

УДК 536.755+621.3

І. Щур, докт.техн.наук

Національний університет "Львівська політехніка", Україна

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ НЕРІВНОВАЖНИХ ПРОЦЕСІВ ЕНЕРГОПЕРЕТВОРЕННЯ – НОВИЙ НАПРЯМ У ПІДВИЩЕННІ ЕНЕРГООЩАДНОСТІ

На принципах термодинаміки нерівноважних процесів (перетворювачів енергії) розроблено теоретичні основи нового наукового напрямку – енерготехнології. Перевагами запропонованого підходу є: уніфікація, наочність та простота формування різних критеріїв енергетичної ефективності. Показано приклад застосування цього підходу до задач електротехніки.

Вступ

XX століття ознаменувалося бурхливим розвитком різних галузей науки як в теоретичному, так і в прикладному напрямках. У цей же час розвинулася інша наука – класична термодинаміка, яка завдяки феноменологічному підходу до макроскопічного опису систем є фундаментальною і дозволяє аналізувати енергоперетворення у явищах різної природи (фізичних, хімічних, біологічних) і навіть досліджувати закономірності в інформаційних, суспільних системах тощо. Проте об'єкти механіки, електротехніки, світлотехніки, за малим виключенням, не стали предметами дослідження термодинаміки, оскільки для них були розроблені свої методи і закони, які, як правило, мають узагальнені відповідники в термодинаміці. Термодинаміку використовували переважно для опису оборотних процесів та ізольованих систем зі значною часткою теплової енергії, звідки й походить назва науки. Термодинаміка нерівноважних процесів (ТД НП), яка розвинулася з класичної термодинаміки у другій половині XX ст., підвела загальні теоретичні основи під енергетичні закономірності не лише ізольованих, а й закритих і відкритих систем з реальними необоротними процесам та врахуванням їх швидкості протікання. В результаті був розроблений чіткий математичний апарат, особливо для лінійних систем, який дозволяє уніфікувати опис енергетичних перетворень. В наш час, коли гостро постала проблема ощадного використання енергії, є доцільною і перспективною розробка на основі підходів ТД НП теоретичних основ нового наукового напрямку – енерготехнології, в рамках якого були б розроблені як загальні принципи ощадного використання енергії в техніці, так і шляхи підвищення енергетичної ефективності конкретних технологічних процесів в різних галузях техніки – електротехніці, світлотехніці тощо, а особливо в комплексних енергетичних системах, де мають місце явища різної фізичної природи.

Термодинамічний аналіз перетворювачів енергії

Для будь-якої неізольованої системи, яка обмінюється енергією і речовиною із зовнішнім середовищем, зміна ентропії виражається двома членами: $d_e S$ – зовнішнім, зумовленим обмінами із зовнішнім середовищем (потік ентропії); $d_i S$ – внутрішнім, зумовленим нерівноважними процесами всередині системи (виробництво ентропії). Виходячи з цього, узагальнена форма другого закону термодинаміки для неізольованих систем виражається наступною залежністю швидкості виробництва ентропії в системі:

$$\sigma_s = \frac{d_i S}{dt} \geq 0. \quad (1)$$

Оскільки кожен реальний необоротний процес супроводжується якимось внутрішнім потоком \vec{J}_k , що породжується відповідною рушійною силою \vec{X}_k , яка виражає нерівноважність, то доказано [1], що в умовах локальної рівноваги має місце рівність

$$\sigma_s = \sum_i \vec{J}_k \vec{X}_k. \quad (2)$$

Принцип локальної рівноваги, що лежить в основі ТД НП, полягає в тому, що за нерівноважного стану тіла при не дуже швидкоплинних процесах стан дуже малих його елементів можна вважати рівноважним і застосувати до нього рівняння класичної ТД [2]. Добуток σ_s на абсолютну температуру системи носить назву дисипативної функції, оскільки відображає швидкість дисипації (розсіяння, деградації) вільної енергії системи.

