

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Кафедра «Автоматизовані електромеханічні системи»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

по розрахунку параметрів і характеристик та
комплектації систем автоматизованого електропривода
з дисциплін:

**«ЕЛЕМЕНТИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ»,
«КЕРУЮЧІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ АВТОМАТИЗОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ»,
«ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ»,
«СИЛОВІ ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМ МЕХАТРОНІКИ ТА РОБОТОТЕХНІКИ»,
«ІНФОРМАЦІЙНІ ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМ МЕХАТРОНІКИ ТА РОБОТОТЕХНІКИ»**

ХАРКІВ 2022

ББК 39.62 я7
А 39
УДК 629.78 (075)

А 39 Тукалов І. О., Кунченко Т.Ю. Методичні вказівки по розрахунку параметрів і характеристик та комплектації систем автоматизованого електропривода з дисциплін: «Елементи автоматизованого електропривода», «Керуючі перетворювачі автоматизованих електроприводів», «Елементи систем керування автоматизованих електроприводів», «Силові елементи систем мехатроніки та робототехніки», «Інформаційні елементи систем мехатроніки та робототехніки». Навчально-методичне забезпечення самостійної роботи студентів. -Харків: НТУ ХПІ, 2022. - 40с.

Подано навчально-методичний супровід самостійної роботи студентів з проектування реверсивних тиристорних перетворювачів постійного струму, а також розрахунку та обрання компонентів для сучасних систем автоматизованих електроприводів.

Призначений для студентів спеціальності

- 141 – "Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка",
що спеціалізуються за напрямками:
141.09 – "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод",
141.10 – "Мехатроніка і робототехніка",
а також студентів інших спеціальностей, що вивчають ці або суміжні
дисципліни.

Іл. 15. Табл. 13. Бібліогр. 9 наім.

УДК 629.78 (075)
ББК 39.62 я7

1. ЗАВДАННЯ ТА ВКАЗІВКИ З ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ

1.1. МЕТА РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ

При виконанні розрахункової роботи студенти повинні закріпити отримані знання та набути практичних навичок розрахунку та проектування типових перетворювальних пристроїв, а також вибору всіх елементів автоматизованого електроприводу.

1.2. ЗМІСТ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ

РГР № 1

Розрахунково-пояснювальна записка повинна містити такі розділи:

- вступ;
- завдання на проектування;
- вибір силової схеми керованого випрямляча;
- вибір основних елементів керованого тиристорного перетворювача (силового трансформатора, тиристорів, при необхідності – зрівнюючих реакторів, згладжуючого дроселя);
- розрахунок параметрів та характеристик усіх елементів схеми;
- розрахунок динамічних параметрів електроприводу;
- розрахунок зовнішньої та регулювальної характеристик тиристорного перетворювача;
- висновок;
- список літератури.

Зміст графічної частини:

- принципова схема перетворювача з усіма вибраними елементами;
- графіки зовнішньої та регулювальної характеристик тиристорного перетворювача.

РГР № 2

Розрахунково-пояснювальна записка повинна містити такі розділи:

- вступ;
- завдання на проектування;
- вибір функціональної схеми електроприводу;
- вибір основних елементів захисту керованого тиристорного перетворювача (за результатами розрахунків РГР №1);
- розрахунок та вибір резисторів динамічного гальмування;
- вибір та розрахунок параметрів елементів керуючої частини електроприводу (вибір та опис заданого осередка УБСР, вибір та розрахунок задатчика інтенсивності, датчиків струму та швидкості);

- висновок;
- список літератури.

Зміст графічної частини:

- функціональна схема електроприводу з усіма вибраними елементами;
- схема з'єднання резисторів динамічного гальмування;
- схема заданного осередка УБСР.

1.3. ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ

Оформлення розрахунково-пояснювальної записки має відповідати стандарту підприємства.

Нумерація сторінок пояснювальної записки має бути наскрізною.

Титульна сторінка не нумерується.

Виклад тексту має бути коротким, чітким.

Позначення та написання фізичних величин має відповідати міжнародній системи одиниць СІ.

1.4. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА ПРОЕКТУВАННЯ

Завдання на розрахункову роботу видає керівник. Варіанти завдання наведено у табл.1.1.

Вихідні дані для проектування:

основні параметри та тип електродвигуна, який є навантаженням перетворювача;

схема та тип управління тиристорного перетворювача;

допустимий рівень зрівняльного струму при спільному управлінні групами (у частках від номінального струму тиристорного перетворювача γ);

допустимий рівень пульсацій діючого значення струму якоря $\delta\%$ (для двигунів серії П допустимий рівень пульсацій 7%);

значення навантаження на валу електродвигуна (відповідає номінальному струму двигуна);

момент інерції механізму (у частках від моменту інерції двигуна μ);

величина лінійної напруги мережі живлення 380В, 50 Гц, форма напруги мережі - синусоїдальна.

Силу схему перетворювача студент вибирає самостійно відповідно до заданого варіанту.

