

Електротехнічний факультет
Кафедра електропривода



Енергозбереження засобами електропривода

Енергетичні процеси в електроприводі

Лектор: Худолій Сергій Сергійович, к.т.н., професор

Розробники:

Для студентів напрямів підготовки: 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Доступне для завантаження на сайті кафедри: <http://elprivod.nmu.org.ua/ua/student/disciplines/eze.php>

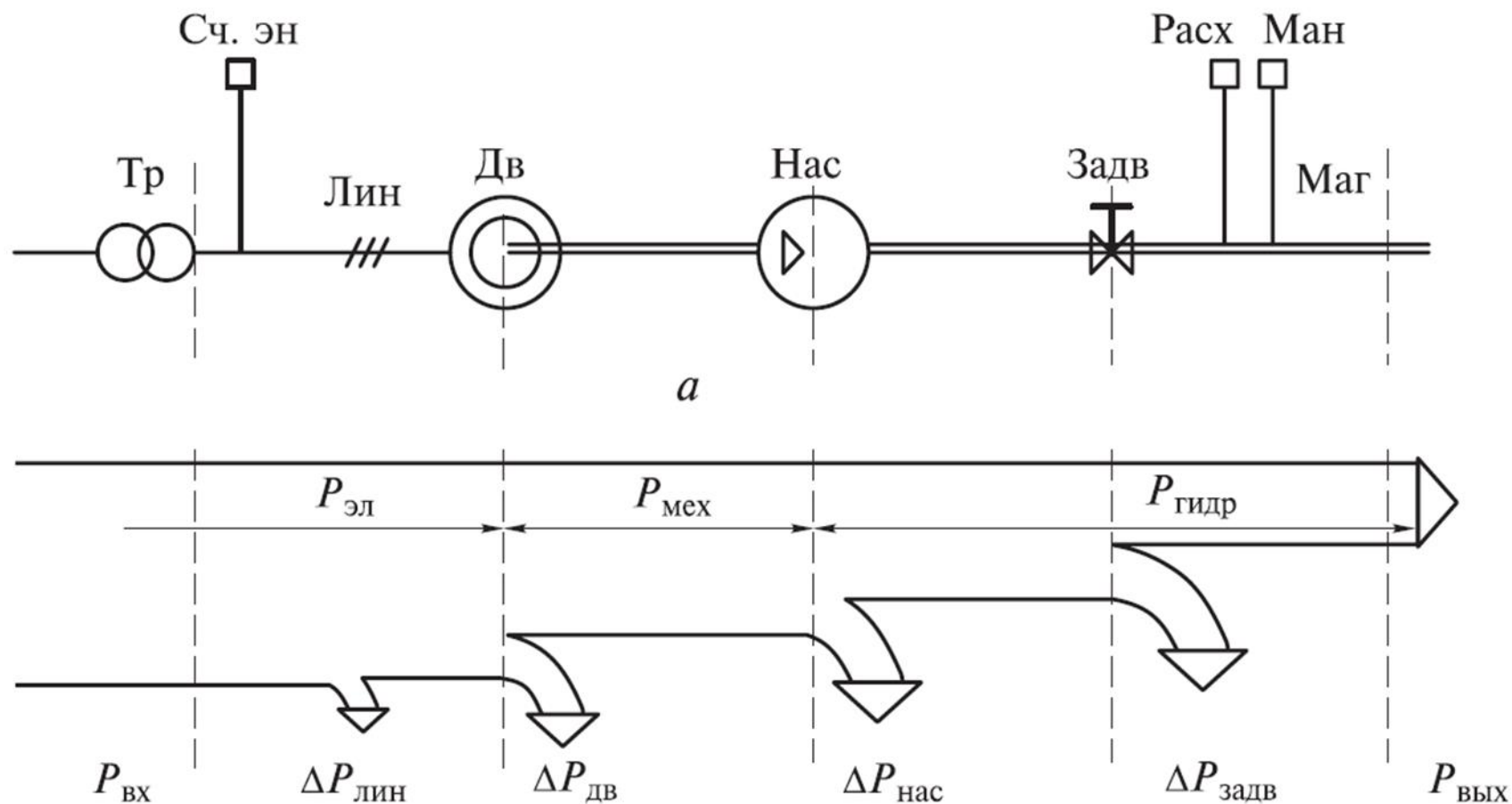


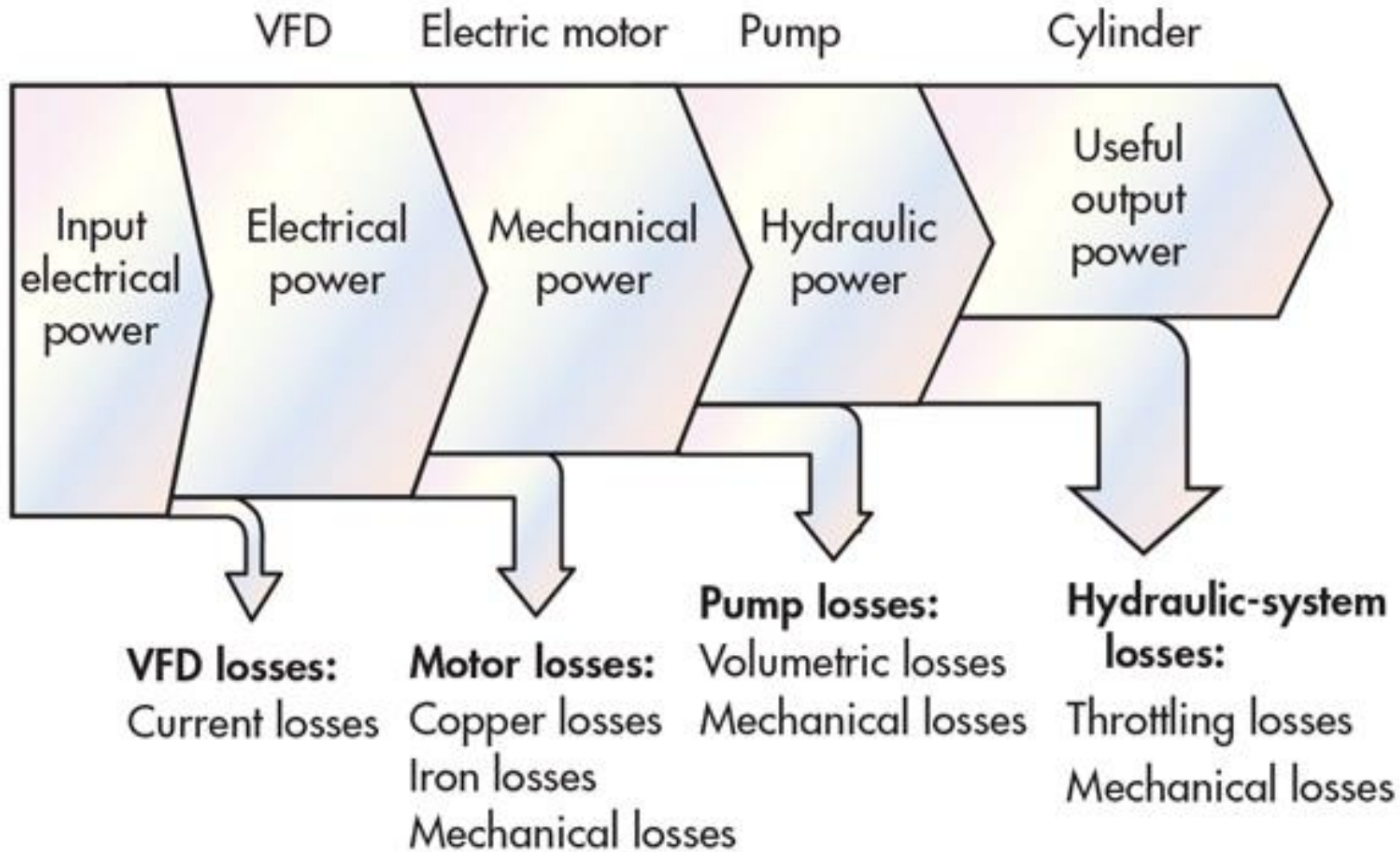
Зміст

1. Енергетичні процеси в електроприводі
2. Енергетичні характеристики асинхронного електропривода
3. Енергетичні характеристики електропривода постійного струму
4. Режим роботи електропривода.
5. Розрахунок встановленої потужності для типових механізмів.
6. Методи оцінки теплового стану електроприводу.
7. Розрахунок потужності перетворювача частоти.
8. Вибір гальмівного резистора для ПЧ-АД.

