

ЕЛЕКТРОПРИВІД З ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ ЯК ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЕНЕРГІЇ

© Щур І.З., 2002

Вперше описано і досліджено електропривід з двигуном постійного струму послідовного збудження як термодинамічний перетворювач енергії, що дало можливість отримати низку універсальних аналітичних і графічних залежностей між основними параметрами і показниками електропривода у відносних одиницях.

It is for the first time that the electric drivers with direct current series motor as thermodynamic energy converters were described and researched mathematically as a result of which there appeared an opportunity to obtain a series of universal analytical and graphic dependencies between major parameters and indicators of the electric driver in relative units.

Електропривід з двигуном постійного струму (ДПС) послідовного збудження завдяки своїм відомим перевагам широко використовується в різних технічних об'єктах. Проте детальний аналіз зв'язку режимів роботи ДПС послідовного збудження з показниками привода, зокрема енергетичними, є ускладнений через нелінійність електромеханічних характеристик привода та наявність різних схем включень двигуна. Для значного полегшення цього аналізу і розробки універсальних методів розрахунку параметрів електропривода з ДПС послідовного збудження доцільно розглянути останній як електромеханічний перетворювач та застосувати до нього метод термодинамічного аналізу перетворювачів енергії [1,2].

У межах термодинаміки нерівноважних процесів будь-який перетворювач вільної енергії можна представити “чорною скринькою” (рис. 1), яка перетворює вільну енергію на вході у вихідну вільну енергію. Для входної і вихідної енергій, враховуючи дисипативні функції (функції виробництва ентропії), можна відповідним чином підібрати термодинамічні сили X_1 і X_2 та потоки J_1 і J_2 , які завдяки спряженості входу і виходу будуть зв'язані між собою такими лінійними рівняннями:

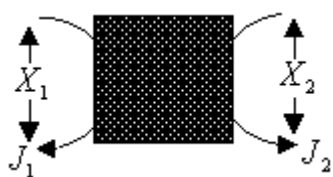


Рис. 1. Загальна схема перетворювача енергії

$$\begin{cases} J_1 = L_{11}X_1 + L_{12}X_2 \\ J_2 = L_{21}X_1 + L_{22}X_2 \end{cases},$$

де $L_{jk} = \left(\frac{\partial J_j}{\partial X_k} \right)_{X_j = \text{const}}$ – “феноменологічні” коефіцієнти.

Л. Онзагер відкрив загальний принцип, який називають “співвідношеннями взаємності Онзагера”. Він стверджує, що $L_{jk} = L_{kj}$, тобто що в околі стану рівноваги лінійна залежність будь-якого потоку J_j від будь-якої сили X_k збігається з аналогічною залежністю потоку

J_k від сили X_j . Справедливість співвідношень взаємності Онзагера не обмежується квазірівноважними системами, проте їх сила тим вища, чим система ближча до рівноваги. За визначенням X_1 , X_2 та J_1 додатні, а J_2 – від’ємний, що означає поглинання енергії на вході і утворення її на виході, тому L_{11} , L_{22} та L_{12} повинні бути додатними. Для універсального представлення результатів в теорії термодинамічної ефективності перетворювачів енергії [2] використовуються нормовані величини. Для цього вводяться такі параметри: ступінь спряження $q = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11}L_{22}}}$; феноменологічна стехіометрія $Z = \sqrt{L_{22}/L_{11}}$;

відношення сил $\chi = X_2/X_1$.

Використовуючи введені позначення, перетворювач енергії можна оцінювати за різними показниками. На рис. 2 для різних ступенів спряження показані універсальні залежності від приведенного відношення сил $Z\chi$ таких важливих для будь-якого перетворювача енергії параметрів:

– нормованого відношення вихідного потоку до вхідного

$$j = -\frac{J_2}{J_1} = -\frac{(Z\chi)+q}{q(Z\chi)+1} ; \quad (1)$$

– термодинамічної ефективності перетворення вільної енергії

$$\eta = -\frac{J_2 X_2}{J_1 X_1} = -(Z\chi) \frac{(Z\chi)+q}{q(Z\chi)+1} . \quad (2)$$