Таблиця 1.1 Вихідні дані до розрахункової роботи

Варіант	Двигун			Схема перетворювача	Тип управління групами	Допустимий зрівнюючий струм $I_{ур} = \gamma I_{дн}$	Момент інерції механізма $J_M = \mu J_{дв}$	Заданий осередок УБСР (схема та опис)	Тип тахогенератора НЗ-нез. збудж. ПМ-пост. магн.
	Тип	U_H	n_H						
№		В	об/хв			γ	μ		
1	П62	220	1500	нульова	роздільне		0,6	ЗИ-ЗАИ	НЗ
2	П72	220	1000	нульова	спільне	0,3	1,1	ДТ-ЗАИ	НЗ
3	П62	220	1000	мостова	роздільне		1,8	РТ-1АИ	НЗ
4	П52	220	1500	мостова	спільне	0,1	0,8	РС-1АИ	ПМ
5	П72	220	1000	нульова	роздільне		1,2	ЗИ-ЗАИ	ПМ
6	П62	220	1500	нульова	спільне	0,2	2	ДТ-ЗАИ	ПМ
7	П51	220	1000	мостова	роздільне		0,7	РТ-1АИ	НЗ
8	П41	220	1500	мостова	спільне	0,1	1,3	РС-1АИ	НЗ
9	П91	220	1000	нульова	роздільне		2,1	ЗИ-ЗАИ	НЗ
10	П81	220	1500	нульова	спільне	0,3	0,6	ДТ-ЗАИ	ПМ
11	П111	220	1500	мостова	роздільне		1,2	РТ-1АИ	ПМ
12	П112	220	1500	мостова	спільне	0,1	1,6	РС-1АИ	ПМ
13	П101	220	1000	нульова	роздільне		1,2	ЗИ-ЗАИ	НЗ
14	П91	220	1500	нульова	спільне	0,3	1,6	ДТ-ЗАИ	НЗ
15	П92	440	750	мостова	роздільне		0,9	РТ-1АИ	НЗ
16	П91	440	1000	мостова	спільне	0,2	1,7	РС-1АИ	ПМ
17	П81	110	1500	нульова	роздільне		1,4	ЗИ-ЗАИ	ПМ
18	П101	220	1000	нульова	спільне	0,3	0,8	ДТ-ЗАИ	ПМ
19	П112	440	750	мостова	роздільне		0,7	РТ-1АИ	НЗ
20	П111	440	1000	мостова	спільне	0,1	1,3	РС-1АИ	НЗ
21	П41	110	1500	нульова	роздільне		2,1	ЗИ-ЗАИ	НЗ
22	П52	110	1500	нульова	спільне	0,3	0,6	ДТ-ЗАИ	ПМ
23	П102	220	1000	мостова	роздільне		1,2	РТ-1АИ	ПМ
24	П101	220	1000	мостова	спільне	0,1	1,6	РС-1АИ	ПМ
25	П52	220	1500	нульова	роздільне		0,6	ЗИ-ЗАИ	НЗ
26	П62	220	1000	нульова	спільне	0,3	1,1	ДТ-ЗАИ	НЗ
27	П102	440	1500	мостова	роздільне		1,8	РТ-1АИ	НЗ
28	П111	440	1500	мостова	спільне	0,2	0,8	РС-1АИ	ПМ
29	П62	110	1500	нульова	роздільне		1,2	ЗИ-ЗАИ	ПМ
30	П81	110	1500	нульова	спільне	0,3	2	ДТ-ЗАИ	ПМ
31	П62	220	1500	мостова	роздільне		0,7	РТ-1АИ	НЗ
32	П72	220	1000	мостова	спільне	0,1	1,3	РС-1АИ	НЗ
33	П52	110	1500	нульова	роздільне		2,1	ЗИ-ЗАИ	НЗ
34	П62	110	1500	нульова	спільне	0,2	0,6	ДТ-ЗАИ	ПМ
35	П112	440	1500	мостова	роздільне		1,2	РТ-1АИ	ПМ
36	П112	440	1000	мостова	спільне	0,1	1,6	РС-1АИ	ПМ
37	П62	220	1000	нульова	роздільне		0,9	ЗИ-ЗАИ	НЗ
38	П52	220	1500	нульова	спільне	0,3	1,7	ДТ-ЗАИ	НЗ
39	П91	440	1000	мостова	роздільне		1,4	РТ-1АИ	НЗ
40	П92	440	750	мостова	спільне	0,2	0,8	РС-1АИ	ПМ

2. РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

2.1. ВИБІР СИЛОВОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Силова схема керованого тиристорного перетворювача (ТП) являє собою реверсивний випрямляч, призначений для перетворення змінного струму будь-якої частоти на постійний, величина напруги якого визначається вимогами навантаження. Як вихідні дані при проектуванні зазвичай беруть середні значення випрямленої напруги і струму навантаження та діапазон регулювання вихідної напруги. При використанні ТП для живлення якірних ланцюгів електродвигунів визначаються діапазон регулювання швидкості обертання та режим роботи двигуна.

Силові схеми перетворювачів, які застосовуються в електроприводі, відрізняються числом фаз (однофазні та трифазні); способом підключення вентилів до вторинної обмотки трансформатора (мостові, нульові) та ін. Вибір тієї чи іншої схеми ТП залежить від використання силового трансформатора за потужністю, використання вентилів за струмом та напругою, енергетичних показників, гармонійного складу вихідної напруги та струму, потужності двигуна, діапазону та точності регулювання, режиму роботи.

У зв'язку з дискретністю роботи вентилів у силовому ланцюгу виникають пульсації струму, які викликають додаткові втрати в обмотках електричних машин та апаратів, збільшують нагрівання, погіршують умови комутації двигуна.

Частота пульсацій струму та напруги на навантаженні залежить від числа фаз випрямляча, а амплітуда пульсації – від індуктивності силового ланцюга та глибини регулювання напруги. Отже, для згладжування струму силового ланцюга необхідно збільшувати індуктивність силового ланцюга, або число фаз перетворювача.

Збільшення індуктивності силового ланцюга є найпростішим способом зниження пульсацій струму до необхідної величини. Однак включення додаткових дроселів призводить до збільшення ваги та габаритів перетворювача та погіршення динамічних властивостей електроприводу.

