

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО
ФАКУЛЬТЕТ ЕНЕРГЕТИКИ І КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

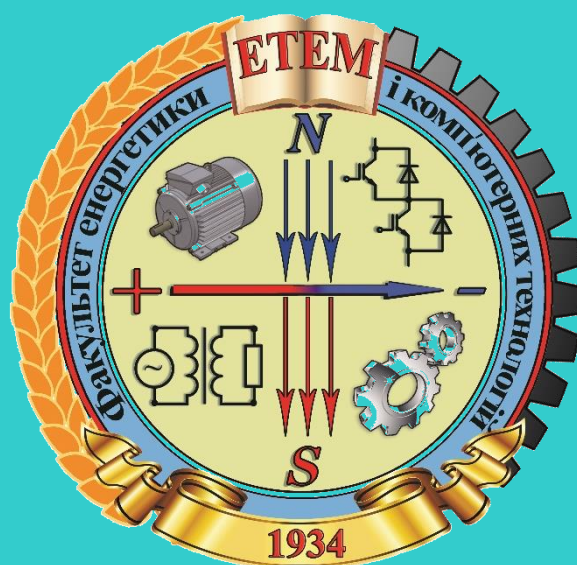
Кафедра «Електротехніка і електромеханіка
імені професора В.В. Овчарова»

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСАХ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ ЗМІННОГО СТРУМУ

для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр»
зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»



Мелітополь, 2020

УДК 621.3(075)

Основи електропривода: Методичні вказівки до практичної роботи «Енергозбереження при перехідних процесах в електроприводах змінного струму» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / М.В. Постнікова, С.О. Квітка. – Мелітополь: ТДАТУ, 2020. – 27 с.

Розробники: к.т.н., доцент Постнікова М.В.,
к.т.н., доцент Квітка С.О.

Рецензент: д.т.н., професор Діордієв Володимир Трифонович
Таврійський державний агротехнологічний університет

Розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри електротехніки і електромеханіки імені професора В.В. Овчарова
Протокол №11 від 29 квітня 2020 р.

Затверджено методичною комісією факультету енергетики і комп'ютерних технологій ТДАТУ
Протокол №10 від 27 травня 2020 р.

© Постнікова М.В.
Квітка С.О.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
Енергозбереження при перехідних процесах в електроприводах змінного струму	5
1 Мета роботи	5
2 Завдання для самостійної роботи	5
3 Програма роботи	5
4 Основні теоретичні положення	6
5 Вихідні дані	12
6 Приклад розрахунку	12
7 Вказівки щодо оформлення звіту	20
8 Контрольні питання	20
9 Список літератури	21
10 Критерії оцінювання практичної роботи	22
ДОДАТОК А Зразок оформлення титульного аркушу звіту з практичної роботи	23
ДОДАТОК Б Технічні дані асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором	24
ДОДАТОК В Технічні дані асинхронних тришвидкісних електродвигунів	25

ВСТУП

Навчальна дисципліна «Основи електропривода» є профілюючою навчальною дисципліною за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» у закладах вищої освіти III - IV рівнів акредитації при підготовці фахівців ступеня вищої освіти «Бакалавр».

На практичному занятті студент повинен закріпити одержані теоретичні знання і набути практичних навичок з розрахунку електроприводів.

При виконанні практичних робіт з основ електропривода студент повинен самостійно вирішувати практичні інженерні задачі, вміти розраховувати втрати енергії при перехідних процесах в електроприводах змінного струму з можливістю енергозбереження.

Одержавши графік виконання практичних робіт з дисципліни, студент самостійно готується до кожної з них, вивчаючи відповідні розділи теоретичного матеріалу.

Перед виконанням практичної роботи викладач перевіряє готовність студента за темою практичного заняття, використовуючи контрольні питання, які приводяться в практичній роботі. Лише після перевірки викладачем ступеня підготовки студента до заняття, студент може виконувати практичну роботу.

Для роботи студент отримує варіант індивідуального завдання і необхідну нормативно-довідкову літературу. Студент самостійно виконує розрахунки відповідно до теми практичного заняття.

Після виконання необхідних розрахунків студент складає звіт по роботі, який вміщує всі фактичні дані (схеми, таблиці, графіки) та аналіз результатів розрахунку.

В кінці заняття студент повинен представити викладачу результати індивідуальної роботи за темою практичного заняття, при необхідності внести необхідні виправлення та одержати бали від викладача за свою роботу.

Практична робота
**ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСАХ
В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ ЗМІННОГО СТРУМУ**

1 Мета роботи

Засвоєння студентами методики розрахунку втрат енергії при перехідних процесах в електроприводах змінного струму з можливістю енергозбереження.

2 Завдання для самостійної роботи

2.1 Опрацювати теоретичний матеріал: перехідні режими в приводах з асинхронними двигунами, аналітичне визначення часу перехідного процесу пуску і електричного гальмування [1, с. 136-141; 2, с. 148-152; 3, с. 291-298; 5, с. 121-127].

2.2 Опрацювати теоретичний матеріал: визначення енергетичних показників роботи електропривода в перехідних режимах [1, с. 264-271; 2, с. 158-161; 3, с. 332-348; 4, с. 155-161].

2.3 Відповісти на контрольні питання.

3 Програма роботи

3.1 Для одношвидкісного електродвигуна з короткозамкненим ротором:

3.1.1 визначити втрати енергії при пуску при відсутності навантаження на валу. Приведений момент інерції на валу електродвигуна прийняти рівним

$$J_{\text{пр}} = 4J_{\text{р.д}};$$

3.1.2 визначити енергозберігаючий спосіб гальмування. Для цього:

– визначити втрати енергії при гальмуванні противмиканням асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором;

– визначити втрати енергії при динамічному гальмуванні, яке здійснюється постійним струмом, який перевищує номінальний струм

електродвигуна в два рази.

