрат ΔP_{v^*} (4.18) дорівнюють:

$$d\Delta P_{c^*} / d\Phi_* = -2a_2 \Phi_* \omega_*^3; \quad (4.23)$$

$$d\Delta P_{v^*} / d\Phi_* = 2a_4 M_*^2 / \Phi_*^3 + 2a_5 \beta_{\text{ОП}}^2 M_*^2 / \Phi_*^3 + 2a_6 M_*^2 / \Phi_*^3. \quad (4.24)$$

При сумісному рішенні рівнянь (4.20), (4.23) та (4.24) отримаємо значення потоку, при якому втрати в двигуні мінімальні для заданих значень M_* і ω_* :

$$\Phi_{\text{ОПТ}^*}^2 = M_* \sqrt{\frac{a_4 + a_5 \beta_{\text{ОП}}^2 + a_6}{a_2 \omega_*^\beta}}. \quad (4.25)$$

Сумарні втрати в двигуні для оптимального значення потоку збудження отримаємо з (4.18) та (4.19) при виконанні умови (4.25):

$$\Delta P_{\Sigma \text{min}^*} = 2M_* \sqrt{(a_4 + a_6)(a_5 + a_2 \omega_*^\beta)} + a_1 \omega_*^n. \quad (4.26)$$

В реальних умовах експлуатації тягових двигунів магнітний потік Φ_* є нелінійною функцією струму збудження $I_{36,*}$, тому виникає необхідність визначення характеристик і умов регулювання, тобто режиму керування, який забезпечує мінімальні сумарні втрати в ТЕД при реалізації закону керування $M_*(\omega_*)$ на всіх інтервалах значень кутових швидкостей. Очевидно, що найбільш ефективним з енергетичної та практичної точки зору є режим керування ТЕД, що забезпечує найменші втрати або максимальний ККД при порівняно нескладній програмі та пристрої керування ТЕД в приводі мотоблоку.

Отримані рівняння постійних ΔP_{c^*} та змінних ΔP_{v^*} втрат у вигляді функційних залежностей від основних параметрів регулювання ДПС U_* і Φ_* дозволяють обґрунтувати простий в реалізації режим керування ТЕД мотоблоку по максимуму ККД. Умовою отримання максимального ККД ДПС є рівність постійних та змінних втрат:

$$\Delta P_{c^*} = \beta_m^2 \Delta P_{v^*}, \quad (4.27)$$

де $\beta_m = \frac{P_2}{P_{2H}}$ – коефіцієнта завантаження ДПС, при якому ККД досягає максимального значення.

З (4.27) отримаємо:

$$\beta_m^2 = \Delta P_{c^*} / \Delta P_{v^*}. \quad (4.28)$$

З урахуванням (4.16) і (4.17), задаючись показниками ступеня кутової швидкості ω_* $n = 1,5$ і $\beta = 1,5$, отримаємо:

$$\beta_m^2 = \frac{a_1 \omega_*^{1,5} + a_2 \Phi_*^2 \omega_*^{1,5} + a_3}{a_4 \cdot I_*^2 + a_5 \cdot I_{36,*}^2 + a_6 \cdot I_*^2}, \quad (4.29)$$

або, з урахуванням того, що $I_* = 1 / U_*$:

$$\beta_m^2 = \frac{a_1 \omega_*^{1,5} + a_2 \Phi_*^2 \omega_*^{1,5} + a_3}{a_4 \cdot 1 / U_*^2 + a_5 \cdot 1 / U_*^2 \beta_{\text{ОП}}^2 + a_6 \cdot 1 / U_*^2}, \quad (4.30)$$

де $a_1 \dots a_6$ – коефіцієнти, що визначають співвідношення окремих видів втрат до сумарних втрат ДПС при номінальному навантаженні.

