

1. Гуляев В.А. Вычислительная диагностика. - К. 1991. 2. Чайковская Е.Е. Синергетический подход при разработке экспертных систем // Тр. Одес. политехн. ун-та. - Одесса, 1999. - Вып. 3(9). - С. 108-110. 3. Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. - М. 1964. 4. Чайковская Е.Е. Математическое моделирование динамики энергетических систем как основы диагностики / / Тр. Одес. политехн. ун-та. - Одесса, 2000. - Вып. 3(12). - С. 83-86. 5. Чайковская Е.Е. Динамическая подсистема как основа экспертных систем // Тр. Одес. политехн. ун-та. - Одесса, 1999. - Вып. 3(9). - С. 108-110.

УДК 621.313.2:536.755

І. Щур

Національний університет "Львівська політехніка"

ЗАСТОСУВАННЯ ПІДХОДІВ НЕРІВНОВАЖНОЇ ТЕРМОДИНАМІКИ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

© Щур І., 2002

Вперше застосовано принципи термодинаміки нерівноважних процесів (перетворювачів енергії) до аналізу енергетики електроприводів постійного струму. Показано переваги запропонованого підходу: уніфікація, наочність та простота формування різних критеріїв енергетичної ефективності.

It is for the first time that the principles of thermodynamics of irreversible processes (energy converters) were applied to the analysis of energetics of electric drivers of direct current. The advantages of the suggested approach were stressed: unification, visuality and simplicity of forming various criteria of energy efficiency.

Термодинаміка нерівноважних процесів (ТД НП) – це фундаментальна наука, яка розвинулася з класичної термодинаміки і охопила не лише ізольовані, а й закриті та відкриті системи [1]. У межах ТД НП стало можливим аналізувати енергетику реальних незворотних процесів у системах будь-якої природи з врахуванням швидкості перебігу цих процесів. В результаті був розроблений чіткий математичний апарат, особливо для лінійних систем, який дає змогу уніфікувати опис енергетичних перетворень.

Стосовно електротехніки ТД НП з успіхом використовувалася для аналізу термоелектричних ефектів [1,2]. Інші ділянки електротехніки, зокрема електропривід, залишалися поза увагою цієї науки. Це пояснюється безентропійністю як вхідної електричної, так і вихідної механічної енергії в такому перетворювачі, як електродвигун, а також порівняно малими втратами енергії в ньому. Проте існує багато систем електроприводів, у яких з метою порівняно простого і надійного регулювання параметрів доводиться поступатися енергетичною ефективністю як в усталених, так і в перехідних процесах. Саме для чіткого опису, графічного представлення і розуміння енергетичних закономірностей в таких системах доцільно застосувати підходи ТД НП.

У межах ТД НП будь-який перетворювач вільної енергії може бути представлений "чорною скринькою" (рис. 1), яка перетворює вільну енергію на вході у вихідну вільну енергію [3]. Для вхідної і вихідної енергій, виходячи з дисипативної функції (функції виробництва

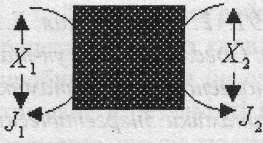


Рис. 1. Загальна схема перетворювача енергії

ентропії), можна відповідно підібрати термодинамічні сили X_1 і X_2 та потоки J_1 і J_2 , які завдяки спряженості входу і виходу будуть зв'язані такими лінійними рівняннями:

$$\begin{cases} J_1 = L_{11}X_1 + L_{12}X_2 \\ J_2 = L_{21}X_1 + L_{22}X_2 \end{cases}, \quad (1)$$

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

Л.Онзагер відкрив загальний принцип, який іменують "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.