3.2 Для тришвидкісного електродвигуна визначити енергозберігаючий спосіб пуску. Для цього:

3.2.1 визначити втрати енергії при прямому пуску тришвидкісного електродвигуна. Приведений момент інерції на валу електродвигуна прийняти рівним $J_{\text{пр}} = 4J_{\text{р.д}}$;

3.2.2 визначити втрати енергії при ступінчастому пуску тришвидкісного електродвигуна на вищу швидкість;

3.2.3 визначити ефект енергозбереження при ступінчастому пуску тришвидкісного електродвигуна на вищу швидкість.

4 Основні теоретичні положення

Перехідні процеси в електроприводі відбуваються при переході з одного усталеного стану до іншого, коли змінюються швидкість, струм, момент, температура електродвигуна. Перехідні процеси виникають в будь-якій системі електропривода при його пуску, гальмуванні, реверсуванні та регулюванні швидкості, зміні навантаження на робочому органі, коливанні напруги або частоти мережі живлення, тобто під впливом зовнішніх збурюючих факторів. Реакція привода на збурюючий вплив складає сутність перехідних процесів.

Перехідні процеси в електроприводах обумовлені наявністю механічної, електромагнітної і теплової інерційностей. В рухомих частинах накопичується кінетична енергія, в пружних елементах – потенціальна, в індуктивностях – електромагнітна, в масі двигуна – тепла. Відсутність інерційностей виключило би протікання перехідних процесів. При стрибкоподібному збурюючому впливі відбувалося би миттєва зміна швидкості, моменту двигуна, струму та інших величин.

В залежності від виду енергії, яка обумовлює перехідні процеси, розрізняють механічні, електромагнітні та теплові процеси.

Механічні перехідні процеси пов'язані із зміною кінетичної енергії.

Електромагнітні перехідні процеси виникають при зміні електромагнітної енергії в обмотках електричних машин. Теплові перехідні процеси обумовлені зміною теплової енергії в електричній машині.

Для дослідження перехідного процесу необхідно скласти диференціальне рівняння, рішення якого опише поведінку системи як в перехідному, так і в усталеному режимі роботи при заданих початкових і кінцевих умовах.

Перехідні процеси в електроприводах з трифазними асинхронними електродвигунами можна описати, використовуючи основне рівняння руху електропривода

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad (1)$$

де M – рушійний момент, Н·м;

M_c – момент статичних опорів, Н·м;

J – момент інерції системи, кг·м²;

$\frac{d\omega}{dt}$ – кутове прискорення, рад/с².

Для заміни кутової швидкості ковзанням продиференціюємо рівняння

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - S) \quad (2)$$

та отримаємо

$$\frac{d\omega}{dt} = -\omega_0 \frac{dS}{dt}. \quad (3)$$

Тоді рівняння (1) можна записати у вигляді

$$M - M_c = -J \omega_0 \frac{dS}{dt}. \quad (4)$$

При перехідних процесах в електроприводах з трифазними асинхронними електродвигунами з урахуванням кривизни механічної характеристики, яка описується формулою Клосса або спрощеною формулою Клосса, за умови, що $M_c = 0$ основне рівняння руху можна записати у вигляді

$$\frac{2M_{\kappa}}{\frac{S}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S}} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (5)$$

З урахуванням рівняння (3) рівняння (5) можна записати у вигляді

$$\frac{2M_{\kappa}}{\frac{S}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S}} = -J\omega_0 \frac{dS}{dt}. \quad (6)$$

Звідки

$$dt = -\frac{J\omega_0}{2M_{\kappa}} \cdot \left(\frac{S}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S} \right) dS = -\frac{T_{\text{м}}}{2} \cdot \left(\frac{S}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S} \right) dS, \quad (7)$$

де $T_{\text{м}} = \frac{J\omega_0}{M_{\kappa}}$ – електромеханічна стала часу.

Електромеханічна стала часу – це час, за який система з моментом інерції J розганяється з нерухомого стану до швидкості ідеального холостого ходу ω_0 під дією моменту, що дорівнює максимальному моменту двигуна M_{κ} .

Час перехідних процесів пуску привода при зміні ковзання від $S_{\text{поч}}$ до $S_{\text{кін}}$ можна знайти проінтегрувавши вираз (7)

$$t_{\text{по}} = \frac{T_{\text{м}}}{2} \cdot \int_{S_{\text{кін}}}^{S_{\text{поч}}} \left(\frac{S}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S} \right) dS = \frac{T_{\text{м}}}{2} \cdot \left(\frac{S_{\text{поч}}^2 - S_{\text{кін}}^2}{2S_{\kappa}} + S_{\kappa} \ln \frac{S_{\text{поч}}}{S_{\text{кін}}} \right). \quad (8)$$

Оскільки при пуску двигуна з нерухомого стану $S_{\text{поч}} = 1$, то

$$t_{\text{по}} = \frac{T_{\text{м}}}{2} \cdot \left(\frac{1 - S_{\text{кін}}^2}{2S_{\kappa}} + S_{\kappa} \ln \frac{1}{S_{\text{кін}}} \right). \quad (9)$$

Оскільки при кутовій швидкості $\omega = (0,95 \dots 0,98)\omega_0$ розгін вважається закінченим, то можна прийняти $\omega_{\text{кін}} = 0,05$ і тривалість пуску без

навантаження можна визначити

$$t_{\text{по}} = \frac{T_{\text{м}}}{2} \cdot \left(\frac{1 - 0,05^2}{2S_{\text{к}}} + S_{\text{к}} \ln \frac{1}{0,05} \right). \quad (10)$$

Величиною $0,05^2$, як дуже малою у порівнянні з одиницею, у першому члені можна знехтувати, тоді

$$t_{\text{по}} = T_{\text{м}} \cdot \left(\frac{1}{4S_{\text{к}}} + 1,5S_{\text{к}} \right). \quad (11)$$

Отже, час пуску залежить від критичного ковзання двигуна, яке прямо пропорційно опоріві роторного кола.