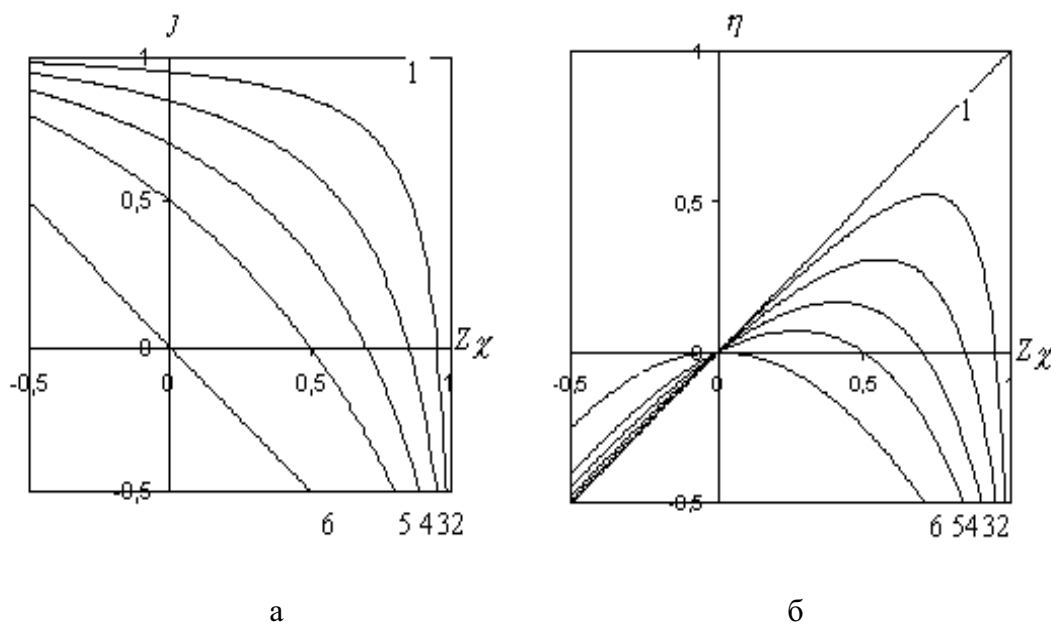


Рис. 2. Залежності нормованого відношення потоків (а) і нормованої вихідної потужності (б) від нормованого відношення сил при різних ступенях спряження q :
 1 – $q = -1,0$; 2 – $q = -0,95$; 3 – $q = -0,85$; 4 – $q = -0,7$; 5 – $q = -0,5$; 6 – $q = 0$

ДПС послідовного збудження як електромеханічний перетворювач енергії

В електроприводі постійного струму основним перетворювачем енергії є електродвигун, в якому за посередництвом електромагнітного поля вхідна електрична енергія перетворюється у механічну. У результаті нерівноважності процесів перетворення деяка незначна частина енергії у вигляді електричних, електромагнітних та механічних втрат дисипує у тепло. Зважаючи на позиції термодинаміки нерівноважних процесів, ДПС

послідовного збудження як електромеханічний перетворювач енергії показаний на рис. 3, а.

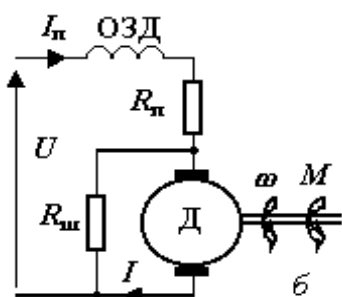
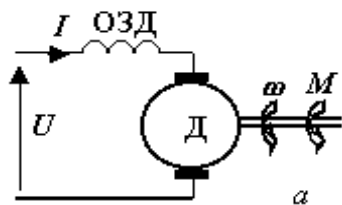


Рис. 3. Схеми електроприводів постійного струму з ДПС послідовного збудження

Вхідною силою вибрана напруга мережі U , вхідним потоком – струм в якірному колі I , вихідними відповідно – кутова швидкість двигуна ω і електромагнітний момент двигуна M . У цьому випадку ДПС описується системою лінійних рівнянь, аналогічною ДПС незалежного збудження [3]:

$$\begin{cases} I = \frac{1}{R_{я.к}} U - \frac{k\Phi}{R_{я.к}} \omega \\ -M = -\frac{k\Phi}{R_{я.к}} U + \frac{k^2\Phi^2}{R_{я.к}} \omega \end{cases}, \quad (3)$$

де $R_{я.к} = R_{я} + R_{о.з}$ – сумарний опір якірного кола двигуна; $R_{я}$, $R_{о.з}$ – опори обмоток якоря та збудження; k – конструктивний коефіцієнт; Φ – магнітний потік.