Для умов локальної рівноваги справедливим є також феноменологічний закон, який виражає інтенсивність будь-якого потоку у вигляді добутків ТД-сил \vec{X}_i і відповідних кінетичних коефіцієнтів L_{ki} (принцип лінійності Онзагера):

$$\vec{J}_k = \sum_i L_{ki} \vec{X}_i. \quad (3)$$

Вираз (2) показує, що один потік може спонукатися різними термодинамічними рушійними силами. Проте, відповідно до принципу Кюри [2], різні рушійні сили можуть одночасно впливати на пернос, якщо вони є тензорами одного рангу, наприклад, тільки скаляри або тільки вектори. У виразах (2) і (3) потоки і сили мають векторний характер, що найчастіше буває на практиці.

Відповідно до другого закону ТД (1), сума в рівнянні (2) повинна бути більшою від нуля. Але це не означає, що кожен із членів цієї суми окремо повинен бути більшим від нуля. Можливі випадки, коли одні члени додатні, тобто продукують ентропію, при умові, що інші від'ємні, тобто споживають надлишкову кількість ентропії. Це явище

яке полягає в тому, що одні процеси можуть спонукати інші процеси протікати в термодинамічно невігідному напрямку (проти рушійної сили, "під гору"), було названо ТД-спряженням [3]. Так, для двох спряжених процесів, до яких належить будь-який перетворювач енергії (ПЕ), оскільки його вихідні параметри (o – output) визначаються вхідними (i – input), можна записати наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} J_i = L_{ii} X_i + L_{io} X_o \\ J_o = L_{oi} X_i + L_{oo} X_o \end{cases} \quad (4)$$

де кінетичні або "феноменологічні" коефіцієнти знаходяться з виразів

$$L_{jk} = \left(\frac{\partial J_j}{\partial X_k} \right)_{X_j = \text{const}} \quad (5)$$

За визначенням X_i , X_o та J_i додатні, а J_o - від'ємний, що означає поглинання енергії на вході і утворення її на виході, тому L_{ii} , L_{oo} та $-L_{io}$ повинні бути додатними.

Завдяки ТД НП з допомогою рівнянь (2)-(5) були відкриті нові, а також досліджені відомі спряжені ефекти: термоелектричні, п'єзоелектричні, термодифузні, електрокінетичні, магнітострікційні, оптико-акустичні і т. п. [1-3]. Л.Онзагер відкрив загальний принцип, що називається співвідношення взаємності Онзагера, який можна називати четвертим законом ТД [4], за що був удостоєний Нобелівської премії. 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 співпадає з аналогічною залежністю потоку J_k від сили X_j . Співвідношення взаємності Онзагера дозволяють суттєво скоротити число незалежних коефіцієнтів у системах типу (4). Справедливість співвідношень взаємності Онзагера не обмежується квазірівноважними системами (співвідношення взаємності стосуються перших похідних (5) в точці рівноваги), проте їх сила тим вища, чим система ближча до рівноваги. Для суттєво нерівноважних систем лінійні залежності (4) і співвідношення взаємності часто справджуються завдяки справедливості принципу локальної рівноваги для окремих малих частин, на які розпадається кожна велика система, яка знаходиться під впливом градієнтів ТД-сил [4]. Відповідно до другого закону ТД (1), на допустимі значення кінетичних коефіцієнтів накладаються обмеження – матриця коефіцієнтів L повинна бути невід'ємно визначеною, тобто

$$(L_{io})^2 \leq L_{ii} L_{oo} \quad (6)$$

Якщо всередині ізольованої системи під дією якихось сил проходить перенос маси та енергії, то величина цієї сили зменшується, і система наближається до стану рівноваги, при якому її ентропія має максимальне значення. Ентропія системи в будь-якому її стані є мірою

II міжнародна науково-технічна конференція

наближення системи до рівноваги, а швидкість її зміни в часі (1), або потік ентропії J_S , дає кількісну оцінку результатів переносу, що проходить під дією якихось рушійних сил. Чим менші ці сили, тим менша нерівноважність і тим меншою є дисипація енергії (2) та енерговтрати. Для неізольованих систем, відповідно до принципу мінімуму І.Пригожина, ще одного Нобелівського лауреата в даній царині, потік ентропії буде набувати свого найменшого значення у стаціонарних процесах, причому, зрозуміло, що він буде тим меншим, чим меншою буде швидкість цього процесу [2].