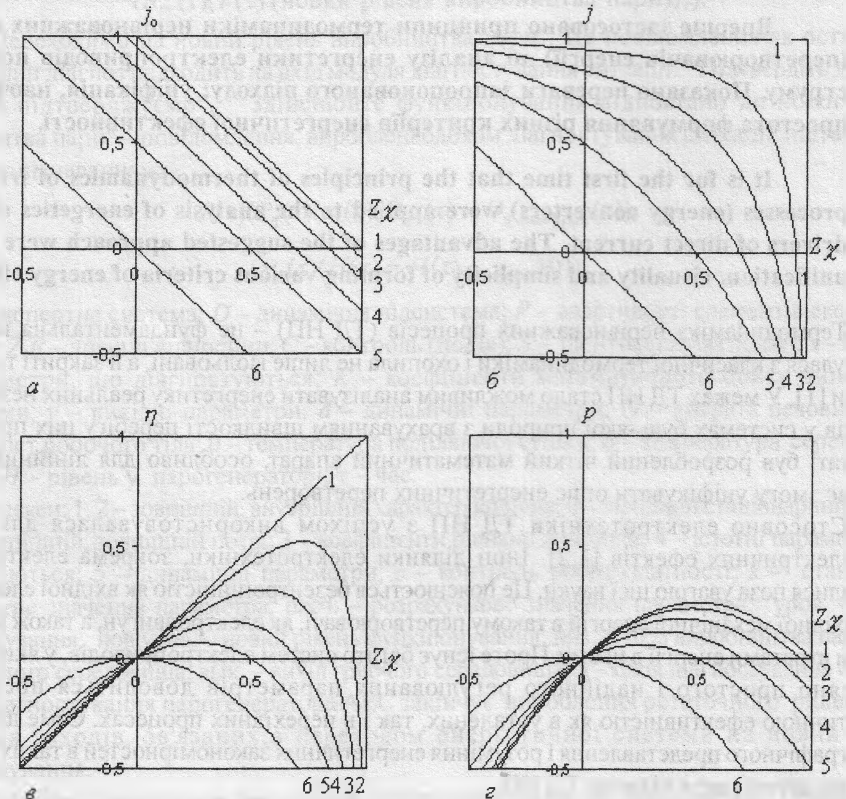


Рис. 2. Залежності нормованого вихідного потоку (а), нормованого відношення потоків (б), термодинамічної ефективності (в) і нормованої вихідної потужності (г) від нормованого відношення сил при різних ступенях спряженості q :

1 - $q = -1,0$; 2 - $q = -0,95$; 3 - $q = -0,85$; 4 - $q = -0,7$; 5 - $q = -0,5$; 6 - $q = 0$

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 [3,4] використовуються нормовані величини. Для цього вводяться такі параметри:

– ступінь спряження
$$q = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11}L_{22}}}; \quad (2)$$

– феноменологічна стехіометрія
$$Z = \sqrt{L_{22}/L_{11}}; \quad (3)$$

– відношення сил
$$\chi = X_2/X_1. \quad (4)$$

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

– нормованого вихідного потоку

$$j_o = -\frac{J_2}{ZL_{11}X_1} = -(Z\chi) - q;$$

– нормованого відношення вихідного потоку до вхідного

$$j = -\frac{J_2}{ZJ_1} = -\frac{(Z\chi) + q}{q(Z\chi) + 1};$$

– термодинамічної ефективності перетворення вільної енергії

$$\eta = -\frac{J_2 X_2}{J_1 X_1} = -(Z\chi) \frac{(Z\chi) + q}{q(Z\chi) + 1}; \quad (5)$$

– нормованої вихідної потужності

$$p = -\frac{J_2 X_2}{L_{11} X_1^2} = -[(Z\chi) + q](Z\chi). \quad (6)$$

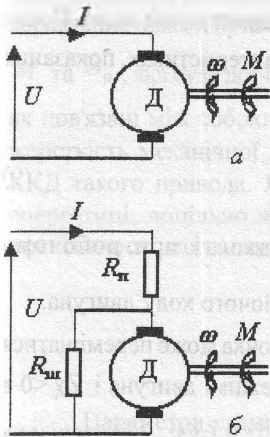


Рис. 3. Схеми електроприводів постійного струму

В електроприводі постійного струму основним перетворювачем енергії є електродвигун, в якому за посередництвом електромагнітного поля вхідна електрична енергія перетворюється у механічну. В результаті нерівноважності процесів перетворення деяка незначна частина енергії у вигляді електричних, електромагнітних та механічних втрат дисипує у тепло. Виходячи з позицій ТД НП, двигун постійного струму (ДПС) як електромеханічний перетворювач енергії показаний на рис. 3,а. Вхідною силою вибрана напруга мережі U , вхідним потоком – струм в якірному колі I , вихідними відповідно ω – кутова швидкість двигуна і електромагнітний момент двигуна M . У такому разі ДПС описується системою лінійних рівнянь

$$\begin{cases} I = \frac{1}{R_{\text{я}}} U - \frac{k\Phi}{R_{\text{я}}} \omega \\ -M = -\frac{k\Phi}{R_{\text{я}}} U + \frac{k^2\Phi^2}{R_{\text{я}}} \omega \end{cases}, \quad (7)$$

де $R_{\text{я}}$ – сумарний опір якрного кола двигуна; k – конструктивний коефіцієнт; Φ – магнітний потік.