Принципова різниця між системами рівнянь (3) для ДПС незалежного і послідовного збудження полягає у тому, що в останньому випадку рівняння є нелінійними, оскільки до складу кінетичних коефіцієнтів входить значення магнітного потоку Φ , яке залежить від струму в якірному колі та моменту навантаження.

Незважаючи на нелінійність рівнянь в системі (3), визначимо основні параметри ДПС послідовного збудження як перетворювача енергії: $q = -1$; $Z = k\Phi$; $\chi = \omega/U$; $Z\chi = E/U$, де E – ЕРС двигуна.

Універсальні характеристики (1) і (2) для перетворювачів енергії визначаються двома величинами – q і $Z\chi$. Останній параметр лінійно залежить від струму навантаження, оскільки $E = U - IR_{я.к}$. Отже, нелінійність кінетичних коефіцієнтів в системі рівнянь (3) не вплине на вигляд універсальних характеристик. Такі ж результати можна отримати, взявши за вихідну силу E замість ω , а за вихідний потік I замість M . Така заміна буде правомірною, оскільки вихідна потужність $P_{вих} = M\omega = EI$. Тоді система рівнянь (3) буде замінена двома однаковими лінійними рівняннями

$$\begin{cases} I = \frac{1}{R_{я.к}} U - \frac{1}{R_{я.к}} E \\ -I = -\frac{1}{R_{я.к}} U + \frac{1}{R_{я.к}} E \end{cases}. \quad (4)$$

Ефективність перетворення енергії η в такому абсолютно спряженому ($q = -1$) електромеханічному перетворювачі, яким є ДПС послідовного збудження, ілюструється

прямою на рис. 4. Там же показана електромеханічна характеристика 1 двигуна у відносних одиницях

$$Z\chi = \bar{E} = 1 - \bar{I}\bar{R}_я, \quad (5)$$

де $\bar{E} = E/U_H$; $\bar{I} = I/I_H$; $\bar{R}_{я.к} = (R_я + R_{0.3})/R_H$; $R_H = U_H/I_H$; U_H, I_H – номінальні значення напруги та струму двигуна.

Точкою А на рис. 4 показано робочу точку при номінальному навантаженні: $\bar{E}_A = 1 - \bar{R}_я$. Значення $\bar{R}_я$ для ДПС послідовного збудження переважно знаходяться в межах 0,05...0,1.

Зв'язок між відносними параметрами ДПС послідовного збудження, як відомо, описується для кожної серії двигунів універсальними характеристиками $\bar{\omega}(\bar{I})$ та $\bar{M}(\bar{I})$, якими зручно доповнити графіки, як показано на рис. 4.

Використовуючи показані на рис. 4 графічні залежності, можна легко визначати параметри двигуна, а також його енергетичну ефективність в будь-якій робочій точці.

Реостатне регулювання швидкості

При введенні в коло якоря двигуна додаткового опору R_d з метою пониження швидкості системи рівнянь (3) і (4) зміняться лише величиною $R_{я.к} = R_я + R_{0.3} + R_d$. Електромеханічний перетворювач енергії далі буде абсолютно спряженим, а електромеханічна характеристика (5) буде м'якшою (пряма 2 на рис. 4). Номінальному навантаженню буде відповідати точка В з нижчою енергетичною ефективністю. Універсальна залежність $\bar{M}(\bar{I})$ залишиться без змін, а залежність $\bar{\omega}(\bar{I})$ буде зберігати той же характер, але при нижчих значеннях $\bar{\omega}$. Порівнюючи дві точки кутової швидкості на природній та штучній характеристиках при однаковому значенні струму якоря та переходячи до відносних одиниць, можна показати, що

$$\bar{E} = \bar{M}\bar{\omega}(1 - \bar{R}_я)/\bar{I} = 1 - \bar{I}\bar{R}_\Sigma, \quad (6)$$

де $\bar{R}_\Sigma = R_{я.к}/R_H = \bar{R}_я + \bar{R}_d$; $\bar{R}_d = R_d/R_H$.

