

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-енергетичний факультет

Кафедра енергетики аграрного виробництва

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Методичні рекомендації

для виконання завдань з самостійної роботи

студентами денної форми навчання

спеціальності 6.100101

«Енергетика сільськогосподарського виробництва»

Миколаїв

2015

УДК 621.313

ББК 31.26

О-75

Друкується за рішенням методичної ради інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету, протокол № 9 від 27.05.15р.

Укладач:

О. О. Плахтир - канд. техн. наук, доцент кафедри енергетики та аграрного виробництва Миколаївського національного аграрного університету

Рецензенти:

Д. Ю Шарейко - канд. техн. наук, доцент кафедри автоматичного управління Національного університету кораблебудування

О. В. Хвоцян - канд. техн. наук, старший викладач кафедри енергетики аграрного виробництва Миколаївського національного аграрного університету

ЗМІСТ

ВСТУП	4
I. ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	5
1. МЕХАНІКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА	5
2. ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	7
3. СИСТЕМА ГЕНЕРАТОР-ДВИГУН	11
II. СПЕЦІАЛЬНІ ЕЛЕКТРОПРИВОДИ І АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ	19
1. РОЗРАХУНОК ВИКОНАВЧОГО ПРИВОДУ ЗІ СПЕЦІАЛЬНИМИ ЕЛЕКТРИЧНИМИ МАШИНАМИ	19
2. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ДІАГНОСТИКА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ. ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ДІАГНОСТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ	28
III. ЧАСТОТНОРЕГУЛЬОВАННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД	38
1. СИСТЕМАТИЗАЦІЯ РІЗНИХ ТИПІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З КЕРОВАНІСТІ	38
2. КЕРОВАНІСТЬ АСИНХРОННОГО КОРОТКОЗАМКНЕНОГО ДВИГУНА У СТАЛИХ РЕЖИМАХ	41
3. ЗАКОНИ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛІННЯ	44
4. СИСТЕМИ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ЗАКОНИ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛІННЯ	49
5. ОСОБЛИВОСТІ ЧАСТОТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ	51
6. АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД З ВЕКТОРНИМ УПРАВЛІННЯМ	52
ПРИБЛИЗНИЙ ПЕРЕЛІК ЗАПИТАНЬ ДЛЯ САМОПІДГОТОВКИ	54
ЛІТЕРАТУРА	58

ВСТУП

Сучасна технічна революція передбачає упровадження в агропромисловому комплексі високопродуктивних і ефективних процесів і робочих машин, важливою ланкою яких є система електропривода.

Розуміння задач, які вирішує електропривод, дозволить сформувати погляд на процес розвитку і вдосконалення системи перетворення енергії, на прогресивні схеми регульованих приводів постійного і змінного струму, які знаходяться в стадії експериментальних досліджень і промислової перевірки. Особлива увага приділяється приводам із статичними перетворювачами в силових колах, вивченню специфічних явищ і режимів, пов'язаних із застосуванням тиристорних перетворювачів в промисловості.

І. ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

1. МЕХАНІКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Задача 1.

Механізм приводиться двигуном незалежного збудження серії П. 220 В; тип вибрати по останній цифрі шифру із табл.1

Таблиця 1

ВАРІАНТ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Серія П	112	111	102	101	92	62	71	72	81	82
P_n , кВт	85	75	55	42	32	8	10	14	19	25
n_n , об/хв	750	750	750	750	750	1000	1000	1000	1000	1000

НЕОБХІДНО :

1. Написати повні технічні дані вибраного двигуна , розрахувати пускову діаграму $\omega=f(M)$. Відносне значення моменту опору при пуску μ і число ступенів Z вибрати із табл.2 по передостанній цифрі шифру.

Таблиця 2

ВАРІАНТ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
μ	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7
z	6	6	6	5	5	5	4	4	3	3

2. Розрахувати , побудувати швидкісні і механічні характеристики, визначити величину змінюючого параметри для випадків:

а) $\omega=0,6\omega_n$ $R_d=var$;

б) $\omega=0,6\omega_n$ $U=var$;

в) $\omega=1,2\omega_n$ $\Phi=var$.

ПРИМІТКА: Змінюючий параметр повинен забезпечити казану частоту обертання при моменті опору , заданого в попередньому пункті задачі.

3. Розрахувати, побудувати швидкісну і механічну характеристики при шунтуванні якоря , визначити R_d , який забезпечує жорсткість характеристики удвічі більшу жорсткості характеристики одержаної в пункті 2, і при розрахунковому значенні R_d . Знайти ККД при номінальному моменті.

4. Двигун працює на природній характеристиці при заданому в п.1 моменті опору. Визначити опір і секції противмикання, який забезпечує гальмівний момент, рівний двократному номінальному.

Для цих же умов розрахувати опір динамічного гальмування. Розрахувати і побудувати швидкісні і динамічні характеристики.

ПРИМІТКА: Характеристики, одержані в п.п. 2-4, поєднати на окремих графіках $\omega=(I)$ $\omega=(M)$ і дати порівняльну оцінку.

Задача 2.

Вантажопідійомний механізм, кінематична схема якого зображена на рис.1 приводиться двигуном постійного струму, з послідовним збудженням. Дані кінематичної схеми приведені в табл.3 і вибираються по останній цифрі шифру.

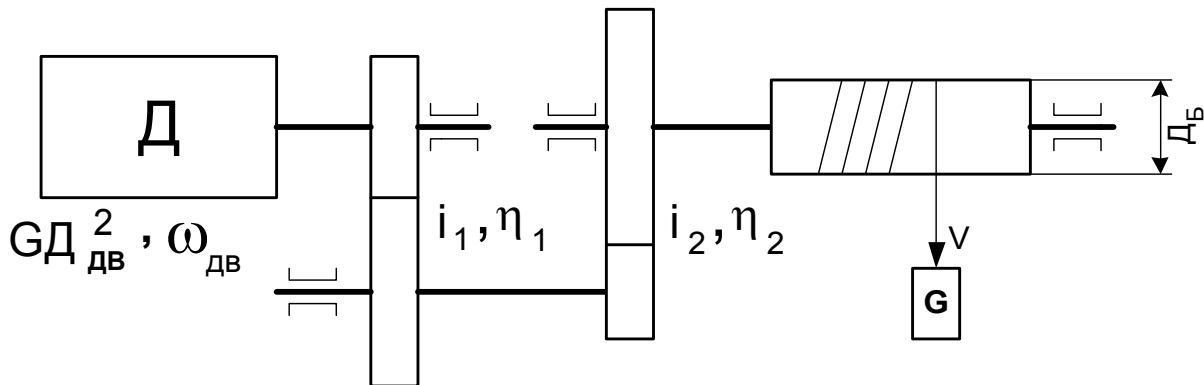


Рис.1

НЕОБХІДНО:

1. Визначити частоту обертання двигуна, моменти на валах барабана двигуна при підйманні і опусканні повного вантажу.

Таблиця 3.

ВАРІАНТ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
G,кН	4.5	3.5	8.2	4.7	5.0	11.0	6.5	25.0	15.0	19.0
Дб,м	0.5	0.8	1.0	1.3	1.4	1.6	0.9	1.3	1.2	1.4
V, м/с	0.8	1.5	1.08	1.48	1.95	1.48	1.67	1.39	1.48	1.52
i1=i2	5	6.5	6	6.5	7.5	6.5	5	7.5	6.5	6

Для всіх варіантів : $\eta\delta=0.97$; $\eta_1=\eta_2=0.96$

2. Визначити потужність на валу двигуна при підйманні та опусканні повного вантажу, вибрати двигун по каталогу серії ДП і визначити зведений до валу двигуна маховий момент і момент інерції механізму.

3. Розрахувати і побудувати природну швидкісну і механічну характеристики.

4. Розрахувати пускові опори двигуна, побудувати пускову діаграму для заданого числа ступенів Z (вибирається по передостанній цифрі шифру із табл.4).

Таблиця 4.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Z	4	2	3	4	2	3	4	2	3	3

5. Розрахувати і побудувати штучні швидкісні і механічні характеристики двигуна для одержаних значень опорів пускового реостата.

6. Визначити величини опорів, які необхідно увести в коло якоря двигуна для зниження частоти обертання при номінальному моменті опору до $\omega=0,5\omega_n$ і $\omega=-0,5\omega_n$, а також розрахувати і побудувати швидкісні і механічні характеристики.

7. Визначити величину додаткового опору, який необхідно увести в коло якоря, щоб при переході в режим динамічного гальмування з самозбудженням гальмівний момент дорівнював двократному номінальному. До переходу в режим динамічного гальмування двигун працював на природній характеристиці при моменті опору, рівному номінальному.

8. Розрахувати і побудувати механічні характеристики при шунтуванні якоря опором $R_{ш}=0,4R_n$. Визначити струм мережі I_m , струм шунта $I_{ш}$ та струм якоря I_a при номінальному моменті, споживаючу потужність і потужність втрат в опорах. Знайти ККД при номінальному моменті.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО РІШЕННЯ ЗАДАЧ 1, 2

Задача 1.

Розрахунок пускового реостату виконується розрахунковим або графічним шляхом згідно /Л1, с.36-40; Л2, с.367-369; Л3, с.72-78; Л7, с.46-55/. При рішенні п.п. 2,3,4 можна скористатися /Л3, с.45; Л1, с. 23-25, 522-524; Л2, с.57-59, 197-200, 229-335/.

Задача 2.

Для визначення зведеного до валу двигуна моменту опору необхідно скласти рівняння балансу потужності двигун – робоча машина / Л3, с.21-25 /. При рішенні решти пунктів задачі можна скористатися /Л3, с.45-51; Л1, с.23-25, 522-524; Л2, с.57-59, 197-200, 229-235 /.

2. ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Задача 3.

Для механізму з вентиляторним моментом використовується асинхронний двигун з фазним ротором. Момент статичного опору механізму залежить від швидкості і описується рівнянням:

$$M = M \left[a + (1 - a) \left(\frac{\omega}{\omega_{НДВ}} \right)^2 \right], \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Значення номінального моменту механізму $M_{нmax}$ і n_c вибрати по останній цифрі шифру із табл.5

Коефіцієнт a вибирається із табл.6 по передостанній цифрі шифру.

Таблиця 5

ВАРІАНТ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$M_{н}, \text{Нм}$	490	354	265	188	131	94	277	396	540	740
$n_c, \text{об/хв}$	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1000	1000	1000	1000

Таблиця 6

ВАРІАНТ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a	0,09	0,095	0,1	0,11	0,12	0,13	0,12	0,11	0,1	0,09

НЕОБХІДНО:

1. Вибрати двигун і вписати його технічні дані.
2. Розрахувати і побудувати криву $\omega=f(M_c)$ і природну характеристику, користуючись спрощеною формулою Клоса.
3. Розрахувати і побудувати пускову діаграму з урахуванням характеру навантаження при числі ступенів $Z=4$. Розрахувати пускові опори.
4. Виконати розрахунок і побудову кривої ККД $\eta=f(\omega)$ при вентиляторному характері навантаження і розрахункових значеннях пускового реостату.
5. Розрахувати і побудувати характеристики асинхронного двигуна при зміні напруги, частоти мережі. Дані взяти із табл.7 по передостанній цифрі шифру.

Таблиця 7

ВАРІАНТ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U/U_H	0.9	0.8	0.85	0.8	0.75	0.7	0.78	1.05	1.1	1.15
f/f_H	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.9	1.1	1.2	1.3	1.4

6. Розрахувати і побудувати механічні характеристики асинхронного двигуна в режимі динамічного гальмування для наступних випадків:

- а) однакових значеннях опорів ротора $R_p=R_{рн}$ і двох різних значень постійного струму в обмотці статора $I_p=2I_{с.х.}$; $I_p=3I_{с.х.}$

б) при тих же значеннях постійного струму, але при значенні опору, рівному $0.2R_p$.

Задача 4.

Механізм приводиться в рух двома двигунами постійного струму незалежного збудження при жорсткому зв'язку валів, якірні кола яких можуть бути ввімкнені паралельно або послідовно. Технічні дані двигунів приведені в табл.8 і вибираються по останній цифрі шифру.

НЕОБХІДНО:

А. ПАРАЛЕЛЬНЕ ВМИКАННЯ ЯКІРНИХ КІЛ ДВИГУНІВ

1. По паспортним даним двигунів розрахувати і побудувати їх природні характеристики і спільну при роботі на один вал.

2. В коло якоря одного з двигунів введений додатковий опір $R_d = a(R_a + R_d)$ (коефіцієнт **a** вибирається по передостанній цифрі шифру із табл.9), другий працює на природній характеристиці. Побудувати ці характеристики і їх спільну, визначити розподіл струмів і моментів між двигунами при $M_c = 2M_n$ графічним і аналітичним шляхом. Порівняти дані. Що необхідно зробити для рівномірного розподілу навантажень?

3. Виконати теж саме, що і в п.2 при умові, що у двигуна, працюючого на природній характеристиці, зменшено магнітний потік на "**в**"% (коефіцієнт "**в**" вибирається із табл.9 по передостанній цифрі шифру). Розподіл струмів і моментів визначити графічно і аналітично для $M_c = 1.5M_n$; $M_c = 2M_n$. В яких режимах при даних моментах навантаження будуть працювати двигуни? Визначити, з якою частотою обертання будуть працювати двигуни при заданих моментах навантаження. Розрахувати відповідні параметри для рівномірного розподілу навантажень.

4. Для заданого значення $I_c = 2I_n$ необхідно одержати частоту обертання $\omega = 0,2\omega_n$ трьома способами:

а) введенням додаткового опору в коло якорів двигунів;

б) один двигун працює в двигунному режимі, другий – в режимі динамічного гальмування.

в) один двигун працює в двигунному режимі, другий в режимі противмикання.

Визначити графічним і аналітичним шляхом величини додаткових опорів, які необхідно ввести в якорі обох двигунів, щоб забезпечити їх роботу для вказаних вище висновків.

Технічні дані електродвигунів постійного струму серії П 220В 1500

об/хв., 2Р=4 загально промислового виконання

ВАРІАНТ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип	П71	П72	П82	П82	П91	П92	П101	П102	П111	П112
Р _н ,кВт	19	25	32	42	55	75	100	125	160	200
І _н ,А	103	132	166	218	287	381	508	632	809	1000
η _н ,%	84	86	87.5	87.5	87	89.5	89.5	90	90	91
R _я , 10 ⁻² Ом при 20 ⁰ С	9.12	5.35	5.7	3.44	1.875	0.975	0.955	0.58	0.46	0.338
R _{дп} , 10 ⁻² Ом при 20 ⁰ С	3.23	2.4	1.8	1.18	0.69	0.41	0.36	0.14	0.178	0.157
R _{оз} , Ом при 20 ⁰ С	76.8	67	95.5	79.2	35.8	31.8	37.8	32.5	28.0	24.0
GД ² , кг·м ²	1.4	1.6	2.7	3.1	5.9	7.0	10.3	12.0	20.4	23.0

Таблиця 9

ВАРІАНТ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
а	5	6	7	8	9	10	9	8	7	6
в, %	10	15	20	25	20	15	10	15	20	25

ПРИМІТКА : Струм якоря двигуна , працюючого в двигуному режимі, вибирається студентом самостійно, щоб було зручно одержати необхідний режим.

5. Два асинхронних двигуна з фазним ротором працюють на один вал при жорсткому зв'язку валів (технічні дані двигунів узяті із задачі 3). Необхідно визначити величини додаткових опорів, щоб при роботі одного двигуна в двигуному режимі на характеристиці, у якої $M_p = M_{кр}$, а другого – в динамічного гальмування, одержати швидкість $\omega = 0,2\omega_n$, при $M = M_n$. Виконати графічні побудови.

Б. ПОСЛІДОВНЕ ВМИКАННЯ ЯКОРНИХ КІЛ ДВИГУНІВ

Обидва двигуни працювали на природних характеристиках при $M_c = 2M_n$. У одного із двигунів зменшився магнітний потік на “в”% (див. Табл.9). Визначити

струм якоря I_a , моменти двигунів M_1 і M_2 , напругу на двигунах U_1 і U_2 , швидкість обертання ω . Виконати графічні побудови. Зробити відповідні висновки.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЗАДАЧ 3, 4

Щоб вирішити задачу, спочатку необхідно скласти схему заміщення для указаних способів вмикання двигунів і на їх основі записати відповідні рівняння.

3. СИСТЕМА ГЕНЕРАТОР-ДВИГУН

Задача 5.

Привод механізму виконано по системі генератор – двигун (Г-Д) з тиристорним збудженням (ТЗ), структурна схема якої приведена на рис.2. Технічні дані двигуна узяті із табл.8 задачі 4 по останній цифрі шифру.

НЕОБХІДНО:

1. Розрахувати і вибрати генератор, приводний двигун генератора, тиристорний перетворювач, скласти схему заміщення і визначити основні параметри.

2. Розрахувати і побудувати швидкісні і механічні характеристики в розімкненій і замкненій системах регулювання при наступних зворотних зв'язках (33):

- а) за швидкістю;
- б) за струмом;
- в) відсічки за струмом.

Дані для розрахунку характеристик в замкненій системі регулювання узяті із табл.10 по передостанній цифрі шифру.

3. Розрахувати енергетичні показники в розімкненій системі регулювання при $M_c = M_n$ і побудувати графіки $\eta = f(\omega)$.