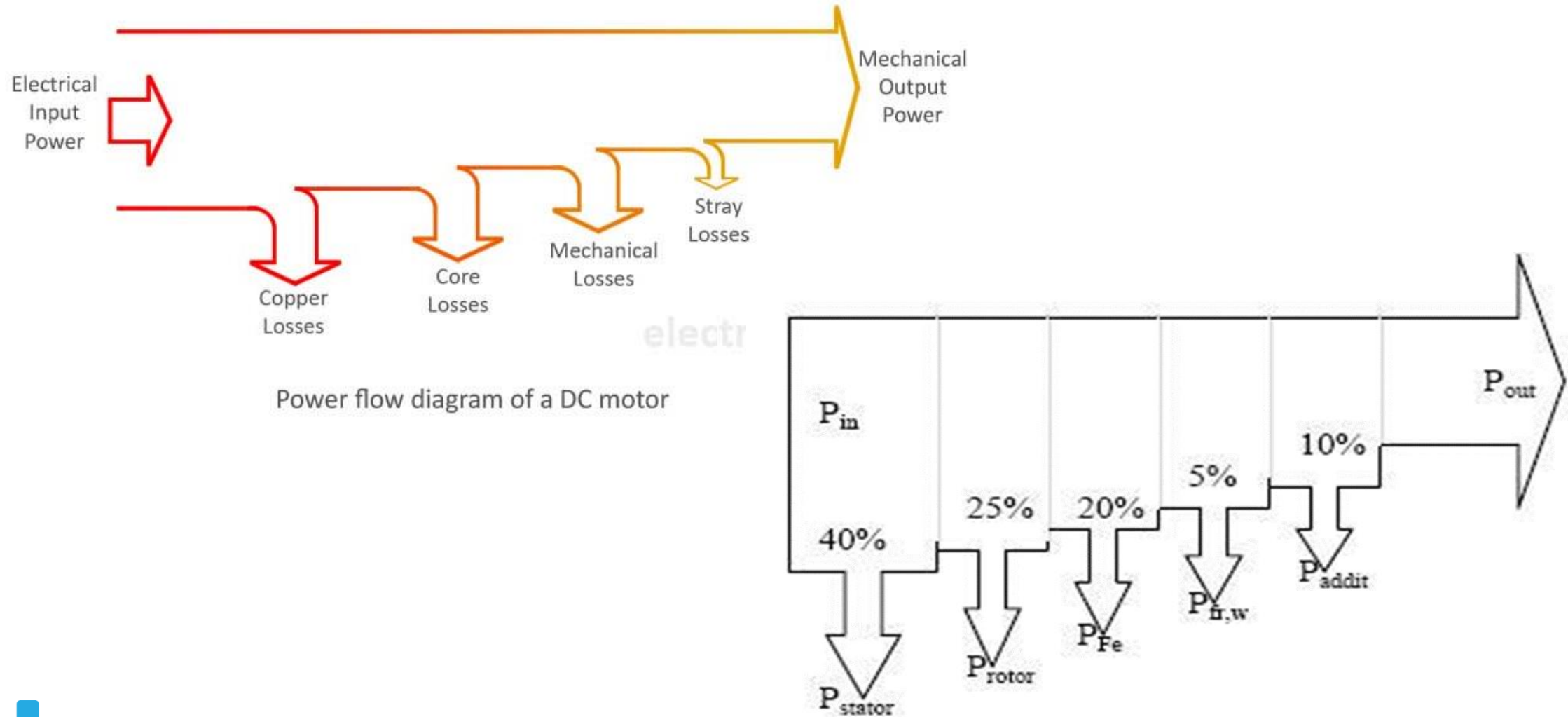


Енергетичні процеси в електроприводі



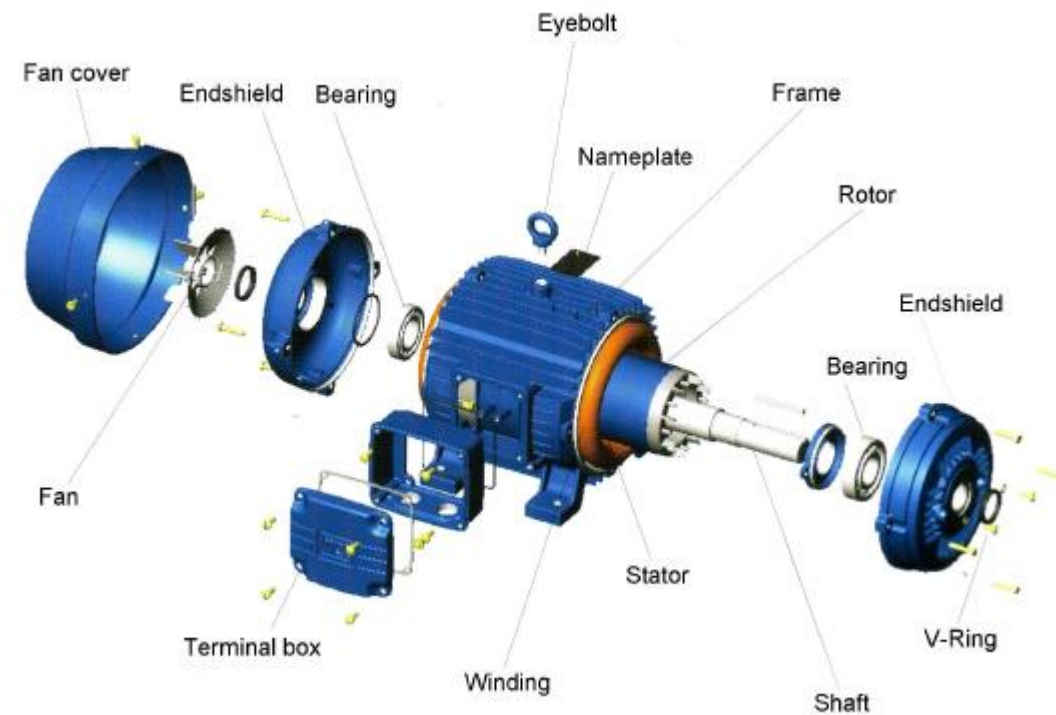
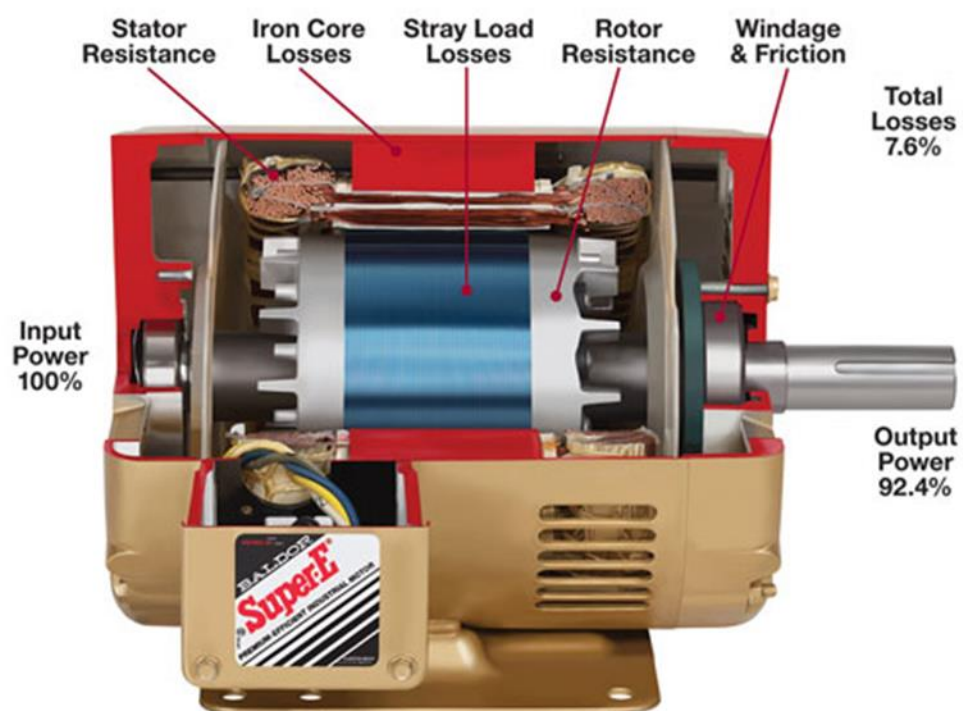


Енергетичні процеси в електроприводі



Енергетичні характеристики асинхронного двигуна

Motor Efficiency



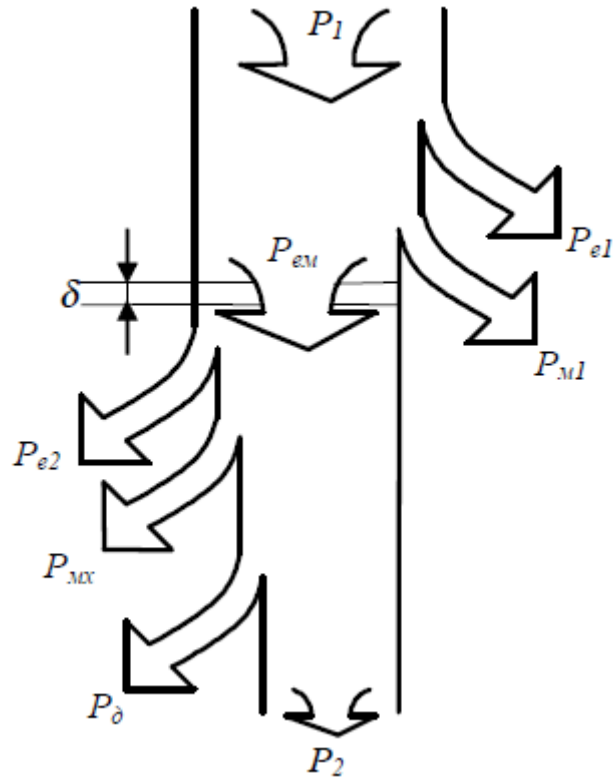
Відмови електродвигунів

Дані IEEE*		Дані EPRI**		Середнє значення
Причина відмови	%	Компонент, що відмовив	%	%
Пробій ізоляції внаслідок тривалого перевантаження	4,2%	Корпусна ізоляція статора	23,0%	Відмови електричної частини
Природне старіння ізоляції	26,4%	Ізоляція витків	4,0%	
		Бандаж	3,0%	
		Осердя статора	1,0%	
		Кліть ротора	5,0%	
Разом, електричні причини	30,6%	Разом, електричні причини	36,0%	33,3%
Надмірна вібрація	15,5%	Підшипники ковзання	16,0%	Відмови механічної частини
Недостатнє змащення	15,2%	Підшипники кочення	8,0%	
		Упорні підшипники	5,0%	
		Вал ротора	2,0%	
		Осердя ротора	1,0%	
Разом, механічні причини	30,7%	Разом, механічні причини	32,0%	31,4%
Надмірна температура експлуатації	3,0%	Ущільнення підшипників	6,0%	Порушення умов експлуатації
Надмірна вологість	5,8%	Витік мастила	3,0%	
Невідповідність напруги	1,5%	Пошкодження корпусу	1,0%	
Невідповідність частоти	0,6%	Порушення установки	1,0%	
Агресивні хімічні речовини	4,2%			
Порушення умов охолодження	3,9%			
Інші причини	19,7%	Інші причини	21,0%	
Разом, експлуатаційні причини	38,7%	Разом, експлуатаційні причини	32,0%	35,4%