Гальмування противмиканням до зупинки ротора або для реверсування здійснюють перемиканням двох фаз статора двигуна. Час гальмування без навантаження від $S_{\text{поч}} = 2$ до $S_{\text{кін}} = 1$ визначається за виразом

$$t_{\text{г.пр.о}} = T_{\text{м}} \cdot \left(\frac{0,75}{S_{\text{к}}} + 0,346S_{\text{к}} \right). \quad (12)$$

Для динамічного гальмування найчастіше обмотку статора двигуна вимикають з мережі змінного струму і вмикають в коло постійного струму.

Оскільки при динамічному гальмуванні $S = \frac{\omega}{\omega_0}$, то ковзання двигуна при

гальмуванні без навантаження змінюється від $S_{\text{поч}} = 1$ до $S_{\text{кін}} = 0$. Отже, час гальмування визначається за виразом

$$t_{\text{г.д.о}} = T_{\text{м}} \cdot \left(\frac{1}{4S_{\text{к.д.}}} + 1,5S_{\text{к.д.}} \right), \quad (13)$$

де $S_{\text{к.д.}}$ – критичне ковзання на гальмівній характеристиці;

$T_{\text{м}} = \frac{J\omega_0}{M_{\text{к.д.}}}$ – електромеханічна стала при динамічному гальмуванні.

Процес електромеханічного перетворення енергії в електроприводі завжди супроводжується втратами електричної енергії (потужності) в дисипативних елементах, в якості яких в електроприводі виступають активні опори в силових колах і колах керування, а також в додатково включених в електричні кола елементах, в механічній частині – це тертя в елементах кінематичного кола.

Оцінка цих властивостей електропривода здійснюється за допомогою енергетичних показників, до яких відносяться коефіцієнт корисної дії (ККД), коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$), втрати потужності ΔP та енергії ΔA . Іноді до цих показників відносять спожиті з мережі корисну потужність і енергію.

Співвідношення величин спожитої з мережі електроенергії, механічної енергії на валу двигуна і значення втрат і визначають ККД і коефіцієнт потужності. Ці показники широко використовують як при створенні нових, так і при оцінці роботи діючих електроприводів.

Визначення енергетичних показників роботи ЕП в перехідних режимах є не менш важливою задачею, ніж для усталеного режиму роботи. Визначається це у першу чергу тим, що у перехідних режимах струми в обмотках двигуна значно перевищують номінальні значення і спричиняють підвищення втрат енергії, чим суттєво впливають на нагрівання двигуна.

У загальному випадку втрати енергії за час перехідного процесу можуть бути визначені за виразом

$$\Delta A = \int_0^t \Delta P dt = \int_0^t (\Delta P_c + \Delta P_v) dt = \int_0^t \Delta P_c dt + \int_0^t \Delta P_v dt = \Delta A_c + \Delta A_v, \quad (14)$$

де ΔA_c , ΔA_v – відповідно постійні та змінні втрати енергії.

До постійних відносять втрати в сталі ΔP_c , механічні $\Delta P_{\text{мех}}$ і додаткові $\Delta P_{\text{дод}}$. Змінні втрати – це втрати потужності в колі статора

$$\Delta P_1 = 3I_1^2 R_1 \quad (15)$$

і в колі ротора

$$\Delta P_2 = 3I_2'^2 R_2', \quad (16)$$

де I_1, I_2' – відповідно струм обмотки статора і приведений струм обмотки ротора;

R_1, R_2' – відповідно опір обмотки статора і приведений опір кола ротора.

При відсутності моменту опору на валу електродвигуна, виразивши втрати потужності в роторному колі через потужність ковзання, тобто

$$3I_2'^2 R_2' = M \omega_0 S,$$

і з урахуванням (4) отримаємо втрати енергії при перехідних процесах в асинхронному електроприводі

$$\Delta A_0 = \int_0^{t_{\text{п}}} M \omega_0 S \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) dt = \int_{S_{\text{кін}}}^{S_{\text{поч}}} J \omega_0^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) S dS \quad (17)$$

або

$$\Delta A_0 = J \frac{\omega_0^2}{2} \cdot (S_{\text{поч}}^2 - S_{\text{кін}}^2) \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right). \quad (18)$$

При пуску двигуна ковзання змінюється від $S_{\text{поч}} = 1$ до $S_{\text{кін}} = 0$, тоді

$$\Delta A_{\text{п0}} = J \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right), \quad (19)$$

де $J \frac{\omega_0^2}{2}$ – втрати енергії в роторному колі, що визначаються запасом

кінетичної енергії, яку набуває механічна система до кінця пуску;

$J \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \frac{R_1}{R_2'}$ – втрати енергії в обмотці статора.

При гальмуванні двигуна, що обертається вхолосту, способом противмикання ковзання змінюється від $S_{\text{поч}} = 2$ до $S_{\text{кін}} = 1$, тоді втрати енергії становлять

$$\Delta A_{\text{г.пр.0}} = 3J \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) = 3\Delta A_{\text{п0}}. \quad (20)$$

При гальмуванні противмиканням втрати енергії втричі більші, ніж втрати енергії при пуску.

Втрати енергії при динамічному гальмуванні визначаються за виразом

$$\Delta A_{\text{г.д.}} = \Delta A_{\text{г.д.01}} + \Delta A_{\text{г.д.02}}, \quad (21)$$

де $\Delta A_{\text{г.д.01}}$ – втрати енергії в обмотці статора, Дж;

$\Delta A_{\text{г.д.02}}$ – втрати енергії у колі ротора, Дж.

Втрати енергії в колі ротора асинхронного двигуна при динамічному гальмуванні без навантаження визначаються запасом кінетичної енергії маховими масами ротора перед початком гальмування

$$\Delta A_{\text{г.д.02}} = J_{\text{пр}} \cdot \frac{\omega_0^2}{2}. \quad (22)$$

а в обмотках статора

$$\Delta A_{\text{г.д.01}} = 3I_{\text{екв}}^2 \cdot R_1 \cdot t_{\text{г.д.}}. \quad (23)$$

де $I_{\text{екв}}$ – еквівалентний струм статора, А;

R_1 – опір обмотки статора електродвигуна, Ом;

$t_{\text{г.д.}}$ – час динамічного гальмування електродвигуна, с.