Таблиця 10

ВАРІАНТ		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
33 за ω	K_{ω}	0.5	0.6	0.7	0.8	0.4	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85
33 за I	$\frac{\Delta\omega_z}{\Delta\omega_p}$	0.08	0.1	0.12	0.15	0.11	0.13	0.14	0.09	0.085	0.095
Відсічка за струмом	$\frac{I_{відс}}{I_H}$	2.0	1.95	2.15	2.2	2.05	1.9	2.1	2.25	1.9	2.15
	$\frac{I_y}{I_{відс}}$	1.05	1.1	1.12	1.13	1.14	1.15	1.16	1.17	1.18	1.2

4. Визначити необхідну величину задавальної напруги для одержання номінальної частоти обертання двигуна при $M_c = M_n$ зі зворотним зв'язком:

- а) за швидкістю;
- б) за струмом.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО РІШЕННЯ ЗАДАЧІ 5

Для побудови характеристик привода необхідно відповідно структурних схем (рис.3) з урахуванням вказаних зворотних зв'язків скласти рівняння електричної рівноваги, розв'язати його відносно частоти обертання двигуна $\omega_{дв}$ і відповідно заданих умов табл.10 розрахувати і побудувати необхідні характеристики.

НАПРИКЛАД:

Рівняння електричної рівноваги для схеми (рис.3 б) буде мати вигляд :

$$K\Phi_{дв}\omega_{дв} = U_3 \cdot K_{\Sigma} - I_{я} \cdot R_{\Sigma} + I_{я} \cdot K_i \cdot K_{\Sigma},$$

де

$$U_{3Н} = 10 \div 12 В;$$

$$K\Phi_{дв} = \frac{U_{нд} - I_{нд} \cdot R_{яд}}{\omega_{нд}};$$

$$K_{\Sigma} = \frac{E_{ГН}}{U_{3Н}};$$

$$R_{\Sigma} = R_{яд} - R_{яГ}.$$

Рішення даного рівняння відносно частоти обертання $\omega_{дв}$ дає вираз швидкісної характеристики привода зі зворотним зв'язком за струмом:

$$\omega_{дв} = \frac{U_3 \cdot K_{\Sigma} - I_{я} \cdot (R_{\Sigma} - K_i \cdot K_{\Sigma})}{K\Phi_{дв}}$$

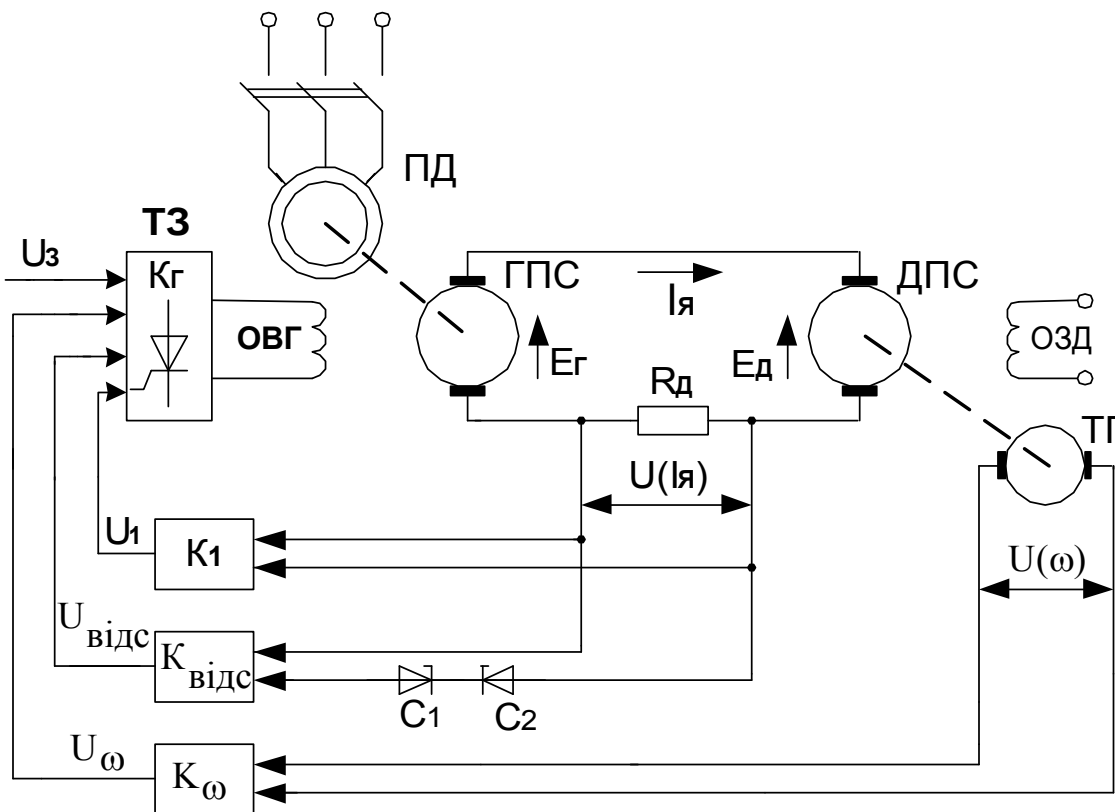


Рис.2

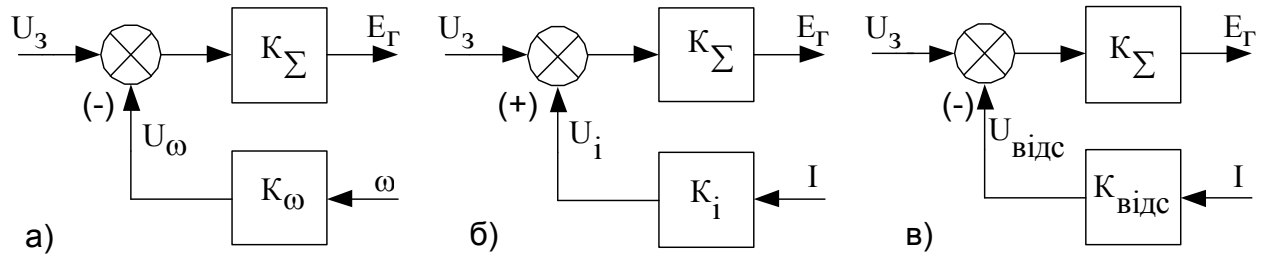


Рис.3

Задача 6

Механізм приводиться двигуном постійного струму з незалежним збудженням. Технічні дані двигунів серії П; 220В; 1000 об/хв; $2p=4$; $2a=2$ приведені в табл.11 і вибираються по останній цифрі шифру.

Таблиця 11

ВАРІАНТ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип	П52	П61	П62	П71	П72	П81	П82	П91	П92	П101
$R_H, \text{кВт}$	4.5	6.0	8.0	11.0	14.0	19.0	25.0	32.0	42.0	55.0
$I_H, \text{А}$	25.2	32.6	43.0	63.0	78.0	105	133	171	219	286
$\eta_H, \%$	81	83.5	85	79.5	81	82	85.5	85	87	87.5
N	372	372	279	297	270	222	286	165	145	111
$R_{\Sigma}, 10^{-2} \text{ Ом}$ при 20° C	43.2	32	22.6	22.4	17.2	11.0	8.06	5.03	4.01	2.06
На полюс $W_{\text{дп}}$	58	58	48	47	42	34	30	26	24	18
$R_{\text{дп}}, 10^{-2} \text{ Ом}$ при 20° C	20	17.4	10.2	7.6	6.55	3.46	3.18	1.63	1.45	0.86
На полюс W_3	1650	1950	1700	1400	1450	1600	1350	870	1000	950
$R_{\text{оз}}, \text{ Ом}$ при 20° C	184	158	136	85	108	96.2	79.2	35.8	48.4	37.8
$G_D^2, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	0.4	0.56	0.65	1.4	1.6	2.7	3.1	5.0	7.0	10.3

Характер моменту навантаження взяти із табл.12 по передостанній цифрі шифру.

Таблиця 12

ВАРІАНТ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
M_c	А	А	Р	Р	Р	А	А	Р	Р	А

А - активний; Р - Реактивний .

НЕОБХІДНО

1. Розрахувати і побудувати криві перехідного процесу $\omega=f(t)$; $I_{\text{я}}=f(t)$ без урахування електромагнітної сталої часу T_e для наступних випадків:

а) при спуску двигуна без навантаження і з навантаженням $M_c = M_H$ на повну напругу мережі;

б) при переході двигуна із двигуного режиму ($M_c = M_H$) в режим електродинамічного гальмування з допоміжним опором, дорівнює номінальному;

в) при зміні полярності напруги живлення на якорі для зазначеного в п.б) допоміжного опору;

г) визначити втрати електроенергії на опорах в якірному колі від початку перехідного процесу до 0.95 усталеного значення.

2. Розрахувати і побудувати криві перехідного процесу $\omega=f(t)$; $I_{\text{я}}=f(t)$ з урахуванням електромагнітної сталої часу T_e для наступних випадків:

а) при спуску двигуна без навантаження і з навантаженням $M_c = M_H$ на повну напругу мережі;

б) для випадку, коли в момент $t=0$ до валу двигуна, працюючого в режимі холостого ходу при $M_c=0$, прикладається момент $M_c = M_H$.

3. Побудувати криві перехідного процесу, якщо до валу двигуна прикладений момент $M_c = M_0 + M_1 \cdot \sin(\Omega t)$, при ($T_e=0$) в заданий момент часу Δt (початковий стан системи – робота двигуна в режимі холостого ходу). Значення M_0 , M_1 , Ω , Δt узяти із табл.13 по останній цифрі шифру.

Таблиця 13

ВАРІАНТ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta t, \text{с}$	1.1	2.0	2.2	3.0	0.3	0.0	1.4	1.8	1.0	3.3
$M_0, \text{Нм}$	260	118	480	500	400	416	1280	1500	1200	1100
$M_1, \text{Нм}$	113	1180	315	860	826	716	610	716	700	480
Ω	32.5	17.0	6.1	12.1	13.0	17.4	5.0	9.0	8.3	6.8

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО РІШЕННЯ ЗАДАЧІ 6

1. Перед тим, як розраховувати і будувати криві перехідного процесу без урахування T_e необхідно для заданих умов п.1 розрахувати і побудувати статичні характеристики $\omega=f(I_A)$, визначити початкові і кінцеві значення параметрів $\omega_{\text{ПОЧ}}$, $\omega_{\text{КІНЦ}}$, $I_{\text{ПОЧ}}$, $I_{\text{КІНЦ}}$.

Незалежно від характеру перехідного процесу, інтересуючи залежності мають вигляд:

$$I_A(t) = I_{\text{ПОЧ}} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}} + I_{\text{КІНЦ}} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_M}});$$

$$\omega(t) = \omega_{\text{ПОЧ}} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}} + \omega_{\text{КІНЦ}} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_M}});$$

де $\omega_{\text{ПОЧ}}$, $I_{\text{ПОЧ}}$ - значення швидкості і струму в момент, безпосередньо слідує за початком перехідного процесу, тобто після зміни умов, які викликали перехідний процес; *електромеханічна стала часу*

$$T_M = \frac{J R_{\Sigma}}{(K \Phi)^2},$$

J, R_{Σ} - значення моменту інерції двигуна і опору силового кола;

$\omega_{\text{КІНЦ}}$, $I_{\text{КІНЦ}}$ - значення швидкості і струму, які має двигун по закінченню перехідного процесу.

2. З урахуванням електромагнітної сталої часу передаточна функція по керуючій дії:

$$W_K(p) = \frac{1/K}{T_M T_E p^2 + T_M p + 1},$$

по збурюючій дії :

$$W_{ЗБ}(p) = \frac{\omega(p)}{M_C(\omega)} = \frac{\Delta \omega_C (T_E p + 1)}{T_M T_E p^2 + T_M p + 1}.$$

Загальне рішення диференціального рівняння, що описує перехідні режими, незалежно від дії, має вигляд:

$$\omega(t) = A e^{P_1 t} + B e^{P_2 t} + C,$$

де P_1, P_2 – корені характеристичного рівняння у випадку дійсних коренів;

$$\omega(t) = A e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \psi) + C$$

де α , β - дійсна і уявна частини коренів характеристичного рівняння, якщо корені комплексні.

Коефіцієнти A, B, C, ψ визначаються із початкових умов, які необхідно сформулювати точно і математично коректно. Початкові умови визначаються або аналітичним шляхом, або із графіків швидкісних характеристик заданих режимів роботи.

3. Для побудови перехідного процесу (п.3) його зображення в операторній формі має вигляд :

$$\Delta \omega(p) = \frac{M_c(p)}{(k\Phi)^2} \cdot \frac{1}{(T_M p + 1)}.$$

Операторне зображення моменту :

$$M_c(p) = M_0 + M_1 \frac{\Omega p}{p^2 + \Omega^2},$$

звідки :

$$\Delta \omega(p) = \frac{M_0}{(k\Phi)^2} \cdot \frac{1}{(T_M p + 1)} + \frac{M_1}{(k\Phi)^2} \cdot \frac{\Omega p}{(p^2 + \Omega^2)(T_M p + 1)}.$$

Оригінал зображення :

$$\omega(t) = \frac{M_0}{(k\Phi)^2} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_M}}) + \frac{M_1}{(k\Phi)^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \Omega^2 T_M^2}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \sin \Theta + \sin(\Omega \cdot t - \Theta) \right) + \omega_0;$$

$$\Theta = \arcsin \frac{\Omega}{\sqrt{1/T_M^2 + \Omega^2}}.$$

Значення Θ знаходиться із умови :

Визначення оригіналу зображення можна також виконати по / Л.8 ; Л.9 /.

Задача 7.

Навантажувальна діаграма циклічно працюючого механізму приведена на рис.4.

На першій ділянці t_1 електропривод рівноприскорений розганяється до кутової швидкості, що дорівнює $0.25\omega_H$, на другій ділянці t_2 відбувається також рівноприскорений рух до усталеної кутової швидкості ω_H .

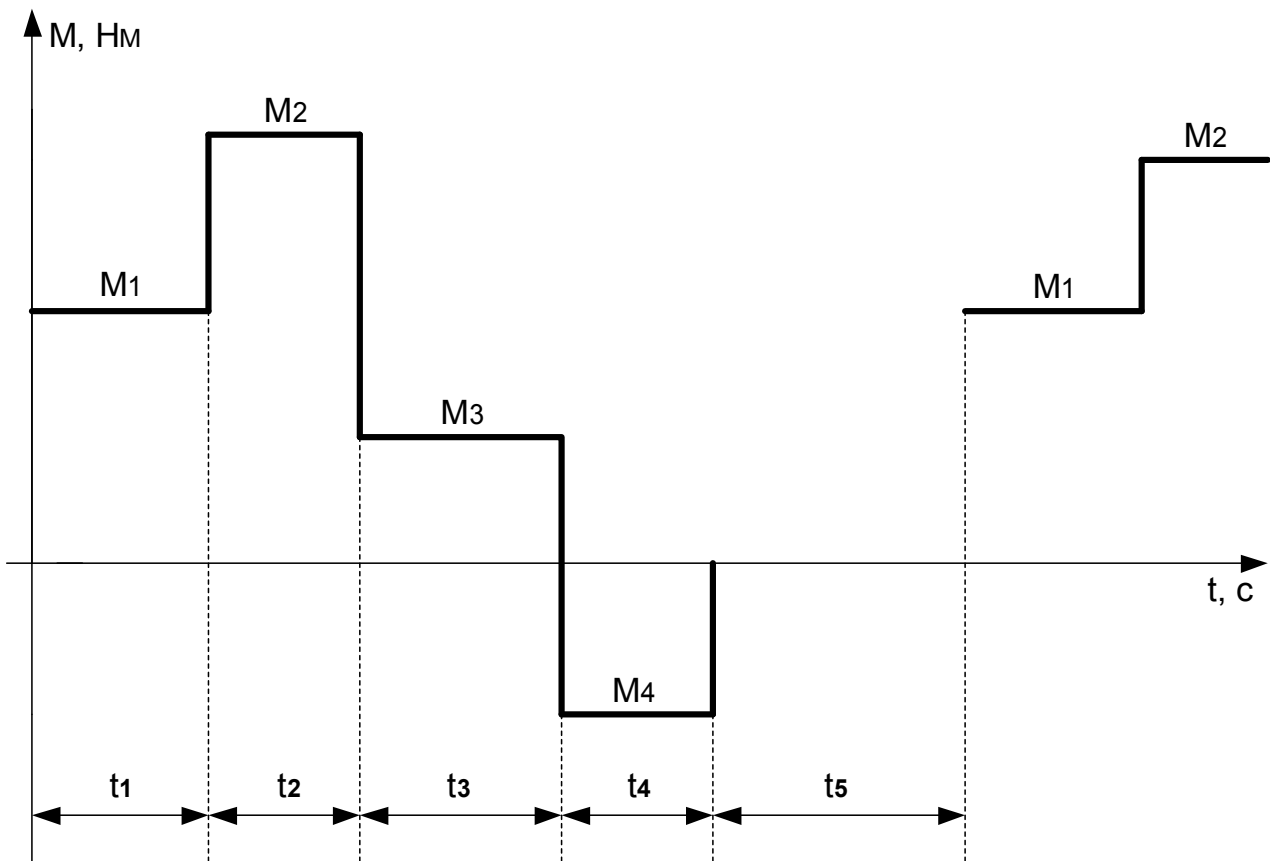


Рис.4

На ділянці t_3 має місце усталений режим, на ділянці t_4 відбувається гальмування привода з постійним уповільненням до повної зупинки. Після паузи t_5 робочий цикл повторюється.