Отже, штучну електромеханічну характеристику $\bar{E}(\bar{I})$ можна побудувати за допомогою рівняння (6) за заданою робочою точкою $(\bar{M}_p; \bar{\omega}_p)$ та значенням \bar{I}_p , визначеним за залежністю $\bar{M}(\bar{I})$. З рівняння (6) також легко знаходиться значення необхідного додаткового опору в якірному колі.

Всі наведені залежності справедливі і при роботі в режимі противмикання. Пряма ефективності перетворення енергії η в цьому випадку продовжиться у від'ємну область.

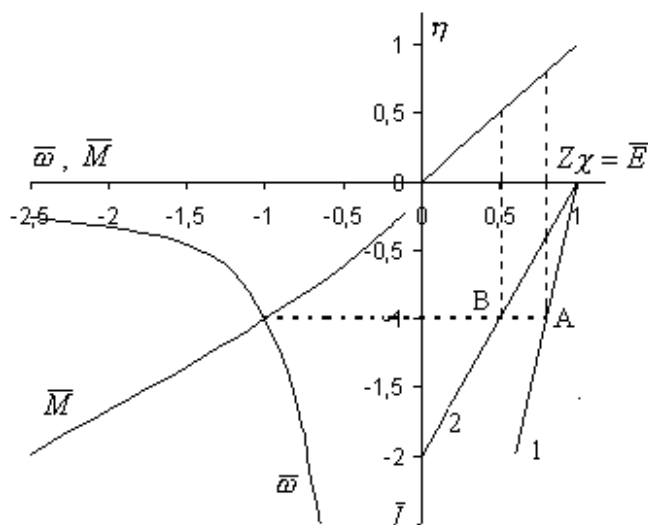


Рис. 4. Зв'язок між електромеханічними характеристиками та ефективністю перетворення енергії в ДПС послідовного збудження

Регулювання швидкості шунтуванням якоря

Для схеми з шунтуванням якоря ДПС послідовного збудження (рис. 3,б) одержана така система рівнянь [3]:

$$\begin{cases} I_{\Pi} = \frac{1}{R}U - \frac{k\Phi}{R}\omega \\ -M = -\frac{k\Phi}{R}U + \frac{k^2\Phi^2}{R}\omega \end{cases}, \quad (7)$$

де I_{Π} – струм, що споживається з мережі; $R = R_{\text{я}} + \alpha R_{\Pi}$; $\alpha = R_{\text{ш}} / (R_{\Pi} + R_{\text{ш}})$; $R_{\text{ш}}$ – опір, включений паралельно до якоря двигуна; R_{Π} – сумарний опір обмотки збудження двигуна та послідовно включеного з нею опору.

Для електромеханічного перетворювача енергії, що описується системою рівнянь (7), основні параметри мають такі значення: $q = -\alpha$; $Z = k\Phi$; $\chi = \omega/U$; $Z\chi = E/U$. Отже, основні параметри q і $Z\chi$ будуть лінійними стосовно E , однак перетворювач має часткову спряженість, оскільки $|q| < 1$.

Систему рівнянь (7) зручно представити в лінійному вигляді та у відносних одиницях:

$$\begin{cases} \bar{I}_{\Pi} = \frac{1}{\bar{R}} - \frac{\alpha}{\bar{R}}\bar{E} \\ -\bar{I} = -\frac{\alpha}{\bar{R}} + \frac{1}{\bar{R}}\bar{E} \end{cases}, \quad (8)$$

де $\bar{I}_{\Pi} = I_{\Pi} / I$; $\bar{R} = R / R_{\Pi}$.

Для перетворювача енергії, що описується системою рівнянь (8), $q = -\alpha$; $Z = 1$; $\chi = \bar{E}$.

Універсальні характеристики ефективності перетворення енергії, а також відповідні їм для деякої робочої точки p електромеханічні характеристики ДПС послідовного збудження показані на рис. 5. Як видно з характеристик, даний електромеханічний перетворювач має більше ступенів вільності: одні і ті ж вихідні параметри \bar{M}_p і $\bar{\omega}_p$ можна забезпечити, працюючи на різних електромеханічних характеристиках, яким відповідають свої значення співвідношення опорів схеми α , жорсткості характеристик $\Delta\bar{E} = \alpha - \bar{E}_p$, а також енергетичної ефективності перетворення енергії η . Крім цього, накладається також обмеження струму в обмотці збудження $\bar{I}_{\Pi} \leq 1$. Тому для даної схеми доцільно провести дослідження, результати яких