Наслідки теплового пробою в обмотці





$$P_1 = \sqrt{3}U_{1л} \cdot I_{1л} \cdot \cos\varphi_1 = 3U_{1\phi} \cdot I_{1\phi} \cos\varphi_1 \quad - \text{електрична потужність}$$

$$P_{e1} = m_1 I_{1\phi}^2 \cdot r_1 \quad - \text{електричні втрати в обмотці статора}$$

$$P_{эм} = P_1 - (P_{e1} + P_{M.1}) \quad - \text{електромагнітна потужність}$$

$$P_{э2} = m_2 I_{2\phi}^2 \cdot r_2 = 3(I'_{2\phi})^2 \cdot r'_2 \quad - \text{електричні втрати в обмотці ротора}$$

$$P'_2 = P_{эм} - P_{э2} \quad - \text{механічна потужність}$$

$$P_{мх} + P_{\delta} = P_0 \quad - \text{втрати холостого ходу}$$

$$\Sigma p = P_{e1} + P_{M.1} + P_{э2} + P_{мх} + P_{\delta} \quad - \text{сума втрат}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad - \text{ККД}$$

$$P_1 = P_2 + \Sigma p, \quad \eta = \frac{P_1 - \Sigma p}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_1} \quad (75 \div 90)\%.$$



$$\Delta P_c = k_\xi \cdot (P/M)_{10/50} \cdot B^2 (f/50)^{1.5} M$$

де: k_ξ - додатковий коефіцієнт; $(P/M)_{10/50}$ - питомі втрати в залізі на одиницю маси при індукції 1 Тл та частоті 50 Гц; B - середнє значення індукції; f - частота; M - маса магнітопроводу. Дана складова теплових втрат для системи

$$\Delta P_p = s \cdot (P_e - \Delta P_{c.p} - \Delta P_c - \Delta P_{\partial o \partial})$$

де: s - ковзання; P_e - потужність, споживана з мережі; $\Delta P_{c.p}$ - втрати в сталі ротора, ΔP_c - втрати в сталі; $\Delta P_{\partial o \partial} = \Delta P_{\partial o \partial.pom} + \Delta P_{\partial o \partial.ct}$ додаткові втрати в магнітопроводі.

Втрати на тертя в підшипниках розраховуються як:

$$\Delta P_{mi} = 1,55 \cdot 10^{-4} G \cdot d \cdot n$$

де: G - навантаження на підшипник; d - діаметр валу; n - частота обертання.



Вентиляційні втрати:

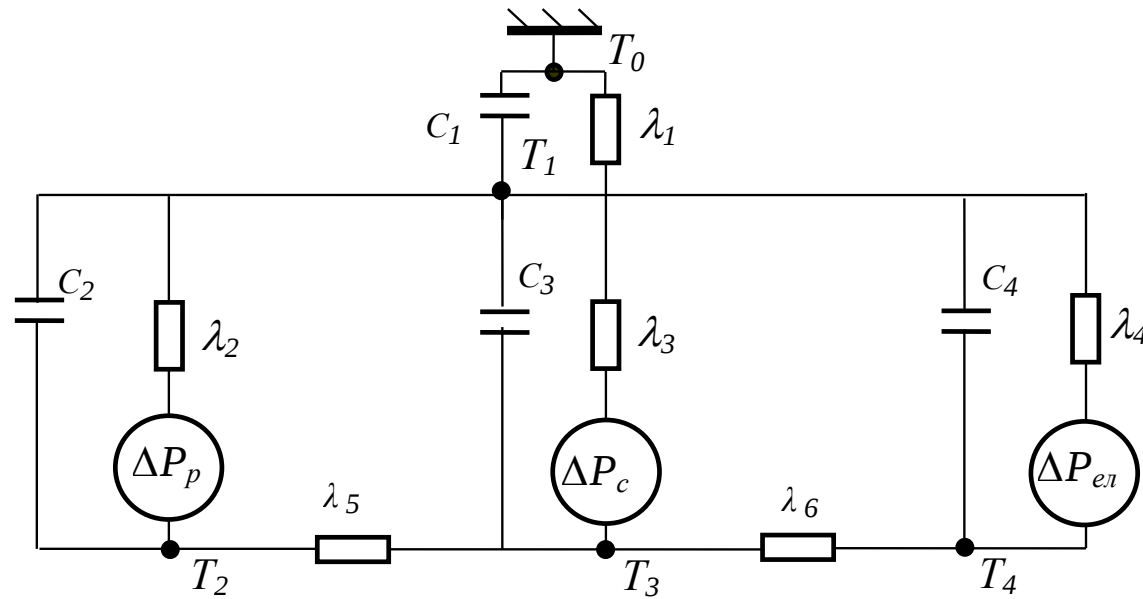
$$\Delta P_{вен} = \frac{Q \cdot p_n}{\eta_z \cdot \eta_{об} \cdot \eta_{мех}}$$

де: Q - витрати повітря; p_n - повний тиск вентилятору; $\eta_z, \eta_{об}, \eta_{мех}$ - його гідравлічний, об'ємний та механічний ККД. Витрати повітря Q і тиск вентилятора p_n розраховуються під час проектування електродвигуна для номінального режиму роботи.





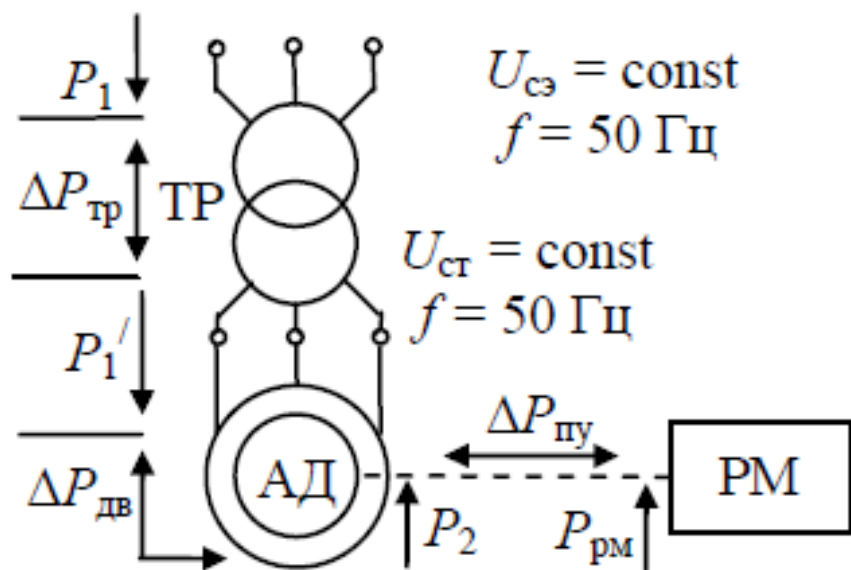
Динамічна теплова модель асинхронного двигуна



$$\begin{cases} C_1 \frac{dT_1}{dt} + T_1 \cdot (\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_1) - T_2 \cdot \lambda_2 - T_3 \cdot \lambda_3 - T_4 \cdot \lambda_4 - T_0 \cdot \lambda_1 = 0, \\ C_2 \frac{dT_2}{dt} + T_2 \cdot (\lambda_2 + \lambda_5) - T_1 \cdot \lambda_2 - T_3 \cdot \lambda_5 = \Delta P_p, \\ C_3 \frac{dT_3}{dt} + T_3 \cdot (\lambda_5 + \lambda_3 + \lambda_6) - T_2 \cdot \lambda_5 - T_1 \cdot \lambda_3 - T_4 \cdot \lambda_6 = \Delta P_c, \\ C_4 \frac{dT_4}{dt} + T_4 \cdot (\lambda_6 + \lambda_4) - T_3 \cdot \lambda_6 - T_1 \cdot \lambda_4 = \Delta P_{en}. \end{cases}$$



Енергетичні характеристики нерегульованого ЕП змінного струму



$$\eta_{\text{дв}} = \frac{P_2}{P_1'} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{дв}}}$$

$$\Delta P_{\text{дв ном}} = \frac{P_2 - \eta_{\text{дв ном}} P_2}{\eta_{\text{дв ном}}} = \frac{P_2 (1 - \eta_{\text{дв ном}})}{\eta_{\text{дв ном}}}$$

$$\Delta P_{\text{дв}} = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}}$$

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{воз}} + \Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{воз}} + \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{вен}}$$

$$\Delta P_{\text{пер}} = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{р}} + \Delta P_{\text{доб}}$$

