

УДК 631.371

## ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ МОТОБЛОКУ

Ковальов О.В., інженер.

*Таврійський державний агротехнологічний університет*

Тел. (0619)42-31-59

**Анотація** – обґрунтовані та сформульовані режими оптимального керування тяговим двигуном постійного струму мотоблоку з забезпеченням високих техніко-енергетичних показників.

**Ключові слова** – тяговий електропривод, електротрансмісія, режим керування, мотоблок, інтервал швидкостей, вентильний перетворювач, крива намагнічення.

*Постановка проблеми.* Тягові електродвигуни постійного струму знайшли в наш час досить широке застосування в приводі електрифікованих транспортних засобів – електромобілів, електрокар, мотоблоків та ін. Тому представляється досить важливим питання формування таких режимів управління тяговими двигунами постійного струму, які б забезпечували оптимальне регулювання на кожному інтервалі кутових швидкостей характеристики  $M_*(\omega_*)$  по мінімуму втрат двигуна за допомогою порівняно простих по конструкції і управлінню вентильних перетворювачів (ВП) при централізованому електропостачанні мотоблоку.

*Аналіз останніх досліджень.* Проблемі оптимізації регулювання електричних машин, і зокрема ДПС, постійно приділяється увага. Окрім закону оптимального регулювання, обґрунтованого в [1] і використаного в даній статті, для оцінки раціонального регулювання тягового мотоблоку ДПС, питанням енергозбереження в електроприводі присвячена робота Н.Ф. Льїнського [2] і, нарешті, в [3] детально розглянуті питання управління тяговими ДПС по мінімуму втрат в приводі електротрансмісій великовантажних автомобілів. Проте отримані при цьому закони регулювання тягового електроприводу (ТЕП) по мінімуму втрат є складними функціональними залежностями, практична

реалізація яких, можлива тільки на основі замкнених систем автоматичного керування тяговим електроприводом і не можуть бути використані для керування тяговими двигунами потужністю  $1...3 \text{ кВт}$  привода мотоблоків.

*Формулювання цілей статті.* Метою статті є обґрунтування та вибір оптимального режиму керування тяговим двигуном постійного струму мотоблоку з високими техніко-економічними показниками, при використанні порівняно простої програми та пристрою управління тяговим ДПС в приводі мотоблоку.

*Основна частина.* Сумарні втрати в двигуні постійного струму  $\Delta P_c$  і  $\Delta P_v$  можна представити в наступному вигляді:

$$\Delta P_c = \Delta P_{MX.H} \cdot \omega_*^n + \Delta P_{MG.H} \cdot \omega_*^\beta \cdot \Phi^2 + \Delta P_{Д.Н}; \quad (1)$$

$$\Delta P_v = \Delta P_{a.H} \cdot I_*^2 + \Delta P_{B.H} \cdot I_{B*}^2 + \Delta P_{Щ.Н} \cdot I_*^2. \quad (2)$$

де  $\Delta P_{MX.H}$ ;  $\Delta P_{MG.H}$ ;  $\Delta P_{Д.Н}$ ;  $\Delta P_{a.H}$ ;  $\Delta P_{B.H}$ ;  $\Delta P_{Щ.Н}$  – потужності окремих видів втрат при номінальному навантаженні.

Для оцінки сумарних втрат  $\Delta P_c$  і  $\Delta P_v$ , а також окремих втрат в двигуні, доцільно їх представити у вигляді відношення до сумарних номінальних втрат  $\Delta P_{\Sigma H}$ :

$$\begin{aligned} \Delta P_{c*} &= \Delta P_{cH*} / \Delta P_{\Sigma H*}; \quad \Delta P_{v*} = \Delta P_{vH*} / \Delta P_{\Sigma H*}; \\ a_1 &= \Delta P_{MX.H} / \Delta P_{\Sigma H}; \quad a_2 = \Delta P_{MG.H} / \Delta P_{\Sigma H}; \quad a_3 = \Delta P_{Д.Н} / \Delta P_{\Sigma H}; \\ a_4 &= \Delta P_{a.H} / \Delta P_{\Sigma H}; \quad a_5 = \Delta P_{B.H} / \Delta P_{\Sigma H}; \quad a_6 = \Delta P_{Щ.Н*} / \Delta P_{\Sigma H}. \end{aligned} \quad (3)$$

При цьому

$$\Delta P_{\Sigma H} = P_H \frac{1 - \eta_H}{\eta_H} \quad (4)$$

визначається за паспортними даними.