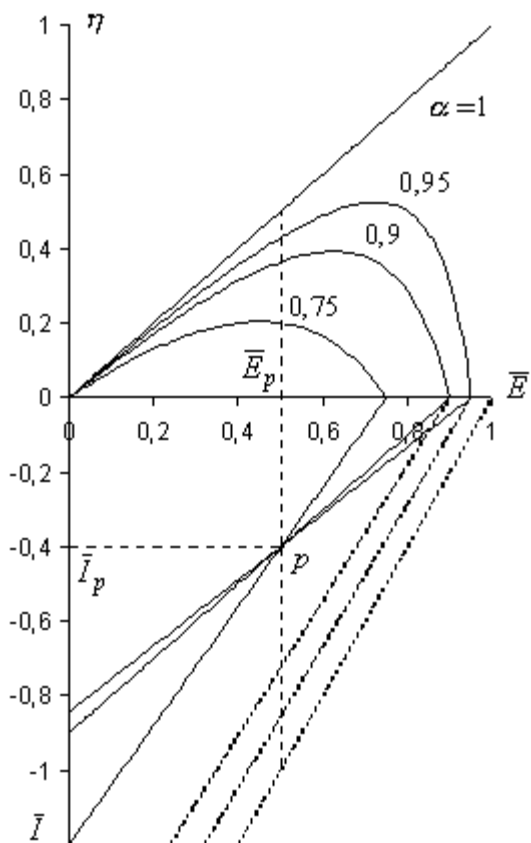


Рис. 5. Зв'язок між електромеханічними характеристиками та ефективністю перетворення енергії в електроприводі з шунтуванням якоря ДПС послідовного збудження

давали б можливість за допомогою отриманих залежностей у відносних одиницях легко визначати параметри електропривода із заданими характеристиками:

а) робота на найжорсткішій електромеханічній характеристиці.

Оскільки магнітний потік збудження двигуна забезпечується струмом I_{Π} , а не лише струмом двигуна I , то доцільно вираз (6) замінити еквівалентним

$$\bar{E} = \bar{\Phi} \bar{\omega} (1 - \bar{R}_я), \quad (9)$$

де $\bar{\Phi} = \Phi / \Phi_{\Pi}$ – відносне значення магнітного потоку збудження двигуна.

Найжорсткішій електромеханічній характеристиці буде відповідати допустиме збудження двигуна $\bar{\Phi} = 1$, а отже, $\bar{I}_{\Pi} = 1$. Для заданої робочої точки з виразу (9) отримуємо $\bar{E}_p = \bar{\omega}_p (1 - \bar{R}_я)$. Оскільки $\bar{\Phi} = 1$, то $\bar{I}_p = \bar{M}_p$. Розв'язавши систему рівнянь (8), отримуємо

$$\alpha = \frac{\bar{I} + \bar{I}_{\Pi} \bar{E}}{\bar{I}_{\Pi} + \bar{I} \bar{E}}; \quad \bar{R} = \frac{1 - \alpha \bar{E}}{\bar{I}_{\Pi}}. \quad (10)$$

Підставивши значення параметрів для робочої точки у вирази (10), одержуємо

$$\alpha = \frac{\bar{M}_p + \bar{\omega}_p (1 - \bar{R}_я)}{1 + \bar{M}_p \bar{\omega}_p (1 - \bar{R}_я)}; \quad \bar{R} = 1 - \alpha \bar{\omega}_p (1 - \bar{R}_я).$$

Для отриманого α з універсальної характеристики (рис. 2, б) або з виразу (2) можна визначити енергетичну ефективність роботи електропривода η ;

б) залежність між жорсткістю електромеханічної характеристики та допустимим навантаженням у всьому діапазоні регулювання швидкості.

Для одного і того ж робочого значення \bar{E}_p для кожного співвідношення опорів схеми α існує допустиме навантаження $M_{\text{дон}}$, причому чим менше α (жорсткіша електромеханічна характеристика), тим менше $M_{\text{дон}}$ (пунктирні прямі на рис. 5).

