

**Термодинамічний аналіз нерівноважних процесів енергоперетворення – новий напрям у підвищенні енергоощадності в електротехніці та світлотехніці**

**Ігор Щур,**

Національний університет

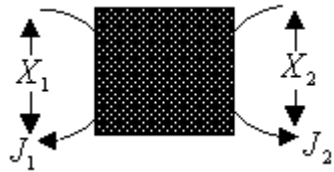
“Львівська політехніка”

# АНОТАЦІЯ

- *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 приклади успішного застосування цього підходу до задач електротехніки та світлотехніки.*

# Теоретичні основні перетворювачів енергії (ПЕ)

Загальна схема перетворювача вільної енергії та система рівнянь, що його описує



$$\sigma_s = \sum_k \vec{J}_k \vec{X}_k$$

$$\vec{J}_k = \sum_i L_{ki} \vec{X}_i$$

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

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

співвідношення  
взаємності  
Онзагера

$$L_{jk} = L_{kj}$$

## Основні параметри ПЕ

ступінь спряження

феноменологічне співвідношення

відношення сил

$$q = \frac{L_{io}}{\sqrt{L_{ii}L_{oo}}}$$

$$\chi = \frac{X_o}{X_i}$$

$$Z = \sqrt{\frac{L_{oo}}{L_{ii}}}$$

## Основні характеристики ПЕ

а) нормований вихідний потік

$$j_o = -\frac{J_o}{ZL_{ii}X_i} = -Z\chi - q$$

б) нормоване відношення вихідного потоку до вхідного

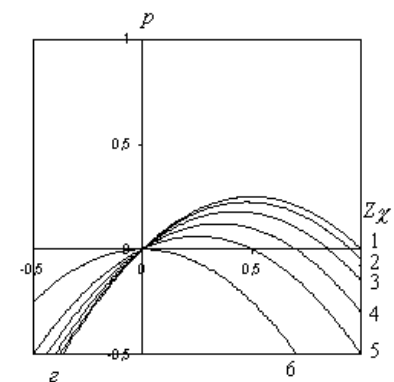
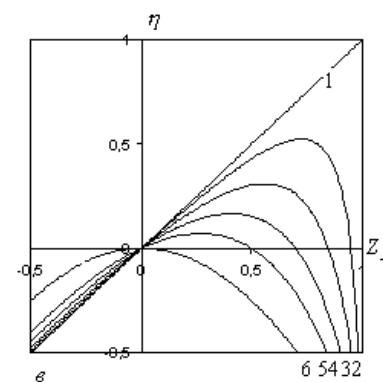
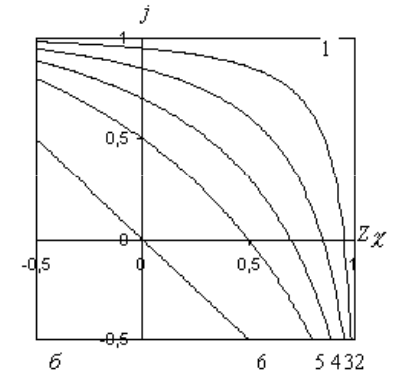
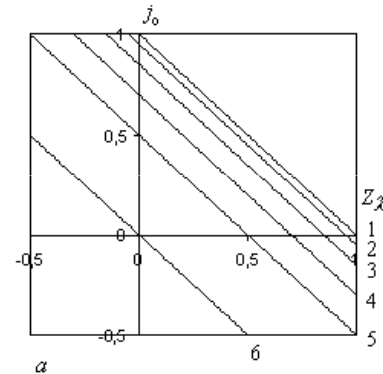
$$j = -\frac{J_o}{ZJ_i} = -\frac{(Z\chi) + q}{q \cdot (Z\chi) + 1}$$