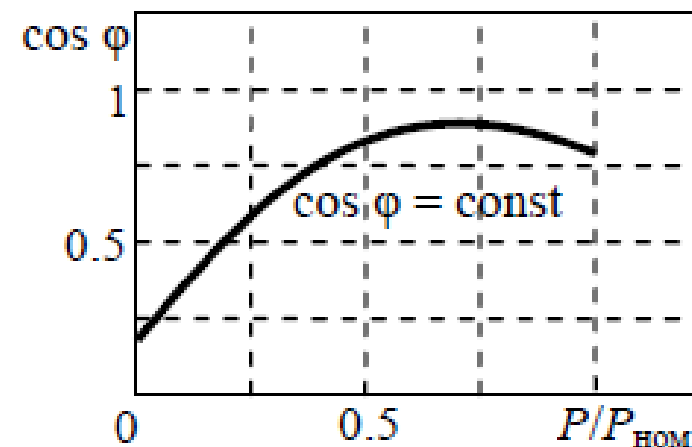
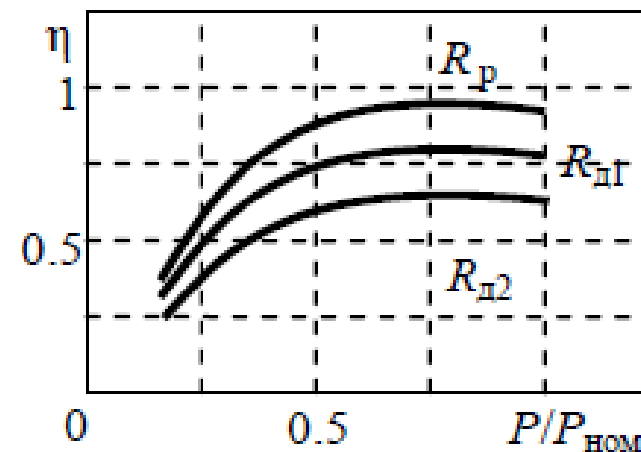
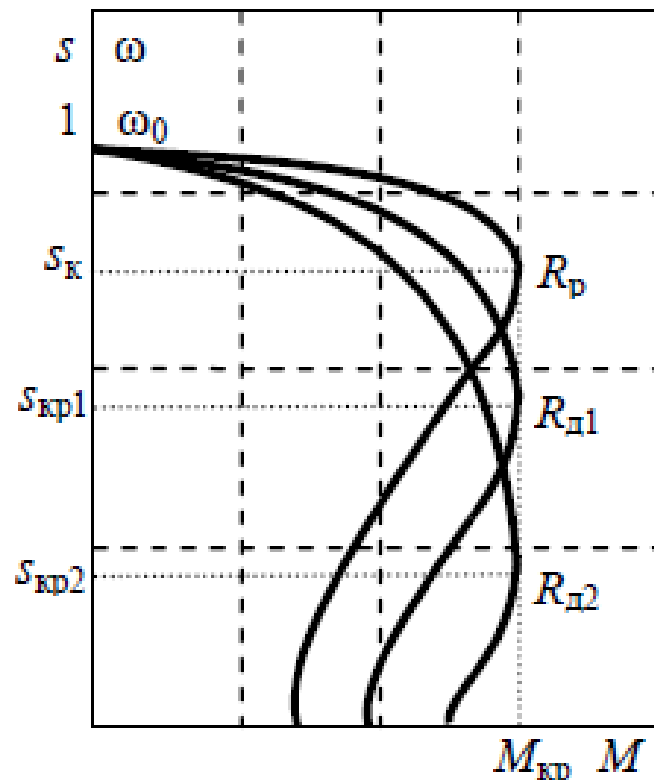
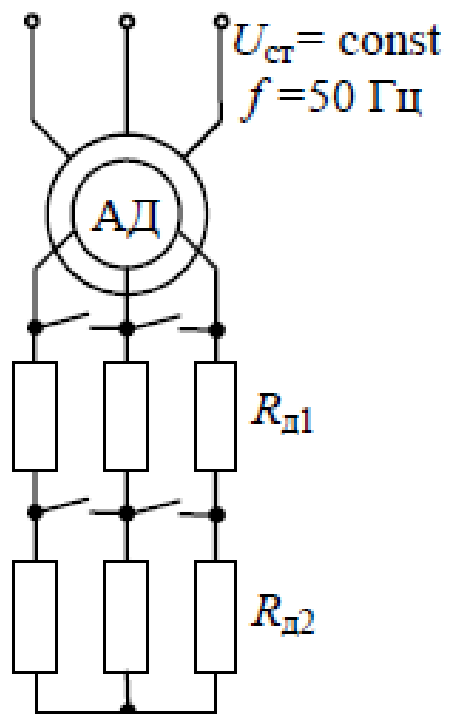
$$\Delta P_{\text{ст}} = 3 I_{\text{ст}}^2 R_{\text{ст}}$$

$$\Delta P_{\text{р}} = 3 I_{\text{р}}^2 R_{\text{р}} = 3 (I_{\text{р}}')^2 R_{\text{р}}'$$

$$\Delta P_{\text{пер}} = M \omega_0 s \left(1 + \frac{R_{\text{ст}}}{R_{\text{р}}'} \right) = P_1 s \left(1 + \frac{R_{\text{ст}}}{R_{\text{р}}'} \right)$$



Енергетичні характеристики ЕП з реостатним регулюванням



$$\Delta P = P_1 - P_2 = M\omega_0 - M\omega = M(\omega_0 - \omega) = P_1\omega_0 \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = P_1\omega_0 s.$$



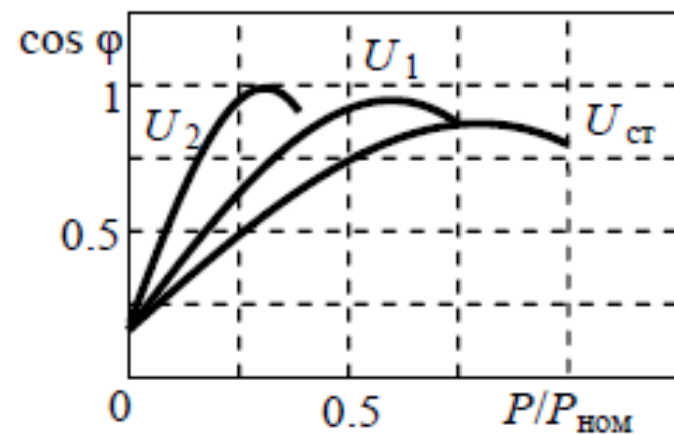
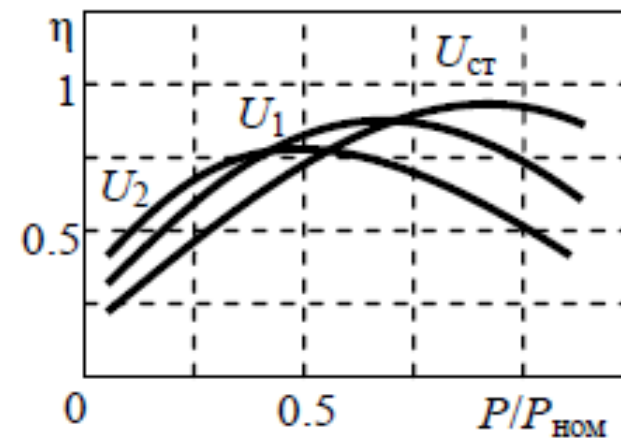
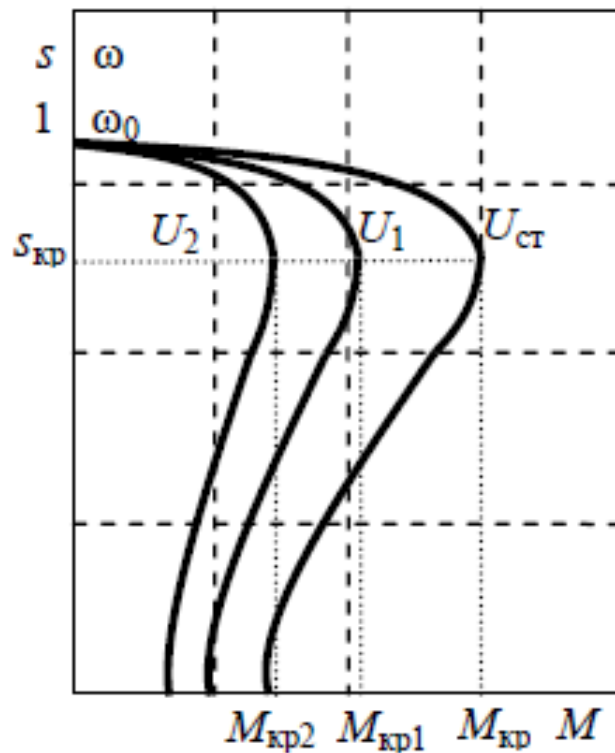
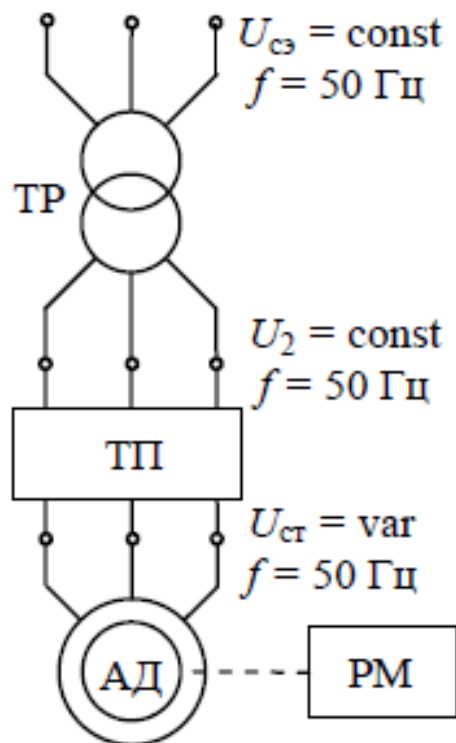
$$\Delta P = P_1 - P_2 = M\omega_0 - M\omega = M(\omega_0 - \omega) = P_1\omega_0 \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = P_1\omega_0 s.$$