5 Вихідні дані

Вихідні дані для виконання практичного заняття за варіантами наведені в додатках Б та В.

6 Приклад розрахунку

6.1 Для одношвидкісного електродвигуна з паспортними даними (таблиця 1) визначити енергозберігаючий спосіб гальмування.

Таблиця 1 – Вихідні дані за варіантом індивідуального завдання (додаток Б)

Варіант	Типорозмір електродвигуна	Номинальна потужність P_n , кВт	Момент інерції ротора електродвигуна $4J_{р.д.}$, кг·м ²	Наведений опір фази обмотки, в.о.		Приведений головний індуктивний опір X'_μ , в.о.	Приведений індуктивний опір розсіювання обмотки ротора X_2^* , в.о.
				статора R_1^*	ротора R_2^*		
30	4A250M6У3	55	1,3	0,034	0,014	3,4	0,13

6.1.1 Визначити втрати енергії при пуску асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при відсутності навантаження на валу. Приведений момент інерції на валу електродвигуна прийняти рівним $J_{пр} = 4J_{р.д.}$.

Втрати енергії при пуску асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при відсутності моменту опору на валу електродвигуна (пуск вхолосту) визначається за виразом

$$\Delta A_{п} = J_{пр} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_1^*}{R_2^*} \right),$$

де $J_{пр}$ – приведений момент інерції, кг·м². Згідно завдання $J_{пр} = 4J_{р.д.}$;

ω_0 – синхронна кутова швидкість електромагнітного поля статора, рад/с;

R_1^* , R_2^* – відповідно приведені опори фази обмоток статора і ротора, в.о.

Синхронна кутова швидкість визначається за формулою

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p},$$

де f_1 – частота струму в мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц;

p – кількість пар полюсів.

$$\text{Для електродвигуна 4A250M6У3 } p = \frac{2p}{2} = \frac{6}{2} = 3.$$

Отже,

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,67 \text{ рад/с ;}$$

$$\Delta A_{\text{п}} = 4 \cdot 1,3 \cdot \frac{104,67^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{0,034}{0,014} \right) = 97663 \text{ Дж}.$$

6.1.2 Визначити втрати енергії при гальмуванні противмиканням асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.

Втрати енергії при гальмуванні противмиканням асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором дорівнюють

$$\Delta A_{\text{г.пр}} = 3J_{\text{пр}} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} = 3\Delta A_{\text{п}};$$

$$\Delta A_{\text{г.пр}} = 3 \cdot 97663 = 292989 \text{ Дж}.$$

6.1.3 Визначити втрати енергії при динамічному гальмуванні, яке здійснюється постійним струмом, який перевищує номінальний струм електродвигуна в два рази.

Втрати енергії при динамічному гальмуванні визначаються за виразом

$$\Delta A_{\text{г.д.}} = \Delta A_{\text{г.д.01}} + \Delta A_{\text{г.д.02}},$$

де $\Delta A_{\text{г.д.01}}$ – втрати енергії в обмотці статора, Дж;

$\Delta A_{\text{г.д.02}}$ – втрати енергії у колі ротора, Дж.

Втрати енергії у колі ротора визначаються за формулою

$$\Delta A_{\text{г.д.02}} = J_{\text{пр}} \cdot \frac{\omega_0^2}{2};$$

$$\Delta A_{\text{г.д.02}} = 1,3 \cdot 4 \cdot \frac{104,67^2}{2} = 28485 \text{ Дж}.$$

Втрати енергії в обмотці статора при протіканні постійного струму збудження по двом обмоткам статора визначаються за виразом

$$\Delta A_{\text{д.г.01}} = I_{\text{д.г.}}^2 \cdot 2 \cdot R_1 \cdot t_{\text{г.д.}},$$

де $I_{\text{д.г.}}$ – постійний струм при динамічному гальмуванні, А, який, згідно завдання, перевищує номінальний струм електродвигуна в два рази

$$I_{\text{д.г.}} = 2I_{1\text{н}};$$

R_1 – опір обмотки статора електродвигуна, Ом;

$t_{\text{г.д.}}$ – час динамічного гальмування електродвигуна, с.

Номінальний струм електродвигуна визначаємо за формулою

$$I_{1\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{3 \cdot U_{1\text{ф}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{н}}},$$

де $P_{\text{н}}$ – номінальна потужність електродвигуна, Вт;

$U_{1\text{ф}}$ – номінальна фазна напруга, В;

$\cos \varphi_{\text{н}}$ – номінальний коефіцієнт потужності електродвигуна, в.о.;

$\eta_{\text{н}}$ – номінальний коефіцієнт корисної дії електродвигуна, в.о.

$$I_{1\text{н}} = \frac{55 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,89 \cdot 0,915} = 102,3 \text{ А};$$

$$I_{\text{д.г.}} = 2 \cdot 102,3 = 204,6 \text{ А}.$$

Значення приведенного опору фази обмотки статора перераховуємо в іменовані одиниці за допомогою формули

$$R_1 = R_1' \cdot \frac{U_{1\text{ф}}}{I_{1\text{н}}};$$

$$R_1 = 0,034 \cdot \frac{220}{102,3} = 0,07 \text{ Ом}.$$

Час динамічного гальмування визначаємо за формулою

$$t_{\text{г.д.}} = T_{\text{м}} \cdot \left(1,5 \cdot S_{\text{к.г.д}} + \frac{1}{4 \cdot S_{\text{к.г.д}}} \right),$$

де T_M – електромеханічна постійна часу електродвигуна, с;

$S_{к.г.д}$ – критичне ковзання при динамічному гальмуванні, в.о.