Механізм приводиться асинхронним двигуном з фазним ротором. Синхронна частота обертання, величини моментів вибираються із табл.14 по передостанній цифрі шифру.

Таблиця 14

ВАРІАНТ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
M1 ,Нм	90	110	130	150	170	180	200	225	250	275
M2 ,Нм	120	150	175	200	225	250	275	300	325	350
M3 ,Нм	50	75	100	125	150	125	100	150	100	100
M4 ,Нм	50	75	100	125	150	175	200	225	250	200
t1 , с	1.0	1.5	2.0	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2
t2 , с	1.5	2.0	2.5	2.5	2.5	3.0	3.0	3.0	3.5	3.5
t3 , с	2.0	3.0	4.0	2.0	3.0	4.0	2.0	3.0	4.0	2.0
t4 , с	0.5	0.6	0.75	0.5	0.75	0.8	0.9	0.8	0.5	1.0
t5 , с	0.8	14.0	1.0	25.0	1.0	50.0	1.2	20.0	2.0	25.0
n ,Об/хв	750	750	750	1000	1000	1000	1500	1500	1500	1500

НЕОБХІДНО:

1. Розрахувати і побудувати швидкісну діаграму $\omega=f(t)$ електропривода і визначити режим його роботи у відношенні нагрівання.

2. Визначити необхідну потужність і вибрати асинхронний двигун з фазним ротором:

а) на всіх ділянках діаграми двигун працює з примусовим охолодженням;

б) за час зупинки двигуна система примусового (незалежного) охолодження вимикається;

в) в електроприводі застосовується двигун з самовентиляцією;

3. Перевірити двигун на перевантажувальну здатність.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЗАДАЧІ 7

Для вибору потужності електродвигуна і його перевірки за умовами нагрівання застосовуються методи середніх втрат, еквівалентного струму, моменту, потужності.

В даному випадку доцільно скористатися методом еквівалентного моменту з урахуванням умов охолодження при роботі на зниженій швидкості і зупинці.

У випадку зупинки і виключення системи охолодження погіршення умов охолодження ураховується коефіцієнтом β , який дорівнює 0.5. Погіршення умов охолодження двигуна з самовентиляцією при роботі на зниженій частоті обертання ураховується коефіцієнтом α ;

$$\alpha = \frac{1 + \beta}{2}.$$

При примусовому охолодженні (вентиляції) погіршення умов відведення тепла не ураховується (див.Л.1).

II. СПЕЦІАЛЬНІ ЕЛЕКТРОПРИВОДИ І АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

1. РОЗРАХУНОК ВИКОНАВЧОГО ПРИВОДУ ЗІ СПЕЦІАЛЬНИМИ ЕЛЕКТРИЧНИМИ МАШИНАМИ

Задача 1.

Розрахунок характеристик двофазних асинхронних двигунів

Відповідно до заданого варіанта (таблиця 1) виконати розрахунок і навести графіки механічних ($M = f(\omega)$) характеристик для двофазного асинхронного двигуна з амплітудним і фазним керуванням. Розрахувати значення напруг, струмів і моментів прямої та зворотної послідовності, швидкість ідеального холостого ходу, статичну помилку за швидкістю та жорсткість механічних характеристик.

Таблиця 1

Варіант	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/хв	R_2 , Ом	$K_{\text{тр}}$	J , кг·м ²	γ	$\sin\theta$
1	2,2	885	0,61	2,65	0,0425	1; 0,5	1; 0,75
2	3,5	910	0,77	1,76	0,0675	1; 0,25	1; 0,5
3	5	940	0,24	2,2	0,1025	1; 0,75	1; 0,25
4	7,5	945	0,29	1,59	0,142	1; 0,25	1; 0,75
5	11	953	0,132	1,84	0,262	1; 0,75	1; 0,5
6	7,5	702	0,211	1,94	0,262	1; 0,5	1; 0,25
7	11	715	0,0835	2,33	0,465	1; 0,5	1; 0,75
8	16	718	0,105	1,63	0,675	1; 0,25	1; 0,5
9	2,2	885	0,61	2,65	0,0425	1; 0,75	1; 0,25
10	3,5	910	0,77	1,76	0,0675	1; 0,25	1; 0,75
11	5	940	0,24	2,2	0,1025	1; 0,75	1; 0,5
12	7,5	945	0,29	1,59	0,142	1; 0,5	1; 0,25
13	11	953	0,132	1,84	0,262	1; 0,5	1; 0,75
14	7,5	702	0,211	1,94	0,262	1; 0,25	1; 0,5
15	11	715	0,0835	2,33	0,465	1; 0,75	1; 0,25
16	16	718	0,105	1,63	0,675	1; 0,25	1; 0,75
17	2,2	885	0,61	2,65	0,0425	1; 0,75	1; 0,5
18	3,5	910	0,77	1,76	0,0675	1; 0,5	1; 0,25
19	5	940	0,24	2,2	0,1025	1; 0,25	1; 0,75
20	7,5	945	0,29	1,59	0,142	1; 0,75	1; 0,5

В таблиці прийняті наступні позначення :

$P_{\text{ном}}$ - номінальна потужність двигуна;

$n_{\text{ном}}$ - номінальні оберти двигуна;

$I_{ст}$ - струм статора;

R_2 - опір ротора;

J - момент інерції;

$K_{тр}$ - коефіцієнт трансформації напруги;

γ - коефіцієнт керування;

θ - кут зсуву фаз між напругами керування і збудження.

Напруга живлення при $\gamma=1$ $U_k=U_3=220$ В.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАВДАННЯ ЗАДАЧІ 1

Двофазний асинхронний ЕП з амплітудним керуванням

При амплітудному керуванні регулювання швидкості досягається за рахунок створення несиметричної системи напруг на обмотках ЕД. При цьому напруга на обмотці збудження U_3 залишається постійною, а напруга на обмотці керування U_k змінюється, за допомогою пристрою керування ПК.

$$\dot{U}_3 = \text{const}, \quad \dot{U}_k = \gamma \dot{U}_3$$

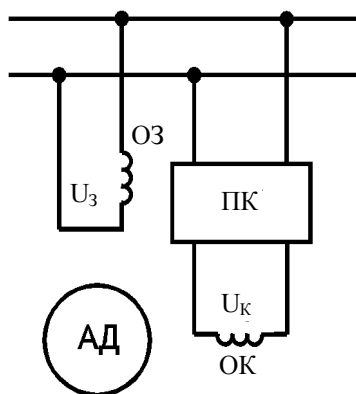


Рис.1.. Схема включення двофазного АД

де $\gamma = \dot{U}_k / \dot{U}_3$ - коефіцієнт амплітудного керування.

Несиметричну систему можна розкласти на складові прямої \dot{U}_1 і зворотної послідовності \dot{U}_2 , тому при фазовому зсуві 90° (чиста ємність) модулі напруги мають вигляд

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{U}_3}{2}(1 + \gamma); \quad \dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_3}{2}(1 - \gamma).$$

Система рівнянь для струмів

$$I_1 = \frac{U_1 S}{R_2'}; \quad I_2 = \frac{U_2 (2 - S)}{R_2'}.$$

Вираз для електромагнітного моменту

$$M_{эм} = \frac{I_1^2 R_2'}{S \omega_1},$$

де $\omega_1 = \frac{2\pi f}{p}$ - швидкість магнітного поля, S - ковзання, p - число пар полюсів, R_2' -

приведений активний опір ротора $R_2' = R_2 \cdot k_{тр}^2$.

Моменти прямої, зворотної послідовності й результуючий момент:

$$M_1 = \frac{U_1^2 S}{\omega_1 R_2'} = \frac{U_3^2 S}{4\omega_1 R_2'} (1 + \gamma)^2; \quad M_2 = \frac{U_2^2 (2 - S)}{4\omega_1 R_2'} (1 - \gamma)^2;$$
$$M = M_1 - M_2 = \frac{U_3^2}{\omega_1 R_2'} \left[\gamma - \frac{1 + \gamma^2}{2} (1 - S) \right] = M_n \left[\gamma - \frac{1 + \gamma^2}{2} (1 - S) \right],$$

$$\text{де } M_{\Pi} = \frac{U_{\kappa}^2}{\omega_1 R_2} = \text{const при } S=1 \text{ і } \gamma=1$$

Швидкість ідеального холостого ходу : $\omega_0 = \frac{2\gamma}{1+\gamma^2} \omega_1$.

Статична помилка за швидкістю : $\Delta\omega = \frac{2\omega_0}{M_n(1+\gamma^2)} M$;

Жорсткість механічної характеристики : $|\beta| = M_{\Pi} \frac{1+\gamma^2}{2\omega_0}$.

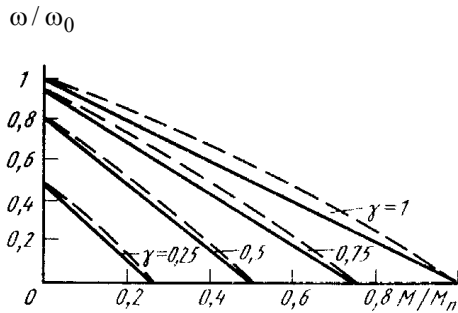


Рис.2. Механічні характеристики при амплітудному керуванні: - ідеальні, --- реальні

Зі зменшенням γ і ω_0 жорсткість механічної характеристики зменшується. Динамічні властивості характеризуються T_s і T_m але $T_s = \frac{L}{R}$ дуже мала й у розрахунок не приймається.

$$T_m = J \frac{2\omega_1}{M_n(1+\gamma^2)}$$

у міру зниження швидкості ω_0, T_m збільшується і перехідні процеси відбуваються більш повільно.

Двофазний асинхронний ЕП з фазовим керуванням

Принцип фазового керування аналогічний амплітудному (див. рис.1.), але при фазовому напруга на ОК залишається незмінною, але змінюється по фазі щодо напруги на ОЗ. При цьому

$$\gamma=1, \dot{U}_{\kappa} = \dot{U}_3 e^{-j\theta}, \theta = f(t)$$

Напруга прямої і зворотної послідовностей для U_B .

$$\dot{U}_3 = U_{\kappa} e^{j\theta};$$

$$\dot{U}_1 = \frac{U_{\kappa}}{2} (1 + e^{j(\frac{\pi}{2}-\theta)}); \quad \dot{U}_2 = \frac{U_{\kappa}}{2} (1 + e^{j(\frac{\pi}{2}+\theta)}).$$

Вектори напруг прямої і зворотної послідовностей

$$\dot{U}_1 = \frac{U_{\kappa}}{2} (1 + \sin \theta - j \cos \theta); \quad \dot{U}_2 = \frac{U_{\kappa}}{2} (1 - \sin \theta + j \cos \theta).$$

$$U_1^2 = \frac{1}{4} U_{\kappa}^2 [(1 + \sin \theta)^2 + \cos^2 \theta] = \frac{1}{2} U_{\kappa}^2 [1 + \sin \theta];$$

$$U_2^2 = \frac{1}{4} U_{\kappa}^2 [(1 - \sin \theta)^2 + \cos^2 \theta] = \frac{1}{2} U_{\kappa}^2 [1 - \sin \theta];$$

$$U_1 = U_{\kappa} \sqrt{\frac{1}{2} [1 + \sin \theta]}; \quad U_2 = U_{\kappa} \sqrt{\frac{1}{2} [1 - \sin \theta]}.$$

Вирази для струмів прямої і зворотної послідовностей мають вигляд:

$$I_1 = \frac{U_k S}{R_2'} \sqrt{\frac{1}{2}[1 + \sin \theta]}; \quad I_2 = \frac{U_k(2-S)}{R_2'} \sqrt{\frac{1}{2}[1 - \sin \theta]}.$$

Тому що $M \approx U^2$, то, знайшовши квадрати модуля кожної напруги, підставимо їх у вираз для моменту

$$M = M_1 - M_2 = \frac{U_1^2 S}{\omega_1 R_2'} - \frac{U_2^2(2-S)}{\omega_1 R_2'} = M_n \left(\sin \theta - \frac{\omega}{\omega_1} \right),$$

чи для відносних величин

$$\frac{\omega}{\omega_1} = \sin \theta - \frac{M}{M_n}$$

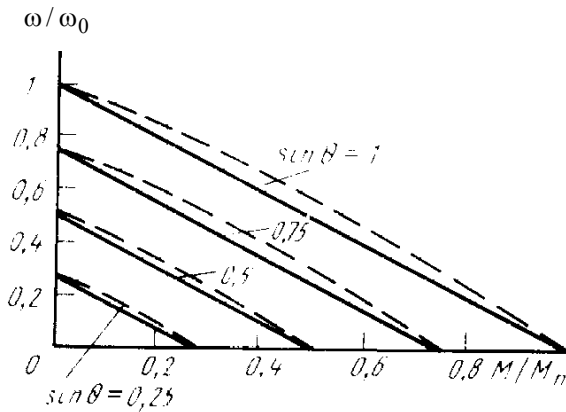


Рис.3.

Механічні характеристики при фазовому керуванні: — ідеальні, - - реальні

Якщо вважати, що $\sin \theta$ - це коефіцієнт керування, то характеристики мають вигляд прямих.

Жорсткість характеристик $|\beta| = \frac{M_n}{\omega_1}$

постійна у всьому діапазоні регулювання і при малих швидкостях приблизно вдвічі вище ніж при амплітудному керуванні.

T_m при фазовому керуванні не змінюється

$$T_m = J \frac{\omega_1}{M_n}.$$

Для реалізації фазового керування в структурі ЕП необхідно

включити фазообертач, що зміщає фазу вихідної напруги у функції різниці U_3 і U_{03} . В іншому структурі ЕП аналогічна структурі з амплітудним керуванням.

Задача 2.

Розрахунок характеристик виконавчих електроприводів з двигунами постійного струму

Відповідно до заданого варіанта (таблиця 2) виконати розрахунок і навести графіки механічних ($M = f(\omega)$), регулювальних ($\omega = f(\alpha)$) і енергетичних ($P_2 = f(\omega)$) характеристик для виконавчого двигуна постійного струму з якірним і полюсним керуванням.

Таблиця 2

Варіант	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/хв	$I_{\text{я}}$, А	$R_{\text{я}}$, Ом	J , кг·м ²	α
1	0,74	700	4,7	6,2	0,0575	1; 0,75
2	1,2	700	7,1	3,07	0,07	1; 0,5
3	1,45	700	8,5	2,49	0,125	1; 0,25
4	2,3	700	13,7	1,24	0,16	1; 0,75
5	2,7	600	17	1,94	0,4	1; 0,5
6	4,2	600	24	1,71	0,5	1; 0,25
7	6,5	550	37,5	0,58	0,95	1; 0,75
8	0,44	530	3	10,79	0,0575	1; 0,5
9	1,25	500	7,5	2,35	0,16	1; 0,25
10	4,5	450	27	0,92	0,95	1; 0,75
11	5,5	400	32	0,88	1,15	1; 0,5
12	0,74	2100	5,2	6,2	0,0575	1; 0,25
13	1,2	2100	7,7	3,07	0,07	1; 0,75
14	1,45	2100	9,2	2,49	0,125	1; 0,5
15	2,3	2100	15,5	1,24	0,16	1; 0,25
16	2,7	1800	20,1	1,94	0,4	1; 0,75
17	4,2	1800	27	1,71	0,5	1; 0,5
18	6,5	1650	43	0,58	0,95	1; 0,25
19	1,25	2000	7,9	2,35	0,16	1; 0,75
20	4,5	1800	34,8	0,92	0,95	1; 0,5

У таблиці прийняті наступні позначення :

$P_{\text{ном}}$ - номінальна потужність двигуна;

$n_{\text{ном}}$ - номінальні оберти двигуна;

$I_{\text{я}}$ - номінальний струм якірного ланцюга;

$R_{\text{яц}}$ - опір якірного ланцюга;

J - момент інерції;

α - коефіцієнт керування.

Напруга живлення при $\alpha=1$ $U_{\text{к}}=U_3=220$ В.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАВДАННЯ ЗАДАЧІ 2

Виконавчі ДПС із якірним керуванням

У таких виконавчих двигунів

$$I_K = \frac{U_K - E_K}{R_K} = \frac{U_K - k^2 U_3 \omega}{R_K},$$

де е.р.с. $E_K = k\Phi^2 U_3$ тому що, $\Phi \equiv I_3 \equiv U_3$

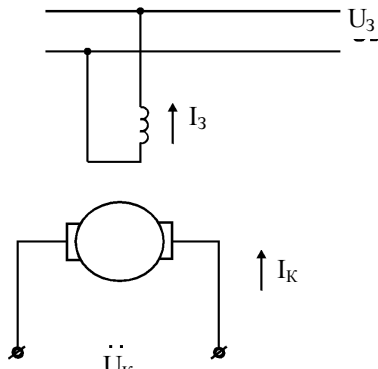


Рис. 4. Схема включення ДПС при якірному

звідки $\Phi = kU_3$,

k - конструктивний коефіцієнт двигуна.