Рівняння втрат  $\Delta P_c$  (1) і  $\Delta P_v$  (2) з урахуванням (3) приймуть вигляд

$$\Delta P_{c*} = a_1 \cdot \omega_*^n + a_2 \cdot \omega_*^\beta \cdot \Phi^2 + a_3; \quad (5)$$

$$\Delta P_{v*} = a_4 \cdot I_*^2 + a_5 \cdot I_{B*}^2 + a_6 \cdot I_*^2. \quad (6)$$

Оскільки  $I_* = M_* / \Phi_*$ ;  $I_* = 1 / U_*$ , то змінні втрати в ДПС можна представити у функції потоку і напруги:

$$\Delta P_{v*} = a_4 \cdot M_*^2 / \Phi_*^2 + a_5 \cdot \beta_{оп}^2 M_*^2 / \Phi_*^2 + a_6 M_*^2 / \Phi_*^2; \quad (7)$$

$$\Delta P_{v*} = a_4 \cdot 1 / U_*^2 + a_5 \cdot 1 / U_*^2 + a_6 \cdot 1 / U_*^2. \quad (8)$$

При роботі електроприводу задаються координати механічного руху  $M$  і  $\omega$ , тому варіюваними змінними, що дозволяють змінити втрати, є напруга  $U_*$  і магнітний потік  $\Phi_*$  створюваний струмом  $I_{B*}$  в обмотці збудження двигуна.

Зв'язок між магнітним потоком  $\Phi_*$  і струмом  $I_{B*}$  визначається кривою намагнічення магнітного ланцюга двигуна  $\Phi_* = f(F_{B*})$  приведеною на рис. 1. Якщо ДПС працює на лінійній ділянці кривої намагнічення, то  $I_{B*} = \hat{O}_*$  і потік, при якому втрати мінімальні, визначаються з умови

$$d\Delta P_{\Sigma*} / d\Phi_* = 0 \text{ або } d\Delta P_{c*} / d\Phi_* = d\Delta P_{v*} / d\Phi_*. \quad (9)$$