Порівнюючи системи рівнянь (1) і (7) і враховуючи вирази (2)–(4), отримуємо

$$q = -1; \quad Z = k\Phi; \quad \chi = \frac{\omega}{U}; \quad Z\chi = \frac{E}{U}. \quad (8)$$

Отже ДПС, підключений до мережі, є абсолютно спряженим перетворювачем енергії. На природній механічній характеристиці точка номінального режиму відповідає значенню $Z\chi$, близькому до 1. Звідси і близька до 1 термодинамічна ефективність перетворення енергії, тобто ККД двигуна (рис. 2,в) та близькі до 0 значення електромагнітного моменту (рис. 2,а) і вихідної потужності (рис. 2,г). Останнє зумовлено тим, що у зв'язку із значною жорсткістю природної механічної характеристики теоретично максимальний момент, який відповідає стопорінню ДПС, у кілька десятків разів перевищує номінальний.

При введенні в коло якоря додаткових опорів для регулювання швидкості ДПС система рівнянь (7) істотно не зміниться (замість $R_{\text{я}}$ буде $R_{\text{я}} + R_{\text{д}}$, де $R_{\text{д}}$ – додатковий опір). Проте точка, що відповідає робочому режимові, буде переміщатися на характеристиках, показаних на рис. 2, відповідно до $Z\chi$:

$$Z\chi = \frac{E}{U} = \frac{U - I(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{U} = 1 - \Delta\bar{\omega}, \quad (9)$$

де $\Delta\bar{\omega} = (\omega_0 - \omega_{\text{р}})/\omega_0$ – відносний перепад кутової швидкості при робочому навантаженні; $\omega_0 = U/(k\Phi)$ – кутова швидкість ідеального неробочого ходу двигуна.

Отже, при реостатному регулюванні швидкості ДПС робоча точка може переміщатися по прямій чи кривій на рис. 2,а-г при $q=-1$ від $Z\chi=1$ до $Z\chi=0$ в режимі двигуна і $Z\chi < 0$ в режимі противмикання. В останньому випадку $j_0 > 1$ (рис. 2,а) і $\eta < 0$ (рис. 2,в), оскільки привід, крім енергії з мережі, використовує також активний момент навантаження. В режимі динамічного гальмування двигун відключається від мережі і тому цей режим будуть характеризувати лінії для $q=0$.

Для отримання понижених швидкостей при задовільних значеннях жорсткості механічних характеристик в простих електроприводах постійного струму ще досить часто використовують схему з шунтуванням якоря двигуна (рис. 3,б). Перетворювач вільної енергії цього типу характеризується такою системою лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} I = \frac{R_{\text{ш}} + R_{\text{п}}}{\alpha} U - \frac{R_{\text{ш}} k\Phi}{\alpha} \omega \\ -M = -\frac{R_{\text{ш}} k\Phi}{\alpha} U + \frac{(R_{\text{ш}} + R_{\text{п}}) k^2\Phi^2}{\alpha} \omega \end{cases}, \quad (10)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} + R_{\text{п}}}$$

Для такої схеми також справедливі вирази (8), за винятком того, що $q = -\alpha$, тобто при шунтуванні якоря двигуна спряженість між вхідною і вихідною енергіями відмінна від -1. Її можна задати, підбираючи величини опорів $R_{\text{п}}$ та $R_{\text{ш}}$. Для подальшого аналізу енергетики цієї схеми доцільно перейти до відносних одиниць:

$$\begin{cases} \bar{I} = \frac{1}{\bar{R}} - \frac{\alpha}{\bar{R}} \bar{\omega} \\ -\bar{M} = -\frac{\alpha}{\bar{R}} + \frac{1}{\bar{R}} \bar{\omega} \end{cases}, \quad (11)$$

де $\bar{I} = \frac{I}{I_{\text{д.н}}}$; $\bar{M} = \frac{M}{M_{\text{н}}}$; $\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_0}$; $\bar{R} = \frac{R_{\text{а}} + R_{\text{п}} \alpha}{R_{\text{н}}}$; $R_{\text{н}} = U_{\text{д.н}} / I_{\text{д.н}}$; $U_{\text{д.н}}$, $I_{\text{д.н}}$, $M_{\text{н}}$ – номінальні значення напруги, струму та моменту двигуна відповідно.