З іншої сторони $\kappa_e = \kappa_\phi = \kappa_m$; $E_K = k\Phi\omega = k^2 U_3 \omega$, R_y - опір обмотки якоря.

Обертаючий момент: $M = k\Phi I_K = k^2 U_3 I_K$,
підставивши формулу для I_K , одержимо

$$M = \frac{k^2 U_3 U_K - k^4 U_3^2 \omega}{R_K} = \frac{\alpha k^2 U_3^2 - k^4 U_3^2 \omega}{R_K}$$

Для зручності перейдемо до відносних одиниць. За базисний момент прийемо $M_{\text{пуск1}}$ - пусковий момент при $\alpha=1$, тобто $U_K = U_3$ $\left(\alpha = \frac{U_K}{U_3} \right)$

З формули моменту одержимо:

$$M_{\text{пуск1}} = \frac{k^2 U_3^2}{R_K},$$

$$\mu = \frac{M}{M_{\text{пуск1}}} = \alpha - k^2 \omega.$$

За одиницю частоти обертання, приймаємо частоту при ідеальному холостому ході при $\alpha=1$.

Вираз для γ одержимо положивши $\alpha=1$ і $\mu=0$

$$\omega_{01} = \frac{1}{k^2} \quad \text{чи} \quad \mu = \alpha - \frac{\omega}{\omega_{01}} \quad \text{чи при} \quad \gamma = \frac{\omega}{\omega_{01}}; \quad \mu = \alpha - \gamma.$$

Це рівняння показує лінійну залежність μ від α і γ

Якщо записувати останнє рівняння у вигляді $\gamma = \alpha - \mu$, одержимо рівняння регульовальної характеристики.

Жоден з виконавчих двигунів не володіє лінійними механічними характеристиками, крім ДПС із якірним керуванням.

Потужність збудження $P_3 = I_3^2 R_3 = \frac{U_3^2}{R_3}$, що складає (5÷30%). Потужність

керування $P_K = I_K U_K$, що складає (95÷70%). Це недолік - велика потужність керування, підвищені габарити. Потужність на валу $P_g = M\omega$

валу $p_2 = \mu\gamma = \gamma(\alpha - \gamma) = \alpha\gamma - \gamma^2$ - нелінійна при $\alpha = \text{const}$.

З виразу видно, що $p_2 = p_{2max}$ при $\alpha = \gamma_0$, тобто половина частоти обертання холостого ходу тобто $\gamma_{p_{2max}} = \frac{\alpha}{2}$. Цей вираз можна одержати, якщо виконати диференціювання виразу для p_2 і дорівнявши похідну до нуля.

Максимум потужності одержимо при $p_{2max} = \frac{\alpha^2}{4}$. При $U_k = U_3$ тобто $\alpha = 1$ $p_{max} = \frac{1}{4}$ потужності, споживаної при пуску.

Виконавчі двигуни з постійним магнітним і якірним керуванням мають аналогічні характеристики.

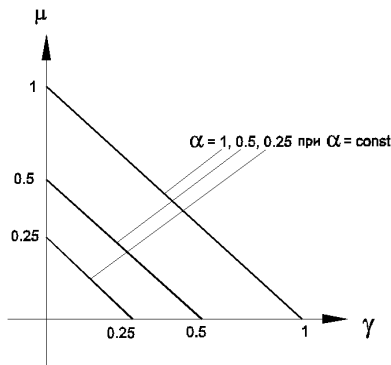


Рис.5. Механічні характеристики ДПС

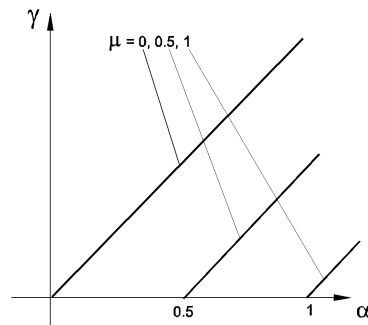


Рис.6. Регульовальні характеристики

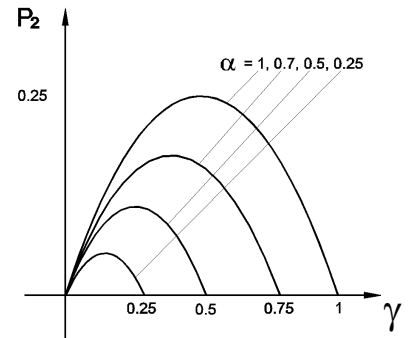


Рис.7. Енергетичні характеристики

Виконавчі ДПС із полюсним керуванням

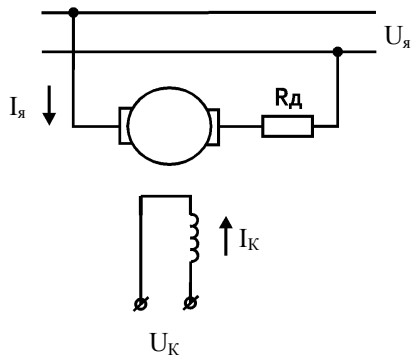


Рис.8. Схема включення при полюсному керуванні

У цих ДПС $U_я = const$ для обмеження пускового струму включається R_d .

$$\Phi_3 \equiv I_k \equiv U_k;$$

$$\Phi = kU_k = \alpha kU_я; \quad \alpha = \frac{U_k}{U_я},$$

проти е.р.с.

$$E_3 = k\Phi\omega = \alpha k^2\omega U_я.$$

Рівняння для обертаючого моменту:

$$M = k\Phi I_я$$

підставимо $I_я = \frac{U_я - E_я}{R_я}$ одержимо $M = \frac{k^2\alpha U_я^2 - k^4\alpha^2 U_я^2\omega}{R_d}$.

Приведемо до відносних одиниць аналогічно якірному рівнянню

$$M_{пуск1} = \frac{k^2 U_я^2}{R_d};$$

$$\mu = \frac{M}{M_{пуск1}} = \alpha - k^2\alpha^2\omega.$$

За одиничну частоту обертання γ приймаємо частоту при ідеальному холостому ході ($\mu=0, \alpha=1$) тоді одержимо $\mu = \alpha - \alpha^2 \gamma$

Характеристики є прямими, але зі зміною α жорсткість змінюється.

Частота обертання ідеального холостого ходу $\gamma = \frac{1}{\alpha}$.

При $\alpha \rightarrow 0$ $\gamma \rightarrow \infty$

Рівняння регулювальної характеристики

$\gamma = \frac{\alpha - \mu}{\alpha^2}$, тобто характеристики нелінійні.

При малих моментах опору регулювальні характеристики неоднозначні, тобто та сама частота обертання може бути отримана при різних напругах керування. Такий принцип застосовується в системах де $\mu \geq 0.5$. Потужність силового кола $P_{\text{я}} = U_{\text{я}} I_{\text{я}}$ - що складає (95 - 70%). Потужність керування $P_{\text{к}}$ - (5 - 30%), що вигідно відрізняє від двигуна з якірним керуванням

$$P_{\text{к}} = I_{\text{к}}^2 R_{\text{к}} = U_{\text{к}}^2 / R_{\text{к}} = \alpha^2 U_{\text{я}}^2 / R_{\text{к}}$$

$$\text{Потужність на валу } P_2 = \mu \gamma = (\alpha - \alpha^2 \gamma) \gamma = \alpha \gamma - \alpha^2 \gamma^2$$

$p_2 \rightarrow \max$ при $\gamma_{p_{\max}} = \frac{\gamma_0}{2} = \frac{1}{2\alpha}$ підставивши у вираз для p_2 , одержимо

$$P_{2\max} = \alpha \gamma_{p_{\max}} - \alpha^2 \gamma_{p_{\max}}^2 = \frac{\alpha}{2\alpha} - \frac{\alpha^2}{4\alpha^2} = \frac{1}{4}$$

Максимум P_2 не залежить від α , але від α залежить γ , тобто навіть при незначній нарузі керування можна одержати значну потужність на валу.

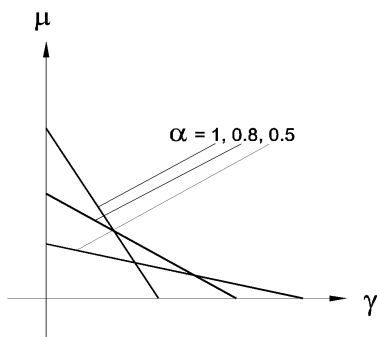


Рис.9. Механічні характеристики

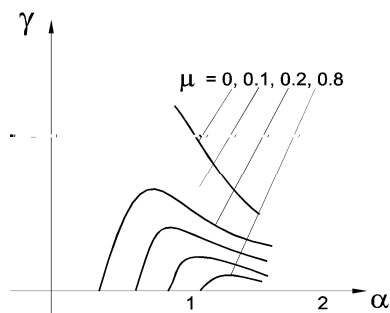


Рис.10. Регулювальні характеристики

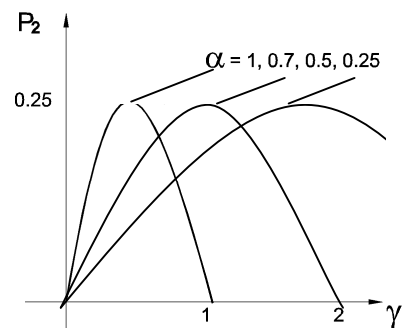


Рис.11. Енергетичні характеристики

2. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ДІАГНОСТИКА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ. ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ДІАГНОСТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ

Задача 1.

Визначення параметрів електроприводу постійного струму

Відповідно до заданого варіанта (таблиця 3) визначити параметри електроприводу постійного струму методом простору стану та параметричним методом. Результати розрахунку параметрів і постійних часу звести до таблиці 4. Порівняти отримані результати і зробити висновки по них.

Таблиця 3

Варіант Т	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/хв	$I_{\text{я}}$, А	U , В	$L_{\text{я}}$, Гн* 10^{-3}	$R_{\text{я}}$, Ом	J , кг*м ²
1	0.8	1000	18	52	1,18	0,422	0,02
2	0.8	750	31,5	44	0,73	0,309	0,035
3	1.1	500	28	50	1,10	0,244	0,07
4	2.7	600	50	70	0,55	0,17	0,238
5	5.5	500	90	78,5	0,40	0,1343	0,398
6	1.0	1000	24	56	0,8	0,439	0,023
7	1.1	600	29	47	0,89	0,323	0,072
8	2.0	600	50	53	0,42	0,1547	0,288
9	4.1	500	78,5	66	0,33	0,0817	0,442
10	2.1	3000	24.5	110	1.41	0.0571	0.31
11	6.4	1500	37	220	3.4	0.257	0.4
12	3.5	3000	41	110	7.2	0.457	0.212
13	2.1	1000	25	110	5.3	0.657	0.08
14	13.7	1000	80	220	2.2	0.264	0.7
15	12.0	1500	35	440	3.2	0.394	0.85
16	24.7	3000	48	660	2.4	0.194	1.1
17	73	3000	124	750	0.41	0.0704	2.1
18	4.8	1000	55	110	7.4	0.674	0.11
19	7.4	1500	43	220	3.74	0.474	0.21
20	10	1350	29	440	6.741	0.7	0.6

У таблиці прийняті наступні позначення :

$P_{\text{ном}}$ - номінальна потужність двигуна;

$n_{\text{ном}}$ - номінальні оберти двигуна;

$I_{\text{я}}$ - номінальний струм якірного ланцюга;

U , - номінальна напруга;

$R_{я}$ - опір якірного ланцюга;
 $L_{я}$ - індуктивність якірного ланцюга;
 J - момент інерції.

Для всіх варіантів прийняти $\omega_c = \omega_H$, $I_c = I_H$, де
 ω_H, I_H - номінальна швидкість та струм електроприводу.

Таблиця 4

Найменування	T_M	T_e	$J_{дв}$	$R_{як}$	$L_{як}$	$k\Phi$
Паспортні дані						
Метод простору-станів						
Метод інтервалів						

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ 1

Визначення динамічних параметрів ЕП відбувається, коли відома крива перехідного процесу $I(t)$, $\omega(t)$ та ін. (не обов'язково при пуску).

Криві перехідного процесу (ПП) можуть бути отримані як експериментально на осцилографі, так і при роботі ЕОМ у вигляді масивів даних у пам'яті.

Для вирішення завдання необхідно визначити електромеханічну й електромагнітну постійні часу T_M і T_e .

Корені характеристичного рівняння двигуна постійного струму

$$T_e T_M p^2 + T_M p + 1 = 0$$

знаходяться за формулою

$$p_{1,2} = \frac{-T_M \pm \sqrt{T_M^2 - 4T_e T_M}}{2T_e T_M}.$$

Якщо корені характеристичного рівняння різні дійсні, перехідні характеристики струму $I(t)$ і швидкості $\omega(t)$ можна розрахувати за залежностями:

$$\omega(t) = Ae^{p_1 \cdot t} + Be^{p_2 \cdot t} + \omega_c,$$

$$i(t) = \frac{J}{k\Phi} (p_1 \cdot Ae^{p_1 \cdot t} + p_2 \cdot Be^{p_2 \cdot t}) + I_c,$$

де ω_c, I_c - сталі значення швидкості й струму;

A, B – постійні коефіцієнти, які можна визначити з початкових умов:

$$A = -\frac{p_2}{p_1} B; \quad B = -\frac{\omega_c}{1 - \frac{p_2}{p_1}}.$$

В даний час розроблені різноманітні засоби і методики розрахунку параметрів. Розглянемо деякі з них.

1. Визначення параметрів ЕП постійного струму методом простору станів

Існуючі методики експериментального визначення параметрів електропривода орієнтовані, як правило, на системи не більш ніж другого порядку. Лінійну чи лінеаризовану систему електроприводу можна описати векторно-матричним рівнянням вигляду:

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot U,$$

де X , U - вектори стану і сторонніх впливів; A , B - матриці стану і керування. Застосовуючи методи Фур'є й інтегруючи, можна одержати прості рекурентні формули, за якими визначається зв'язок між двома послідовними різницями вектора стану X на інтервалі ΔT :

$$X_{n+1} - X_n = e^{A \Delta T} (X_n - X_{n-1}) - (E - e^{A \Delta T})^{-1} A B (U_n - U_{n-1}),$$

Розклавши отримане рівняння в ряд Тейлора за ступенями $A \Delta T$, одержимо:

$$X_{n+1} - X_n = X_n - X_{n-1} + \Delta T A (X_n - X_{n-1}) + \Delta T B (U_n - U_{n-1}).$$

Чи більш точно, рівняння, що відповідає кінцево-різницевої схемі Ейлера-Коши:

$$X_{n+1} - 2X_n + X_{n-1} = \frac{\Delta T}{2} [A(X_{n+1} - X_{n-1}) + B(U_{n+1} - U_{n-1})].$$

Сформувавши матриці Q і R за формулами:

$$Q = X_{n+1} - X_{n-1};$$

$$R = \left[(X_{n+1} - X_n) - (X_n - X_{n-1}) - \frac{\Delta T}{2} B (U_{n+1} - U_{n-1}) \right],$$

одержимо

$$A = \frac{2}{\Delta T} R Q^{-1}.$$

Визначивши компоненти матриці A , перевіряємо виконання прийнятої за допущеннями умови

$$a_{ji} \cdot \Delta T \leq 1.$$

При її порушенні необхідно зменшити ΔT і повторити розрахунок.

Формування матриць здійснюється відповідно до таблиці 5.

При незмінних сторонніх впливах на суміжних інтервалах:

$$R = (X_{n+1} - X_n) - (X_n - X_{n-1}).$$

Таблиця 5

t	0	ΔT	$2 \Delta T$...	$n \Delta T$
Координата вектора	X_1	X_2	X_2	...	X_n
Номер стовпця матриці R і Q	----	1	2	...	n
матриця Q	----	$X_2 - X_0$	$X_3 - X_1$...	$X_{n+1} - X_{n-1}$
матриця R	----	$X_2 - X_1 -$ $-(X_1 - X_0)$	$X_3 - X_2 -$ $-(X_2 - X_1)$...	$X_{n+1} - X_n -$ $-(X_n - X_{n-1})$

Наприклад, для ДПС, динаміка якого описується рівняннями:

$$L \frac{di}{dt} = U - i \cdot R - k\phi \cdot \omega;$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = k\phi \cdot i - M_c,$$

цю систему можна записати у вигляді, де :

$$X = \begin{Bmatrix} i \\ \omega \end{Bmatrix}; \quad B = \begin{Bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{J} \end{Bmatrix}; \quad U = \begin{Bmatrix} U \\ -M_c \end{Bmatrix}$$

Матриця A має вигляд :

$$A = \begin{Bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{k\phi}{L} \\ \frac{k\phi}{J} & 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{Bmatrix}.$$

На рисунку показаний зразковий вид перехідного процесу пуску електроприводу постійного струму (рис.12).