$$\Delta P_{2p} = P_1 s \frac{R_p}{R_p + R_d},$$

$$\Delta P_{2d} = P_1 s \frac{R_d}{R_p + R_d}.$$



Енергетичні характеристики ЕП з ТРН



$$\Delta P = P_1 - P_2 = M\omega_0 s$$

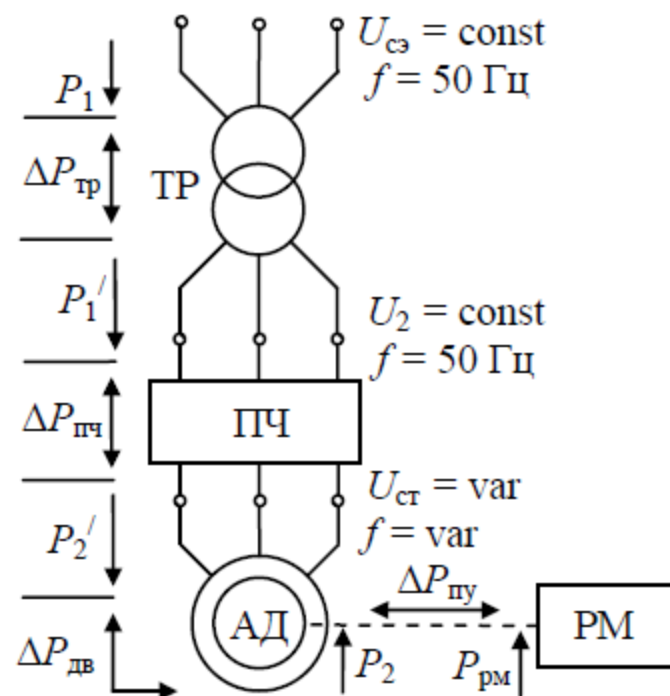
$$\Delta P_{\text{доп}} = M_{\text{доп}} \omega_0 s$$

$$\Delta P_{\text{доп}} = (2 \div 3) M_{\text{ном}} \omega_0 s$$



Енергетичні характеристики ЕП з ПЧ

$$\eta_{\text{рзп}} = \frac{P_1'}{P_1} \frac{P_2'}{P_1'} \frac{P_2}{P_2'} \frac{P_{\text{рм}}}{P_2} = \eta_{\text{тр}} \eta_{\text{пч}} \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{пу}}$$



К трансформатору
и сети электроснабжения

Выпрямитель

Автономный
инвертор

К приводному
асинхронному двигателю

$$\eta_{\text{пч}} = \frac{P_2'}{P_1'} = \frac{P_2'}{P_2' + \Delta P_{\text{пч}}}$$

$$\Delta P_{\text{пч}} = \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{зпт}} + \Delta P_{\text{ан}}$$

$$\Delta P_{\text{ан}} = N \Delta P_{\text{тр}} = N (\Delta P_{\text{ро}} + \Delta P_{\text{рн}} + \Delta P_{\text{дин тр}})$$

$$\Delta P_{\text{ро}} = 0,5 I_{\text{к0}} U_{\text{кз}}$$

$$\Delta P_{\text{рн}} = 0,5 I_{\text{к ном}} U_{\text{кз ост}}$$

$$\Delta P_{\text{дин тр}} = I_{\text{к ном}} U_{\text{кз ост}} \tau_{\text{тр}} f_{\text{к}}^k$$



$$\Delta P_{\text{в}} = K \Delta P_{\text{д}} = K (\Delta P_{\text{пр}} + \Delta P_{\text{обр}} + \Delta P_{\text{дин д}})$$

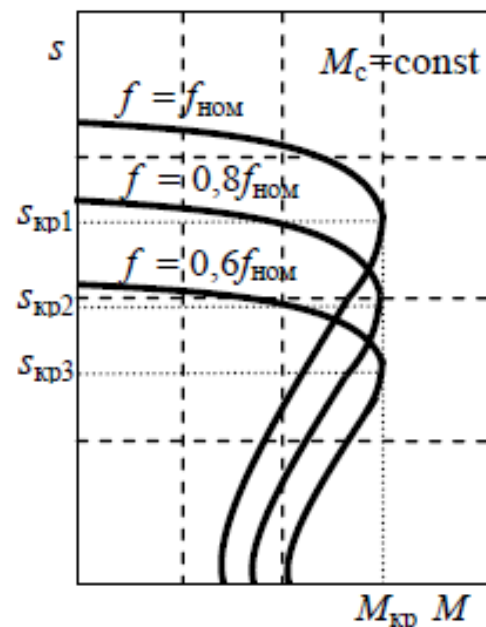
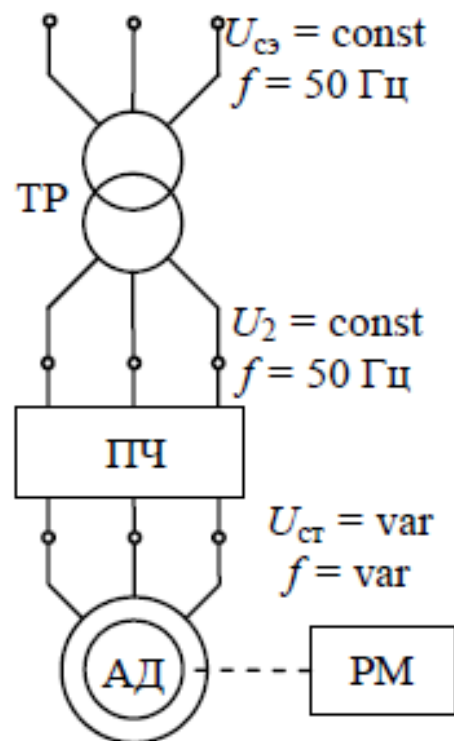
$$\Delta P_{\text{пр}} = 0,5 \Delta U_{\text{д}} I_{\text{ср}}$$

$$\Delta P_{\text{обр}} = 0,5 U_{\text{обр}} I_{\text{обр}}$$

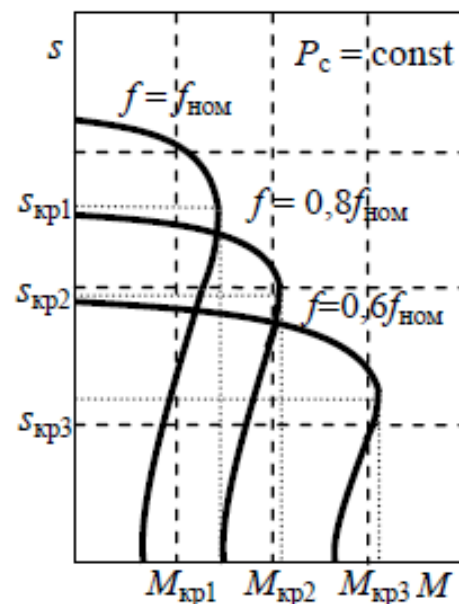
$$\Delta P_{\text{дин д}} = 0,5 U_{\text{обр}} I_{\text{ср}} \tau_{\text{д}}$$



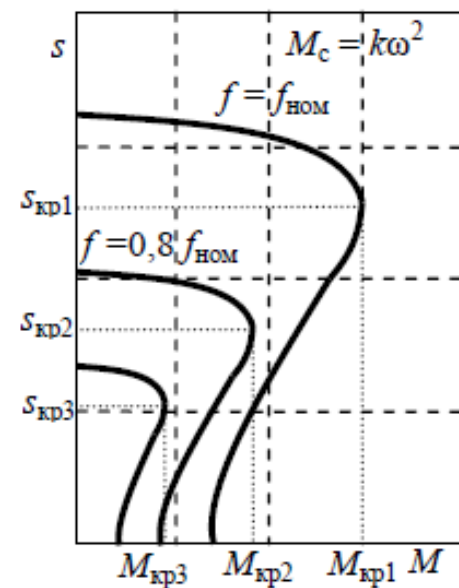
Енергетичні характеристики ЕП з ПЧ з різними законами керування



$$U_{ст} / f = \text{const}$$



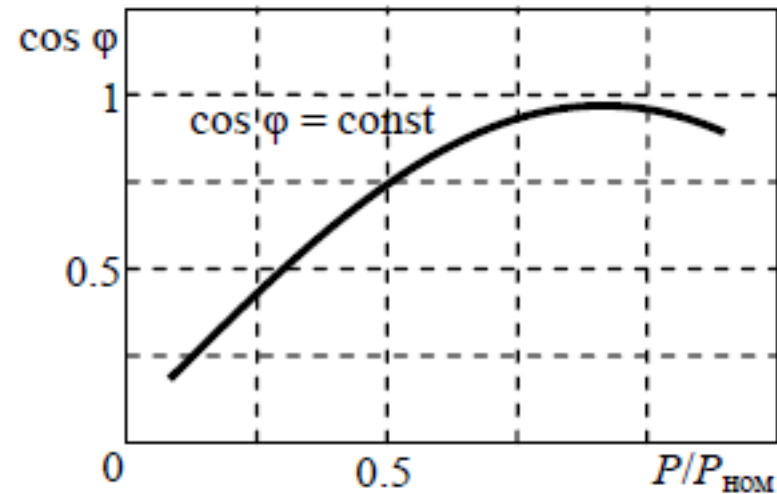
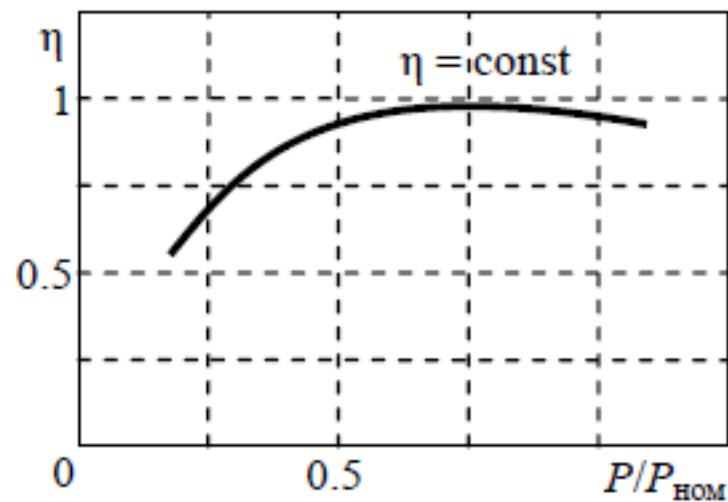
$$U_{ст}^2 / f = \text{const}$$