Описані вище результати ТД НП покладені в основу теорії ТД-аналізу ПЕ [4,5].

З аналізу системи (4) зрозуміло, що чим більш від'ємне значення L_{i0} (в порівнянні зі значеннями решти коефіцієнтів L), тим вищий ступінь впливу сили на вході на вихідний потік. Крім того, при більш від'ємних значеннях L_{i0} збільшується ступінь пригнічення вхідного потоку силою на виході. Таким чином, коефіцієнт L_{i0} пов'язаний зі ступенем спряження q між собою вхідного і вихідного процесів у ПЕ. Для уникнення впливу на q величин інших кінетичних коефіцієнтів ступінь спряження був визначений як коефіцієнт L_{i0} , нормований на коефіцієнти L_{ii} і L_{oo} :

$$q = \frac{L_{i0}}{\sqrt{L_{ii}L_{oo}}} . \quad (7)$$

Відповідно до такого визначення, q буде від'ємним і набуватиме, зважаючи на (6), значень від -1 до 0 .

З метою отримання універсальних характеристик ПЕ у відносних одиницях, вводяться ще два показники:

- *відношення сил*

$$\chi = X_o / X_i ; \quad (8)$$

- *феноменологічне співвідношення*

$$Z = \sqrt{L_{oo}/L_{ii}} . \quad (9)$$

Пронормувавши вхідний та вихідний потоки на вихідний потік при нульовій вихідній силі (потік короткого замикання), систему рівнянь (4) можна переписати з використанням введених позначень

$$\begin{cases} \frac{J_i}{L_{ii} X_i} = q \cdot (Z\chi) + 1 \\ \frac{J_o}{ZL_{ii} X_i} = Z\chi + q \end{cases} , \quad (10)$$

а відношення потоків визначити таким чином:

$$\frac{J_o}{J_i} = Z \frac{(Z\chi) + q}{q \cdot (Z\chi) + 1}. \quad (11)$$

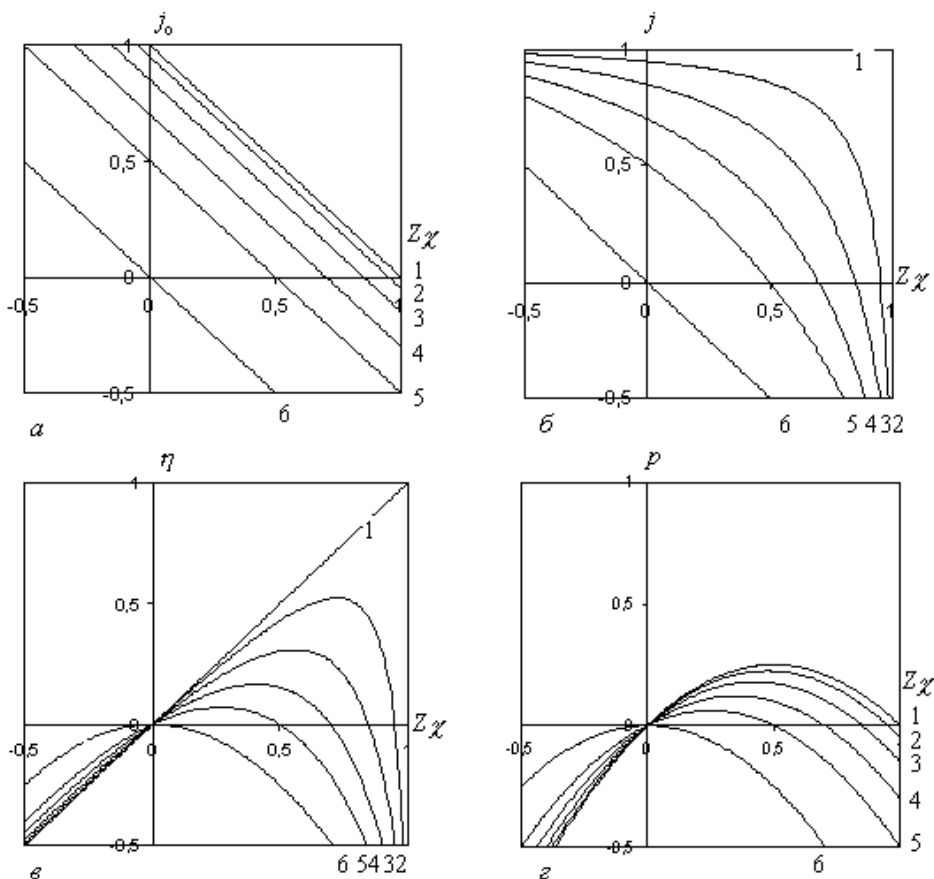


Рис. 1. Залежності нормованого вихідного потоку (а), нормованого відношення потоків (б), термодинамічної ефективності (в) і нормованої вихідної потужності (г) від нормованого відношення сил при різних ступенях спряження q :
 1 – $q = -1,0$; 2 – $q = -0,95$; 3 – $q = -0,85$; 4 – $q = -0,7$; 5 – $q = -0,5$;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

У виразах (10) та (11) добуток $(Z\chi)$ є безрозмірною величиною, яка виражає приведені відношення сил. Зміст q також стає зрозумілим: при $q = -1$ вихідний потік відрізняється від вхідного завжди в $-Z$ разів – отже, потоки жорстко (повністю) спряжені. При $q = 0$ вхідний і вихідний потоки викликаються лише своїми силами і протікають в напрямку їх зменшення, тобто потоки зовсім не спряжені. При значеннях q від -1 до 0 вихідний потік підтримується вхідним потоком у напрямку "під гору", проте відношення цих потоків змінюється разом зі зміною $(Z\chi)$, тобто вхідний та вихідний процеси в цьому випадку частково спряжені. На рис. 1,а,б приведені універсальні графічні залежності відповідно приведеного вихідного потоку

II міжнародна науково-технічна конференція

$j_o = -J_o / (ZL_{ii} X_i)$ (друге рівняння в системі (10)) та нормованого відношення потоків $j = -J_o / (ZJ_i)$ від нормованого відношення сил $(Z\chi)$ при різних значеннях ступеня спряження.

Важливою характеристикою ПЕ є ТД-ефективність їх функціонування, тобто відношення швидкості, з якою ПЕ виробляє вихідну вільну енергію, до швидкості, з якою він споживає вхідну вільну енергію:

$$\eta = -\frac{J_o X_o}{J_i X_i} = -j\chi = -(Z\chi) \frac{(Z\chi) + q}{q \cdot (Z\chi) + 1}. \quad (12)$$

Графічна залежність (12) при різних значеннях q показана на рис. 1, в. З (12) легко знаходиться оптимальне з точки зору ТД-ефективності відношення сил

$$(Z\chi)_{\text{opt-}\eta} = -\frac{q}{1 + \sqrt{1 - q^2}}, \quad (13)$$

при якому ТД-ефективність має максимальне значення, рівне

$$\eta_{\text{max}} = (Z\chi)_{\text{opt-}\eta}^2. \quad (14)$$

Робота ПЕ в точці з максимальною ТД-ефективністю є привабливою на перший погляд, проте при високих ступенях спряження ($|q| \rightarrow 1$) вона може бути недоцільною, оскільки вихідний потік наближається до нуля, тобто вихідний процес протікає з дуже малою швидкістю. Для того, щоб перетворення енергії проходило з більшою швидкістю, необхідно частково пожертвувати ТД-ефективністю.