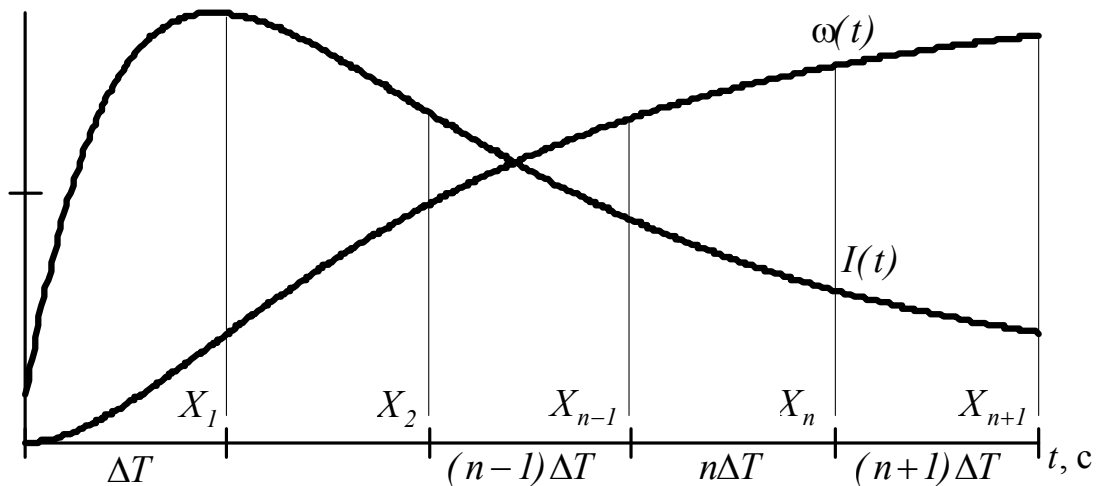


Рис.12

За діаграмою складаємо таблицю 6, аналогічну попередній.

Таблиця 6

$t,$	0	ΔT	$2 \Delta T$...	$n \Delta T$
$i,$	0	i_1	i_2	...	i_n
$\omega,$	0	ω_1	ω_2	...	ω_n
Номер стовпця		1	2	...	n
$Q = \begin{Bmatrix} i_{n+1} - i_{n-1} \\ \omega_{n+1} - \omega_{n-1} \end{Bmatrix}$		Q_1	Q_2	...	Q_n
$R = \begin{Bmatrix} (i_{n+1} - i_n) - (i_n - i_{n-1}) \\ (\omega_{n+1} - \omega_n) - (\omega_n - \omega_{n-1}) \end{Bmatrix}$		R_1	R_2	...	R_n

Визначаємо елементи матриці A .

Коефіцієнти зворотної матриці Q^{-1} визначаються як

Запишемо для трьох інтервалів вимірів :

$$\left\{ \begin{array}{l} U = L \frac{di_k}{dt} + i_k \cdot R + k\phi \cdot \omega_k; \\ U = L \frac{di_{k+1}}{dt} + i_{k+1} \cdot R + k\phi \cdot \omega_{k+1}; \\ U = L \frac{di_{k+2}}{dt} + i_{k+2} \cdot R + k\phi \cdot \omega_{k+2}; \\ J \frac{d\omega_k}{dt} - k\phi \cdot i_k + M_0 + k \cdot \omega_k^2 = 0; \\ J \frac{d\omega_{k+1}}{dt} - k\phi \cdot i_{k+1} + M_0 + k \cdot \omega_{k+1}^2 = 0; \\ J \frac{d\omega_{k+2}}{dt} - k\phi \cdot i_{k+2} + M_0 + k \cdot \omega_{k+2}^2 = 0. \end{array} \right.$$

Вирішуючи отриману систему щодо шуканих параметрів, одержимо їхні числові значення.

Певні труднощі викликає чисельне обчислення похідних, що провадиться за однією з наступних формул:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} &= \frac{y_{k-1} - y_{k+1}}{2\Delta t}; \\ \frac{dy}{dt} &= \frac{-y_{k+2} + 8y_{k+1} - 8y_{k-1} + y_{k-2}}{12\Delta t}; \\ \frac{dy}{dt} &= \frac{y_{k+3} - 9y_{k+2} + 45y_{k+1} - 45y_{k-1} + 9y_{k-2} - y_{k-3}}{60\Delta t}. \end{aligned}$$

Особливістю реалізації цього методу є те, що інтервал часу між вимірами повинен бути різним, тобто $\Delta t_k \neq \Delta t_{k+1} \neq \Delta t_{k+2} \neq \Delta t_{k+3}$, бо якщо похідні в обмірюваних точках мало відрізняються один від одного

$\frac{di_k}{dt} \approx \frac{di_{k+1}}{dt} \approx \dots; \frac{d\omega_k}{dt} \approx \frac{d\omega_{k+1}}{dt} \approx \dots$, це приводить до значних погрешностей.

Задача 2.

Діагностика електроприводу. Вибір параметрів діагностичного комплексу

Розрахунок параметрів вимірювально-діагностичного комплексу.

Вибір обладнання

Відповідно до заданого варіанта (таблиця 7) виконати розрахунок параметрів джерела системи динамічного навантаження з дією на напругу живлення та потік двигуна постійного струму. Визначити максимальні та мінімальні значення швидкості та напруги двигуна при динамічному навантаженні.

Таблиця 7

Варіант Т	$P_{\text{НОМ}}$, кВт	$n_{\text{НОМ}}$, об/хв	$I_{\text{я}}$, А	$R_{\text{е}}$, Ом	J , кг·м ²	$L_{\text{е}}$, $\times 10^{-3}$ Гн	$I_{\text{е}}$	$I_{\text{ят}}$
1	0,74	700	3,7	6,2	0,0575	2,3	0,8	1
2	1,2	700	6,1	3,07	0,07	4,6	0,7	1,5
3	1,45	700	7,5	2,49	0,125	8,3	1	2
4	2,3	700	11,7	1,24	0,16	2,9	0,9	1,5
5	2,7	600	15	1,94	0,4	9,5	0,8	2
6	4,2	600	21	1,71	0,5	2,1	1	2,5
7	6,5	550	27,5	0,58	0,95	5,9	0,9	1
8	0,44	530	2	10,79	0,0575	3,7	1	1,5
9	1,25	500	6,5	2,35	0,16	8,3	0,7	1
10	4,5	450	23	0,92	0,95	2,9	0,8	1,5
11	5,5	400	28	0,88	1,15	9,5	0,9	2,5
12	0,74	2100	4,2	6,2	0,0575	2,3	1	1
13	1,2	2100	6,7	3,07	0,07	4,6	0,8	1,5
14	1,45	2100	8,2	2,49	0,125	8,3	1	2
15	2,3	2100	13,5	1,24	0,16	2,1	0,9	2,5
16	2,7	1800	17,1	1,94	0,4	5,9	1	1,5
17	4,2	1800	23	1,71	0,5	3,7	0,9	1
18	6,5	1650	37	0,58	0,95	8,3	0,8	2
19	1,25	2000	6,9	2,35	0,16	2,9	0,7	1,5
20	4,5	1800	30,8	0,92	0,95	9,5	1	2

В таблиці прийняті наступні позначення :

$P_{\text{НОМ}}$ – номінальна потужність двигуна;

$n_{\text{НОМ}}$ – номінальні оберти двигуна;

$I_{\text{я}}$ – номінальний струм якірного ланцюга;

$R_{\text{е}}$ – еквівалентний опір якірного ланцюга;

$L_{\text{е}}$ – еквівалентна індуктивність якірного ланцюга;

$I_{\text{е}}$ – ефективне значення струму (відносно номінального струму);

$I_{\text{ят}}$ – струм обмеження (відносно номінального струму);

J - момент інерції.

Номінальну напругу двигуна прийняти $U_{\text{я}} = 220\text{В}$.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ 2

На відміну від систем статичного навантаження при динамічному навантаженні мається ряд специфічних питань, що стосуються джерел живлення. Це пов'язано з тим, що навантаження змінюється в часі, внаслідок чого в системі між її складовими циркулює потужність, що в основному визначає встановлену потужність обладнання.

Найбільш характерними режимами навантаження і роботи джерела живлення є:

- навантаження двигуна при постійному потоці, струм у якірному ланцюзі змінний за знаком, швидкість двигуна близька до номінальної чи розрахункової (режим P1);

- напруга на затискачах якоря двигуна незмінна; змінюється струм за знаком, залишаючись незмінним за амплітудою, швидкість двигуна змінюється від мінімальної до розрахункової (режим P2).

У режимі P1 справедлива система рівнянь

$$U_{я}(t) = U_0 + U_1 \sin \Omega_1 t,$$

$$I_{я}(t) = I_0 + I_1 \sin(\Omega_1 t - \varphi_1),$$

$$\omega(t) = \omega_0 + \omega_1 \sin(\Omega_1 t + \varphi_2),$$

$$\Phi(t) = \Phi_0,$$

де індекс «0» - відповідає постійній складовій, а «1» - перемінній складовій;

φ_1, φ_2 - кути зрушення фаз:

$$\varphi_1 = \arctg(\Omega_1 T_e - \frac{1}{\Omega_1 T_M}); \quad \varphi_2 = \frac{\pi}{2} - \varphi_1;$$

Ω_1 - частота динамічного навантаження.

Частота динамічного навантаження повинна бути на порядок вище резонансної частоти системи $\Omega = \sqrt{\frac{1}{T_e T_M}}$, тобто $\Omega_1 \gg \Omega$.

Струм холостого ходу визначається за умови:

$$I_0 = \frac{M_{xx}}{k\Phi_0} = \frac{0,5(1 - \eta_H)P_H}{\omega_H \cdot k\Phi_0},$$

де M_{xx} - момент холостого ходу;

$k\Phi_0$ - конструктивний коефіцієнт двигуна, обумовлений за номінальних умов;

P_H - номінальна потужність двигуна;

ω_H - номінальна швидкість обертання.

Знаючи ефективне значення струму якірного ланцюга, можна визначити перемінну складову струму:

$$I_1 = \sqrt{I_e^2 - \left(\frac{M_{xx}}{k\Phi_0}\right)^2}.$$

Далі визначаються перемінні складові напруги і швидкості:

$$U_1 = I_1 R_e \sqrt{1 + \left(\Omega_1 T_e - \frac{1}{\Omega_1 T_M}\right)^2},$$

$$\omega_1 = \frac{U_1}{k\Phi_0 \cdot \Omega_1 T_M \sqrt{1 + \left(\Omega_1 T_e - \frac{1}{\Omega_1 T_M}\right)^2}}.$$

З виразу для максимально припустимої швидкості визначаються постійні складові напруги і швидкості:

$$\omega_{\max} = \omega_0 + \omega_1 = \frac{U_0}{k\Phi_0} + \omega_1.$$

Потужність джерела живлення в режимі P1:

$$P_{дж} \geq U_H I_H.$$

Режим P1 можливий і при обмеженні струму в руховому і гальмовому режимах. Швидкість двигуна при розгоні в руховому режимі:

$$\omega(t) = \omega_1' + \frac{d\omega}{dt} t,$$

де

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{I_{ят} k\Phi_0 - M_{xx}}{J};$$

ω_1' - мінімальне значення швидкості;

$I_{ят}$ - струм обмеження.

При $t = T/2$

$$\omega_2' = \omega_1' + \frac{I_{ят} k\Phi_0 - M_{xx}}{J} \cdot \frac{T}{2},$$

де ω_2' - максимальне значення швидкості;

T - період динамічного навантаження, $T = \frac{1}{\Omega_1}$.

При уповільненні двигуна з тим же струмом у якірному ланцюзі

$$\omega_1' = \omega_2' - \frac{I_{ят} k\Phi_0 + M_{xx}}{J} \cdot \frac{T}{2}.$$

Шляхом відповідних перетворень можна одержати систему рівнянь для визначення мінімальної і максимальної напруги джерела при навантаженні:

$$U_{2дж} = U_{1дд} + \frac{I_{ят}k\Phi - M_{xx}}{J} k\Phi_0 \cdot \frac{T}{2};$$

$$U_{1дж} = U_{2дд} - \frac{I_{ят}k\Phi + M_{xx}}{J} k\Phi_0 \cdot \frac{T}{2}.$$

Очевидно, що $U_{2и}$ повинно дорівнювати номінальному значенню напруги живлення, а ω_2' - номінальній швидкості двигуна.

Режим Р2 відповідає навантаженню з впливом на поле двигуна.

Напруга джерела живлення

$$U_{дж} = 2U_H(1 - \eta_H)\sqrt{\alpha_0\rho},$$

де $\alpha_0=0.3\div 0.5$ – коефіцієнт, що враховує відношення втрат у якорі двигуна до загальних втрат;

$\rho= 1.75\div 2.5$ – відношення повного опору джерела живлення до опору якоря.

Особливістю процесу регулювання швидкості двигуна ослабленням потоку є можливість перекидання регулювання, що відповідає мінімальному потоку

$$k\Phi_{\min} = \frac{2M_{xx}R_e}{U_{дж}}.$$

Швидкість двигуна при цьому повинна бути не нижче номінальної

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_0} - \frac{M_{xx}R_e}{(k\Phi_0)^2} \geq \omega_H.$$

Якщо умова не виконується, необхідно підібрати інші коефіцієнти і повторити розрахунок.

III. ЧАСТОТНОРЕГУЛЬОВАННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД

1. СИСТЕМАТИЗАЦІЯ РІЗНИХ ТИПІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З КЕРОВАНІСТІ

Задача 1.

Принцип роботи різних типів електромеханічних перетворювачів (ЕМП). Класифікація ЕМП за способами збудження частин, що взаємно переміщуються. Електромагнітний момент і його вираження через множення пар векторів на векторній діаграмі. Управління електромагнітним моментом. Керованість різних типів ЕМП.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ 1

Принцип роботи всіх типів електромеханічних перетворювачів (ЕПМ) заснований на взаємодії контурів зі струмом і пронизуючого ці контури магнітного потоку. Загальним для всіх типів обертових ЕМП є:

- наявність рухомої і нерухомої частини;
- збудження хоча б однієї частини ЕМП від джерела енергії перемінного струму;
- наявність магнітних полів статора і ротора, нерухомих відносно один одного (що виходить із принципу створення постійного обертаючого моменту, для чого кут між векторами струму і потокозчеплення повинний бути постійним, а положення цих векторів повинне змінюватися в просторі з однаковою швидкістю.

Обертові ЕМП можна розділити на дві групи:

1. ЕМП, у яких магнітні потоки частин, що взаємно переміщуються, створюються за допомогою джерел енергії перемінного струму; при цьому розрізняють ЕМП зі збудженням від двох джерел енергії відповідно для статора і ротора (двоканальні ЕМП), реалізовані на основі АД з фазним ротором, і ЕМП зі збудженням тільки статора (одноканальні ЕМП), реалізовані на основі АД з короткозамкненим ротором.

2. ЕМП зі збудженням однієї з частин постійним струмом; найбільш розповсюдженими реалізаціями цієї групи є ЕМП зі збудженням ротора постійним струмом, частотно-регульований привод із синхронним двигуном, і ЕМП зі збудженням статора постійним струмом (на основі двигуна постійного струму, в обмотці якоря якого протікає багатofазний перемінний струм, перетворений колектором - механічним перетворювачем частоти з постійного струму; поле якоря обертається щодо ротора в напрямку, протилежному обертанню ротора, при цьому поле якоря нерухомо щодо обмотки збудження, а частота струму в обмотці жорстко залежить від швидкості ротора).

У АД частоти струмів у обмотках статора і ротора зв'язані співвідношенням $f_2 = f_1 \cdot S$, де S - ковзання; швидкості обертання полів статора і ротора різні, але відносно один одного вони нерухомі, тому що сума кутових швидкостей ротора і поля ротора щодо ротора рівні кутової швидкості поля статора, тобто $\omega + \omega_p = \omega_c$.

Механічна енергія характеризується електромагнітним моментом і швидкістю. Електромагнітний момент, що виникає при взаємодії струмів і потоків частин ЕМП, що взаємно переміщаються, незалежно від способу їх збудження, визначається векторним добутком результуючого вектора робочого потокозчеплення в повітряному зазорі і результуючого вектора струму однієї з частин ЕМП, наприклад,

$$M = \bar{\Psi}_0 \times \bar{I}_2 = \psi_{2m} I_{2m} \sin \delta$$

де ψ_{2m} і I_{2m} - амплітуди результуючих векторів;

δ - кут навантаження (див. векторну діаграму).

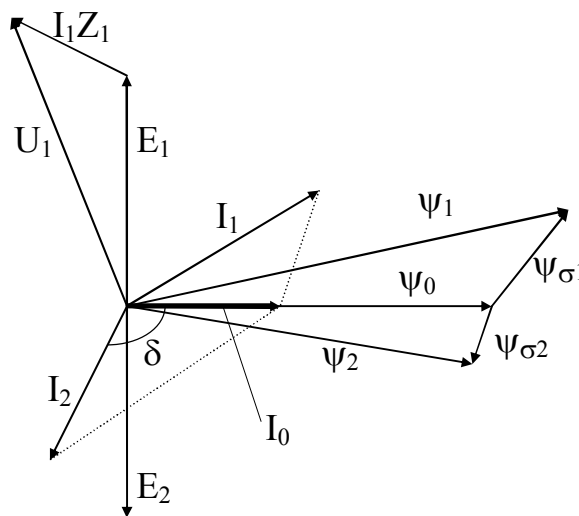


Рис.1. Векторна діаграма фази АД

З огляду на те, що в ЕМП електромагнітні перемінні взаємозалежні, електромагнітний момент можна виразити через будь-яку пару векторів, наприклад: $M = L_0 I_0 I_2$; $M = L_1 I_1 I_2$; $M = L_0 I_1 I_0$

$$M = \psi_0 \frac{1}{L_2} \psi_2; \quad M = K_1 \psi_1 \frac{1}{L_2} \psi_2,$$

де L_0 - взаємна індуктивність фаз статора і ротора;

L_1, L_2 - повні індуктивності статора і ротора;

ψ_0 - робоче потокозчеплення;

ψ_1, ψ_2 - потокозчеплення статора і ротора;

K_1 - коефіцієнт зв'язку статора; $K_1 = L_0 / L_1$;

I_0 - струм намагнічування;

$\psi_{\tau 1}, \psi_{\tau 2}$ - потокозчеплення розсіювання статора і ротора.