Відповідно до виразу (1) для перетворювача енергії, що описується системою рівнянь (8), нормоване відношення потоків дорівнює

$$j = \frac{\bar{I}}{\bar{I}_{\Pi}} = \frac{\alpha - \bar{E}}{1 - \alpha \bar{E}}. \quad (11)$$

Для допустимого навантаження, як було показано вище, $\bar{\Phi} = 1$, $\bar{I}_{\Pi} = 1$, $\bar{M} = \bar{I}$, $\bar{E} \cong \bar{\omega}$. При таких умовах з виразу (11) отримуємо

$$\bar{I}_{\text{дон}} = \bar{M}_{\text{дон}} = j = \frac{\alpha - \bar{E}}{1 - \alpha \bar{E}}, \quad (12)$$

а відповідно до виразу (2)

$$\eta = j \bar{E} = \bar{I}_{\text{дон}} \bar{E} = \bar{E} \frac{\alpha - \bar{E}}{1 - \alpha \bar{E}}. \quad (13)$$

Залежності (12) і (13) відповідають універсальним характеристикам, які показані графічно на рис. 2.

Значення кутової швидкості без навантаження $\bar{\omega}_0$ та при допустимому навантаженні можна визначити з виразів:

$$\bar{\omega}_0 = \frac{\alpha \bar{R}}{(1 - \alpha^2)(1 - \bar{R}_я)}; \quad \bar{\omega} = \frac{\bar{E}}{(1 - \bar{R}_я)}, \quad (14)$$

де $\bar{\omega}_0 = \omega_0 / \omega_{\Pi}$; ω_{Π} – номінальне значення кутової швидкості двигуна.

Перше рівняння отримано при підстановці в (9) наближеного значення $\bar{\Phi} = \bar{I}_n$, одержаного з системи (8) при $\bar{I} = 0$ і $\bar{E} = \alpha$, а друге – при $\bar{\Phi} = 1$. Після перетворень з (14) випливає, що

$$\bar{\omega}_o = \frac{1}{1-\beta} \bar{\omega} ; \quad (15)$$

$$\Delta \bar{\omega} = \bar{\omega}_o - \bar{\omega} = \frac{\beta}{1-\beta} \bar{\omega} ,$$

$$\text{де } \beta = j/\alpha = \frac{1}{\alpha} \frac{\alpha - \bar{E}}{1 - \alpha \bar{E}} .$$

На рис. 6 показані залежності (15) для ряду значень α . З рис. 2 і 6 для потрібної кутової швидкості $\bar{\omega}$, що близька до \bar{E} , можна швидко проаналізувати залежності між

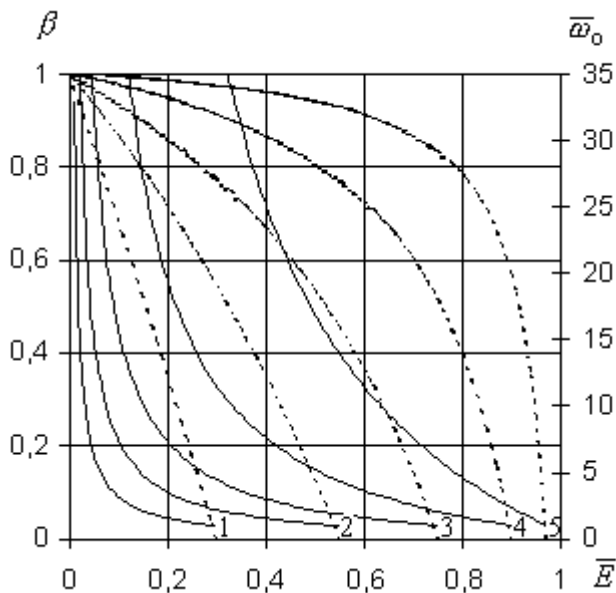


Рис. 6. Залежності параметра β (пунктирні лінії) та $\bar{\omega}_o$ (суцільні лінії) від \bar{E} для таких значень α :
1- 0,3; 2- 0,55; 3- 0,75; 4- 0,9; 5- 0,97

допустимим навантаженням, перепадом швидкості $\Delta \bar{\omega} = \bar{\omega}(\bar{\omega}_o / \bar{\omega} - 1)$ та енергетичною ефективністю роботи електропривода і вибрати потрібне значення співвідношення опорів α . Точніше необхідні параметри визначаються з виразів (12), (13) і (15). З першого рівняння системи (8) далі визначається $\bar{R} = 1 - \alpha \bar{E}$.