У сучасних ДПС значення β_m знаходиться в межах $\beta_m = 0,7 \dots 0,9$, що закладається при проектуванні двигунів і пояснюється найбільш вірогідним тривалим завантаженням ДПС в умовах експлуатації. Коефіцієнти відносних втрат у ДПС послідовного збудження істотно різної потужності відрізняються незначно. Тому в розрахунках, якщо параметри обраного ДПС не зазначені, можна використовувати усереднені значення $a_1 \dots a_6$: $a_{1(\text{МХ})} = 0,05 \dots 0,06$; $a_{2(\text{МГ})} = 0,1 \dots 0,3$; $a_{3(\text{Д})} = 0,05 \dots 0,1$; $a_{4(\text{Е.А.})} = 0,45 \dots 0,5$; $a_{5(\text{Е.П.36.})} = 0,17 \dots 0,19$; $a_{6(\text{Щ})} = 0,03 \dots 0,05$.

Рівняння (4.29) і (4.30) дозволяють оцінити як змінюється співвідношення постійних і змінних втрат $\Delta P_{c^*} / \Delta P_{v^*}$ тягового електродвигуна при зміні основних параметрів регулювання U_* і Φ_* , та визначити режим керування тяговим електродвигуном по максимуму ККД.

У відповідності з (4.27) сумарні втрати при максимальному ККД в двигуні дорівнюють:

$$\Delta P_{\Sigma \text{ОПТ}^*} = \Delta P_{c^*} + \beta_m^2 \Delta P_{v^*}. \quad (4.31)$$

Напряга $U_{\text{ОПТ}^*}$, при якій втрати будуть мінімальними, а ККД максимальним визначається з умови:

$$\frac{d\Delta P_{\Sigma \text{ОПТ}^*}}{dU_*} = 0. \quad (4.32)$$

або

$$\frac{d\Delta P_{c^*}}{dU_*} = \frac{-\beta_T^2 \Delta P_{v^*}}{dU_*}. \quad (4.33)$$

З (4.30), узявши похідні по виразам у чисельнику та знаменнику з урахуванням, що $\Phi_* \cong U_* / \omega_*$, отримаємо:

$$\frac{d\Delta P_{c^*}}{dU_*} = 2a_2 U_* \sqrt{\omega_*}; \quad (4.34)$$

$$\frac{d\beta_m^2 \Delta P_{v^*}}{dU_*} = \beta_m^2 \left(-\frac{2a_4}{U_*^3} - \frac{2a_5 \beta_{оп}^2}{U_*^3} - \frac{2a_6}{U_*^3} \right). \quad (4.35)$$

При сумісному рішенні (4.32), (4.33) и (4.34), отримаємо:

$$U_{опт^*} = \beta_m \sqrt{\frac{a_4 + a_5 \beta_{оп}^2 + a_6}{a_2 \sqrt{\omega_*}}}, \quad (4.36)$$

де $U_{опт^*}$ – оптимальне значення напруги, що забезпечує керування ДПС при максимальному ККД.

Магнітний потік $\Phi_{опт^*}$ і струм збудження $I_{опт^*}$ при регулюванні напруги по (4.36) приймаємо рівними:

$$\Phi_{опт^*} \cong U_{опт^*} / \omega_*; \quad I_{опт^*} \cong U_{опт^*} / (K_\mu \cdot \omega_*), \quad (4.37)$$

Характеристика регулювання напруги $U_{опт^*}$ (4.36), потоку $\Phi_{опт^*}$ и струму $I_{зб.опт^*}$ сумісно з вірно обраними умовами регулювання забезпечують режим керування тяговим ДПС у відповідності з завданням коефіцієнтом завантаження і максимальним ККД двигуна.