Одним з доцільних варіантів вибору робочої точки ПЕ може бути режим максимальної вихідної потужності. Нормоване значення вихідної потужності можна виразити наступним чином:

$$p = -\frac{J_o X_o}{L_{ii} X_i^2} = -[(Z\chi) + q] \cdot (Z\chi). \quad (15)$$

Графічна залежність (15) при різних q показана на рис. 1, г. Максимум вихідної потужності $p_{\text{max}} = q^2/4$ досягається при $(Z\chi)_{\text{max}, p} = -q/2$. Однак, як видно з рис. 1, в і г, максимальна вихідна потужність супроводжується досить низькою ТД-ефективністю і може

бути рекомендована хіба що для ПЕ, підключених до дармових джерел енергії, наприклад, природних поновлювальних.

Використовуючи отримані універсальні залежності (10)-(12) і (15), можна шляхом комбінації двох показників легко формувати інші доцільні для конкретних ПЕ критерії оптимальної роботи [4], наприклад: максимальний вихідний потік при оптимальній ТД-ефективності, максимальна вихідна потужність при оптимальній ТД-ефективності, максимум добутку $[J_o/(ZL_i X_i)] \cdot \eta$ (так званий "економічно вигідний вихідний потік"), максимум добутку $p\eta$ (так звана "економічно вигідна вихідна потужність") тощо. Методика забезпечення вказаних оптимальних режимів полягає у такій зміні доступних кінетичних коефіцієнтів вихідної моделі (4), щоб отримати потрібну комбінацію параметрів ($Z\chi$) і q , при якій вибраний критерій досягає свого максимального значення. Наприклад, для критерію максимального вихідного потоку при оптимальній ТД-ефективності оптимальна робоча точка досягається за таких значень параметрів: $(Z\chi)=0,486$; $q=-0,786$; $\eta=0,236$.

Побудована за принципом рівнянь Онзагера лінійна математична модель ПЕ описує стаціонарні режими роботи. Значний практичний інтерес складають нестационарні, динамічні режими роботи ПЕ, у яких, відповідно до принципу мінімуму Пригожина, генерується значно більше ентропії. Проведені дослідження [] показали, що лінійними рівняннями Онзагера аналогічно вищевикладеному, але в операційній формі можна представити динамічну систему. Вона будується для зображень за Лапласом потоків і сил та характеризується змінними у часі кінетичними коефіцієнтами, що пов'язано з наявністю різноманітних сталих часу (фізично – акумуляторів енергії), проте співвідношення взаємності мають місце у будь-який момент часу. За такою динамічною моделлю системи можна будувати аналогічні критерії оптимальності для нестационарних режимів роботи, але відповідні розрахунки слід проводити вже з оригіналами зображень.

Таким чином, на основі викладеного можна запропонувати методику енергетичної оптимізації стаціонарного режиму роботи ПЕ, яка полягає в наступному.

1. На підставі аналізу фізичних процесів, які мають місце в конкретному ПЕ, виходячи із визначеної дисипативної функції, необхідно вибрати пари вхідних та вихідних ТД-сил і потоків. Цей етап є найбільш складним і відповідальним, оскільки потребує певного досвіду. Рекомендації щодо його проведення можна знайти в [1].

2. Для отриманих вхідних і вихідних потоків і сил побудувати математичну модель і скласти лінійні рівняння Онзагера (4), що описують досліджуваний ПЕ, та знайти вирази для його основних

II міжнародна науково-технічна конференція

параметрів: q, Z, χ . Цей етап має свої особливості в залежності від типу системи і її складності:

а) У випадку лінійності системи та можливості її математичного опису за умови правильності вибору потоків і сил виконання цього етапу не складає спеціальних труднощів.

б) У випадку нелінійності системи для кожної робочої точки (X_1, X_0) система характеризується своїми кінетичними коефіцієнтами, значення яких можна знайти за виразами (5). Тому нелінійну математичну модель системи необхідно дослідити для ряду робочих точок, які складають практичний інтерес, і далі за отриманими результатами можна порахувати значення параметрів q, Z, χ .