в) робота в режимі максимуму енергетичної ефективності.

Певний інтерес становить вибір такого режиму роботи електропривода, коли забезпечується екстремум енергетичної ефективності. Така робоча точка є оптимальною щодо жорсткості електромеханічної характеристики і енергетичної ефективності електропривода, оскільки два останні показники перебувають у протиріччі.

Для оптимальних точок справедливі залежності [2]

$$(Z\chi)_{\text{opt}} = -\frac{q}{1 + \sqrt{1 - q^2}} ; \quad \eta_{\text{opt}} = (Z\chi)_{\text{opt}}^2 .$$

Враховуючи це, для нашого електромеханічного перетворювача отримуємо

$$\alpha_{\text{opt}} = \frac{2\bar{E}}{1 + \bar{E}^2} . \quad (16)$$

При роботі з допустимим навантаженням параметри електропривода для оптимальної точки знаходяться шляхом підстановки значення α_{opt} у вирази (12), (13) і (15). В результаті отримуємо

$$\bar{I}_{\text{don}} = \bar{M}_{\text{don}} = \bar{E}, \quad \eta = \bar{E}^2, \quad \bar{\omega}_o / \bar{\omega} = 2 / (1 - \bar{E}^2) . \quad (17)$$

Складніше знайти умови роботи в оптимальних точках при навантаженнях, менших від допустимого. При цьому $\bar{I}_n < 1$ і $\bar{\Phi} < 1$. Відносний електромагнітний момент двигуна можна виразити так: $\bar{M} = \bar{\Phi} \bar{I} = \bar{\Phi} j \bar{I}_n$. Підставляючи в останнє рівняння значення виразів (9), (11) і (16), отримуємо

$$\bar{E} = \sqrt{\frac{\bar{M} \bar{\omega} (1 - \bar{R}_я)}{\bar{I}_n}} = \sqrt{\frac{\bar{P}}{\bar{I}_n}} \quad (18)$$

де $\bar{P} = \bar{M} \bar{\omega} (1 - \bar{R}_я)$ – відносна електромагнітна потужність, що розвивається двигуном.

Враховуючи (17), можна констатувати, що для оптимальних робочих точок справедливим співвідношенням є $\eta = \bar{P} / \bar{I}_n$.

Для знаходження значення \bar{I}_n виразимо момент двигуна через універсальну характеристику $\bar{M}(\bar{I})$ (рис. 4):

$$\bar{M} = \bar{\Phi} \bar{I} = \frac{\bar{M}(\bar{I}_n)}{\bar{I}_n} j \bar{I}_n = \bar{M}(\bar{I}_n) j \quad (19)$$

Отже, параметри електропривода для роботи в оптимальних точках можна знайти за таким алгоритмом.

Прийняти для початку $\bar{E} = \bar{\omega}_p$. Враховуючи, що в оптимальних точках $j = \bar{E}$, з виразу (19) знаходимо $\bar{M}(\bar{I}_n) = \bar{M}_p / \bar{E}$. Для отриманого значення моменту за універсальною кривою $\bar{M}(\bar{I}_n)$ знайти $\bar{I}_{n,p}$ і разом із заданими \bar{M}_p і $\bar{\omega}_p$ підставити у вираз (18). Для знайденого значення \bar{E} описаний алгоритм повторити. Після 3–4 ітерацій отримується з достатньою для практичних розрахунків точністю значення \bar{E} . На рис. 7 зображені графічно результати комп'ютерних обчислень за описаним алгоритмом, одержані для ДПС послідовного збудження типів МП, ДП і Д, потужністю, більшою 10 кВт. Враховуючи отримане \bar{E} , за допомогою виразів (16), (17), (19), (10) можна знайти всі необхідні параметри електропривода: α , η , $\bar{M}_{доп}$, $\bar{\omega}_o$, $\Delta \bar{\omega}$, \bar{I}_n , \bar{I} , \bar{R} , $\bar{\Phi}$.