Електромеханічна постійна часу електродвигуна визначається за формулою

$$T_M = \frac{J_{пр} \cdot \omega_0}{M_{к.г.д}},$$

де $M_{к.г.д}$ – критичний момент ЕД при динамічному гальмуванні, Н·м.

Критичний момент електродвигуна при динамічному гальмуванні визначаємо за формулою

$$M_{к.г.д} = \frac{3 \cdot I_{екв}^2 \cdot x_{\mu}^{\prime*2} \cdot U_{1ф}}{2 \cdot \omega_0 \cdot (x_{\mu}^{\prime*} + x_2^{\prime*}) \cdot I_{1н}},$$

де $I_{екв}$ – змінний струм, еквівалентний постійному $I_{д.г.}$ за величиною створюваного магнітного поля, А. Приймаємо $I_{екв} = 0,816 \cdot I_{д.г.}$ при схемі обмоток «зірка» і підключенні постійного струму до двох фаз;

$x_{\mu}^{\prime*}, x_2^{\prime*}$ – відповідно приведений індуктивний опір кола намагнічування і приведений опір обмотки ротора, в.о.

$$I_{екв} = 0,816 \cdot 204,6 = 167 \text{ А};$$

$$M_{к.г.д} = \frac{3 \cdot 167^2 \cdot 3,4^2 \cdot 220}{2 \cdot 104,67 \cdot (3,4 + 0,13) \cdot 102,3} = 2814,7 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$T_M = \frac{4 \cdot 1,3 \cdot 104,67}{2814,7} = 0,19 \text{ с}.$$

Критичне ковзання при динамічному гальмуванні визначаємо за формулою

$$S_{\text{к.г.д.}} = \frac{R_2'^*}{x_\mu'^* + x_2'^*};$$

$$S_{\text{к.г.д.}} = \frac{0,014}{3,4 + 0,13} = 0,004 \text{ в.о.};$$

$$t_{\text{г.д.}} = 0,19 \cdot \left(1,5 \cdot 0,004 + \frac{1}{4 \cdot 0,004} \right) = 11,9 \text{ с};$$

$$\Delta A_{\text{д.г.01}} = 204,6^2 \cdot 2 \cdot 0,07 \cdot 11,9 = 69740,7 \text{ Дж};$$

$$\Delta A_{\text{г.д.}} = 69741 + 28485 = 98226 \text{ Дж};$$

$$\Delta A_{\text{г.пр}} = 292989 \text{ Дж} > \Delta A_{\text{г.д.}} = 98226 \text{ Дж}.$$

6.2 Для тришвидкісного електродвигуна з паспортними даними (таблиця 2) визначити енергозберігаючі умови пуску:

Таблиця 2 – Вихідні дані за варіантом індивідуального завдання (додаток В)

Варіант	Тип електродвигуна	Число полюсів	$P_{\text{н}}$, кВт	$\eta_{\text{н}}$ %	$\cos\varphi_{\text{н}}$, в.о.	$S_{\text{н}}$, %	Опір, в.о.		Момент інерції ротора, $J_{\text{р.д.}}$, кг·м ²
							$R_1'^*$	$R_2'^*$	
30	4A250M8/6/4У3	8	25	86,5	0,71	0,9	0,096	0,022	1,9
		6	28	87,5	0,82	0,8	0,054	0,01	
		4	37	86,5	0,9	0,9	0,049	0,01	

6.2.1 Визначити втрати енергії при прямому пуску тришвидкісного електродвигуна відразу на вищу швидкість. Приведений момент інерції на валу електродвигуна прийняти рівним $J_{\text{пр}} = 4J_{\text{р.д}}$.

При прямому пуску тришвидкісного електродвигуна відразу на вищу швидкість втрати енергії визначаються за формулою

$$\Delta A_{\text{прям}} = J_{\text{пр}} \cdot \frac{\omega_{03}^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_{1.03}'^*}{R_{2.03}'^*} \right),$$

де ω_{03} – синхронна кутова швидкість електромагнітного поля при найменшій

кількості полюсів, рад/с. Індекс «03» означає третю, найвищу швидкість.

Для електродвигуна 4A250M8/6/4У3 найменша кількість полюсів

$$p = \frac{2p}{2} = \frac{4}{2} = 2.$$

Отже,

$$\omega_{03} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157 \text{ рад/с ;}$$

$$\Delta A_{\text{прям}} = 4 \cdot 1,9 \cdot \frac{157^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{0,049}{0,01} \right) = 552630 \text{ Дж .}$$

6.2.2 Визначити втрати енергії при ступінчастому пуску тришвидкісного електродвигуна спочатку на нижчу швидкість, потім на середню, і нарешті, на вищу швидкість.

Втрати енергії при ступінчастому пуску тришвидкісного електродвигуна спочатку на нижчу швидкість, потім на середню, і нарешті, на вищу швидкість обертання визначаємо за формулою

$$\Delta A_{\text{ступ}} = \Delta A_1 + \Delta A_2 + \Delta A_3.$$

На першій ступені пуску втрати енергії складуть

$$\Delta A_1 = J_{\text{пр}} \cdot \frac{\omega_{01}^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R'_{1.01}}{R'_{2.01}} \right).$$

Для електродвигуна 4A250M8/6/4У3 кутова швидкість при нижчій швидкості обертання при $p = \frac{2p}{2} = \frac{8}{2} = 4$ дорівнює

$$\omega_{01} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{4} = 78,5 \text{ рад/с ;}$$

$$\Delta A_1 = 4 \cdot 1,9 \cdot \frac{78,5^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{0,096}{0,022} \right) = 125513 \text{ Дж .}$$

На другій ступені пуску втрати енергії складуть

$$\Delta A_2 = J_{\text{пр}} \cdot \frac{\Delta \omega_{02}^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_{1.02}^*}{R_{2.02}^*} \right).$$

На другій ступені пуску початкова кутова швидкість ω_{01} , а кінцева – ω_{02} .