Розглянемо формування режиму керування двигуном постійного струму послідовного збудження по максимуму ККД на основних ділянках механічної характеристики $M_*(\omega_*)$ та характеристик регулювання $U_*(I_*)$, наведених в [4, с. 147]. В інтервалі кутових швидкостей $0 \leq \omega_* \leq \omega_{ін}^*$ на ділянці АВ в режимі пуску ДПС приймаємо наступні умови пуку: $M_* = M_{п*} = 2...3$; $I_* = I_{п*} = 2...3$; $\beta_{оп} = 1$. Характеристика регулювання прийме вид:

$$U_{min^*} = a\Phi_{п*}\omega_{min^*} + bI_{п*}; \quad (4.38)$$

$$\Phi_{п*} = \Phi_{п*}(I_{п*}).$$

У (4.38) $a = E_H / U_H = 0,95$; $b = I_H R'_a / U_H = 0,05$ в інтервалі швидкостей $\omega_{min^*} \leq \omega_* \leq 1$ на ділянці DC характеристики $M_*(\omega_*)$ і $U_*(I_*)$. Умови регулювання: $P_{п*} = 1$; $I_* = I_*(\omega_*)$; $\beta_{оп} = 1$; $\beta_m = const$.

Характеристика регулювання має вигляд:

$$U_{опт^*}^2 = \beta_m \sqrt{\frac{a_4 + a_5 \beta_{опт^*}^2 + a_6}{a_2 \sqrt{\omega_*}}}; \quad (4.39)$$

$$\Phi_{опт^*} = U_{опт^*} / \omega_*; \quad I_{в.опт^*} = U_{опт^*} / (K_\mu \cdot \omega_*).$$

В інтервалі скоростей $1 \leq \omega_* \leq \omega_{п*}$ на ділянці СС' $\omega_{п*}$ – гранична швидкість, до значення якої забезпечується раціональне економічне регулювання і припустимі потенційно-комутаційні умови при $U_* > 1$. При кратності швидкості $K_\omega \geq 3$ значення $\omega_{п*}$ приймається рівним $\omega_{п*} = 2$, а умови регулювання: $P_{п*} = 1$; $I_* = I_*(\omega_*)$; $\beta_{оп} = 1$; $\beta_m = const$.

Характеристика регулювання:

$$U_{опт^*}^2 = \beta_m \sqrt{\frac{a_4 + a_5 \beta_{опт^*}^2 + a_6}{a_2 \sqrt{\omega_*}}}; \quad (4.40)$$

$$\Phi_{опт^*} = U_{опт^*} / \omega_*; \quad I_{зб.опт^*} = U_{опт^*} / (K_\mu \cdot \omega_*).$$

В інтервалі швидкостей $\omega_{п*} \leq \omega_* \leq \omega_{max^*}$ на ділянці С'Д характеристики $M_*(\omega_*)$ умови регулювання: $P_{п*} = 1$; $\beta_{оп} \geq 0,4$; $\beta_m = const$. Характеристик регулювання:

$$\Phi_* = \frac{U_{\max}^2 - B}{a - \omega_{\max} U_{\max}}; \quad (4.41)$$

$$U_* = U_{\max}$$

Режими керування, умови та характеристик керування для різних швидкісних режимів роботи ДПС послідовного збудження з умовою отримання максимального ККД наведені в табл. 4.15.