в) У випадку складності математичного опису системи її можна дослідити експериментально. Правильно вибрати ТД-потоки і сили можна лише після проведення ряду експериментів та математичної обробки їх результатів з метою отримання лінійних залежностей між парами потоків та сил. Далі кінетичні коефіцієнти можна розрахувати з системи рівнянь (4) за результатами дослідів короткого замикання $(X_0 = 0)$ і неробочого ходу $(J_0 = 0)$ або у випадку неможливості їх проведення – за результатами вимірювань у двох точках і обчислень за виразами (5), замінивши диференціали параметрів на відповідні прирости.

3. Обґрунтувати найбільш доцільний критерій енергетичної оптимізації та скласти його математичний вираз.

4. Підставити значення q, Z і χ у вираз критерію оптимізації та дослідити його на максимум почергово за доступними параметрами вихідної математичної моделі.

5. Порівняти між собою отримані результати і вибрати найкращий варіант оптимізації.

Приклад

Як приклад для ілюстрації застосування запропонованого методу візьмемо електромеханічний ПЕ – електропривід постійного струму незалежного збудження за класичною схемою з шунтуванням якоря [7]. Вибір такої схеми зумовлений, перш за все, порівняно низьким спряженням вхідного і вихідного процесів, а також широкими можливостями вибору робочої точки з порівняно важко прогнозованими показниками. Схема електропривода, що живиться від джерела напруги ДН показана на рис.2.

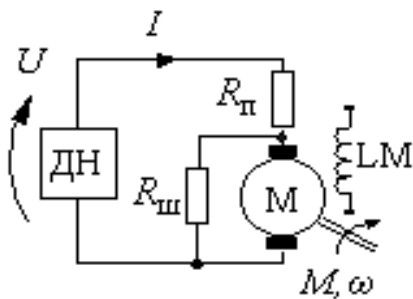


Рис. 2. Схема електро-механічного ПЕ

Аналіз дисипативної функції даного ПЕ показує, що вхідною силою

"СВІТЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

слід вибрати напругу ДН U , вхідним потоком – споживаний струм I , вихідною силою – кутову швидкість обертання двигуна ω , а вихідним потоком – його електромагнітний момент M . З відомих рівнянь для машини постійного струму та рівнянь рівноваги напруги за другим законом Кірхгофа отримана наступна система лінійних рівнянь Онзагера:

$$\begin{cases} I = \frac{\alpha(1+R_{\text{я}}/R_{\text{ш}})}{R_{\text{я}}+R_{\text{п}}\alpha}U - \frac{\alpha k\Phi}{R_{\text{я}}+R_{\text{п}}\alpha}\omega \\ -M = -\frac{\alpha k\Phi}{R_{\text{я}}+R_{\text{п}}\alpha}U + \frac{k^2\Phi^2}{R_{\text{я}}+R_{\text{п}}\alpha}\omega \end{cases}, \quad (16)$$

де $R_{\text{я}}$ - опір якоря двигуна; k – конструктивний коефіцієнт; Φ – магнітний потік, а відношення додаткових опорів позначено

$$\alpha = \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} + R_{\text{п}}}. \quad (17)$$

Для подальшого аналізу енергетики цієї схеми доцільно перейти до відносних одиниць, здійснивши нормування на номінальні значення параметрів двигуна $U_{\text{д.н}}$, $I_{\text{д.н}}$, $M_{\text{н}}$, $\omega_{\text{о}} = U_{\text{д.н}}/k\Phi_{\text{н}}$ та ввівши позначення:

$$\begin{aligned} U^* &= \frac{U}{U_{\text{д.н}}}; \\ I^* &= \frac{I}{I_{\text{д.н}}}; \quad M^* = \frac{M}{M_{\text{н}}}; \quad \Phi^* = \frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}}; \quad \omega^* = \frac{\omega}{\omega_{\text{о}}}; \quad R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{д.н}}}{I_{\text{д.н}}}; \\ R^* &= \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{п}}\alpha}{R_{\text{н}}}; \quad \xi = \sqrt{\frac{R_{\text{п}} + R_{\text{ш}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{ш}}}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha \cdot (1 + R_{\text{я}}/R_{\text{ш}})}}. \end{aligned}$$