$$U_{ст} / f^2 = \text{const}$$

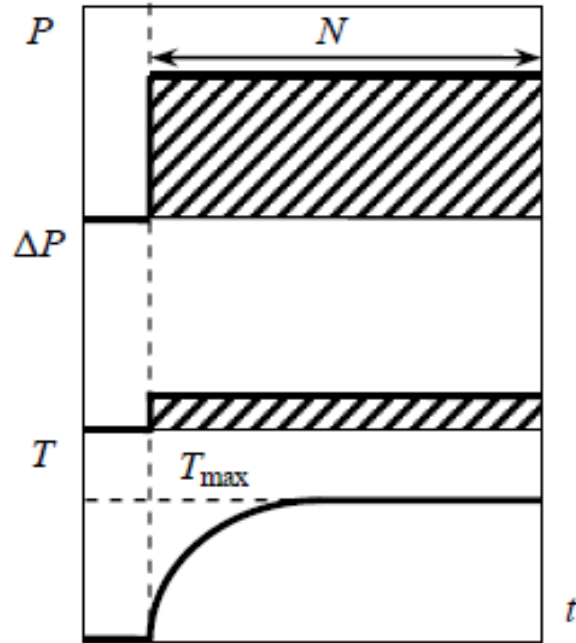


$$\Delta P_{\text{пер}} = M\omega_0 s \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) = M \frac{R_p' + R_{\text{cr}}}{p(X_p' + X_{\text{cr}})}$$



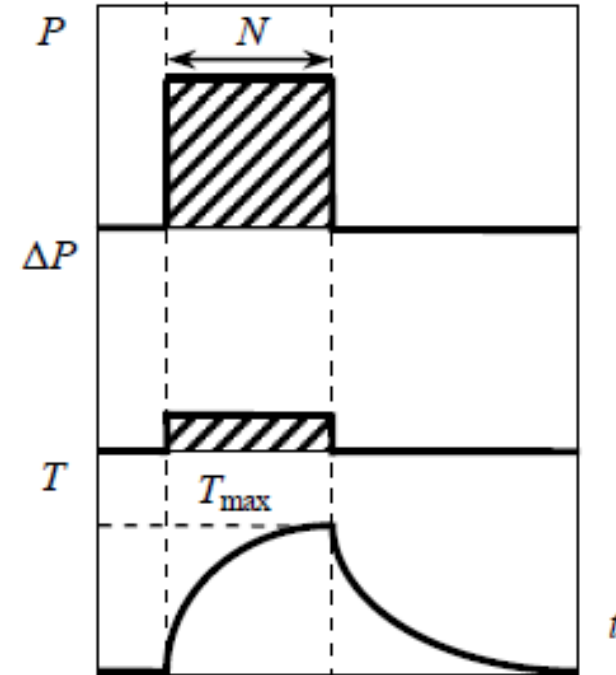
Режими роботи електропривода

S1



Діаграма роботи
електродвигуна у тривалому
режимі S1

S2

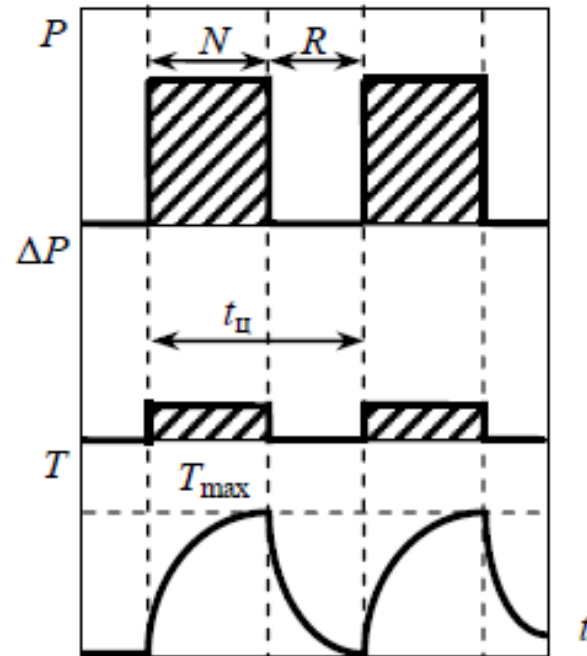


Діаграма роботи
електродвигуна у
короточасному режимі S2



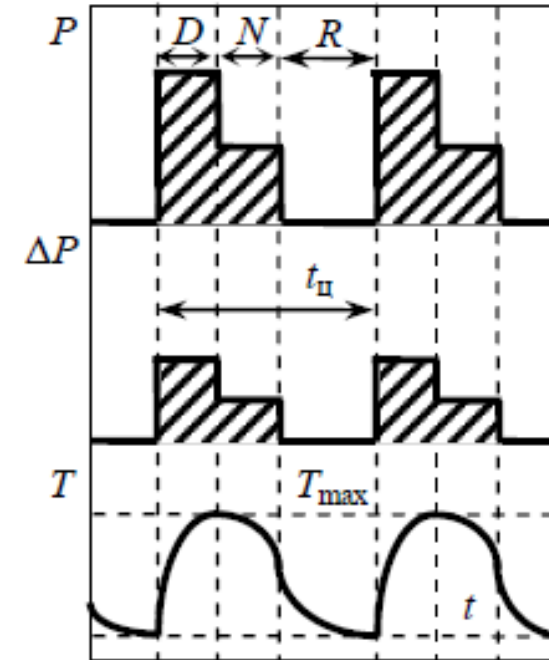
Режими роботи ЕП

S3



Діаграма роботи електродвигуна у повторно-короткочасному режимі S3

S4

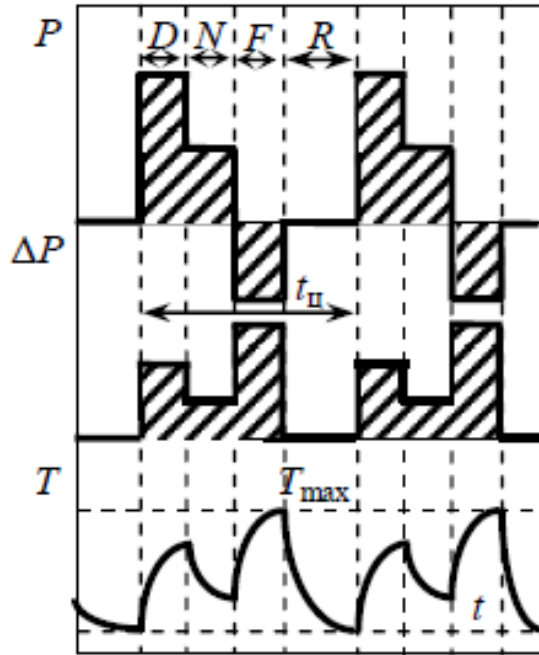


Діаграма роботи електродвигуна у повторно-короткочасному режимі з частими пусками S4



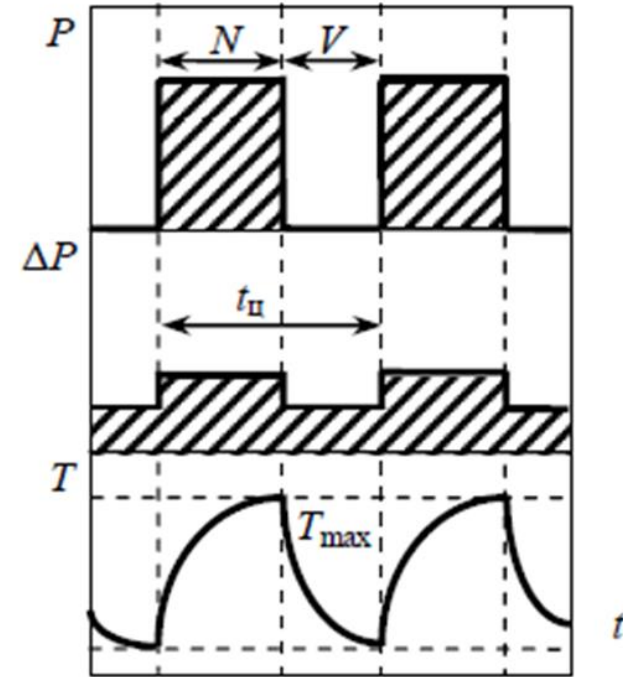
Режими роботи ЕП

S5



Діаграма роботи
електродвигуна у повторно-
короткочасному режимі з
частими пусками і
електричним гальмуванням
S5