Таблиця 4.15

Енергоощадні режими керування тяговим електродвигуном мотоблоку

Інтервали кутових швидкостей	Умови регулювання	Характеристики регулювання	Режими керування
$0 \leq \omega_* \leq \omega_{\min}^*$	$M_{\Pi^*} = 2 \dots 3$ $I_{\Pi^*} = 2 \dots 3$ $\beta_{\text{оп}} = 1$	$U_{\min}^* = 0,95 \Phi_{\Pi^*} \omega_{\min}^* - 0,05 I_{\Pi^*}$ $\Phi_{\Pi^*} = \Phi_*(I_{\Pi^*})$	1
$\omega_{\min}^* \leq \omega_* \leq 1$	$P_{1^*} = 1$ $I_* = I_*(\omega_*)$ $\beta_{\text{оп}} = 1$ $\beta_m = \text{const}$	$U_{\text{опт}^*}^2 = \beta_m \sqrt{\frac{a_4 + a_5 \beta_{\text{опт}^*}^2 + a_6}{a_2 \sqrt{\omega_*}}}$ $\Phi_{\text{опт}^*} = U_{\text{опт}^*} / \omega_*$ $I_{36, \text{опт}^*} = U_{\text{опт}^*} / (K_\mu \cdot \omega_*)$	2
$1 \leq \omega_* \leq \omega_{1^*}$	$P_{1^*} = 1$ $I_* = I_*(\omega_*)$ $\beta_{\text{оп}} = 1$ $\beta_m = \text{const}$	$U_{\text{опт}^*}^2 = \beta_m \sqrt{\frac{a_4 + a_5 \beta_{\text{опт}^*}^2 + a_6}{a_2 \sqrt{\omega_*}}}$ $\Phi_{\text{опт}^*} = U_{\text{опт}^*} / \omega_*$ $I_{36, \text{опт}^*} = U_{\text{опт}^*} / (K_\mu \cdot \omega_*)$	3
$\omega_{1^*} \leq \omega_* \leq \omega_{\max}^*$	$P_{1^*} = 1$ $\beta_{\text{оп}} \geq 4$ $\beta_m = \text{const}$	$\Phi_* = \frac{U_{\max}^2 - B}{a - \omega_{\max} U_{\max}}$ $U_* = U_{\max}$	4

Джерело: узагальнено автором

Аналогічно з урахуванням специфіки систем збудження можуть бути сформовані режими керування по максимуму ККД ДПС незалежного та змішаного збудження.

Для полегшення розрахунків $U_{\text{опт}^*}$ і $\Phi_{\text{опт}^*}$ необхідно встановити зв'язок між коефіцієнтом насичення K_μ та відносною кутовою швидкістю ω_* , що досягається побудовою залежностей $U_{\text{опт}^*}(\omega_*)$ і $\Phi_{\text{опт}^*}(K_\mu)$ на основі сумісного розгляду залежностей $K_\mu(I_{36}^*)$ і $I_{36}^*(\omega_*)$, побудованих на основі характеристик намагнічування і співвідношень (4.40) для відповідних значень K_μ

Для часткових тягових механічних характеристик $P_{1^*} < 1$ при реалізації режиму керування ТЕД по максимуму ККД зміна напруги і коефіцієнту ослаблення магнітного поля визначаються за рівняннями:

$$U_{\text{опт.ч}^*} = U_{\text{опт}^*} \cdot \sqrt{P_{1^*}}; \quad (4.42)$$

$$\beta_{\text{оп.опт.ч}^*} = \beta_{\text{опт.ч}^*} \cdot P_{1^*}$$

Оптимальні характеристики регулювання (4.35) і (4.37) забезпечують керування ДПС за максимумом ККД і заданою величиною β_m . Важливим при цьому є наступна обставина. Згідно графіку ККД ДПС, значення максимального ККД не відрізняється критичністю, тобто при порівняно великій зоні зміни коефіцієнту завантаження β , ККД двигуна близький до значення η_{\max} при $\beta_m = 0,7 \dots 0,9$. Це істотно спрощує практичну реалізацію режимів керування ДПС з застосуванням простих за конструкцією вентильних перетворювачів у вигляді тиристорних регуляторів напруги.

Для з'ясування ефективності використання мотоблоків проведемо техніко-енергетичну оцінку технічного рівня найбільш поширених в Україні мотоблоків з двигунами внутрішнього згорання і тяговим електродвигуном (табл. 4.16).

Запропонована методика порівняльної техніко-енергетичної оцінки мотоблоків як промислового виробництва, так і розроблених і виготовлених власними силами в умовах господарства, заснована на визначенні інтегрального коефіцієнта ефективності обладнання з використанням ряду оціночних показників отриманих з паспортних даних обладнання [2, с. 94].