Робоче потокозчеплення можна виразити через векторну суму струмів статора і ротора

$$\psi_0 = L_0(I_1 + I_2) = L_0 I_0$$

Як впливає з рівнянь електромагнітного моменту, керувати електромагнітним моментом ЕМП можна, впливаючи на амплітуду будь-яких двох векторів електромагнітних перемінних і на кут між ними. Однак використання трьох керуючих впливів жорстко зафіксує електромагнітний момент і позбавить ЕМП властивості статичної стійкості, забезпечення якого повинна взяти на себе зовнішня система управління, що приведе до її функціональної надмірності. Звичайно регулюють дві перемінні, залишаючи вільною третю, за рахунок зміни якої ЕМП «самостійно» вирішує задачу статичної стійкості.

Друга характеристика механічної енергії, кутова швидкість, може регулюватися або безпосереднім впливом на швидкості векторів електромагнітних перемінних і на електромагнітний момент (асинхронні машини), або впливати тільки на кутову швидкість (синхронні машини), або тільки на момент (машини постійного струму).

Під керованістю ЕМП розуміють можливість безпосереднього впливу на внутрішні перемінні, формуючі параметри механічної енергії.

Найбільшою керованістю володіє ЕМП із збудженням обох частин від джерел перемінного струму. Такі ЕМП надають зовнішній системі управління надлишкові можливості для формування необхідних законів зміни параметрів механічної енергії, що дозволяє на їхній основі будувати АЕП різних типів. Практично без втрати керованості можна спростити структуру ЕМП, виключивши перетворювач в одному з каналів, але зберігши збудження обох каналів.

Наприклад, в асинхронно-вентильному каскаді статор АД живиться від мережі, а ротор - від керованого перетворювача.

ЕМП із порушенням однієї з частин постійним струмом відносять до ЕМП із неповною керованістю через менше число можливих керуючих впливів, однак за рахунок зовнішніх регуляторів відновити повну керованість достатньо просто. Загальною властивістю таких ЕМП є енергетична нерівнозначність каналів: основна енергія чи циркулює по каналу статора (СД) чи по каналу ротора (ДПТ).

Найменшою керованістю володіють одноканальні ЕМП, до яких відноситься АД з короткозамкненим ротором. Причина тут у тім, що практично неможливо безпосередньо впливати на кут навантаження δ , керуючи синхронною швидкістю і струмами по каналу статора. Відновити керованість одноканальних ЕМП можна за рахунок створення алгоритмів і систем управління.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Що є загальним для всіх типів обертових ЕМП? (збудження ЕМП, взаємне розташування магнітних полів частин ЕМП, що рухаються взаємно).
2. У чому полягає принцип створення постійного обертаючого моменту?
3. Способи збудження частин ЕМП, що рухаються взаємно.
4. Вираження для електромагнітного моменту.
5. Способи управління величиною електромагнітного моменту.
6. Порівняння керованості ЕМП різних типів.

2. КЕРОВАНІСТЬ АСИНХРОННОГО КОРОТКОЗАМКНЕНОГО ДВИГУНА У СТАЛИХ РЕЖИМАХ

Задача 2.

Схема заміщення фази АД у частотному керуванні. Вираження електромагнітних перемінних у відносних одиницях. Критерії оптимального співвідношення між амплітудою і частотою напруги, що харчується. Регулювання електромагнітного моменту асинхронного короткозамкненого двигуна. Вентильні електроприводи з одноканальними ЕМП і незалежним управлінням частотою. Керованість АД з короткозамкненим ротором у сталих режимах.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ 2

Для аналізу властивостей АД у сталих режимах звичайно використовують схему заміщення фази машини (рис 2), що відповідає векторній діаграмі, приведеної на рис.1.

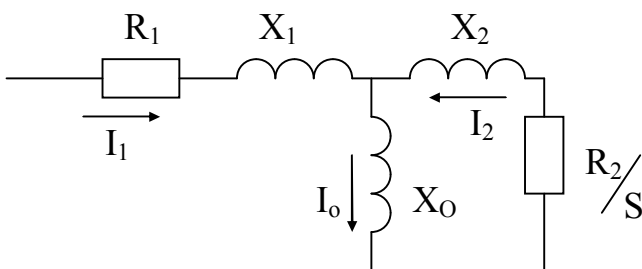


Рис. 2 Схема заміщення фази АД

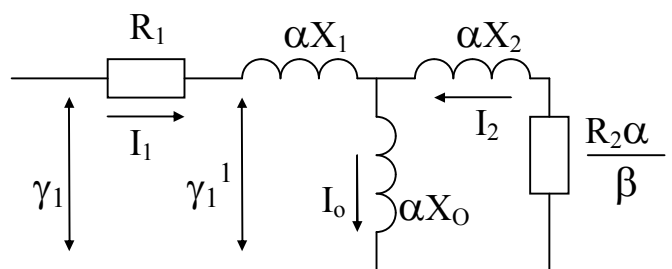


Рис. 2 а Схема заміщення фази АД при частотному управлінні

При перемінній частоті всі опори схеми заміщення, крім опору обмотки статора r_1 , є функцією частоти, тому зручніше використовувати схему заміщення фази АД, зображену на рис.2а, де:

X_1, X_2^1 - індуктивні опори розсіювання фази ротора, приведені до статорного ланцюга при номінальній частоті струму статора f_{1n} ;

X_0 - індуктивний опір контуру намагнічування АД при ном. частоті f_{1n} .

Електромагнітні перемінні АД зручно виразити у відносних одиницях. Базисними величинами є номінальні значення фазного струму, напруги, частоти.

$$\alpha - \text{відносна частота струму статора } \alpha = \frac{f_1}{f_{1n}};$$

$$\nu - \text{відносна швидкість ротора } \nu = \frac{\omega}{\omega_s};$$

$$\gamma - \text{відносна напруга } \gamma = \frac{U}{U_{1n}};$$

β –відносна частота струму ротора (чи абсолютне ковзання) $\beta = \frac{f_2}{f_{1n}}$;

i – струм у в.о. $i = \frac{i}{I_{1n}}$;

ψ –потокозчеплення у в.о. $\Psi = \frac{\Psi}{\Psi_\delta}$;

μ –момент у в.о. $\mu = \frac{M}{M_\delta}$;

r, X – опір у в.о. $r = \frac{r}{z_\delta}$, $X = \frac{X}{z_\delta}$;

L -індуктивність у в.о. $L = \frac{L}{l_\delta}$

де $w_\delta = 2\pi f_{1n}$, $\Psi_\delta = \frac{U_\delta}{w_\delta}$, $M_\delta = \frac{3I_\delta U_\delta}{w_\delta}$, $l_\delta = \frac{z_\delta}{w_\delta}$, $z_\delta = \frac{U_{1n}}{I_{1n}}$, $t_\delta = \frac{1}{w_\delta}$.

Схемі заміщення відповідає система д/р у в.о.

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}_1 &= (r_1 + jX_s \alpha) \bar{i}_1 + jx_0 \alpha \bar{i}_2 \\ 0 &= \left(r_2 \frac{\alpha}{\beta} + jX_r \alpha \right) \bar{i}_2 + jX_0 \alpha \bar{i}_1 \quad , \text{де} \\ X_s &= X_1 + X_0 \\ X_r &= X_2 + X_0 \end{aligned}$$

У сталому режимі напруга , прикладена до статора , врівноважується проти ЕДС \bar{e}_1 , індуктованої у статорних обмотках робочим потоком, і спаданням напруги на опорі z_1

$$\begin{aligned} \bar{\gamma} &= \bar{e}_1 + z_1 \cdot \bar{i}_1 \\ \bar{e}_1 &= \alpha \cdot \bar{\Psi}_0 = j x_0 \alpha (\bar{i}_1 + \bar{i}_2) = j x_0 \alpha i_0 \\ z_1 &= r_1 + j x_1 \alpha \end{aligned}$$

Це рівняння встановлює залежність потоку Φ від незалежних параметрів γ, α і μ_3 (тому що $i_1 \sim \mu_3$). Отже, робочий потік визначається в основному амплітудою і частотою напруги мережі:

$$\bar{\Psi}_0 = \frac{\gamma}{\alpha} - j x_1 \bar{i}_1 - \frac{r_1}{\alpha} \bar{i}_1 = \frac{\gamma}{\alpha} - \left(\frac{r_1}{\alpha} + j x_1 \right) \bar{i}_1$$

З рівняння ЕДС ланцюга статора випливає, що можна підібрати закон регулювання γ у функції частоти α і ковзання β , при якому потік АД змінювався б від частоти і ковзання по бажаній залежності.

Критерієм оптимального співвідношення між амплітудою і частотою живильного напруги може бути:

- 1) мінімум втрат для обмеження нагрівання АД;
- 2) максимальна швидкодія електропривода;
- 3) сталість перевантажувальної здатності λ ;

Електромагнітний момент визначається двома векторними перемінними Ψ_0 і $\dot{i}_2(1)$ і може бути виражений через будь-які дві електромагнітні змінні. У АД з коротко замкнутим ротором через виключення каналу збудження ротора безпосередньо через вхідні ланцюги (статора) ми можемо впливати на ψ_0 ; управління ж струмом $i_2=e_2/z_2$, а ЕДС ротора в сталих режимах $e_2 = \frac{d\Psi_0}{dt} = \beta \Psi_0$ і інших джерел збудження в ротора немає.

Діюче значення струму ротора можна визначити за схеми заміщення:

$$I_2 = \frac{E_2 \beta}{\sqrt{(r_2^1)^2 + (x_2 \beta)^2}}$$

Отже, впливати по каналах управління на електромагнітний момент і на струм ротора можна тільки регулюючи ψ_0 . При цьому буде змінюватися і β . Регулювання обмежене насиченням магнітопроводів. При стабілізації ψ_0 зміна e_2 , а отже, і i_2 , може здійснюватися тільки за рахунок зміни частоти струму ротора β .

При зміні β мінюється фазове зрушення струму ротора відносно e_2 , а оскільки електромагнітний момент визначається проекцією струму ротора на вектор e_2 , то на механічній характеристиці неминуче існування критичних крапок. По цьому при відновленні керованості за моментом можна говорити не про усунення принципових обмежень максимального моменту, а про забезпечення такого критичного моменту, який би перевищував необхідний.

Визначимо параметри, при яких досягається максимально можливий момент при забезпеченні системою управління $\Psi_{0\max} = const$ за умовами насичення.

Критична частота струму ротора, активна складова струму ротора і $\cos\varphi_2$ у критичній точці при $\Psi_{0\max} = const$ рівні: $\beta_{\kappa} = \pm \frac{r_2}{x_2}$, $I_{2\text{ак}} = \frac{e_2}{2x_2}$, $\cos\varphi_2 = 1/\sqrt{2}$,

при якому $\varphi_{2\text{до}} = 45^\circ$.

Отже, гранично можливий момент (без обліку теплових навантажень) визначається гранично можливим за умовами насичення потоком ψ_0 , і індуктивним опором розсіювання обмоток (стрижнів) ротора, причому останнє визначає можливий ступінь відновлення керованості одноканального ЕМП за рахунок інформаційної системи.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. У чому особливості схеми заміщення фази АД при частотному управлінні?
2. Як змінюється магнітний потік при зміні амплітуди і частоти напруги живлення?

3. Як змінюється магнітний потік при зміні навантаження?
4. Що можна прийняти за критерій оптимального співвідношення між амплітудою і частотою напруги живлення?
5. Спосіб впливу по каналах управління АД на електромагнітний момент і струм ротора.

3. ЗАКОНИ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛІННЯ

Задача 3.

Зміст законів частотного управління. Закони частотного управління: $\alpha = \beta$, закон Костенко, закони, що забезпечують стабілізацію магнітного потоку на рівні номінального режиму, стабілізація потокозчеплення статора, робочого потокозчеплення, потокозчеплення ротора. Механічні характеристики АД при різних законах частотного управління. Реалізація законів частотного управління в розімкнутих і замкнутих системах ЧУ.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ 3

Під законами частотного управління розуміють співвідношення між частотою і напругою, подаваними на статор АД, які визначають характеристики і режим роботи двигуна. Зміна форми механічної характеристики при частотному регулюванні в першу чергу визначається зміною магнітного потоку, тому з рівняння легко одержати простий закон ЧУ: якщо зневажити спаданням напруги в статорному ланцюзі z_{1i1} , робочий потік буде незмінний при $\gamma = \alpha$. Побудувати механічну характеристику АД

при ЧУ за законом $\gamma = \alpha$ можна за формулою Клосса:

$$\mu = \frac{2\mu_k \cdot (1 - q\beta_k)}{\frac{\beta}{\beta_k} + \frac{\beta_k}{\beta} + 2q\beta_k}$$

$$\text{де } \mu_k = \frac{\kappa_1^2}{2\sigma X_r} \cdot \frac{\tau_1^2 \gamma^2}{\sqrt{(\sigma^2 + \tau_1^2 \alpha^2)(1 + \tau_1^2 \alpha^2)} \pm \tau_1 \alpha (1 - \sigma)}$$

"+" – відповідає руховому режиму;

$$\beta_k = \frac{1}{\tau_2} \cdot \sqrt{\frac{\sigma^2 + \tau_1^2 \alpha^2}{1 + \tau_1^2 \alpha^2}}$$

$$q = \frac{\tau_1 \tau_2 \alpha (1 - \sigma)}{\sigma^2 + \tau_1^2 \alpha^2}$$

$\kappa_1 = \frac{l_0}{l_s}$, $\kappa_2 = \frac{l_0}{l_r}$ - коефіцієнт зв'язку статора і ротора;

$\sigma = 1 - K_1 K_2$ - результируючий коефіцієнт розсіювання;

$\tau_1 = \frac{\sigma l_s}{r_1}$, $\tau_2 = \frac{\sigma l_r}{r_2}$ - постійна часу ланцюгів статора і ротора;

$l_s = l_1 + l_0$ - повна індуктивність ланцюга статора;

$l_r = l_2 + l_0$ - повна індуктивність ланцюга ротора;

$X_r = X_2 + X_0$ - повний індуктивний опір ланцюга ротора;

μ_k , β_k і q залежать від α .

При регулюванні частоти в невеликому діапазон μ_k і β_k практично не змінюються, але при значному зменшенні α максимальний момент μ_k зменшується. Це відбувається внаслідок зменшення потоку двигуна, через збільшення частки спадання напруги на активному опорі статора (тому що при зниженні α зменшуються всі опори машини, крім r), а також через додаткове зменшення струму ротора в точці максимуму моменту, викликаного зменшенням β_k . Остання обставина є причиною необхідності значного збільшення потоку з метою стабілізації $\mu_{до}$ у зоні низьких частот (що можна реалізувати застосуванням відповідного закону ЧУ $\gamma=f(\alpha)$, (при якому зі зменшенням α γ зменшується в меншому ступені, ніж α). Однак істотним недоліком такого закону ЧУ є ще більше зростання потоку при скиданні навантаження і зв'язаний з цим ріст струму статора (якщо машина була насичена в зоні максимального моменту). Таким чином, у розімкнутій системі ЧУ, коли напруга регулюється лише у функції частоти, неможливо підібрати для АД, що працює переважно в тривалому режимі при навантаженні, що міняється від 0 до номінальний, такий закон управління, який би забезпечив номінальну перевантажувальну здатність у діапазоні частот від $\alpha=1$ до $\alpha=0$ унаслідок зменшення β_k , явища насичення стали, зростання потоку при скиданні навантаження й обмежень за нагріванням. При моменті навантаження $M_c=M_{ном}=\text{const}$ і застосуванні закону ЧУ $\gamma=\alpha$, можливий діапазон регулювання (1.5-3):1. При застосуванні закону $\gamma=\alpha$, що забезпечує $\mu_k=\text{const}$ $D_\alpha=(3-7):1$ при припустимому статизмі $\delta=0.1$. Найбільш придатний закон $\gamma=\alpha$ для приводів з вентиляторним навантаженням, що забезпечує сталість перевантажувальної здатності $\lambda=M_{кн}/M_{к\alpha}$ у діапазоні (50-10):1 при $\delta=0.1$.

При глибокому частотному регулюванні (10 000:1) і перемінному моменті навантаження, що змінюється від 0 до номінального, необхідно застосовувати замкнуту систему ЧУ, у якій напруга, прикладена до двигуна, регулюється у функції навантаження. При цьому регулюється (стабілізується) магнітний потік АД.

Закон, що забезпечує сталість λ при $M_c=\text{const}$ ($\gamma=\alpha$), був скоректований М.П.Костенко з урахуванням навантаження γ :

$$\gamma = \alpha \cdot \sqrt{\mu}$$

Однак йому також властиве падіння M_k на малих α унаслідок збільшення частки спадання напруги на r_1 (при висновку закону величиною r_1 також знехтували) і зменшенні магнітного потоку двигуна.