Зниження пульсацій вихідного струму і напруги за рахунок збільшення числа фаз випрямляча призводить до ускладнення як силової схеми перетворювача, так і системи управління. Однак при цьому зберігаються високі динамічні властивості приводу, зменшуються спотворення струму і напруги мережі живлення і підвищується коефіцієнт потужності системи. Тому при виборі схеми перетворювача доводиться вирішувати суперечливе завдання вибору раціонального числа фаз випрямляча та оптимальних габаритів індуктивності фільтра, що згладжує.

Найбільш часто вживані силові схеми ТП показані на рис. 1.

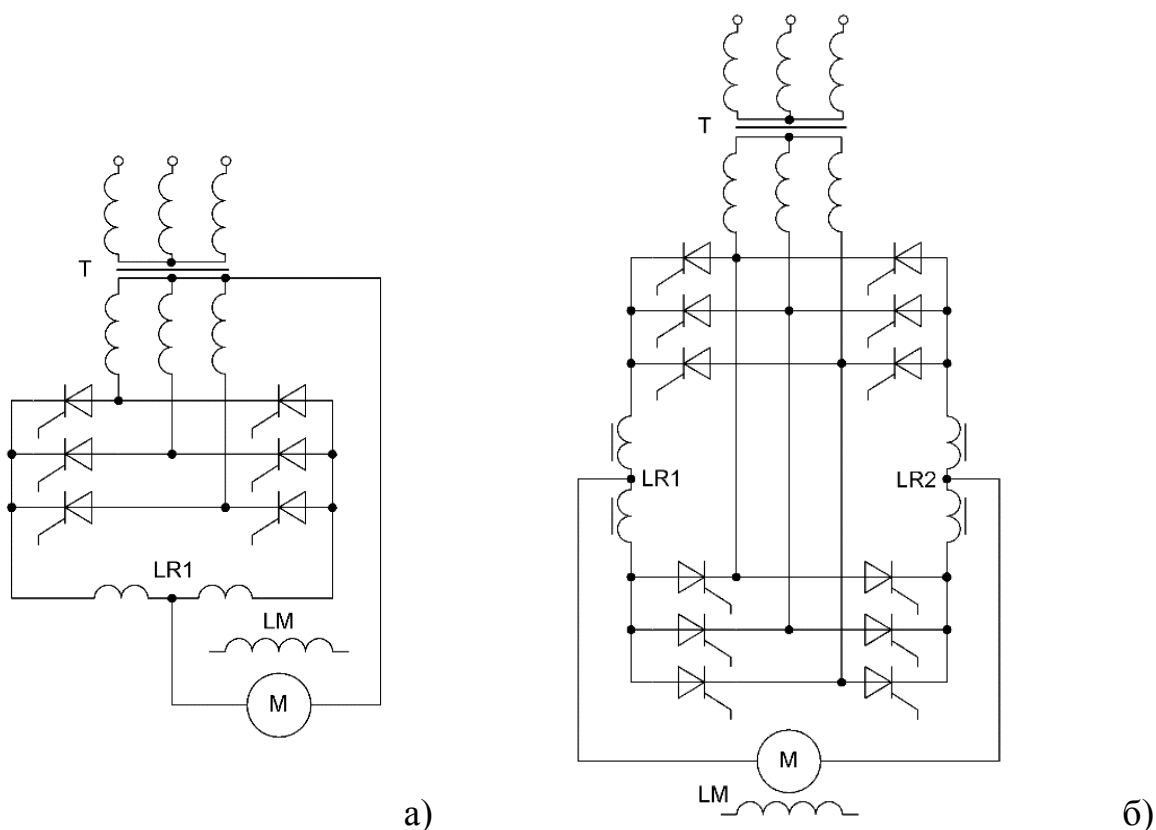


Рис. 1. Електричні схеми реверсивних ТП
а) нульова; б) мостова зустрічно-паралельна.

Трифазна нульова схема (рис. 1, а) проста і містить мало вентилів. Однак через великі значення діючих анодних струмів і зворотної напруги, наявності струмів вимушеного намагнічування трифазні нульові схеми доцільні при з'єднанні обмоток зірка-зірка і трикутник-зірка для тиристорних приводів потужністю 5-30 кВт. Для приводів більшої потужності 50-100 кВт необхідно застосовувати трансформатор з обмотками зірка або трикутник - подвійний зигзаг, що забезпечує компенсацію струмів вимушеного намагнічування та повільніше падаючу зовнішню характеристику.

Трифазна мостова схема (рис. 1, б) має досить жорстку зовнішню характеристику і хороше використання типової потужності трансформатора, в порівнянні з трифазною нульовою, забезпечує менші пульсації і зворотні напруги, має більш високий коефіцієнт потужності і меншу зону переривчастих струмів. Тому для приводів потужністю понад 100 кВт застосовується переважно трифазна мостова схема.

Для реверсивних електроприводів з рекуперативним гальмуванням застосовуються двокомплектні перетворювачі, один з яких працює у випрямляючому, а інший – в інверторному режимі.

Залежно від порядку роботи комплектів розрізняють системи з роздільним та спільним управлінням.

При роздільному управлінні працює лише один комплект перетворювача, що забезпечує заданий напрямок та величину швидкості двигуна. На другий

комплект не подаються керуючі імпульси та він не проводить струм. Для зміни режиму роботи комплектів використовується логічний перемикаючий пристрій (ЛПП), який забезпечує необхідну послідовність відключення комплекту, що раніше працював, і включення другого. Тому при роздільному управлінні в сталих режимах характеристики приводу не відрізняються від роботи з однокомплектним нереверсивним перетворювачем.

Перевагою роздільного управління є відсутність контуру зрівняльного струму, що дозволяє повніше використовувати силовий трансформатор, немає необхідності включати зрівнюючі реактори, зменшуються втрати енергії, вага та габарити перетворювача.