Для електродвигуна 4A250M8/6/4У3 кутова швидкість при середній швидкості

обертання при $p = \frac{2p}{2} = \frac{6}{2} = 3$ дорівнює

$$\omega_{02} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,67 \text{ рад/с.}$$

Зміна швидкості обертання буде дорівнювати

$$\Delta \omega_{02} = \omega_{02} - \omega_{01};$$

$$\Delta \omega_{02} = 104,67 - 78,5 = 26,17 \text{ рад/с;}$$

$$\Delta A_2 = 4 \cdot 1,9 \cdot \frac{26,17^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{0,054}{0,01} \right) = 16656 \text{ Дж.}$$

На третій ступені пуску втрати енергії складуть

$$\Delta A_3 = J_{\text{пр}} \cdot \frac{\Delta \omega_{03}^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_{1.03}^*}{R_{2.03}^*} \right).$$

На третій ступені пуску початкова кутова швидкість ω_{02} , а кінцева – ω_{03} .

Для електродвигуна 4A250M8/6/4У3 кутова швидкість при вищій швидкості

обертання при $p = \frac{2p}{2} = \frac{4}{2} = 2$ дорівнює

$$\omega_{03} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157 \text{ рад/с.}$$

Зміна швидкості обертання буде дорівнювати

$$\Delta\omega_{03} = \omega_{03} - \omega_{02};$$

$$\Delta\omega_{03} = 157 - 104,67 = 52,33 \text{ рад/с};$$

$$\Delta A_3 = 4 \cdot 1,9 \cdot \frac{52,33^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{0,049}{0,01}\right) = 61396 \text{ Дж};$$

$$\Delta A_{\text{ступ}} = 125513 + 16656 + 61396 = 203565 \text{ Дж}.$$

6.2.3 Визначити ефект енергозбереження при ступінчастому пуску тришвидкісного електродвигуна на вищу швидкість.

$$\Delta A_{\text{прям}} = 552630 \text{ Дж} > \Delta A_{\text{ступ}} = 203565 \text{ Дж}.$$

Втрати енергії при прямому пуску електродвигуна 4A250M8/6/4У3 відразу на вищу швидкість обертання в 2,7 рази перевищують втрати енергії при ступінчастому пуску.

7 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з практичної роботи повинен мати:

- 1 Варіант індивідуального завдання.
- 2 Розрахункові формули для виконання практичної роботи.
- 3 Аналіз отриманих результатів.

8 Контрольні питання

- 1 Назвіть основні енергетичні показники електропривода.
- 2 Чому визначення енергетичних показників роботи електропривода в перехідних режимах є не менш важливою задачею, ніж для усталеного режиму роботи?
- 3 Як можуть бути визначені у загальному випадку втрати енергії за час перехідного процесу?
- 4 Що таке постійні та змінні втрати потужності в електроприводі?

5 Як визначається величина постійних втрат енергії при незмінному значенні постійних втрат потужності за час перехідного процесу?

6 Які фактори впливають на величину втрат енергії в перехідних режимах?

7 Яке співвідношення між втратами енергії при пуску двигуна без навантаження і при динамічному гальмуванні?

8 Наведіть вирази для визначення втрат енергії при гальмуванні противмиканням і реверсі.

9 Вкажіть шляхи зменшення втрат енергії в електроприводах.

9 Список літератури

1 Електропривод: Підручник / Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко [та інш.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К. : «Ліра-К», 2009. – 504 с.

2 Електропривод: ч.1 / О.С. Марченко, Ю.М. Лавріненко, П.І. Савченко, Є.Л. Жулай; За ред. О.С. Марченка. – К.: Урожай, 1995. – 208 с.

3 Чиликин М.Г. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. – 6-е изд., доп. и перераб. / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 576 с.

4 Електропривод: Навчальний посібник / О.Ю. Синявський, П.І. Савченко, В.В. Савченко, Ю.М. Лавріненко, В.В. Козирський, Ю.М. Хандола, Ільчов; За ред. О.Ю. Синявського. – К.: Аграр Медіа Груп, 2013. – 586 с.

5 Электрoпривод: практикум / сост.: В. В. Гуриh, Е. В. Бабаева. – Минск: БГАТУ, 2011. – 200 с.

6 Назар'ян Г.Н. Технічні характеристики та якісні показники електричних двигунів. Довідниковий посібник./ Г.Н. Назар'ян, Ю.М. Федюшко, О.В. Сотнік, О.В. Ковальов. - Х.: ТОВ «Планета-принт», 2016. - 201 с.

10 Критерії оцінювання практичної роботи

Кількісна оцінка за виконання практичної роботи визначається за наступними показниками:

1 вхідний контроль за темою практичного заняття, за який максимально можна отримати 20 % від загальної кількості балів за практичну роботу;

2 підготовка та оформлення звіту з практичної роботи, за який максимально можна отримати 30 % від загальної кількості балів;

3 вихідний контроль з практичної роботи (захист практичної роботи), за який максимально можна отримати 50 % від загальної кількості балів.

Вхідний контроль за темою практичного заняття здійснюється шляхом усного опитування студента на початку заняття. Отримана кількість балів за нього визначається пропорційно вірно наданим відповідям.

Підготовка та оформлення звіту з практичної роботи здійснюється студентом безпосередньо на практичному занятті. Отримана кількість балів за нього визначається пропорційно вірно виконаним пунктам звіту.

Вихідний контроль з практичної роботи здійснюється шляхом тестування наприкінці заняття. Отримана кількість балів за нього визначається пропорційно вірно наданим відповідям.

Практична робота вважається виконаною позитивно, якщо студент у підсумку отримав не менше, ніж 60 % балів. У протилежному випадку студент зобов'язаний підвищити бал за практичну роботу у відведений термін під час консультації викладача, який її проводив. Підвищення рейтингу полягає у виконанні певних завдань щодо практичної роботи: вхідний контроль, підготовка та оформлення звіту, вихідний контроль. Підвищити рейтинг з практичної роботи можна не більше, ніж до 60 % балів.