Взявши за мету стабілізувати магнітний потік АД на визначеному рівні, можна одержати різні закони, що реалізують у замкнутих системах ЧУ:

1. Закон, що забезпечує при будь-якій частоті режим роботи АД, найбільш близький до номінального, може бути отриманий при підтримці магнітного потоку (потокозчеплення) у залежності від α і β на рівні, близькому до номінального, дорівнявши відношення робочих потокозчеплень при невідомій і номінальній ($\alpha=\gamma=1$) частотах одиниці для тих самих значень ковзання β :

$$\gamma = \sqrt{\frac{(\sigma - \tau_1 \tau_2 \alpha \beta)^2 + (\tau_1 \alpha + \tau_2 \beta)^2}{(\sigma - \tau_1 \tau_2 \beta)^2 + (\tau_1 + \tau_2 \beta)^2}}$$

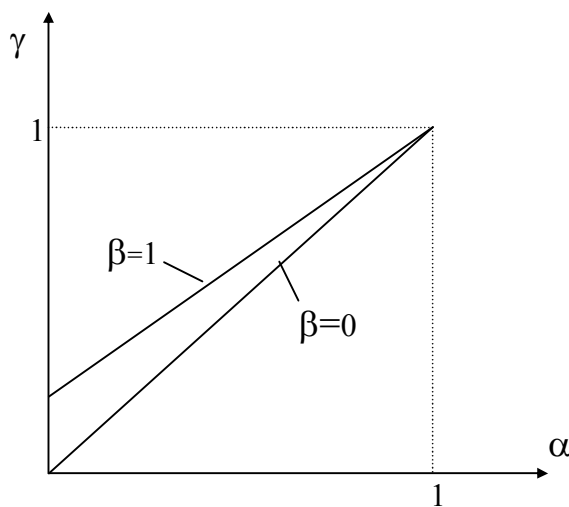


Рис.3

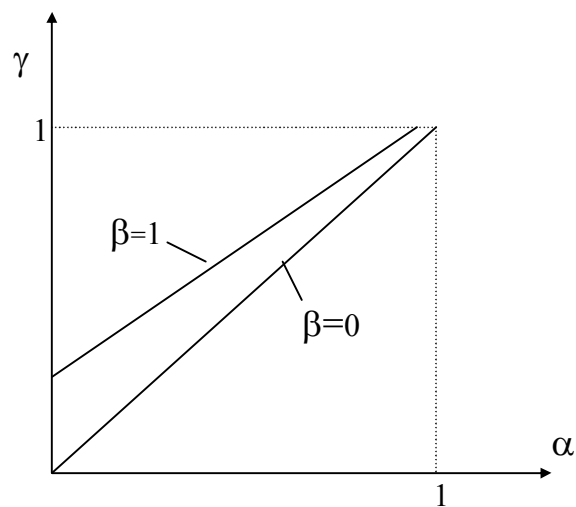


Рис.4

На Рис.3 побудований графік цього закону, особливістю якого є нелінійна і неоднозначна залежність γ від α - зі збільшенням струму навантаження збільшується β і потрібно підвищити γ для компенсації спадання напруги на r_1 з метою підтримки ψ_0 на рівні номінального режиму. Закон:

$$\gamma = f(\alpha\beta)$$

реалізує режим неповної IR-компенсації. Механічну характеристику АД можна побудувати за формулою Клосса, де:

$$\mu_k = \frac{K_1^2}{2\sigma X_r} \cdot \frac{\tau_1^2}{\sqrt{(\sigma^2 + \tau_1^2)(1 - \tau_1^2) \pm \tau_1^2(1 - \sigma)}} \approx \frac{K_1^2}{2\sigma X_r} \cdot \frac{\tau_1}{\sqrt{1 + \tau_1^2 \pm (1 - \sigma)}};$$

$$\beta_k = \frac{1}{\tau_2} \cdot \sqrt{\frac{\tau^2 + \tau_1^2}{1 + \tau_1^2}} \approx \frac{\tau_1}{\tau_2 \cdot \sqrt{1 + \tau_1^2}};$$

$$q = \frac{\tau_1 \tau (1 - \sigma)}{\sigma^2 + \tau_1^2} \approx (1 - \sigma) \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1}.$$

не залежать від частоти. Тут можна зневажити величиною σ^2 , тому що для АД значення σ^2 на 2 порядки менше постійної часу τ_1 і τ_2

2) IR-компенсація.

З першого рівняння системи д/р АД у координатах p-q ($\omega_r = \omega_1$)

$$\overline{U}_1 = r_1 \overline{i}_1 + \frac{d\overline{\psi}_1}{dt} + j\omega \overline{\psi}_1.$$

$$\overline{U}_2 = r_1 \overline{i}_2 + \frac{d\overline{\psi}_2}{dt} + j(\omega_1 - \omega) \overline{\psi}_2$$

для сталого режиму ($\frac{d\overline{\psi}_1}{dt} = 0$) маємо у в.о.:

$$\overline{\gamma}_1 = \overline{\gamma} - r_1 \overline{i}_1 = j\alpha \overline{\psi}_1$$

(див. схему заміщення фази АД).

Визначимо закон частотного управління з умови підтримки потокозчеплення статора ψ_1 при зміні α постійним і рівної максимальному при ідеальному х.р., для чого дорівнявши відношення $\psi_{1\text{xx}}$ при $\alpha = \beta = 1$ і $\psi_1 = f(\alpha, \beta)$ одиниці, одержимо:

$$\gamma = \sqrt{\frac{(\sigma - \tau_1 \tau_2 \alpha \beta)^2 + (\tau_1 \alpha + \tau_2 \beta)^2}{(\sigma^2 + \tau_1^2)(1 + \tau_2^2 \beta^2)}}$$

Залежність (17) $\gamma = f(\alpha)$ для різних значень β побудована на рис.4, реалізує режим повної IR-компенсації. Механічна характеристика може бути побудована за спрощеною формулою Клосса :

$$\mu = \frac{2\mu_k}{\frac{\beta}{\beta_k} + \frac{\beta_k}{\beta}}$$

$$\mu_k = \frac{\kappa_1^2}{2\sigma X_r} \cdot \frac{\tau_1^2}{\sigma^2 + \tau_1^2} \approx \frac{\kappa_1^2}{2\sigma X_r}$$

$$\beta_k = \frac{1}{\tau_2}$$

де μ_k и β_k не залежать від частоти.

3)IZ-компенсація

Розглянемо режим повної компенсації спадання напруги на опорі статора $Z = r_1 + jx_1$, при якому відповідно до рівняння, робоче потокозчеплення $\Psi_{0\text{max}}$ при $\alpha = \gamma = 1$ і ідеальному х.р. ($\beta = 0$). Приймавши відношення виразів для ψ_0 при $\alpha = \gamma = 1$ і $\beta = 0$ і Ψ_0 при довільних значеннях α одиниці, одержимо:

$$\overline{\gamma} = (1 + \kappa_1) \cdot \sqrt{\frac{(\sigma + \tau_1 \tau_2 \alpha \beta)^2 + (\tau_1 \alpha + \tau_2 \beta)^2}{(\sigma + \tau_1)^2 \cdot [(1 + \kappa_1)^2 + (\tau_2^2) \beta^2]}}$$

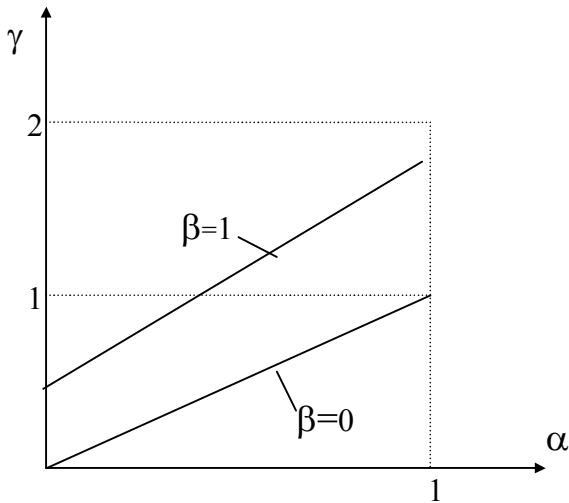


Рис.5

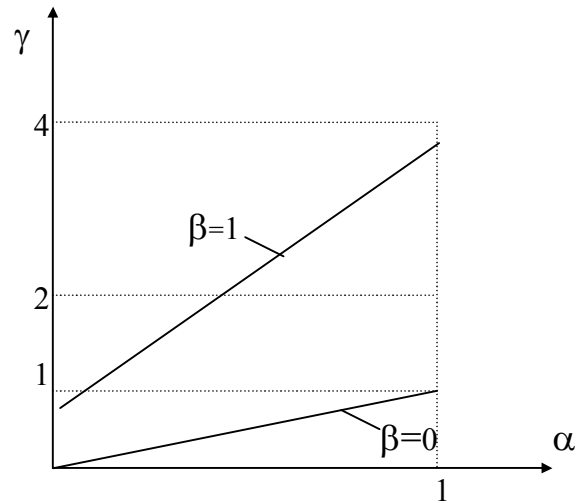


Рис.6

Отже, у верхньому діапазоні частот при підвищених значеннях ковзання потрібна величина напруги, значно перевищуюча номінальну і не завжди може бути забезпечена в системі ПЧ-АД. Залежність $\gamma=f(\alpha)$ при різних β зображено на рис.5. Механічна характеристика може бути побудована за формулою, де:

$$\mu_k = \frac{\kappa_1^2}{2\sigma X_r} \cdot \frac{\tau_1^2(1+\kappa_1)}{\sigma^2 + \tau_1^2} \approx \frac{\kappa_1^2(1+\kappa_1)}{2\sigma X_r}$$

$$\beta_k = \frac{1+\kappa_1}{\tau_2}$$

4)Управління з повною компенсацією за законом, так само, як і раніше розглянуті закони частотного управління з неповною компенсацією, може бути доповнено регулюванням напруги пропорційно $\sqrt{\mu}$ відповідно до узагальненої формули Н.П.Костенко :

$$\gamma^1 = \gamma(\alpha, \beta) \cdot \sqrt{\mu}$$

У цьому випадку при довільному моменті навантаження $\mu \leq 1$ АД буде працювати при будь-якій частоті з $\beta = \text{const}$, величину якого можна визначити з формули Клосса при $\mu=1$.

Наприклад, з (18) маємо :

$$\beta = \beta_k \cdot \left(\mu_k - \sqrt{\mu_k^2 - 1} \right)$$

При цьому АД буде працювати з утратами, мінімально можливими для даного закону управління.

Частотне управління з повною компенсацією за законом забезпечує роботу АД з найбільшим магнітним потоком і найменшим ковзанням, тому втрати в АД менше, ніж при управлінні за законами.

5)Якщо регулювати γ при ЧУ, підтримуючи постійну величину потокозчеплення ротора ψ_2 для кожної α то буде мати лінійну залежність моменту

двигуна від ковзання. За умовою мінімуму втрат підтримуємо ψ_2 для довільної α рівним ψ_2 при $\alpha=\gamma=1$ і ідеальному ХХ ($\beta=0$). Закон $\gamma=f(\alpha,\beta)$ одержуємо аналогічно:

$$\gamma = \sqrt{\frac{(\sigma - \tau_1 \tau_2 \alpha \beta)^2 + (\tau_1 \alpha + \tau_2 \beta)^2}{\sigma^2 + \tau_1^2}}$$

Механічна характеристика АД:

$$\mu = \kappa_\beta \cdot \beta$$

де κ_β - коефіцієнт твердості лінійної частини механічної характеристики АД:

$$\kappa_\beta = \frac{\kappa_1^2 \tau_1^2 \tau_2}{\sigma X_r (\sigma^2 + \tau_1^2)} \approx \frac{\kappa_1^2 \tau_2}{\sigma X_r}$$

Залежність $\gamma=f(\alpha)$ при різних β представлена на рис.6. Управління за законом, що реалізує режим лінійних механічних характеристик АД, використовується тільки у випадку, коли мається можливість збільшення напруги на статорі АД істотно вище номінального. Робота АД у цьому режимі з урахуванням насичення практично можлива при ковзаннях, що не перевищують номінальне за каталожними даними. Розглянуті закони можуть бути реалізовані тільки в замкнених системах частотного управління.

Питання для самоперевірки

1. Що розуміють під законами частотного управління?
2. Як змінюється критичний момент і критичне ковзання при регулюванні швидкості АД з використанням різних законів частотного управління?
3. Коректування законів частотного управління при зміні навантаження.
4. Які закони ЧУ можна реалізувати в розімкнених, а які в замкнених системах?

4. СИСТЕМИ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ЗАКОНИ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛІННЯ

Задача 4.

Вимоги до статичних характеристик і шляхи їхнього виконання. Основні принципи побудови автоматичних систем з ЧУ і класифікація систем. Розімкнуті системи ЧУ. Структурні схеми. Реалізовані закони регулювання. Граничний діапазон регулювання. Одноконтурні замкнуті системи ЧУ зі зворотним зв'язком з потоку, з ЕДС, з струму статора, з абсолютного ковзання, з швидкості. Двоконтурні системи стабілізації потоку і швидкості. Триконтурні системи ЧУ. Загальні властивості систем стабілізації потоку. Рекомендації з застосування зворотних зв'язків у контурі стабілізації потоку і систем ЧУ.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ 4

До статичних характеристик АД при ЧУ пред'являється дві основні вимоги: 1) забезпечення потрібної перевантажувальної здатності на всьому діапазоні частот і навантажень; 2) забезпечення твердості механічних характеристик, більш високої, ніж при природній характеристиці.

Перша вимога виконується при обмеженому діапазоні регулювання в розімкнутих системах за допомогою реалізації законів ЧУ (регулювання напруги лише у функції частоти).

У замкнених системах ЧУ напруга чи струм статора регулюються у функції частоти і навантаження двигуна.

Друга вимога в розімкнутій системі ЧУ нездійсненна. У замкнутій системі ця задача звичайно зважується введенням зворотних зв'язків, що впливають одночасно на напругу і частоту. Для виконання основних вимог до статичних характеристик замкнута система повинна містити в загальному випадку контур стабілізації швидкості і контур регулювання напруги чи струму статора.

Вибір конкретної СУ, видів зворотного зв'язку, що керують і контролюють величини при заданих вимогах до системи привода в основному визначається властивостями АД. Режим роботи АД однозначно визначається при даній частоті, якщо задані потік двигуна й абсолютне ковзання чи струм статора й абсолютне ковзання, тому розрізняють два способи часткового управління:

ЧНУ - при якому керуючими факторами прийняті частота і напруга на статорі;

ЧТУ - при якому керуючими факторами прийняті частота і струм статора.

Основні системи ЧУ: розімкнуті, зі стабілізацією швидкості без стабілізації потоку, зі стабілізацією потоку, зі стабілізацією потоку і швидкості, зі стабілізацією моменту (потоку чи струму статора й абсолютного ковзання), з регулюванням потоку у функції навантаження (без стабілізації абсолютного ковзання), оптимальні (екстремальні) і квазіоптимальні, з перемінною структурою.

У розімкнутих системах закон регулювання реалізується за допомогою функціонального перетворювача, застосовується тільки принцип ЧНУ.

Системи ЧНУ зі стабілізацією швидкості без регулювання потоку мають контур стабілізації швидкості зі зворотним зв'язком або негативної з швидкості, або позитивної з абсолютного ковзання, чи струму або моменту навантаження (канал компенсації).

Системи зі стабілізацією потоку, що використовують принцип ЧНУ, регулюють напругу на двигуні у функції частоти (через функціональний перетворювач) і навантаження за рахунок дії зворотного зв'язку (по потоці, ЕДС статора, швидкості, абсолютному ковзанню, струму статора, моменту) на регулятор напруги.

У системах, що використовують принцип ЧТУ, стабілізація потоку здійснюється за рахунок регулювання струму статора у функції абсолютного ковзання (за допомогою функціонального перетворювача).

5. ОСОБЛИВОСТІ ЧАСТОТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ

Задача 5.

Особливості процесів прямих пусків і реверсів при зниженій частоті. Вплив часу зміни частоти на перехідні процеси пуску і гальмування.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ 5

При прямому пуску ($t_{п.п}$) АД на зниженій частоті протягом першого максимуму пускового моменту ротор не можна вважати нерухомим на відміну від прямого пуску на номінальній частоті. Ця обставина виключає застосування аналітичних методів розрахунку перехідного моменту при зниженій частоті. Експериментально установлений вплив параметрів ЕП на амплітуду пускового моменту. В міру зменшення частоти амплітуда пускового моменту зменшується. При збільшенні моменту інерції стрибок пускового моменту збільшується, причому тим більше, чим нижче частота. Зі збільшенням моменту інерції при частотах, близьких до номінальних, збільшується число й амплітуда коливань пускового моменту, але при частоті 15-20 Гц і нижче збільшення моменту інерції приводить до зменшення коливання моменту

Збільшення моменту опору приводить до збільшення амплітуди пускового моменту, що більш виражено при зменшенні частоти.

У системах ЧУ зі стабілізацією потоку зі збільшенням коефіцієнта підсилення амплітуда пускового моменту збільшується.