$\Phi / \Phi_H, \text{ в.о.}$

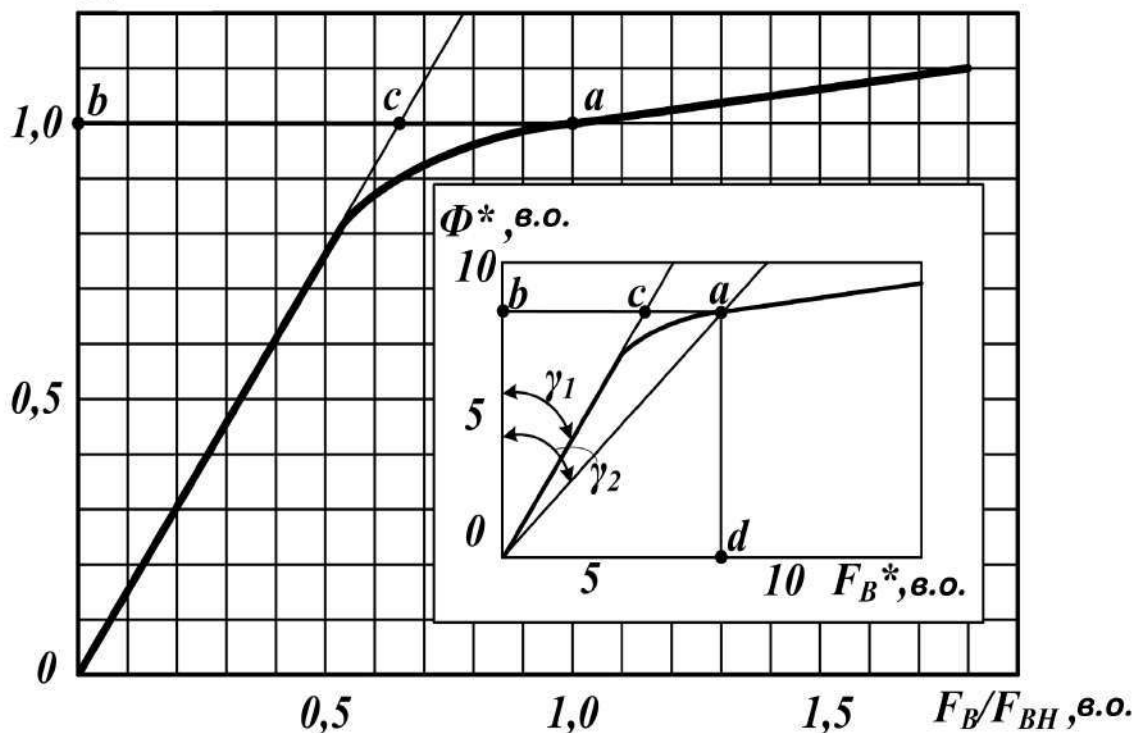


Рис. 1. Універсальна магнітна характеристика ДПС.

Зазначимо, що в загальному випадку згідно рис. 1, магнітний потік  $\Phi_*$  є нелінійною функцією струму збудження

$$I_{A*}^2 = \Phi_* / K_\mu, \quad (10)$$

де  $K_\mu$  – коефіцієнт насичення магнітного ланцюга ДПС, визначений як тангенс кута нахилу прямої, що проходить через початок координат і точки на кривій намагнічення, відповідній даному режиму роботи ДПС.

Згідно кривій намагнічення в точці  $a$  коефіцієнт  $K_\mu$  визначається як відношення відрізків, або МДС

$$K_\mu = \frac{\overline{av}}{\overline{вс}} = \frac{F_{ax}}{F_{c*}}. \quad (11)$$

Відповідно до (9) визначимо мінімальні сумарні втрати в ДПС при допущенні, що магнітний потік  $\Phi_*$  лінійно залежить від струму збудження. Похідні по потоку від сумарних постійних втрат  $\Delta P_{c*}$  (5) і змінних  $\Delta P_{v*}$  (7) втрат будуть рівні:

$$d\Delta P_{c*} / d\Phi_* = -2a_2\Phi_*\omega^3; \quad (12)$$

$$d\Delta P_{v*} / d\Phi_* = 2a_4M_*^2 / \Phi_*^3 + 2a_5\beta_{оп}^2 M_*^2 / \Phi_*^3 + 2a_6M_*^2 / \Phi_*^3. \quad (13)$$

При сумісному вирішенні рівнянь (9), (12) і (13) отримуємо значення потоку, при якому втрати в двигуні мінімальні для заданих значень  $M_*$  і  $\omega_*$

$$\Phi_{опт*}^2 = M_* \sqrt{\frac{a_4 + a_5\beta_{оп}^2 + a_6}{a_2\omega_*^\beta}}. \quad (14)$$

Повні втрати в двигуні для оптимального потоку отримуємо з (7) і (8) при виконанні умови (14)

$$\Delta P_{\Sigma min*} = 2M_* \sqrt{(a_4 + a_6)(a_5 + a_2\omega_*^\beta)} + a_1\omega_*^n. \quad (15)$$

У реальних умовах експлуатації тягових ДПС магнітний потік  $\Phi_*$  є нелінійною функцією струму збудження  $I_{B*}$  (10), тому представляє практичний інтерес визначення характеристик регулювання і умов регулювання, тобто режиму управління, що забезпечує мінімальні сума-

рні втрати в ДПС при реалізації закону регулювання  $M_*(\omega_*)$  на всіх зазначених інтервалах кутових швидкостей. Очевидно, що найбільш ефективним з енергетичної і практичної точки зору є режим управління ТЕД, що забезпечує найменші втрати або максимальний ККД при порівняно простій програмі і пристрою управління тяговим ДПС в приводі мотоблоку.

Отримання рівнянь постійних втрат  $\Delta P_{c*}$  (5) і змінних втрат  $\Delta P_{v*}$  (8) у вигляді функціональних залежностей від основних параметрів регулювання ДПС  $U_*$  і  $\Phi_*$  дозволяють обґрунтувати режим управління ТЕД мотоблоку, що легко реалізовується на практиці, при максимумі ККД.