З системи (11) випливає, що при неробочому ході ($\bar{M} = 0$) $\bar{\omega} = \alpha$. Тому дуже наочним буде поєднання кривих термодинамічної (енергетичної) ефективності (рис. 2,в) з механічними характеристиками привода у відносних одиницях, як показано на рис. 4. Для будь-яких заданих \bar{M} та $\bar{\omega}_p$, яка буде дорівнювати, згідно з (8), Z_{χ} , можна легко візуально і аналітично оцінити, як пов'язані між собою такі взаємно суперечливі показники, як енергетична ефективність і жорсткість механічної характеристики. При заданій жорсткості можна одразу сказати про ККД такого привода. Якщо треба забезпечити максимальну жорсткість при задовільній енергетиці, доцільно вибрати робочу точку привода у точці максимальної енергетичної ефективності для заданого q :

$$Z_{\chi_{\text{opt}}} = \bar{\omega}_p = \frac{\omega_p}{\omega_0} = \frac{\omega_p k \Phi}{U} = \frac{\alpha_{\text{opt}}}{1 + \sqrt{1 - \alpha_{\text{opt}}^2}} \quad (12)$$

Параметри схеми у такому разі легко визначаються з наступних рівнянь, отриманих відповідно з (12) та (11):

$$\alpha_{\text{opt}} = \frac{2\bar{\omega}_p}{1 + \bar{\omega}_p^2}; \quad \bar{R} = \frac{\alpha_{\text{opt}} - \bar{\omega}_p}{\bar{M}} \quad (13)$$

Залежності (13) для зручності користування представлені графічно на рис. 5. Як видно з графіків, найгірша жорсткість механічної характеристики привода при оптимальній енергетичній ефективності отримується при робочій швидкості, дорівнює половині від номінальної.

При плавному регулюванні швидкості ДПС зміною напруги якоря ми увесь час перебуваємо на характеристиках з $q = -1$ при Z_{χ} , близькому до 1. Отже, цей спосіб регулювання швидкості забезпечує у всіх режимах високу енергетичну ефективність.

Нормована вихідна потужність (рис. 2,г), яка важлива для ряду електроприводів, є далекою від максимальної, але двигун у зазначеній робочій точці працює з номінальним навантаженням і максимальною енергетичною ефективністю.

Отже, використання принципів ТД НП відкриває нові можливості для аналізу енергетики електроприводів постійного струму. Аналогічно до наведених у цій статті, можна легко формувати різні інші критерії ефективності роботи систем електроприводів.

1. Де Гроот С., Мазур П. *Неравновесная термодинамика*. М., 1964.
2. Гуров К.П. *Феноменологическая термодинамика необратимых процессов (физические основы)*. М., 1978.
3. Вестерхоф Х., ван Дам К. *Термодинамика и регуляция превращений свободной энергии в биосистемах*. М., 1992.
4. Эткин В.А. *Термодинамика неравновесных процессов переноса и преобразования энергии*. Саратов, 1991.

УДК 504:658.562

В. Семенюк, В. Семенюк, В. Камбург, В. Венгржановська
Технологічний університет Поділля

ВІД ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОГО ДО ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

© Семенюк В., Семенюк В., Камбург В., Венгржановська В., 2002

Показано необхідні та достатні умови переходу від техніко-економічного до еколого-економічного моделювання ресурсо- та енергозбереження.

We are show questions of wanting from technical-economics to ecology-economics models power and resource abilities.

В найближчий час на Україні буде прийнято закон про екологічний аудит, який є складовою частиною екологічного менеджменту. Екоаудит являє собою інструмент управління, який системно охоплює всі питання екологічної оцінки діяльності підприємства, удосконалення системи регулювання впливу підприємства на довкілля та оцінки його інвестиційної привабливості, зокрема вирішення проблем збереження енергії та ресурсів [1-2]. А оскільки одним з головних споживачів природних ресурсів та енергії є промислові підприємства різних галузей народного господарства (також ці підприємства є широкомасштабними забруднювачами довкілля), то для них конче потрібна модернізація виробництв із застосуванням методів системного екологічного підходу. Під цим терміном ми розуміємо комплекс технологічних, управлінських і господарчих удосконалень і нововведень, які здатні поліпшити екологічні характеристики підприємства і зменшити його негативний тиск на природу та людину.

Розв'язати цю задачу можливо за допомогою системного аналізу, який широко застосовується як в промисловості, так і в моделюванні соціально-економічних та екологічних систем [2-7]. Пояснимо це на схемі (див. рисунок):