в) термодинамічна ефективність перетворення вільної енергії

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

г) нормована вихідна потужність

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



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

## Критерії оптимізації перетворювачів енергії

Максимальна термодинамічна ефективність

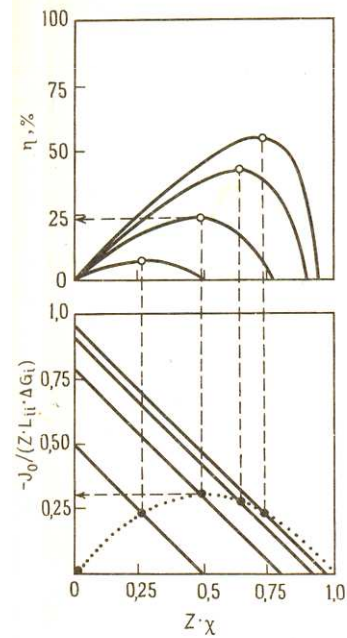
$$Z\chi_{\text{opt-}\eta} = -\frac{q}{1 + \sqrt{1 - q^2}} \quad \eta_{\text{opt}} = (Z\chi_{\text{opt-}\eta})^2$$

Максимальна вихідна потужність

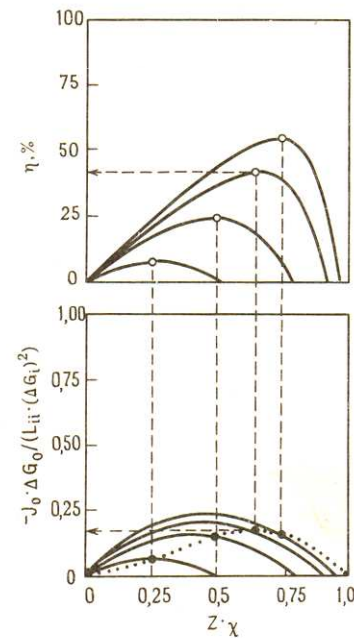
$$Z\chi_{\text{opt-p}} = -\frac{q}{2} \quad p_{\text{opt}} = \frac{q^2}{4}$$

### Комбіновані критерії оптимізації

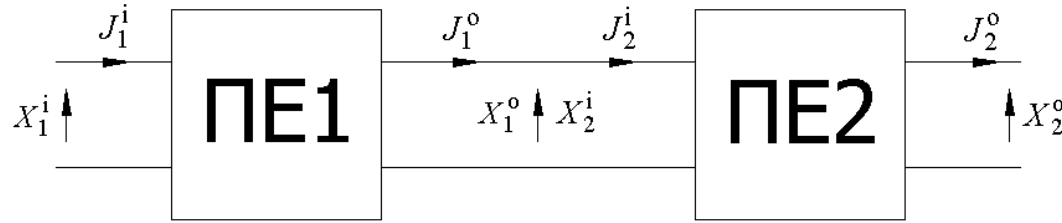
Максимальний вихідний потік при  
оптимальній термодинамічній  
ефективності



Максимальна вихідна потужність при  
оптимальній термодинамічній  
ефективності



## Послідовне з'єднання елементарних перетворювачів енергії



Система рівнянь, які описують еквівалентний ПЕ:

$$\begin{cases} J^i = L^{ii} X^i + L^{io} X^o \\ J^o = L^{oi} X^i + L^{oo} X^o \end{cases}$$

$$\begin{cases} J_1^i = L_1^{ii} X_1^i + L_1^{io} X_1^o \\ J_1^o = L_1^{oi} X_1^i + L_1^{oo} X_1^o \end{cases}$$

$$\begin{cases} J_2^i = L_2^{ii} X_2^i + L_2^{io} X_2^o \\ J_2^o = L_2^{oi} X_2^i + L_2^{oo} X_2^o \end{cases}$$

$$L^{ii} = L_1^{ii} - \frac{L_1^{io2}}{L_1^{oo} + L_2^{ii}}, \quad L^{oo} = L_2^{oo} - \frac{L_2^{io2}}{L_1^{oo} + L_2^{ii}},$$

$$J^i = J_1^i, \quad J^o = J_2^o, \quad X^i = X_1^i, \quad X^o = X_2^o, \quad J_1^o = J_2^i, \quad X_1^o = X_2^i$$