Умовою отримання максимального КПД ДПС є рівність постійних і змінних втрат

$$\Delta P_{c*} = \beta_m^2 \Delta P_{v*}, \quad (16)$$

де  $\beta_m = \frac{P_2}{P_{2H}}$  – коефіцієнт навантаження ДПС, при якому КПД ДПС максимальний.

З (16) витікає, що

$$\beta_m^2 = \Delta P_{c*} / \Delta P_{v*}. \quad (17)$$

З урахуванням (5) і (6), вважаючи показники ступеня кутової швидкості  $\omega_*$   $n = 1,5$  і  $\beta = 1,5$  отримаємо

$$\beta_m^2 = \frac{a_1 \omega_*^{1,5} + a_2 \Phi_*^2 \omega_*^{1,5} + a_3}{a_4 \cdot I_*^2 + a_5 \cdot I_{B*}^2 + a_6 \cdot I_*^2}, \quad (18)$$

або, оскільки  $I_* = I / U_*$  отримаємо

$$\beta_m^2 = \frac{a_1 \omega_*^{1,5} + a_2 \Phi_*^2 \omega_*^{1,5} + a_3}{a_4 \cdot I / U_*^2 + a_5 \cdot I / U_*^2 \beta_{оп}^2 + a_6 \cdot I / U_*^2}, \quad (19)$$

де коефіцієнти  $a_1 \dots a_6$  – відношення окремих видів втрат до сумарних втрат ДПС при номінальному навантаженні (3).

Як зазначалось, у сучасних ДПС значення  $\beta_m$  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.

Як показано в [1], коефіцієнти відносних втрат в ДПС послідовного збудження істотно різної потужності відрізняються незначно. Тому в порівняльних розрахунках, якщо параметри обраних ДПС не встановлені, можна використовувати усереднені значення  $a_1 \dots a_6$ :

$$a_{1(MV)} = 0,05 \dots 0,06; \quad a_{2(MT)} = 0,1 \dots 0,3; \quad a_{3(D)} = 0,005 \dots 0,1;$$

$$a_{4(EA)} = 0,45 \dots 0,5; \quad a_{5(EPB)} = 0,17 \dots 0,19; \quad a_{6(Щ)} = 0,03 \dots 0,05.$$

Рівняння (18) і (19) дозволяють оцінити, як змінюється відношення постійних і змінних втрат  $\Delta P_{c^*} / \Delta P_{v^*}$  тягового ДПС при зміні основних параметрів регулювання  $U_*$ ,  $\Phi_*$  і визначити режим керування ТЕД по мінімуму втрат.

Відповідно до (16) сумарні втрати в двигуні при максимальному ККД рівні

$$\Delta P_{\Sigma OPT^*} = \Delta P_{c^*} + \beta_m^2 \Delta P_{v^*}. \quad (20)$$

Напруга  $U_{OPT^*}$  при якій втрати будуть мінімальними, а ККД максимальним, визначається з умови

$$\frac{d\Delta P_{\Sigma OPT^*}}{dU_*} = 0. \quad (21)$$

або

$$\frac{d\Delta P_{c^*}}{dU_*} = \frac{-\beta_m^2 \Delta P_{v^*}}{dU_*}. \quad (22)$$

З (19), узявши похідні по виразах в чисельнику і знаменнику, з урахуванням того, що  $\Phi_* \cong U_* / \omega_*$ , отримаємо:

$$\frac{d\Delta P_{c^*}}{dU_*} = 2a_2 U_* \sqrt{\omega_*}; \quad (23)$$

$$\frac{d\beta_m^2 \Delta P_{v^*}}{dU_*} = \beta_m^2 \left( -\frac{2a_4}{U_*^3} - \frac{2a_5 \beta_{OP}^2}{U_*^3} - \frac{2a_6}{U_*^3} \right); \quad (24)$$

При сумісному рішенні (22), (23) і (24), отримаємо

$$2a_2 U_* \sqrt{\omega_*} = 2\beta_m^2 \cdot 1 / U_*^3 (a_4 + a_5 \beta_{OP}^2 + a_6)$$