При частотному пуску величина пускового моменту залежить від часу розгорнення частоти ($t_{р.ч}$). При збільшенні часу розгорнення від нуля величина пускового моменту збільшується, досягає максимуму при деякому малому часі розгорнення, і при подальшому збільшенні часу розгорнення частоти момент убуває асимптотично, наближаючись до величини, близької до статичного моменту. При часі пуску, тобто при $t_{р.ч} \geq (2-3)t_{п.п}$, викид перехідного моменту не перевищує величини, що відповідає номінальній перевантажувальній здатності. При цьому коливання моменту практично відсутні, ротор досягає сталої швидкості одночасно з закінченням розгорнення частоти. В міру зменшення часу розгорнення частоти зростають кидки перехідного моменту, коливання електромагнітного моменту на початковій ділянці пуску, з'являються негативні викиди моменту, що затримує АД на низьких швидкостях..

Якщо $t_{р.ч} = (0.7-1)t_{п.п}$, час частотного пуску дорівнює часу розгорнення частоти як на х.р., так і під навантаженням. При $t_{р.ч} \approx (0.3-0.5)t_{п.п}$ час частотного пуску має мінімум і виявляється на 20-50% менше часу прямого пуску $t_{п.п}$. При цьому має місце велика величина максимуму і тривалості кидка моменту, що обумовлює збільшення швидкодії. При подальшому скороченні $t_{р.ч}$ тривалість частотного пуску наближається до тривалості прямого пуску $t_{п.п}$.

Питання для самоперевірки

1. Який вплив на величину пускового моменту при прямому пуску частоти, моменту інерції, моменту опору, коефіцієнта стабілізації магнітного потоку.
2. Як впливає на час частотного пуску тривалість розгорнення частоти.

6. АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД З ВЕКТОРНИМ УПРАВЛІННЯМ

Задача 6.

Принцип побудови і класифікація систем векторного управління АД. Особливості роботи перетворювачів частоти в асинхронних приводах з векторним управлінням. Індикація вектора магнітного потокозчеплення.

Особливості побудови асинхронного привода з управлінням з вектору потокозчеплення двигуна.

Особливості побудови асинхронного привода з управлінням з вектору потокозчеплення ротора двигуна.

Привод типу «Трансвектор», його функціональна схема і характеристики

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ 6

Найбільш розповсюдженими системами векторного управління є системи, що використовують як опорний вектор вектори головного потокозчеплення машини чи потокозчеплення ротора.

Для векторного управління асинхронними двигунами системи управління тиристорами чи транзисторами ПЧ повинні змінювати не тільки частоту й амплітуду, але і фазу напруги, подану на двигун. У системах векторного управління сигнал, що надходить на випрямляч ПЧ із ланкою постійного струму, з керуючого сигналу системи векторного управління U_α і U_β виділяються: сигнал модуля напруги, що впливає на випрямляч ПЧ; сигнал частоти і фази напруги, що впливає на інвертор ПЧ.

Для безпосередніх перетворювачів частоти (НПЧ) з керуючих сигналів системи векторного управління U_α і U_β формуються сигнали фазового регулювання силових ключів для одержання необхідного рівня напруги і сигнали управління частотою і фазою напруги на виході НПЧ. У НПЧ ці сигнали поєднуються і діють на групи силових ключів кожної фази. Частота і фаза вихідної напруги перетворювача визначається тривалістю інтервалів поперемінного відкриття груп.

Відомі обмеження частоти вихідної напруги НПЧ у залежності від частоти напруги мережі $f_{\text{нпч(max)}}=0.5f_c$ зберігаються і при керуванні НПЧ у системах векторного управління.

Однієї з головних задач, що потребують рішення при апаратурній реалізації системи векторного управління, є вимір вектора головного потокозчеплення. Рішення її впливає з представлення вектора у вигляді

$$\psi_0 = |\psi_0| (\cos \eta + j \sin \eta),$$

кут η є кутом (електричним), відлічуваним від осі α (магнітна вісь фази А) до відповідного миттєвого значення положення вектора головного потокозчеплення (до максимуму напруженості магнітного поля в зазорі). Кут η вимірити важко, але можна одержати складові $\psi_{0\alpha} = |\psi_0| \cos \eta$ і $\psi_{0\beta} = |\psi_0| \sin \eta$, установивши,

наприклад, датчики Холу на вісь α і на вісь β , зрушену на кут $\pi/(2p)$ у розточенні статора. Одержати оцінки

$\psi_{0\alpha}$ і $\psi_{0\beta}$ можна і на основі виміру інших електромагнітних перемінних, наприклад, виміривши ЕДС вимірювальної котушки на статорі двигуна, чи обчисливши вектор головного потокозчеплення по напрузі, струму і кутовій швидкості АД.

Система векторного управління з опорним вектором головного потокозчеплення будується у вигляді двоканальних систем управління і містить канал управління кутовою швидкістю і канал управління модулем головного потокозчеплення.

За аналогією з машиною постійного струму, описаної в параграфі 1.1, канал управління кутової швидкості ротора містить два контури: контур управління складової струму статора I_{s2} , еквівалентної току якоря машини постійного струму, і зовнішній контур управління кутовою швидкістю ротора. Канал управління модулем головного потокозчеплення асинхронної машини виявляється істотно складніше аналогічного каналу управління збудженням машини постійного струму. Модуль головного потокозчеплення, складова струму статора I_{s1} і складова напруги статора U_{s1} функціонально пов'язані у вигляді динамічної системи 2-го порядку; крім того, на цей канал впливає складова струму статора I_{s2} у виді трансформаторних е.д.с., пропорційних розсіюванням статора і ротора. Важливою особливістю даної системи є використання як опорного вектора головного потокозчеплення, що істотно підвищує якість управління. Визначення будь-якого іншого опорного вектора пропонує обчислення, що використовують значення параметрів машини, як правило, відомих не точно і, що змінюються в процесі роботи привода.

Складова струму статора I_{s1} у процесі роботи системи безупинно міняється при постійному модулі головного потокозчеплення, що істотно відрізняє АД від ДПТ, де струм збудження звичайно постійний за значенням.

Для одержання астатизму в контурі головного потокозчеплення застосуємо Пі-регулятор з передатною функцією

$$W_{p\psi}(s) = \frac{(T_n s + 1)}{T_u s}$$

де $T_p = T_1$ - велика постійна часу каналу модуля потокозчеплення;

$$T_u = 2 T_\mu K_{m.n} \cdot K_{o.c.n} \left(\frac{L_m}{R_s} \right).$$

Контур управління кутової швидкості ротора, при оптимізованому контурі складової струму I_{s2} , може бути надбудований за умовами технічного оптимуму за допомогою П-регулятора і за умовами симетричного оптимуму за допомогою Пі-регулятора швидкості.

Система векторного управління з опорним вектором ψ_r була запропонована фірмою "Сименс" під назвою "Трансвектор". Система побудована у вигляді двох

каналів : каналу стабілізації модуля потокозчеплення ротора і каналу управління швидкістю обертання ротора.

Потокозчеплення ротора безпосередньо не залежить від складової U_{s1} , по цьому канал управління $|\dot{\psi}_r|$ можна будувати двоконтурним - із внутрішнім контуром управління по струму статора I_{s1} і з зовнішнім по модулю потокозчеплення ротора .

Канал управління кутовою швидкістю ротора також може містити 2 контури управління - внутрішній, по струму статора I_{s2} і зовнішній, по кутовій швидкості ротора

Питання для самоперевірки.

1. Дайте класифікацію систем векторного управління АД.
2. Назвіть типи перетворювачів частоти, що застосовуються в асинхронних приводах з векторним управлінням.
3. Назвіть способи індикації вектора магнітного потокозчеплення.
4. Які особливості побудови асинхронного привода з управлінням за вектором головного потокозчеплення двигуна.
5. Які особливості побудови асинхронного привода з управлінням за вектором потокозчеплення ротора двигуна.

Контрольне завдання

Побудувати механічні характеристики АД при різних законах частотного управління: при керуванні за законом $\gamma=\alpha$, при керуванні за законом, що забезпечує при будь-якій частоті режим роботи АД, найбільш близький до номінального, при керуванні за законами, що забезпечує IR-компенсацію і IZ-компенсацію, при керуванні за законом, що забезпечує постійну величину потокозчеплення ротора ψ_2 . Вихідні дані для розрахунку видає викладач індивідуально.

Перед розрахунком механічних характеристик необхідно привести усі вихідні дані у відносні одиниці. Необхідний теоретичний матеріал викладений у темах 2 і 3. Побудувати механічні характеристики АД при різних законах частотного управління в єдиній системі координат.

ПРИБЛИЗНИЙ ПЕРЕЛІК ЗАПИТАНЬ ДЛЯ САМОПІДГОТОВКИ

ЧАСТИНА І

1. Поняття електропривода і задачі курсу.
2. Механічні характеристики робочих машин.
3. Механічні характеристики двигунів і режими їх роботи.
4. Сумісна робота двигуна і робочої машини. Статична сталість.
5. Рівняння руху електропривода .
6. Зведення статичних моментів, махових мас від одної осі обертання до другої .
7. Зведення сил і махових мас від поступального руху до обертального.
8. Механічні властивості двигунів з незалежним збудженням в рушійному режимі.
9. Штучні характеристики :
 - а) при зміні опору якірного кола ;
 - б) при зміні напруги живлення ;
 - в) при зміні магнітного потоку .
10. Вираз характеристик двигуна у відносних одиницях.
11. Розрахунок і побудова характеристик по паспортним даним.
12. Розрахунок пускового реостата.
13. Гальмівні режими роботи двигуна:
 - а) з віддачею енергії в мережу - рекуперативне гальмування ;
 - б) режим противмикання ;
 - в) режим електродинамічного гальмування .
14. Механічні характеристики і регулювання швидкості двигуна при шунтуванні якоря .
15. Механічні властивості двигунів з послідовним збудженням в рушійному режимі.
16. Розрахунок і побудова швидкісних характеристик.
17. Побудова механічних характеристик методом перехідної.
18. Розрахунок пускового реостату.
19. Гальмівні режими роботи двигуна :
 - а) режим противмикання ;
 - б) режим електродинамічного гальмування .
20. Спеціальні схеми вмикання двигуна :
 - а) при шунтуванні якоря ;
 - б) при шунтуванні обмотки збудження .
21. Механічні властивості двигунів змішаного збудження в рушійному режимі.
22. Розрахунок швидкісної і механічної характеристик.
23. Область застосування двигунів постійного струму.
24. Система Г-Д.
25. Система Г-Д із зворотними зв'язками:
 - а) із зворотнім зв'язком за швидкістю;
 - б) із зворотнім зв'язком за струмом;

- в) з відсічкою за струмом.
 - 26. Гальмівні режими системи Г-Д.
 - 27. Механічні властивості асинхронних двигунів:
 - а) швидкісні характеристики;
 - б) механічні характеристики.
 - 28. Штучні характеристики при зміні:
 - а) активного опору роторного кола;
 - б) напруги мережі живлення;
 - в) частоти мережі живлення;
 - г) активно-індуктивного опору роторного кола;
 - д) активного опору в колі статора.
 - 29. Розрахунок пускового реостата асинхронного двигуна.
 - 30. Несиметричні режими роботи асинхронного двигуна.
 - 31. Гальмівні режими роботи АД:
 - а) генераторний режим з віддачею енергії в мережу ;
 - б) режим противмикання;
 - в) режим електродинамічного гальмування.
 - 32. Механічні властивості синхронних двигунів :
 - а) вираз електромагнітного моменту ;
 - б) кутова характеристика машини ;
 - в) запуск синхронного двигуна ;
 - г) енергетичні показники синхронного двигуна.
 - 33. Характеристики двошвидкісних асинхронних двигунів.
 - 34. Багатодвигунний електропривод. Загальні положення .
 - 35. Дводвигунний привод постійного струму з двигунами незалежного збудження з жорстким зв'язком валів і паралельним вмиканням якорів.
 - 36. Дводвигунний привод постійного струму з двигунами незалежного збудження з жорстким зв'язком валів і послідовним вмиканням якорів.
 - 37. Дводвигунний привод з жорстким зв'язком валів асинхронних двигунів:
 - а) з короткозамкненим ротором;
 - б) з фазним ротором.
- Зрівнювання навантаження дводвигунних електроприводів.
- Електричний вал з робочими зрівнювальними машинами.
- 38. Електричний вал з допоміжними зрівнювальними машинами :
 - а) асинхронними;
 - б) синхронними.

ЧАСТИНА II

1. Особливості роботи вентильних перетворювачів в системах електропривода.
2. Класифікація вентильного приводу постійного струму.
3. Реверсивний вентильний привод з активним моментом на валу.
4. Вентильний привод з реверсом обмотки збудження.
5. Вентильний привод з реверсом обмотки якоря.

6. Вентильний привод постійного струму з двома комплектами вентилів.
7. Особливості статичних характеристик в системі ТП-Д.
8. Імпульсне регулювання напруги.
9. Імпульсне регулювання опору.
10. Класифікація вентильного приводу змінного струму.
11. Привод з перетворювачами частоти з безпосереднім зв'язком.
12. Привод з перетворювачами частоти з проміжною ланкою постійного струму.
13. Каскадні схеми вмикання асинхронного двигуна. Загальні положення.
14. Машинно-вентильний каскад сталої потужності.
15. Машинно-вентильний каскад сталого моменту.
16. Асинхронно-вентильний каскад .
17. Імпульсне регулювання опору в роторному колі АД.
18. Вентильний двигун. Запуск вентильного двигуна.
19. Перехідні процеси в електроприводі. Загальні положення.
20. Рівняння руху електропривода. Аналіз рівняння руху.
21. Методи рішення рівняння руху.
22. Аналітичний метод рішення рівняння руху.
23. Графо - аналітичний метод рішення рівняння руху.
24. Перехідні процеси двигуна з незалежним збудженням :
 - а) по керуючій дії;
 - б) по збуджуючій дії.
25. Розрахунок і побудова кривих перехідного процесу двигуна з незалежним збудженням без урахування електромагнітної сталої часу T_e :
 - а) при спуску двигуна в одну ступінь ;
 - б) при реостатному пуску двигуна ;
 - в) при електродинамічному гальмуванні з активним моментом опору ;
 - г) при електродинамічному гальмуванні з реактивним моментом опору;
 - д) при режимі противмикання і активному моменті опору ;
 - е) при режимі противмикання і реактивному моменті опору ;
26. Перехідні процеси при прийманні і скиданні навантаження.
27. Перехідні процеси з ударним навантаженням.
28. Перехідні процеси в системах Г-Д з ТЗ , ТП-Д , АВК , МВК.
Загальна структура.
29. Особливості перехідних процесів в системі ТП-Д (при лінійній зміні напруги) :
 - а) по керуючій дії;
 - б) по збуджуючій дії;
30. Особливості перехідних процесів в системі Г-Д.
31. Форсування перехідних процесів в системі Г-Д (схеми форсування).
32. Форсування перехідних процесів в системі Г-Д з тиристорним збудженням.
33. Перехідні процеси двигуна постійного струму з урахуванням електромагнітної сталої часу силового кола T_e :

- а) аперіодичні ;
 - б) коливальні.
34. Втрати енергії при перехідних процесах двигуна з незалежним збудженням:
- а) при пуску;
 - б) в режимі електродинамічного гальмування ;
 - в) в режимі противмикання;
 - г) при лінійній зміні напруги.
35. Способи зменшення втрат енергії при перехідних процесах.
36. Вибір потужності двигунів. Загальні положення.
37. Режими роботи двигунів у відношенні нагрівання.
38. Нагрівання і охолодження двигунів при тривалому режимі роботи.
39. Побудова навантажувальних діаграм.
40. Вибір потужності двигунів при тривалому режимі роботи:
- а) при незмінному навантаженні;
 - б) метод середніх втрат;
 - в) метод еквівалентних величин.
41. Нагрівання і охолодження двигунів при короткочасному режимі навантаження .
42. Вибір потужності двигунів при короткочасному навантаженні.
43. Нагрівання і охолодження двигунів при повторно-короткочасному навантаженні.
44. Вибір потужності двигунів при повторно-короткочасному навантаженні.
45. Визначення допустимого числа вмикань за годину асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.
46. Робота електропривода з маховиком і ударним навантаженням.
47. Особливості вибору потужності двигунів для регульованного електропривода.

ЛІТЕРАТУРА

1. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. – М. : Энергоиздат, 1981. – 576 с.
2. Ключев В. И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов / В. И. Ключев, В. М. Терехов. – М. : Энергия, 1980. – 360 с.
3. Иванов–Смоленский А. В. Электрические машины / А. В. Иванов - Смоленский. – М. : Энергия, 1980. – 620 с.
4. Электропривод / О. С. Марченко, Ю. М. Лавріненко, П. І. Савченко, Є. Л. Жулай; за ред. О. С. Марченка . – К. : Урожай, 1995. – 208 с.
5. Фоменко А. П. Электропривод сельскохозяйственных машин, агрегатов и поточных линий / Фоменко А. П. – М. : Колос, 1984. – 280 с.

Навчальне видання

ОСОБИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Методичні рекомендації

Укладач: **Плахтир** Олег Олегович

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. акр. 13,14.

Тираж 50 прим. Зам № _____

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного аграрного університету
54020, м. Миколаїв, вул. Паризької комуни, 9.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.02.2013 р