$$L^{io} = \frac{L_1^{io} L_2^{io}}{L_1^{oo} + L_2^{ii}}$$

### Параметри еквівалентного ПЕ:

ступінь спряження

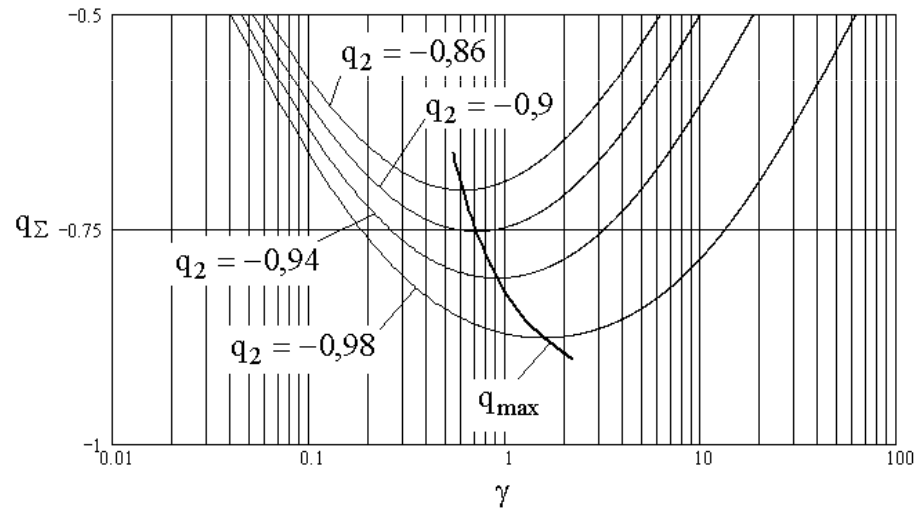
$$q_\Sigma = \frac{q_1 q_2}{\sqrt{(1 - q_1^2 + \gamma)(1 - q_2^2 + \gamma^{-1})}}$$

феноменологічне співвідношення

$$Z = Z_1 Z_2 \gamma \cdot \sqrt{\frac{1 - q_2^2 + \gamma^{-1}}{1 - q_1^2 + \gamma}}$$

співвідношення сил

$$\chi = \chi_1 \chi_2, \quad \text{де} \quad \gamma = \frac{L_2^{ii}}{L_1^{oo}}$$



Залежності ступеня спряження еквівалентного ПЕ від коефіцієнта зв'язку при заданому ступені спряження ПЕ1 (-0,95) та різних ступенях спряження ПЕ2

Оптимальний з точки зору ступеня спряження коефіцієнт зв'язку:

$$\gamma_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{1 - q_1^2}{1 - q_2^2}}$$

$$q_{\Sigma, \text{max}} = \frac{q_1 q_2}{\sqrt{a_1 a_2 \left(1 - \frac{2}{\sqrt{a_1 a_2}}\right)}}$$

$$\text{де} \quad a_2 = (1 - q_2^2) \\ a_1 = (1 - q_1^2)$$

## Електромеханічний ПЕ – електропривід постійного струму незалежного збудження за класичною схемою з шунтуванням якоря

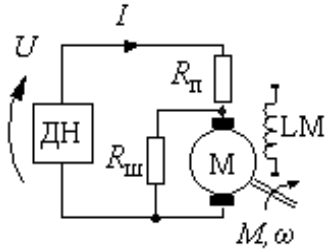
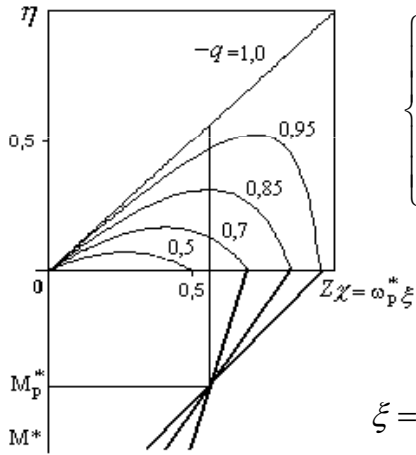


Схема електро-механічного ПЕ

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

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



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

$$R^* = \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{п}}\alpha}{R_{\text{н}}}$$

$$\xi = \frac{\sqrt{R_{\text{п}} + R_{\text{ш}}}}{\sqrt{R_{\text{я}} + R_{\text{ш}}}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha \cdot (1 + R_{\text{я}}/R_{\text{ш}})}}$$

Зв'язок ТД-ефективності  $\eta$  з механічними характеристиками електропривода при шунтуванні якоря двигуна

$$q = -\alpha \xi; \quad Z = \Phi^* \xi;$$

$$\chi = \frac{\omega^*}{U^*}; \quad Z\chi = \frac{\omega^* \Phi^*}{U^*} \xi$$

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

### Основні результати оптимізації електромеханічного ПЕ

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