або

$$a_2 U_*^4 \sqrt{\omega_*} = \beta_m^2 (a_4 + a_5 \beta_{оп}^2 + a_6),$$

звідки

$$U_{опт*} = \beta_m \sqrt{\frac{a_4 + a_5 \beta_{оп}^2 + a_6}{a_2 \sqrt{\omega_*}}}, \quad (25)$$

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

Магнітний потік  $\Phi_{опт*}$  і струм збудження  $I_{опт*}$  при регулюванні напруги по (25) приймаються рівними:

$$\Phi_{опт*} \cong U_{опт*} / \omega_*; \quad I_{опт*} \cong U_{опт*} / (K_\mu \cdot \omega_*), \quad (26)$$

Характеристика регулювання  $U_{опт*}$  (25) потоку  $\Phi_{опт*}$  і струму  $I_{в.опт*}$  (26) спільно з правильно вибраними умовами регулювання, забезпечують режим управління тягового ДПС відповідно до заданого коефіцієнта навантаження  $\beta_m$  і максимальним ККД двигуна.

Розглянемо формування режиму управління ДПС послідовного збудження по максимуму ККД на основних ділянках граничної механічної характеристики  $M_*(\omega_*)$  і характеристик регулювання  $U_*(I_*)$  представлених в [1]. В інтервалі кутових швидкостей  $0 \leq \omega_* \leq \omega_{min*}$  на ділянці АВ в режимі пуску ДПС приймаються наступні умови пуску:  $M_* = M_{п*} = 2...3$ ;  $I_* = I_{п*} = 2...3$ ;  $\beta_{оп} = 1$ . Характеристика регулювання:

$$\begin{aligned} U_{min*} &= a \Phi_{п*} \omega_{min*} + e I_{п*}; \\ \Phi_{п*} &= \Phi_{п*}(I_{п*}). \end{aligned} \quad (27)$$

Тут  $a = E_H / U_H$  0,95;  $e = I_H R_a' / U_H$  0,05. На інтервалі швидкостей  $\omega_{min*} \leq \omega_* \leq 1$  на ділянці DC характеристики  $M_*(\omega_*)$  і  $U_*(I_*)$ . Умови регулювання:  $P_{п*} = 1$ ;  $I_* = I_*(\omega_*) \cong \beta_{оп} = 1$ ;  $\beta_m = const$ .

Характеристика регулювання:

$$U_{\text{ОПТ}^*}^2 = \beta_m \sqrt{\frac{a_4 + a_5 \beta_{\text{ОПТ}^*}^2 + a_6}{a_2 \sqrt{\omega_*}}}; \quad (28)$$

$$\Phi_{\text{ОПТ}^*} = U_{\text{ОПТ}^*} / \omega_*; I_{\overline{B}, \text{ОПТ}^*} = U_{\text{ОПТ}^*} / (K_\mu \cdot \omega_*).$$

В інтервалі швидкостей  $1 \leq \omega_* \leq \omega_{r^*}$ ,  $\omega_{r^*}$  – гранична швидкість, до значення якої забезпечується раціональне економічне регулювання та допустимі потенційно-комутаційні умови при  $U_* > 1$ . При кратності швидкості  $K_\omega \geq 3$  значення  $\omega_{r^*}$  приймається рівним  $\omega_{r^*} = 2$ .

Умови регулювання:  $P_{r^*} = 1; I_* = I_*(\omega_*)$ ;  $\beta_{\text{ОП}} = 1; \beta_m = \text{const}$ .

Характеристика регулювання:

$$U_{\text{ОПТ}^*}^2 = \beta_m \sqrt{\frac{a_4 + a_5 \beta_{\text{ОПТ}^*}^2 + a_6}{a_2 \sqrt{\omega_*}}}; \quad (29)$$

$$\Phi_{\text{ОПТ}^*} = U_{\text{ОПТ}^*} / \omega_*; I_{\overline{B}, \text{ОПТ}^*} = U_{\text{ОПТ}^*} / (K_\mu \cdot \omega_*).$$

В інтервалі швидкостей  $\omega_{r^*} \leq \omega_* \leq \omega_{\text{max}^*}$  на ділянці  $C/d$  характеристики  $M_*(\omega_*)$  умови регулювання:  $P_{r^*} = 1; \beta_{\text{ОП}} \geq 0, 4; \beta_m = \text{const}$ . Характеристики регулювання:

$$\Phi_* = \frac{U_{\text{max}^*}^2 - 6}{a - \omega_{\text{max}^*} U_{\text{max}^*}}; \quad U_* = U_{\text{max}^*}. \quad (30)$$

Режими оптимального керування ДПС послідовного збудження приведені в табл. 1.