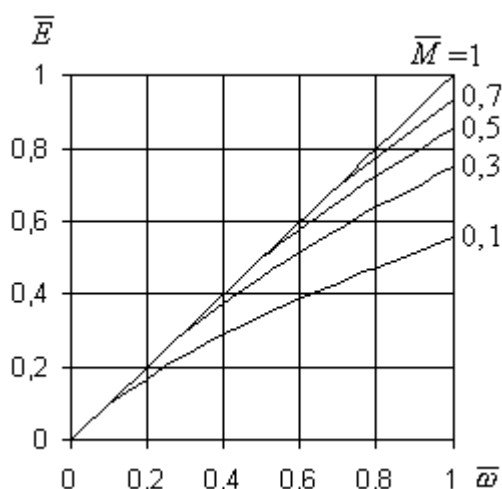


Рис. 7. Залежність \bar{E} від параметрів робочої точки електропривода ($\bar{\omega}$; \bar{M}) для ДПС типів МП, ДП і Д потужністю, більшою від 10 кВт

Висновок

Математичний опис і дослідження електропривода з ДПС послідовного збудження як термодинамічного перетворювача енергії дали можливість отримати універсальні аналітичні і графічні залежності між основними параметрами у відносних одиницях, за допомогою яких можна легко і швидко знаходити параметри основних схем електро-

приводів із заданими характеристиками. Одержані результати є особливо корисними для автоматизованого проектування електроприводів постійного струму.

1. Эткин В.А. Термодинамика неравновесных процессов переноса и преобразования энергии. – Саратов, 1991. 2. Вестерхоф Х., ван Дам К. Термодинамика и регуляция превращений свободной энергии в биосистемах: Пер. с англ. – М., 1992. 5. Щур І. Застосування принципів нерівноважної термодинаміки для аналізу енергетичної ефективності електроприводів // Проблеми економії енергії: Зб. матеріалів III Міжнар. наук.-практ. конф. – Львів, 2001. – 140 с.

УДК 621.314

М.А.Яцун

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра ЕМА

ПРОСТОРОВІ ГАРМОНІКИ МРС КЛІТКИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЗА НАЯВНОСТІ ДЕФЕКТУ В ОДНОМУ СТРИЖНІ

© Яцун М.А., 2002

Визначені комплексні величини просторових гармонік магніторушійної сили додаткових струмів від дефекту в стрижні короткозамкненої клітки обмотки ротора асинхронного двигуна.

Complex value space harmonic of the magnetomotive force at the addit current from the defekt in the bar squirrel-cage rotor winding induction motor has been determined.

При незначному порушенні симетрії короткозамкненої клітки ротора можна прийняти, що напруга живлення і струм неробочого ходу залишаються незмінними. Стан магнітної системи будемо враховувати коефіцієнтом насичення. Аналіз проведимо за основними (першими) гармоніками всіх величин.

Струм неробочого ходу (i_0) створює обертову магніторушійну силу (МРС), величина якої на один полюс за першою гармонікою у точці повітряного проміжку з координатою x $F_0 = (0,45/p)mI_0w_1K_{o61}\sin(\omega t + \pi x/\tau)$, де відлік координати x (кута $\alpha = \pi x/\tau$) береться від осі фази А зі струмом $i_0 = I_0\sqrt{2}\sin\omega t$; p , m , w_1 – кількість відповідно пар полюсів, фаз і витків у фазі статора; K_{o61} і τ – відповідно обмотковий коефіцієнт і полюсний крок; $\omega = 2\pi f$ – колова частота; f – частота змінного струму.

МРС F_0 створює основне магнітне поле, яке обертається з частотою $n=60f/p$ і наводить у дефектному (першому) стрижні короткозамкненої обмотки ротора електрорушійну силу (ЕРС)

$$\begin{aligned}
 e_{01} &= B_{01}lv_B = \frac{2p\tau n_B}{60} l \frac{\mu_0 F_0}{K_H K_\delta \delta} = \frac{2p\tau n_B}{60} l \frac{\mu_0}{K_H K_\delta \delta} \frac{0,45}{p} mI_0 w_1 K_{o61} \times \\
 &\times \sin \left[\omega t + \frac{\pi}{\tau} \left(x_0 - \frac{2p\tau n_p}{60} t \right) \right] = 2fs\tau l \frac{0,45\mu_0}{pK_H K_\delta \delta} mI_0 w_1 K_{o61} \sin \left(s\omega t + \frac{\pi}{\tau} x_0 \right) = \\
 &= E_{01m} \sin \left(s\omega t + \frac{\pi}{\tau} x_0 \right), \tag{1}
 \end{aligned}$$