Технічні характеристики мотоблоків

Показник	М-3	Супер-610	МБ-1 (Луч)	МТЗ-0,5	Хонда F-600	Кубота Т720Е	Исеки KE280	Січ-Д	МБ-КЭП
Номінальна потужність двигуна, кВт	2,3	4,4	3,7	3,68	5,0	5,0	3,0	4,4	0,85
Питомі витрати палива, гр./кВт-год.)	394	448	365	448	490	460	400	495	–
Продуктивність, га/год.	0,15	0,22	0,2	0,26	0,25	0,23	0,13	0,18	0,23
Швидкість пересування, км/год.	3,3...11,1	1,42...6	2,5...10	2,15...9,5	2,5...15,0	2,9...14	2,5...5,6	5...10	1...7
Кількість передач вперед (назад)	2(0)	3(1)	2(2)	4(2)	6(2)	4(2)	2(1)	2(1)	5(2)
Габаритні розміри, мм									
довжина	1000	1650	1500	1800	1400	1754	1500	1860	1250
ширина	600	510	600	850	620	605	550	700	550
висота	1000	1420	1500	1070	880	1190	1100	500	940
Маса, кг	65	90	94	135	100	94	48	140	70

Джерело: узагальнено автором

Для техніко-енергетичної оцінки мотоблоків приймаємо наступні показники.

Питома продуктивність:

$$Q_{\text{Пит.}} = \frac{Q_{\text{б.}}}{P}, \quad (4.43)$$

де $Q_{\text{б.}}$ – базова паспортна продуктивність, га/год.;

P – встановлена потужність, кВт.

Питома металоемність:

$$M_{\text{Пит.}} = \frac{G}{Q_{\text{год.}}}, \quad (4.44)$$

де G – маса обладнання, ц;

$Q_{\text{год.}}$ – продуктивність обладнання, Га/год.

Питомі габаритні розміри:

$$\Gamma_{\text{Пит.}} = \frac{S}{Q_{\text{год.}}}, \quad (4.45)$$

де S – площа, яку займає обладнання, м²;

$Q_{\text{ч}}$ – продуктивність обладнання, Га/год.

Коефіцієнт, що враховує діапазон швидкостей мотоблоків:

$$D = \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}}, \quad (4.46)$$

де V_{max} – максимальна швидкість мотоблока, м/с;

V_{min} – мінімальна швидкість мотоблока, м/с.

Також для порівняльної техніко-енергетичної оцінки мотоблоків використовуємо такі показники, як відносну витрату палива ($Q_{\text{пал.}}$, кг/кВт-год.), продуктивність (Q , га/год.), кількість передач $K_{\text{пер}}$, які визначаються з технічних характеристик мотоблоків.

В якості критерію техніко-енергетичного рівня технологічного обладнання можливе використовувати інтегральний коефіцієнт, який визначається за формулою:

$$K_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \left(2 \pm \frac{(\Pi_i - n) - \Pi_{\text{Мін.}}}{\Pi_i} \right), \quad (4.47)$$

де Π_i – значення i -го показника ряду, що розглядається;

$\Pi_{\text{Мін.}}$ – значення мінімального з m показників;

n – величина, що характеризує найбільше відхилення показників ряду, визначається за рівнянням:

$$n = \frac{\Pi_{\text{Макс.}} - \Pi_{\text{Мін.}}}{m}, \quad (4.48)$$

де $\Pi_{\text{Макс.}}$ – значення максимального показника ряду;

m – загальна кількість показників, що використані для оцінки. В даній роботі приймається $m = 7$.

У виразі (4.47) перед дробом знак плюс відповідає показнику, що характеризує позитивний напрямок ряду (наприклад, для питомої продуктивності) і мінус – негативного (наприклад для питомої металосємності). Обладнання, що має більший інтегральний коефіцієнт є найбільш ефективним, сучасним і перспективним.

Розрахункові значення показників і інтегрального коефіцієнта порівнюваних мотоблоків визначаються аналогічно. Результати розрахунків техніко-енергетичних показників мотоблоків наведені в табл. 4.17.