S6

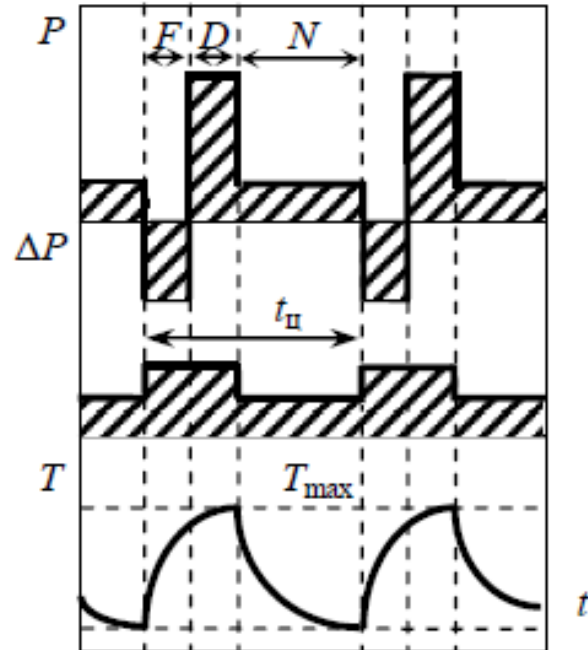


Діаграма роботи
електродвигуна у
переміжному режимі S6



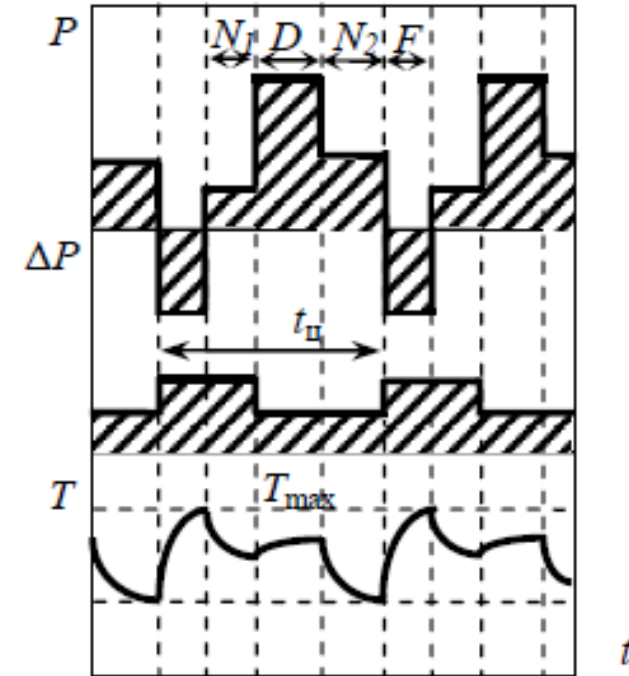
Режими роботи ЕП

S7



Діаграма роботи електродвигуна у переміжному режимі з частими реверсами при електричному гальмуванні S7

S8



Діаграма роботи електродвигуна у переміжному режимі з двома чи більше частотами обертання S8



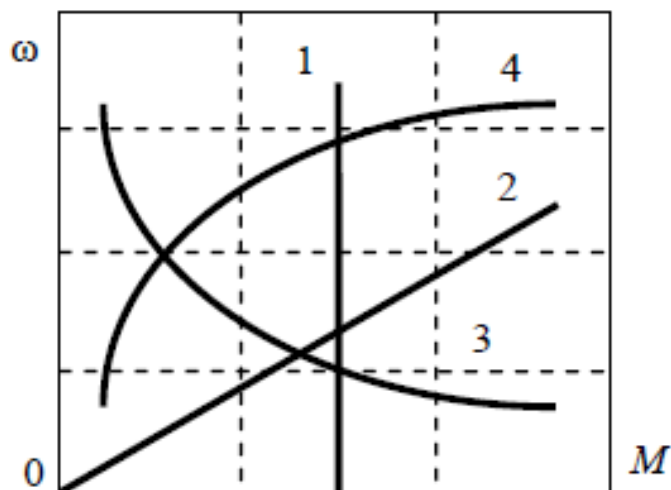
Навантажувальні характеристики робочих механізмів

$$M_c = M_{c_{\text{нач}}} + (M_{c_{\text{ном}}} - M_{c_{\text{нач}}}) \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^P,$$

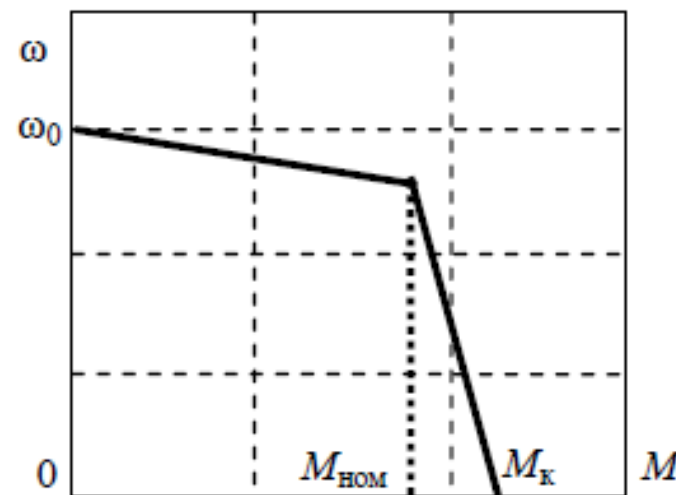
де: $M_{c_{\text{нач}}}$ - початковий момент опору робочого механізму

$M_{c_{\text{ном}}}$ - номінальний момент опору робочого механізму

P - показник ступеню, що визначає характер навантаження



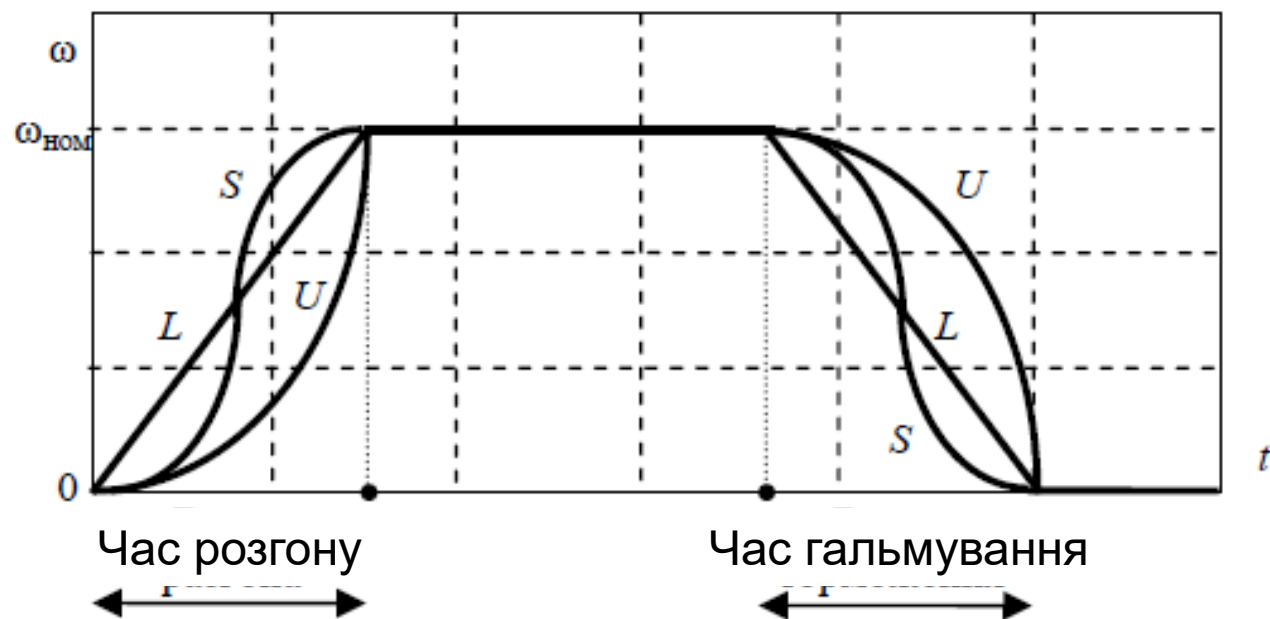
Види навантаження
електроприводу



Експаваторне навантаження
електроприводу



Перехідні характеристики ЕП



Типи прискорень та гальмування електричного двигуна



Розрахунок потужності ЕП для різних механізмів

$$P_2 = k_3 \frac{Q_{\text{вен}} H_{\text{вен}}}{\eta_{\text{вен}} \eta_{\text{пу}}} 10^{-3},$$

- потужність осьового вентилятора

де: $Q_{\text{вен}}$ - продуктивність вентилятора; $H_{\text{вен}}$ - тиск на виході вентилятора;
 $\eta_{\text{вен}}$ - ККД вентилятора; k_3 - коефіцієнт запасу.



Розрахунок потужності ЕП для різних механізмів

$$P_2 = k_3 \frac{g Q_n H_n \rho}{\eta_n \eta_{пу}} 10^{-3},$$

- потужність центробіжного насосу

де: Q_n - продуктивність насосу; H_n - розрахункова висота підйому; g - прискорення вільного падіння; ρ - густина рідини; η_n - ККД насосу; K_3 - коефіцієнт запасу.



Розрахунок потужності ЕП для різних механізмів

$$P_2 = k_3 \frac{Q_{\text{ком}} A}{\eta_{\text{ком}} \eta_{\text{пу}}} 10^{-3},$$

- потужність компресора

де: $Q_{\text{ком}}$ - продуктивність компресора; A – робота ізометричного і адіабатичного стискання атмосферного повітря об'ємом 1 м^3 тиском $1,1 \cdot 10^5$ Па до необхідного тиску; $\eta_{\text{ком}}$ – ККД компресора; k_3 – коефіцієнт запасу.



Розрахунок потужності ЕП для різних механізмів

$$P_2 = k_3 \frac{Q_k L k_{тр}}{367 \eta_k},$$

- потужність конвейера

де: Q_k – продуктивність конвеєра; L – довжина конвеєра; $k_{тр}$ – коефіцієнт тертя в підшипниках;
 η_k – ККД конвеєра; k_3 – коефіцієнт запасу.



Розрахунок потужності ЕП для різних механізмів

$$P_2 = k_3 \frac{(G_0 + G_n) v_n}{\eta_{пм}} 10^{-3}, \quad \text{- потужність ліфта}$$

де: G_0 - вага підйомної платформи; G_n - номінальна вага вантажу; v_n – швидкість піднімання;
 η_k – ККД механізму підйому; K_3 – коефіцієнт запасу.



Розрахунок потужності ЕП для різних механізмів

$$P_2 = \frac{Kqv_p}{\eta_{ст}} 10^{-3},$$

- потужність металоріжучого станка

де: K - питомий опір різку; q - перетин пружини; v_p – швидкість різку; $\eta_{ст}$ – ККД станка.