У разі пропуску практичного заняття студент повинен його відпрацювати у відведений термін під час консультації викладача, який його проводив. Якщо практичне заняття пропущене з поважної причини, то студент може отримати за результатами відпрацювання максимальну кількість балів. Якщо практичне заняття пропущене без поважної причини, то студент може отримати за результатами відпрацювання максимально 60 % балів.

ДОДАТОК А

(Обов'язковий)

ЗРАЗОК ОФОРМЛЕННЯ ТИТУЛЬНОГО АРКУШУ ЗВІТУ

З ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ

**ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО**

ФАКУЛЬТЕТ ЕНЕРГЕТИКИ І КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра «Електротехніка і електромеханіка
імені професора В.В. Овчарова»

ПРАКТИЧНА РОБОТА

з дисципліни «Основи електропривода»

**ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСАХ
В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ ЗМІННОГО СТРУМУ**

ЗВІТ

Студент _____ групи

_____ (підпис)

_____ П.І.Б.

Службові примітки

Роботу захищено з оцінкою _____

Викладач _____

(підпис)

_____ П.І.Б.

Мелітополь, 20__

ДОДАТОК Б

Технічні дані асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором

Варіант	Типорозмір електродвигуна	Номинальна потужність P_n , кВт	Момент інерції ротора електродвигуна, $4J_{р.д.}$, кг·м ²	Наведений опір фази обмотки, в.о.		Приведений головний індуктивний опір X'_{μ} , в.о.	Приведений індуктивний опір розсіювання обмотки ротора X'_2 , в.о.
				статора R_1^*	ротора R_2^*		
1	4A132M2Y3	11	0,023	0,040	0,025	4,2	0,12
2	4A160S2Y3	15	0,048	0,052	0,022	4,0	0,12
3	4A160M2Y3	18,5	0,053	0,049	0,022	4,5	0,12
4	4A180S2Y3	22	0,070	0,039	0,020	3,6	0,11
5	4A180M2Y3	30	0,085	0,030	0,018	3,8	0,11
6	4A200M2Y3	37	0,150	0,029	0,021	4,1	0,12
7	4A200L2Y3	45	0,170	0,027	0,002	4,9	0,13
8	4A225M2Y3	55	0,250	0,026	0,019	5,6	0,12
9	4A250S2Y3	75	0,470	0,021	0,015	4,8	0,13
10	4A250M2Y3	90	0,520	0,020	0,016	5,2	0,13
11	4A132M4Y3	11	0,040	0,043	0,032	3,2	0,13
12	4A160S4Y3	15	0,100	0,047	0,025	4,0	0,13
13	4A160M4Y3	18,5	0,130	0,042	0,024	4,3	0,13
14	4A180S4Y3	22	0,190	0,041	0,021	4,0	0,12
15	4A180M4Y3	30	0,230	0,034	0,018	3,9	0,12
16	4A200M4Y3	37	0,370	0,039	0,018	4,4	0,14
17	4A200L4Y3	45	0,450	0,034	0,017	4,6	0,14
18	4A225M4Y3	55	0,640	0,027	0,015	4,2	0,14
19	4A250S4Y3	75	1,000	0,025	0,014	4,4	0,11
20	4A250M4Y3	90	1,200	0,024	0,014	5,0	0,12
21	4A160S6Y3	11	0,140	0,073	0,030	3,0	0,15
22	4A160M6Y3	15	0,180	0,062	0,028	3,0	0,16
23	4A180M6Y3	18,5	0,220	0,056	0,026	2,9	0,13
24	4A200M6Y3	22	0,400	0,050	0,024	4,1	0,14
25	4A200L6Y3	30	0,450	0,046	0,022	3,7	0,13
26	4A225M6Y3	37	0,740	0,042	0,019	3,7	0,13
27	4A250S6Y3	45	1,200	0,037	0,015	3,8	0,14
28	4A250M6Y3	55	1,300	0,034	0,014	3,4	0,13

ДОДАТОК В

Технічні дані асинхронних тришвидкісних електродвигунів

Варіант	Тип електродвигуна	Число полюсів	P_n , кВт	η_n , %	$\cos\varphi_n$, в.о.	S_n , %	Опір, в.о.		Момент інерції ротора, $J_{р.д.}$, кг·м ²
							R_1^*	R_2^*	
1	4A100S6/4/2Y3	6	1	69,0	0,6	3,2	0,11	0,066	0,0092
		4	1,1	66,0	0,76	2,2	0,26	0,061	
		2	1,5	67,0	0,90	3,0	0,13	0,088	
2	4A100L6/4/2Y3	6	1,4	69,0	0,62	3,1	0,10	0,062	0,012
		4	1,5	71,0	0,76	2,2	0,23	0,057	
		2	2,1	72	0,90	2,8	0,11	0,034	
3	4A112M6/4/2Y3	6	1,6	71,0	0,76	3,2	0,15	0,071	0,017
		4	2,2	76,0	0,84	5,5	0,20	0,110	
		2	2,8	71	0,90	4,4	0,11	0,052	
4	4A132S6/4/2Y3	6	2,8	76,5	0,76	4,5	0,12	0,060	0,028
		4	3,6	79,5	0,85	3,4	0,16	0,070	
		2	4,2	71,5	0,90	3,7	0,082	0,045	
5	4A132M6/4/2Y3	6	3,8	78,5	0,76	4,2	0,093	0,056	0,040
		4	5,0	81,0	0,87	3,4	0,15	0,069	
		2	6,0	76,0	0,90	3,3	0,075	0,039	
6	4A160S6/4/2Y3	6	4,8	79,5	0,82	2,7	0,11	0,032	0,11
		4	5,3	81,0	0,85	1,5	0,15	0,032	
		2	7,5	76,0	0,92	2,5	0,9	0,028	
7	4A160M6/4/2Y3	6	6,7	85,1	0,80	2,7	0,10	0,033	0,14
		4	7,5	83,0	0,86	1,8	0,15	0,035	
		2	10,5	78,5	0,93	2,5	0,089	0,027	
8	4A100S8/4/2Y3	8	0,63	58,0	0,59	4,5	0,15	0,11	0,0092
		4	1,1	66,0	0,76	2,2	0,26	0,061	
		2	1,5	67,0	0,90	3,0	0,13	0,038	
9	4A100L8/4/2Y3	8	0,9	66,0	0,64	5,3	0,14	0,098	0,012
		4	1,5	71,0	0,76	2,2	0,22	0,057	
		2	2,1	72,0	0,90	2,8	0,11	0,034	
10	4A112M8/4/2Y3	8	1,1	65	0,68	6,4	0,17	0,11	0,017
		4	1,9	72,5	0,85	3,6	0,23	0,076	
		2	2,2	67,5	0,90	3,5	0,12	0,043	
11	4A132S8/4/2Y3	8	1,8	70,0	0,65	4,5	0,097	0,066	0,028
		4	3,0	77,5	0,82	2,0	0,170	0,045	
		2	3,6	69,0	0,87	1,3	0,095	0,018	