В результаті отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} I^* = \frac{1}{R^*\xi^2}U^* - \frac{\alpha\Phi^*}{R^*}\omega^* \\ -M^* = -\frac{\alpha\Phi^*}{R^*}U^* + \frac{(\Phi^*)^2}{R^*}\omega^* \end{cases}. \quad (18)$$

З системи рівнянь (18) за виразами (7)-(9) легко знаходяться основні параметри досліджуваного ПЕ:

$$q = -\alpha\xi; \quad Z = \Phi^* \xi; \quad \chi = \frac{\omega^*}{U^*}; \quad Z\chi = \frac{\omega^* \Phi^*}{U^*} \xi. \quad (19)$$

З (18) також випливає, що при неробочому ході ($M^* = 0$) відносна кутова швидкість двигуна $\omega^* \Phi^* / U^* = \alpha$. Тому, враховуючи вирази (19), дуже наочним буде поєднання кривих ТД-ефективності (рис. 1, в) з механічними характеристиками привода у відносних одиницях, як показано на рис. 3 (для спрощення прийнято $U^* = 1$; $\Phi^* = 1$). Для будь-

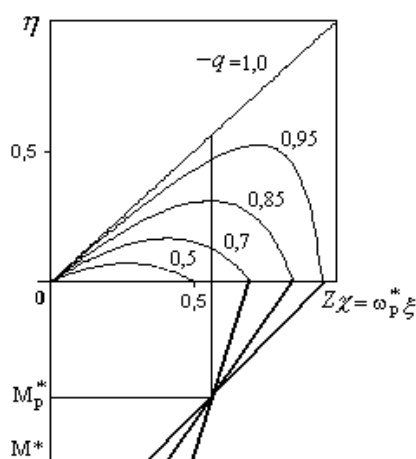


Рис. 3. Зв'язок ТД-ефективності η з механічними характеристиками електропривода при шунтуванні якоря двигуна

яких заданих параметрів робочої точки привода – відносних значень моменту навантаження M_p^* та кутової швидкості ω_p^* – можна легко візуально і аналітично оцінити, як пов'язані між собою такі взаємно суперечливі показники як енергетична ефективність та жорсткість механічної характеристики. При заданій жорсткості можна зразу сказати про ККД такого привода.

За отриманими вище виразами (12)-(15) легко здійснити оптимізацію параметрів даного ПЕ за якимось із критеріїв. У таблиці приведені основні залежності, отримані для двох критеріїв: максимальної енергетичної ефективності та максимальної

вихідної потужності. Крім вказаних виразів, вихідним спільним рівнянням є також рівняння механічної характеристики привода – друге рівняння системи (18). Розв'язок вихідних рівнянь приводить до виразів оптимальних параметрів через координати робочої точки (ω_p^* , M_p^*). У випадках відмінності від одиниці параметрів U^* , Φ^* , що прийнято з метою спрощення виразів у таблиці, замість ω_p^* необхідно підставляти $\omega^* \Phi^* / U^*$, а замість M_p^* – вираз $M_p^* / (U^* \Phi^*)$. Графічне дослідження отриманих виразів α і ξ показало, що при умові $\omega_p^* > 0,2$ вплив множника $M_p^* R^*$ на отримані вирази є незначним, тому ним можна знехтувати і отримати наближені прості результати дослідження, які приведені внизу таблиці. Параметри електричної схеми ПЕ визначаються за отриманими оптимальними значеннями α і ξ з виразів

$$R_{\Pi}^* = R_{\text{я}}^* \frac{(1-\alpha)\xi^2}{1-\alpha\xi^2}; \quad R_{\text{ш}}^* = R_{\text{я}}^* \frac{\alpha\xi^2}{1-\alpha\xi^2}.$$