Розрахунок моменту ЕП для різних механізмів

$$M = \frac{30P_2}{\pi n} 10^3 = 9,55 \frac{P_2}{n} 10^3 = \frac{P_2}{\omega} 10^3 .$$

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_{\text{дв}}} ,$$

- споживана активна потужність

$$S_1 = \frac{P_2}{\eta_{\text{дв}} \cos \varphi} .$$

- споживана повна потужність



Методи оцінки теплового стану електродвигуна

$$\Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_{\text{ном}} .$$

- Метод середніх втрат

$$\tau_{\text{ср}} \leq \tau_{\text{ном}} .$$

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \Delta P_3 t_3 + \dots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i}{t_{\text{ц}}} ,$$

де: ΔP_i - потужність втрат на i -ому інтервалі навантажувальної діаграми; η_i – ККД двигуна при потужності на валу P_i ; t_i – тривалість i -ого інтервалу; $t_{\text{ц}}$ – тривалість циклу інтервалу; n – кількість інтервалів в циклі.

$$\Delta P_i = P_i (\eta_i - 1/\eta_i) ,$$
$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} (\eta_{\text{ном}} - 1/\eta_{\text{ном}}) ,$$



Методи оцінки теплового стану електродвигуна

$$I_{\text{ЭКВ}} \leq I_{\text{НОМ}},$$

- Метод еквівалентного струму

$$I_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_i}{t_{\text{ц}}}},$$

де: I_i - струм електричного двигуна на i -ій ділянці діаграми струму.

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{ном расч}}}{\sqrt{3} U_{\text{НОМ}} \eta_{\text{НОМ}} \cos \varphi}.$$

$$P_{\text{ном расч}} = \sqrt{3} U_{\text{НОМ}} I_{\text{ЭКВ}} \eta_{\text{НОМ}} \cos \varphi.$$



Методи оцінки теплового стану електродвигуна

$$M_{\text{ЭКВ}} \leq M_{\text{НОМ}} . \quad - \text{ Метод еквівалентного моменту}$$

$$M_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}{t_{\text{ц}}}} .$$

$$P_{\text{НОМ расч}} = M_{\text{ЭКВ}} \omega_{\text{НОМ}} = \frac{9,55 M_{\text{ЭКВ}}}{n_{\text{НОМ}}} . \quad P_{\text{НОМ}} \geq P_{\text{НОМ расч}} .$$

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\omega_0 (1 - s_{\text{НОМ}})} = \frac{P_{\text{НОМ}} n_{\text{НОМ}}}{9,55} .$$



Методи оцінки теплового стану електродвигуна

$$P_{\text{НОМ}} \geq P_{\text{ЭКВ}} \quad - \text{Метод еквівалентної потужності}$$

$$P_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{t_{\text{ц}}}},$$



Методи вибору ПЧ для АД

- розрахунок струму, що проходить через перетворювач частоти;
- розрахунок потужності;
- розрахунок пускового моменту (потужності);
- розрахунок моменту інерції;
- перевірка часу прискорення;
- перевірка часу гальмування.



Метод вибору ПЧ для АД

$$I_{\text{уст дв}} = \frac{n_{\text{уст}} M_{\text{уст}}}{9,55 \sqrt{3} U_{\text{ном}} \eta_{\text{дв}} \cos \varphi},$$

де: $n_{\text{уст}}$, $P_{\text{уст}}$ – швидкість обертання і момент асинхронного електричного двигуна при роботі в усталеному режимі (визначається навантажувальною діаграмою).

$$I_{\text{пер дв}} = \frac{n_{\text{уст}} (M_{\text{ном}} - M_{\text{дин}})}{9,55 \cdot \sqrt{3} U_{\text{ном}} \eta_{\text{дв}} \cos \varphi}, \quad M_{\text{ном}} = \frac{9,55 P_{\text{ном}}}{n_{\text{уст}}},$$

$$M_{\text{дин}} = \frac{J}{9,55} \frac{n_{\text{уст}}}{t_{\text{пер}}},$$

$t_{\text{пер}}$ – тривалість перехідного процесу.



Метод вибору ПЧ для АД

$$I_{\text{уст дв}} < I_{\text{ном пч}} ,$$

$$I_{\text{пер дв}} < I_{\text{п пч}} .$$

$$S_{\text{ном дв}} < S_{\text{ном пч}} .$$

$$S_{\text{ном дв}} = \frac{n_{\text{ном}} P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{дв}} \cos \varphi} .$$

$$S_{\text{пер дв}} = \frac{n_{\text{ном}}}{9,55 \cdot \eta_{\text{дв}} \cos \varphi} \left(M_{\text{ном}} + \frac{J}{9,55} \frac{n_{\text{ном}}}{t_{\text{пер}}} \right) .$$

$$S_{\text{пер дв}} < 1,5 S_{\text{п пч}} .$$

$$J = J_{\text{дв}} + J_{\text{рм}} ,$$



Метод вибору ПЧ для АД

$$J = J_{\text{дв}} + J_{\text{рм}},$$

де: $J_{\text{дв}}$ – момент інерції приводного двигуна; $J_{\text{рм}}$ – момент інерції робочого механізму.

$$t_p = \frac{J(n_1 - n_2)}{9,55(M_{\text{ном}}\alpha - M_c)},$$

- час прискорення

де: α – коефіцієнт корекції моменту під час пуску (1,2-1,5 для скалярних систем; 1,5-2 для векторних систем; 2-3 для систем прямого керування моментом).



Метод вибору ПЧ для АД

$$t_{\text{т}} = \frac{J(n_1 - n_2)}{9,55(M_{\text{дв}}\beta + M_{\text{с}})}, \quad \text{- час гальмування}$$

де: β – коефіцієнт корекції моменту під час гальмування (0,1-0,3 без гальмівного резистора; 0,8-1,5 при наявності гальмівного резистора).

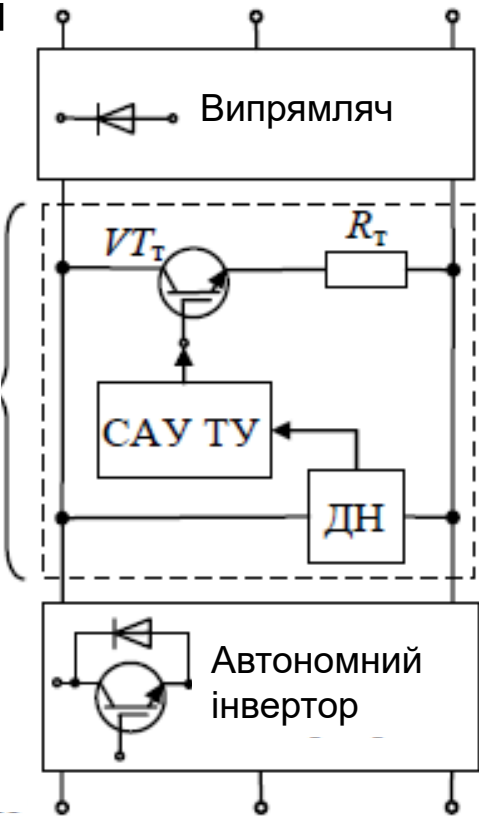


Розрахунок гальмівного резистора для АД

До мережі живлення

Гальмівний пристрій

До двигуна



$$M_{\text{тор max}} = \frac{J(n_1 - n_2)}{9,55 t_T}.$$

$$P_{2 \text{ тор max}} = \frac{M_{\text{тор max}} (n_1 - n_2)}{9,55 t_T}.$$

$$P_{1 \text{ тор max}} = P_{2 \text{ тор max}} - k P_2 ,$$

Потужність двигуна кВт	К-т зменшення навантаження під час гальмування
> 1,5	0,25
2,2 ÷ 4	0,20
15 <	0,08

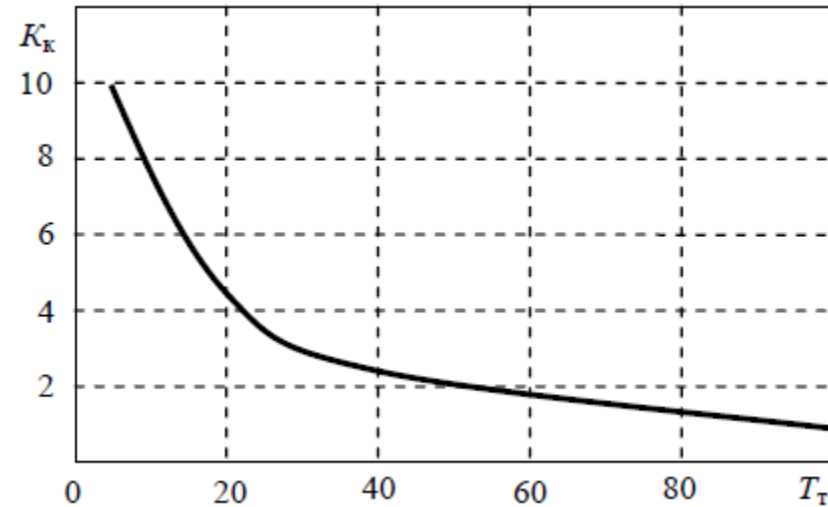


Розрахунок тормозного резистора для АД

$$T_{\tau} = \frac{t_{\tau}}{T_{\text{ц}}} \quad - \text{Період гальмування}$$

$$R_{\tau \text{ max}} \leq \frac{U_d^2}{P_{1 \text{ тор max}}} \quad - \text{максимально-допустимий опір}$$

$$R_{\tau} \leq \frac{P_{1 \text{ тор max}}}{K_{\kappa}} \quad - \text{тормозний опір}$$



Додаткові матеріали