Разом з тим, при роздільному управлінні зміна режиму роботи приводу збільшує тривалість перехідних процесів через необхідну витримку часу при перемиканні комплектів. При роздільному управлінні виникає режим переривчастих струмів перетворювача, що призводить до різкого збільшення швидкості приводу з малими навантаженнями.

У реверсивних перетворювачах із спільним керуванням обидва комплекти вентилів працюють одночасно: один у випрямляльному, а другий в інверторному режимі. Внаслідок цього у схемі утворюється контур, яким протікає зрівняльний струм. Розмір і характер зрівняльного струму визначається законом управління комплектами. Обмеження статичних зрівняльних струмів здійснюється зрівнюючими реакторами.

Вигляд механічних і швидкісних характеристик електроприводу залежить від способу узгодження кутів управління випрямляючої групи α_B та інверторної групи $\alpha_{и}$. При лінійному узгодженому управлінні середні значення напруги на виході випрямляючого та інвертуючого комплектів однакові ($\alpha_B + \alpha_{и} = 180^\circ$).

Недоліком схем з лінійним узгодженням є наявність зрівняльних струмів, що додатково навантажують вентиля та трансформатор. Введення зрівнюючих дроселів збільшує електромагнітну постійну часу, що погіршує динамічні властивості приводу.

При лінійному узгодженні не в повному обсязі використовується трансформатор, оскільки для запобігання перекидання інвертора необхідно вводити обмеження з мінімального кута управління тиристорами.

Однак, завдяки тому, що спільне управління при лінійному узгодженні дозволяє отримати найкращі динамічні показники приводу, однозначні статичні характеристики і забезпечує найпростіший перехід з одного режиму в інший, переваги цього способу управління реверсивними перетворювачами виявляються суттєвішими, ніж його недоліки. Тому на практиці таке управління виявило переважне поширення для потужних перетворювачів. Для обмеження зрівняльного струму застосовують зрівнюючі реактори. Індуктивність реакторів вибирають такою, щоб зрівняльний струм не перевищував 10% від номінального. Для зменшення ваги та габаритів реакторів у приводах малої та середньої потужності допускають збільшення зрівняльного струму до 30% від номінального.

Для зменшення зрівняльних струмів у ряді випадків використовують нелінійне узгодження груп, при якому сума кутів ($\alpha_{\text{в}} + \alpha_{\text{и}} > 180^\circ$). Таке управління призводить до зменшення масогабаритних показників зрівнюючих реакторів, але в цьому випадку ускладнюється налаштування системи управління та погіршуються статичні та динамічні характеристики електроприводу.

Перетворювач підключається до мережі, як правило, через силовий трансформатор. Трансформатор необхідний для узгодження напруги мережі живлення з напругою двигуна і для забезпечення нульового виведення в трифазної нульової схеми. Потужність трансформатора залежить від схеми перетворювача та схеми з'єднання його обмоток.

При необхідності обмеження рівня пульсацій випрямленого струму при роздільному управлінні групами ТП в якірний ланцюг двигуна може включатися згладжуючий реактор (при спільному управлінні для цього, як правило, достатньо зрівнюючих реакторів). Наявність у схемі тих чи інших елементів визначається завданням (табл.1.1). Параметри електродвигуна, відповідно до варіанта, необхідно вибрати з каталогу (довідковий додаток, табл. П1.1).

2.2. ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУГИ УМОВНОГО ХОЛОСТОГО ХОДУ ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Необхідна максимальна випрямлена напруга ТП визначається в два етапи, оскільки до вибору елементів (трансформатора, тиристорів, реакторів та ін.) не відомі їх параметри.

Напруга умовного холостого ходу ТП попередньо визначається виходячи з досвіду проектування:

$$E_{d0} = U_{\text{дв}} + \Delta U_{\text{в}} + \Delta U_{\text{тр}} + \Delta U_{\text{ком}} + \Delta U_{\text{ур}} + \Delta U_{\text{ср}} + \Delta U_{\text{ш}}, \quad (2.1)$$

де $U_{\text{дв}}$ – середнє значення випрямленої напруги на якорі електродвигуна
($U_{\text{дв}} = U_{\text{н}}$);

$\Delta U_{\text{в}}$ – середнє значення падіння напруги на тиристорах ($\Delta U_{\text{в}} = 1 - 2\text{В}$);

$\Delta U_{\text{тр}}$ – падіння напруги на активному опорі силового трансформатора
($\Delta U_{\text{тр}} = 0,02U_{\text{н}}$);

$\Delta U_{\text{ком}}$ – комутаційне зниження напруги ($\Delta U_{\text{ком}} = 0,05U_{\text{н}}$);

$\Delta U_{\text{ур}}$ – падіння напруги на активному опорі зрівнюючого реактора
($\Delta U_{\text{ур}} = 0,0075U_{\text{н}}$);

$\Delta U_{\text{ср}}$ – падіння напруги на активному опорі згладжуючого реактора,
($\Delta U_{\text{ср}} = 0,0075U_{\text{н}}$);

$\Delta U_{\text{ш}}$ – падіння напруги на шинах або кабелі, що з'єднує електродвигун з перетворювачем ($\Delta U_{\text{ш}} = 0,1I_{\text{н}}R_{\text{я}}$);

$I_{\text{н}}$ – номінальний струм двигуна;

$R_{\text{я}}$ – опір якірного ланцюга двигуна..

Необхідна напруга на вторинній обмотці силового трансформатора

$$U_{2л} = \sqrt{3}U_{2ф}, \quad (2.2)$$

$$U_{2ф} = E_{d0}/k_1, \quad (2.3)$$

де $k_1=1,17$ для нульової схеми та $k_1=2,34$ для зустрічно-паралельної мостової схеми.