Продовження додатку В

Варіан	Тип електродвигуна	Число полюс	P_H , кВт	η_H , %	$\cos\varphi_H$, в.о.	S_H , %	Опір, в.о.		Момент інерції ротора, $J_{p.d.}$, кг·м ²
							R_1^*	R_2^*	
12	4A132M8/4/2Y3	8	2,4	72,5	0,66	4,5	0,11	0,075	0,040
		4	4,5	79,5	0,82	2,1	0,15	0,044	
		2	5,0	71,5	0,87	1,2	0,076	0,016	
13	4A160S8/4/2Y3	8	3,8	76,0	0,72	3,3	0,12	0,051	0,11
		4	4,25	81,5	0,84	1,8	0,15	0,028	
		2	6,3	76,5	0,93	2,3	0,093	0,025	
14	4A160M8/4/2Y3	8	5,0	78,0	0,71	3,6	0,12	0,047	0,14
		4	7,1	84,5	0,87	1,4	0,14	0,034	
		2	9,5	80,5	0,93	2,4	0,082	0,026	
15	4A100S8/6/4Y3	8	0,75	59,0	0,62	3,7	0,30	0,014	0,012
		6	0,9	65,0	0,71	3,1	0,17	0,053	
		4	1,3	69,0	0,82	5,30	0,16	0,066	
16	4A100L8/6/4Y3	8	0,9	61,0	0,63	3,5	0,28	0,13	0,015
		6	1,2	68,0	0,71	3,0	0,15	0,05	
		4	1,7	71,0	0,83	4,9	0,15	0,06	
17	4A112MA8/6/4Y3	8	1,1	65,0	0,69	6,4	0,20	0,079	0,017
		6	1,0	62,0	0,77	5,3	0,30	0,088	
		4	1,5	72,0	0,89	6,8	0,14	0,076	
18	4A112MB8/6/4Y3	8	1,4	63,5	0,69	6,3	0,18	0,076	0,021
		6	1,2	68,5	0,77	5,2	0,49	0,31	
		4	2,1	71,0	0,89	7,8	0,15	0,083	
19	4A132S8/6/4Y3	8	1,9	69,5	0,72	5,3	0,15	0,049	0,04
		6	2,2	73,5	0,77	3,8	0,29	0,014	
		4	3,2	74,0	0,90	6,8	0,15	0,069	
20	4A132M8/6/4Y3	8	2,6	72,5	0,72	4,5	0,13	0,047	0,058
		6	2,8	75,0	0,78	3,3	0,21	0,11	
		4	4,5	77,5	0,90	5,4	0,12	0,057	
21	4A160S8/6/4Y3	8	4,0	74,5	0,63	1,3	0,20	0,042	0,15
		6	4,5	76,0	0,75	1,1	0,12	0,016	
		4	7,5	80,5	0,90	1,8	0,10	0,019	
22	4A160M8/6/4Y3	8	5,0	76,5	0,62	1,3	0,18	0,041	0,2
		6	6,3	77,0	0,73	1,0	0,12	0,015	
		4	10,0	82,0	0,90	1,7	0,10	0,017	

Продовження додатку В

Варіан	Тип електродвигуна	Число полюс	P_n , кВт	η_n , %	$\cos\varphi_n$, в.о.	S_n , %	Опір, в.о.		Момент інерції ротора, $J_{p.d.}$, кг·м ²
							R_1^*	R_2^*	
23	4A180M8/6/4Y3	8	8,0	78,0	0,73	1,4	0,16	0,035	0,28
		6	10,0	83,5	0,81	1,2	0,075	0,015	
		4	12,5	83,5	0,92	1,6	0,079	0,018	
24	4A200M8/6/4Y3	8	11	82,0	0,69	1,5	0,14	0,018	0,52
		6	12	82,5	0,79	1,1	0,086	0,014	
		4	18,5	85,0	0,91	1,6	0,076	0,017	
25	4A200L8/6/4Y3	8	14,0	83,0	0,70	1,5	0,14	0,038	0,58
		6	15,0	85,5	0,81	1,2	0,076	0,014	
		4	21,0	85,5	0,92	1,4	0,066	0,015	
26	4A225M8/6/4Y3	8	17,0	86,0	0,76	1,4	0,12	0,032	0,93
		6	18,5	86,0	0,81	1,2	0,079	0,014	
		4	25,0	86,5	0,92	1,4	0,063	0,015	
27	4A250S8/6/4Y3	8	20,0	88,0	0,77	1,1	0,097	0,024	1,7
		6	22,0	85,5	0,75	0,6	0,053	0,008	
		4	30,0	87,0	0,92	1,1	0,053	0,012	
28	4A250M8/6/4Y3	8	25,0	86,5	0,71	0,9	0,096	0,022	1,9
		6	28,0	87,5	0,82	0,8	0,054	0,010	
		4	37,0	86,5	0,90	0,9	0,049	0,010	