Аналогічно, з урахуванням специфіки систем збудження, можуть бути сформовані режими управління по максимуму КПД ДПС незалежного і змішаного збудження.

Для полегшення обчислень  $U_{\text{ОПТ}^*}$  та  $\Phi_{\text{ОПТ}^*}$  по (28) слід встановити зв'язок між коефіцієнтом насичення  $K_\mu$  та швидкістю  $\omega_*$ , що досягається побудовою залежностей  $U_{\text{ОПТ}^*}(\omega_*)$  і  $\Phi_{\text{ОПТ}^*}(K_\mu)$  на основі сумісного розглядання графічних залежностей  $K_\mu(I_{B^*})$  і  $I_{B^*}(\omega_*)$ , побудованих на основі характеристик намагнічення (рис. 1) та співвідношень (26) для тих же значень коефіцієнту  $K_\mu$ .

Для часткових тягових механічних характеристик  $P_{r^*} < 1$  при реалізації режиму управління по максимуму ККД зміна напруги і коефіцієнта ослаблення поля визначається за рівняннями:



$$U_{\text{ОПТ.Ч}^*} = U_{\text{ОПТ}^*} \cdot \sqrt{P_{I^*}}; \beta_{\text{ОП.ОПТ.Ч}^*} = \beta_{\text{ОПТ.Ч}^*} \cdot P_{I^*}. \quad (31)$$

Оптимальні характеристики регулювання (25) і (26) забезпечують управління ДПС по максимуму ККД і заданій величині  $\beta_m$ . Згідно графіка ККД ДПС, значення максимального ККД  $\eta_{\text{max}}$  не відрізняється критичністю, тобто при порівняно великій зоні зміни коефіцієнта навантаження  $\beta$  ККД двигуна близькі за значенням  $\eta_{\text{max}}$  при  $\beta_m = 0,7 \dots 0,9$ . Це істотно спрощує практичну реалізацію режимів керування ДПС по максимуму ККД з використанням порівняльних простих за конструкцією вентильних перетворювачів у вигляді керованих тиристорних регуляторів напруги.

Таблиця 1 – Режими оптимального керування ДПС мотоблоку

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

**Висновок.** Вибір раціональних режимів управління тяговим ДПС мотоблоків слід проводити на основі трьох критеріїв раціонального керування, що дозволяють забезпечити простими і надійними засобами реалізацію заданої тягової характеристики  $M_*(\omega_*)$  з високими техніко-енергетичними показниками.

### Література

1. Ковальов О.В. Тягові характеристики та керування мотоблоком з електроприводом по максимуму ККД / О.В. Ковальов // Вісник Національного технічного Університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – №30. – С. 509-510.
2. Ильинский Н.Ф. Электроприводы постоянного тока с управляемым моментом / Н.Ф. Ильинский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 144 с.
3. Пролыгин А.П. Регулирование двигателей постоянного тока в электроприводе колесных машин / А.П. Пролыгин, А.Д. Машихин, А.Б. Миндлин // Электротехническая промышленность. Тяговое и подъемно-транспортное электрооборудование. – 1975, Вып. 2 (35). – С. 9-11.

## **ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА МОТОБЛОКА**

Ковалев А.В.

### *Аннотация*

**Обоснованы и сформулированы режимы оптимального управления тяговым двигателем постоянного тока мотоблока с обеспечением высоких технико-энергетических показателей.**

## **GROUND OF THE OPTIMUM MODE OF HAULING ENGINE MANAGEMENT OF DIRECT-CURRENT OF MOTOBLOCK**

A. Kovalyov

### *Summary*

**The modes of optimum hauling engine management of direct-current of motoblock are grounded and formulated with providing of high technique-energy indexes.**