Діюче значення струму вторинної обмотки трансформатора без урахування комутаційних режимів та пульсацій

$$I_2 = k_2I_H. \quad (2.4)$$

де $k_2=0,577$ для нульової схеми та $k_2=0,817$ для зустрічно-паралельної мостової схеми.

Трансформатор необхідно вибрати з каталогу (довідковий додаток табл. П2.1, табл. П2.2) для відповідної схеми випрямлення за отриманими значеннями $U_{2л}$ і I_2 за умови, що його номінальна потужність P_H має бути більшою за розрахункову типову потужність трансформатора

$$P_T \geq k_3P_d; \quad (2.5)$$

$$P_d = P_{дв}, \quad (2.6)$$

де P_d – потужність з боку випрямленого струму, прийнята рівній потужності двигуна, $k_3=1,35$ для нульової схеми і $k_3=1,05$ для зустрічно-паралельної мостової схеми.

Далі значення напруги умовного холостого ходу E_{d0} необхідно перерахувати з урахуванням напруги вторинної обмотки $U_{2ф}$ обраного трансформатора

$$E_{d0} = k_1U_{2ф}. \quad (2.7)$$

2.3. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Коефіцієнт трансформації трансформатора

$$K_T = \frac{U_{1л}}{U_{2л}}, \quad (2.8)$$

де $U_{1л}$, $U_{2л}$ – діючі значення лінійних напруг мережевої (первинної) та вентиляльної (вторинної) обмоток трансформатора..

Струм у первинній обмотці

$$I_1 = \frac{I_2}{K_T} . \quad (2.9)$$

Активний опір короткого замикання фази трансформатора

$$R_{KT} = \frac{P_{K3}}{3I_2^2} , \quad (2.10)$$

де P_{K3} – втрати короткого замикання трансформатора.

Повний опір короткого замикання

$$Z_{KT} = \frac{U_K \% U_{2\phi}}{100I_2} = \frac{U_K \% U_{2л}}{100I_2\sqrt{3}} , \quad (2.11)$$

де $U_K \%$ – напруга короткого замикання трансформатора.

Повний індуктивний опір короткого замикання

$$X_{KT} = \sqrt{Z_{KT}^2 - R_{KT}^2} . \quad (2.12)$$

Активний та індуктивний опір вторинної обмотки трансформатора

$$R_2 = \frac{R_{KT}}{2k_T} , \quad (2.13)$$

$$X_2 = \frac{X_{KT}}{2k_T} . \quad (2.14)$$

Індуктивність розсіювання вторинної обмотки трансформатора

$$L_2 = \frac{X_2}{\omega_0} , \quad (2.15)$$

кругова частота мережі живлення

$$\omega_0 = 2\pi f_c , \quad (2.16)$$

де f_c – частота мережі живлення (50Гц).

Еквівалентний (фіктивний) опір трансформатора, що відображає комутаційне зниження напруги перетворювача

$$R_{ком} = \frac{X_2}{2\pi/p} , \quad (2.17)$$

де p – пульсність перетворювача ($p = 3$ – для нульової схеми, $p = 6$ – для мостової схеми).

2.4. ВИБІР ТИРИСТОРІВ

Вибір тиристорів проводиться за середнім значенням струму та максимальним значенням зворотної напруги.

Максимальна зворотна напруга на вентилях і в нульовій і в мостовій схемах

$$U_{\text{обр.макс}} = 2,44 U_{2\phi}. \quad (2.18)$$

Тиристори відповідного класу повинні бути вибрані з каталогу (довідковий додаток табл. П2.3) на напругу не нижче $U_{\text{обр.макс}}$.

Середнє значення струму через тиристор при номінальному навантаженні електродвигуна

$$I_{\text{вср}} = \frac{I_d}{3}. \quad (2.19)$$

Необхідно враховувати, що в період пуску вентилю повинен пропускати максимально допустимий струм двигуна $I_{\text{макс}} = \lambda I_n$, обумовлений сумою динамічного струму та струму статичного навантаження (перевантажувальна здатність за струмом для двигунів серії П $\lambda = 2,5$).

МАРКУВАННЯ ТИРИСТОРА

Т	143	630	16	4	А3	УХЛ
1	2	3	4	5	6	7

- 1 Т – тиристор; ТЛ – лавинний тиристор; Б - швидкодіючий; И – імпульсний; Ч – частотний;
- 2 Конструктивне виконання (номер розробки, розміри, тип корпусу);
- 3 Середній струм у відкритому стані (ампери);
- 4 Клас за напругою (випускаються від 100 В до 6 кВ – класи з 1 по 60);
- 5 Критична швидкість зростання напруги в закритому стані dU/dt ,
(0 – не нормується, 1 – 20 В/мкс, 2 – 50 В/мкс, 3 – 100 В/мкс, 4 – 200 В/мкс, 5 – 320 В/мкс, 6 – 500 В/мкс, 7 – 1000 В/мкс, 8 – 1600 В/мкс, 9 – 2500 В/мкс),
- 6 Група за часом вимкнення
(В3 – 80 мкс, А3 – 100 мкс, Х2 – 125 мкс, Т2 – 160 мкс, Р2 – 200 мкс),
- 7 Кліматичне виконання (УХЛ – помірний та холодний, Т – тропічний).

2.5. РОЗРАХУНОК ІНДУКТИВНОСТІ ЗРІВНЮЮЧИХ ТА ЗГЛАДЖУЮЧОГО РЕАКТОРА

Особливістю реверсивних тиристорних перетворювачів із спільним управлінням є одночасна робота обох комплектів перетворювача: один з них працює у випрямляючому режимі, інший - в інвертуючому. Через відмінність миттєвих значень напруги в контурі, утвореному вентиляльними групами,

з'являється неврівноважена напруга, під дією якої протікає струм, минаючи ланцюг навантаження. Цей струм називається зрівнюючим.