Таблиця 4.17

Техніко-енергетичні показники мотоблоків

Тип мотоблоку	Показник							
	Q, га/ч.	Q _{Пит.} , га/кВт-год.	Q _{Палив.} , кг/кВт-год.	Д, в.о.	K _{пер.}	Г _{Пит.} , м ² /га	M _{Пит.} , ц/кВт	K _Σ
М-3	0,15	0,06	0,394	3,36	2	4,0	0,28	4,03
Супер-610	0,22	0,05	0,448	4,22	4	3,85	0,20	3,77
МБ-1 (Луч)	0,20	0,054	0,365	4,0	4	4,5	0,25	4,01
МТЗ-0,5	0,26	0,07	0,448	4,42	6	5,88	0,37	2,75
Хонда F-600	0,25	0,05	0,490	6,0	8	3,47	0,20	3,5
Кубота T720E	0,23	0,046	0,460	4,8	6	4,61	0,15	0,6
Исеки Ke280	0,13	0,043	0,405	2,24	3	6,34	0,16	5,0
Січъ-Д	0,18	0,04	0,495	2,0	3	3,0	0,31	3,1
МБ-КЭП	0,25	0,27	–	7,0	7	2,98	0,87	6,9

Джерело: розрахунки автора

Отже, вибір раціональних режимів керування тяговими електродвигунами приводу мотоблоку слід проводити на основі критеріїв раціонально керування, що дозволяють забезпечити простими та надійними засобами реалізацію заданої тягової характеристик з високими техніко-енергетичними показниками. В роботі запропоновано алгоритм реалізації режимів керування тягового двигуна приводу мотоблоку по максимуму ККД в заданому інтервалі швидкостей з використання керованих вентильних перетворювачів, що мають достатню просту конструкцію та високу надійність.

Згідно отриманих розрахункових даних, що наведені в таблиці 3, найбільше значення сумарного інтегрального коефіцієнту має електрифікований ґрунтообробний мотоблок ($K_{\Sigma} = 6,9$), що свідчить про його достатню високу енергоефективність при виконанні основних агротехнічних операцій при обробці ґрунту.

4.6. Ефективність використання індукційного нагріву в області металообробки

© **Вегера І. І.**

*к.т.н., доцент, завідувач лабораторією технологій і обладнання індукційного нагріву,
Фізико-технічний інститут НАН Білорусі, м. Мінськ, Республіка Білорусь*

© **Скавиш І. А.**

*інженер-конструктор 2 кат.,
Фізико-технічний інститут НАН Білорусі, м. Мінськ, Республіка Білорусь*

© **Цикунов П. Ю.**

м.н.с., Фізико-технічний інститут НАН Білорусі, м. Мінськ, Республіка Білорусь

У даний час використання токів високої частоти (ТВЧ) в якості джерела тепла набуло широкого поширення в більшості областей металургійної галузі. Один з варіантів нагріву ТВЧ – індукційний нагрів – застосовується як на етапі отримання виливків (ливарне виробництво), так і в процесі формування готових виробів. Використання індукційних нагрівальних і плавильних установок дозволяє отримати продукцію високої якості при менших економічних і трудових витратах в порівнянні з застарілими аналогами виробництв [1; 4; 5]. Оцінку ефективності застосування індукційного нагріву роблять виходячи з його переваг, таких як: високий рівень технологічного інтегрування в існуючі виробничі лінії (модернізація), зменшення часу нагріву і плавки з високим виходом якісного продукту (зменшення кількості окалини і висока продуктивність) навіть з урахуванням вартості електрообладнання, можливість точного математичного моделювання технології на етапі конструювання виробничого циклу.

У ливарному виробництві можна виділити таку сферу застосування нагріву ТВЧ, як індукційні печі. Ще з часів СРСР на різних підприємствах досі експлуатуються подібні установки, як джерело