Таблиця
Основні результати оптимізації електромеханічного ПЕ

	Критерій оптимальності	
	Максимальна енергетична ефективність	Максимальна вихідна потужність
Вихідні рівняння	$\frac{\omega_p^* \Phi^*}{U^*} = \frac{\alpha_{\text{opt-}\eta}}{1 + \sqrt{1 - \alpha_{\text{opt-}\eta}^2 \xi^2}}$	$\frac{\omega_p^* \Phi^*}{U^*} = \frac{\alpha_{\text{opt-p}}}{2}$
	$\frac{\omega_p^* \Phi^*}{U^*} = \alpha_{\text{opt-}\eta} - \frac{R^*}{U^* \Phi^*} M_p^*$	
Вирази для оптимальних параметрів як функцій координат робочої точки (ω_p^* , M_p^*) при $U^* = 1$ і $\Phi^* = 1$	$\alpha_{\text{opt-}\eta} = \frac{\omega_p^* (\omega_p^* + M_p^* R^* - 2)}{M_p^* R^* - 1}$ $\xi = \sqrt{\frac{M_p^* R^* - \omega_p^*}{(\omega_p^*)^2 (\omega_p^* + M_p^* R^* - 1)}}$ $\eta_{\text{max}} = (\omega_p^* \xi)^2$	$\alpha_{\text{opt-p}} = 2\omega_p^*$ $\xi = \frac{1}{\omega_p^*} \sqrt{\frac{\omega_p^* - M_p^* R^*}{2(1 - 2M_p^* R^*)}}$ $P_{\text{max}} = \frac{(\alpha_{\text{opt-p}} \xi)^2}{4}$
Графічне представлення параметрів α і ξ як функцій координат робочої точки (при $R^* = 0,05$)		
Результати досліджень	$\alpha_{\text{opt-}\eta} \approx \omega_p^* (2 - \omega_p^*)$	$\alpha_{\text{opt-p}} = 2\omega_p^*$
	$\xi \approx \frac{1}{\sqrt{\alpha_{\text{opt}}}}; \quad -q \approx \sqrt{\alpha_{\text{opt}}}; \quad Z\chi_{\text{opt}} \approx \frac{\omega_p^*}{\sqrt{\alpha_{\text{opt}}}}$	

Висновок

Використання підходів лінійної ТД НП для моделювання процесів енергоперетворення в об'єктах різної природи відкриває нові можливості їх енергетичного аналізу і оптимізації та забезпечує чіткий,

II міжнародна науково-технічна конференція

наочний математичний апарат, що дає змогу отримувати універсальні практичні результати.

The theoretical foundations of a new scientific direction – energy technology – were developed on the principles of thermodynamics of irreversible processes (energy converters). The advantages of the suggested approach are: unification, visuality and simplicity of forming various criteria of energy efficiency. The example of application of this approach to problems of electric engineering was given.

Література

1. Де Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика: Пер. с англ. – М.: Мир, 1964.
2. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур: Пер. с англ. – М.: Мир, 2002. – 461 с.
3. Вейник А. Термодинамическая пара. – Мн.: Наука и техника, 1973. – 384 с.
4. Вестерхоф Х., ван Дам К. Термодинамика и регуляция превращений свободной энергии в биосистемах: Пер. с англ. М., 1992. – 686 с.
5. Эткин В.А. Термодинамика неравновесных процессов переноса и преобразования энергии. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1991. – 168 с.
6. Когут А., Щур І.З. Опис динамічних процесів у двигуні постійного струму з точки зору термодинаміки нерівноважних процесів // Електроенергетичні та електромеханічні системи: Вісн. Націон. ун-ту “Львівська політехніка”. – №551. – Львів: Вид-во Націон. ун-ту “Львівська політехніка”, 2004. – С. 40-45.
7. Щур І.З. Моделювання електроприводів постійного струму методами лінійної термодинаміки нерівноважних процесів // Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2002, №12, т.2. – С.413-416.