Завдяки наявності зрівнюючих струмів перетворювачі не мають зони переривчастого струму, що визначає однозначність їх зовнішніх характеристик, та відсутність стрибків напруги та швидкості при переході з випрямного режиму в інверторний та назад.

З іншого боку, зрівнюючий струм створює додаткові втрати у вентилях і обмотках трансформатора, та в ряді випадків призводить до аварійних режимів. Для обмеження цих струмів застосовуються зрівнюючі реактори. Активні опори обмоток трансформатора та зрівнюючих реакторів практично не впливають на величину зрівнюючого струму.

Індуктивність зрівнюючих реакторів, необхідна для обмеження статичних зрівнювальних струмів у реверсивних перетворювачах,

$$L_{ур} = \frac{\sqrt{2}U_{2л}k_{ур}}{\sqrt{3}I_{ур}\omega_0}, \quad (2.20)$$

де $I_{ур}$ – допустиме значення зрівнюючого струму, що вибирається відповідно до залежності

$$I_{ур} \leq \gamma I_n, \quad (2.21)$$

$U_{2л}$ - лінійна напруга вторинної обмотки трансформатора;

$k_{ур}$ – розрахунковий коефіцієнт діючого значення зрівнюючого струму

($k_{ур} = 0,65$ для нульової і $k_{ур} = 0,18$ для зустрічно-паралельної мостової схеми випрямлення);

γ – зазначений у завданні коефіцієнт допустимої величини зрівнюючого струму.

Зрівнюючі реактори зазвичай мають середній вивідний контакт. Бажано застосування симетричного включення. За відсутності стандартного реактора з необхідною індуктивністю, можливе встановлення декількох однакових реакторів. Поширені схеми з'єднання реакторів показано на рис. 2.

У довідковому додатку (табл. П2.4, П2.5) наведено параметри деяких реакторів серій ФРОС і СРОС.

При виборі реакторів слід пам'ятати, що у зрівнюючий контур вони включені повністю, а до якірного ланцюга входить лише половина. Отже, рівняння (2.20) визначає сумарну індуктивність реакторів і при виборі, наприклад, двох симетрично включених реакторів, індуктивність кожного визначиться як $L_{ур}^* = L_{ур}/2$.

У більшості випадків, за наявності зрівнюючих реакторів, встановлення згладжуючого реактора не потрібно.

Пульсації випрямленої напруги викликають пульсації випрямленого струму, які погіршують комутацію двигуна та викликають його додаткове нагрівання. Заводи виробники двигунів гарантують їх характеристики при допустимому рівні пульсацій випрямленого струму $\delta\%$, (зазвичай від 2 до 15%

номінального струму). У багатьох випадках індуктивності якоря двигуна замало для згладжування пульсацій.

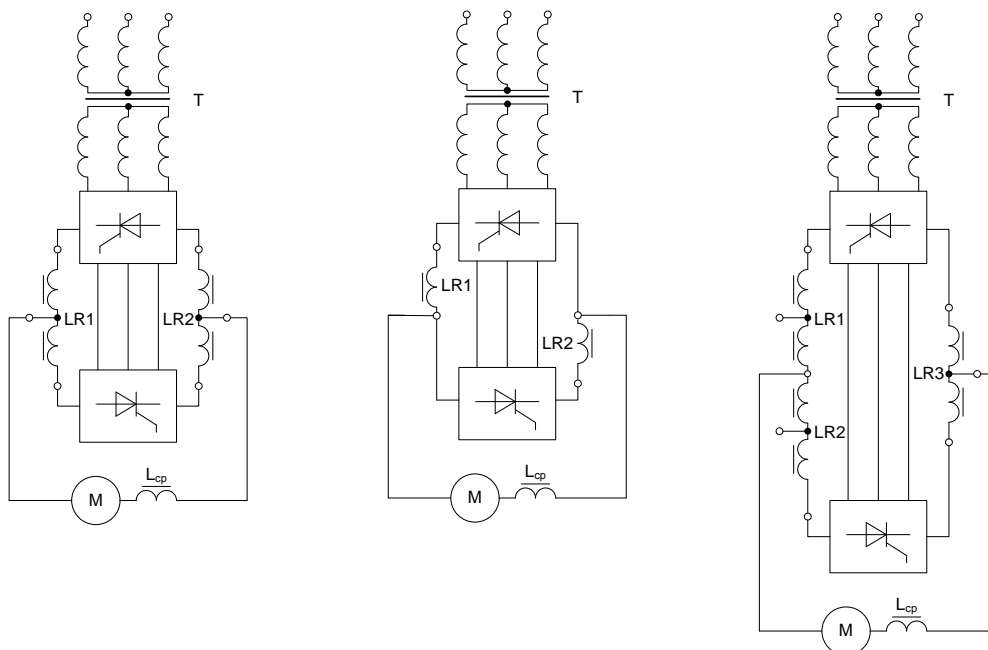


Рис. 2. Схеми з'єднання зрівнюючих реакторів

Індуктивність якорного ланцюга двигуна

$$L_{\text{ДВ}} = \frac{k_L U_{\text{Н}}}{p_{\text{ДВ}} I_{\text{Н}} \omega_{\text{Н}}}, \quad (2.22)$$

де $p_{\text{ДВ}}$ – кількість пар полюсів двигуна;

k_L – коефіцієнт рівний $0,15 \div 0,25$ для компенсованих двигунів та $0,5 \div 0,6$ для некомпенсованих;

$U_{\text{Н}}, I_{\text{Н}}, \omega_{\text{Н}}$ – номінальна напруга, струм та швидкість двигуна.

Номінальна кутова швидкість обертання двигуна

$$\omega_{\text{Н}} = \frac{\pi n_{\text{Н}}}{30}, \quad (2.23)$$

де $n_{\text{Н}}$ - швидкість двигуна об / хв.

Амплітудне значення гармонійних складових випрямленої напруги визначається залежністю

$$E_{\text{кр}} = E_{d0} \frac{2 \cos \alpha}{(kp)^2 - 1} \sqrt{1 + (kp)^2 \tan^2 \alpha}, \quad (2.24)$$

де $k = 1, 2, 3$ – номер гармоніки; p - пульсність ТП.

Найбільшу амплітуду і в нульових, і в мостових схемах має 1-а гармоніка $k = 1$. Амплітуда вищих гармонік значно менша, частота їх вища, отже дія

реактора на них ефективніша. Виходячи з цього, вибір реактора ведеться за основною гармонікою при $kp = 3$ для нульової і $kp = 6$ для мостової схем.

Оскільки при роботі ТП на якір двигуна можлива робота практично в усьому діапазоні зміни кута управління α необхідно орієнтуватися на максимальне значення амплітуди $E_{кр}$, тобто $\alpha \approx 80^\circ$.

Тоді необхідна індуктивність реактора

$$L_{ср} = \frac{E_{кр}100}{\sqrt{2}(kp)\omega_0\delta\%I_H} - L_{дв} - L_{ур} - L_T, \quad (2.25)$$

де $L_T = L_2$ для нульової схеми та $L_T = 2L_2$ для мостової схеми.

За розрахунковими значеннями $L_{ср}$ і $L_{ур}$ з каталогу (табл. П2.4, П2.5) вибирається згладжуючий або зрівнюючі реактори з уточненими значеннями індуктивності та активного опору $R_{ср}$ і $R_{ур}$.

2.6. ДИНАМІЧНІ ПАРАМЕТРИ СИЛОВОГО ЛАНЦЮГУ

Опір якірного ланцюга електродвигуна

$$R_{дв} = \beta(R_{я} + R_{дп} + R_{ко}) + \frac{2\Delta U_{щ}}{I_H}, \quad (2.26)$$

де $R_{я}$, $R_{дп}$, $R_{ко}$ – опори обмоток якоря, додаткових полюсів та компенсаційної обмотки за її наявності;

$\Delta U_{щ}$ – падіння напруги в щітковому контакті двигуна, приймається рівним 2 В;
 $\beta=1,24$ - температурний коефіцієнт, що враховує зміну опору при нагріванні машини на 60 °С.

Активний опір головного ланцюга електроприводу

$$R_{\Sigma} = R_{дв} + R_T + R_{ком} + R_{ур} + R_{ср} + R_{ш}, \quad (2.27)$$

де $R_T = R_2$ для нульової схеми та $R_T = 2R_2$ для мостової схеми;

$R_{ш} = 0,1R_{дв}$ – опір шин або кабелю, що з'єднують тиристорний перетворювач із якорем двигуна.

Індуктивність головного ланцюга

$$L_{\Sigma} = L_{дв} + L_T + L_{ур} + L_{ср}, \quad (2.28)$$

де $L_T = L_2$ для нульової схеми та $L_T = 2L_2$ для мостової схеми.

Слід пам'ятати, що значення індуктивності $L_{ур}$ та активного опору $R_{ур}$ слід використовувати з урахуванням схеми з'єднання.

Електромагнітна постійна часу якірного ланцюга двигуна

$$T_a = \frac{L_{дв}}{R_{дв}}, \quad (2.29)$$

а електромагнітна постійна часу головного ланцюга

$$T_э = \frac{L_э}{R_э}. \quad (2.30)$$

Наведений момент інерції електроприводу

$$J = J_{дв} + J_M = J_{дв}(1 + \mu), \quad (2.31)$$

де $J_{дв}$, J_M – моменти інерції двигуна та механізму відповідно;
 μ – коефіцієнт, що визначає співвідношення між моментом інерції двигуна та механізму, заданий у вихідних даних (слід пам'ятати, що в каталогах електродвигунів може вказуватися маховий момент $GD^2 = 4 J_{дв}$).

Розмір коефіцієнта двигуна

$$k\Phi_H = \frac{U_H - I_H R_{дв}}{\omega_H}, \quad (2.32)$$

де $k = \frac{p_{дв} N}{2\pi a}$ – конструктивна постійна;

N – кількість активних провідників обмотки якоря;

a – число паралельних гілок обмотки якоря;

Φ_H – номінальний магнітний потік двигуна.

Тоді електромеханічна постійна часу електроприводу

$$T_M = \frac{J R_э}{(k\Phi_H)^2}. \quad (2.33)$$

2.7. РОЗРАХУНОК ЗОВНІШНЬОЇ ТА РЕГУЛЮВАЛЬНОЇ ХАРАКТЕРИСТИК ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

У стаціонарному режимі випрямлена напруга перетворювача U_d , з урахуванням падіння напруги у вентилі $\Delta U_в$, падіння на активному опорі фази трансформатора R_2 і комутаційним зниженням напруги визначиться рівнянням

$$U_d = E_{d0} \cos \alpha - \Delta U_в - \left(R_2 + \frac{\omega_0 L_2}{2\pi / p} \right) I_d. \quad (2.34)$$

Відповідно до цього виразу, зовнішні характеристики перетворювача $U_d = f(I_d)$, при $\alpha = const$, є паралельними прямими, а його регулювальні характеристики $U_d = f(\alpha)$, при $I_d = const$, є косинусоїдами. Вигляд цих характеристик показаний на рис.3.

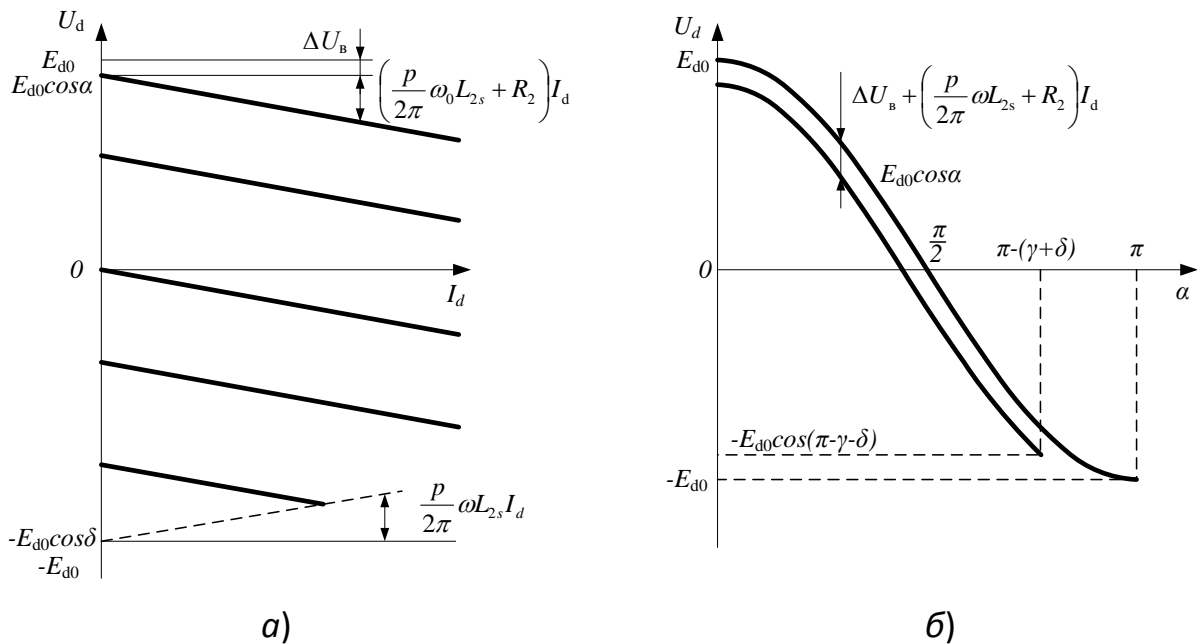


Рис. 3. Статичні зовнішні а) та регулювальні б) характеристики ТП у режимі безперервного струму

Максимальне значення кута регулювання, при якому ще можливе безпечне інвертування, $\alpha_{\max} = \pi - (\gamma + \delta)$, де δ – кут відновлення замикаючих властивостей тиристора (з урахуванням деякого запасу, для використовуваних тиристорів табл. 2.3, слід прийняти $\delta = 2 \div 3^\circ$).

Звідки спливає $\cos(\alpha_{\max} + \gamma) = -\cos \delta$, і може бути знайдено рівняння лінії безпечного інвертування

$$U_d = -E_{d0} \cos \delta + \frac{\omega_0 L_2}{2\pi / p} I_d. \quad (2.35)$$

Кут комутації можна розрахувати за формулою

$$\gamma = \arccos \left[\cos \alpha - \frac{\omega_0 L_2}{E_{d0} (\pi / p)} I_d \right] - \alpha. \quad (2.36)$$

Зовнішні характеристики необхідно побудувати для випрямного та інверторного режимів роботи перетворювача при кутах регулювання $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ, 120^\circ, 135^\circ, 150^\circ$ та змінах випрямленого струму в межах $0 \leq I_d \leq \lambda I_H$. На графіку слід завдати лінію безпечного інвертування.

Для побудови регульовальних характеристик необхідно розрахувати кут комутації при максимальному струмі навантаження перетворювача $I_d = \lambda I_H$ і куті регулювання $\alpha = 30^\circ$. На графіку має бути дві криві: перша відповідає напрузі холостого ходу перетворювача $U_d = E_{d0} \cos \alpha$, друга – залежність (2.34) максимальному струмі навантаження.

3. РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ЗАХИСТУ ТИРИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Через високу чутливість тиристорів до перенапруг та струмових перевантажень надійна робота напівпровідникових перетворювачів може бути забезпечена при застосуванні відповідних видів захистів, що обмежують допустимі значення як перенапруги, так і струму, що протікає через тиристори.

3.1. ВИМОГИ ДО ЗАХИСТУ І ЗАХИСНІ АПАРАТИ

Захист вентиляльних перетворювачів повинен діяти при наявності зовнішніх і внутрішніх к.з. та перекиданні інвертора.

Перекидання інвертора є наслідком порушення правильної комутації струму з одного тиристора в інший, тобто. пропускання відмикання чергового тиристора, зниження напруги мережі змінного струму, стрибка керуючої напруги на вході системи імпульсно-фазового управління, а також відмикання тиристора під дією імпульсів перешкод на керуючому електроді, перенапруг або високої швидкості зростання напруги (dU/dt) на тиристорі в прямому напрямку.

Внутрішні к.з. виникають внаслідок втрати тиристором замикаючих властивостей (пробою тиристора). Вихід тиристора з ладу може бути результатом теплового пробою, що відбувається при перевищенні допустимих амплітуди і тривалості значень струму, або при порушенні режиму охолодження тиристорів.

При зовнішніх к.з. і перекиданні інвертора захист повинен відключити перетворювач.

При внутрішніх к.з. захист повинен відключити весь перетворювач або пошкоджений тиристор (захист знімає управляючі імпульси з інших вентилів).

У тиристорних перетворювачах бажано обмеження першої напівхвилі аварійного струму.

Основні вимоги до елементів захисту, полягають у наступному.

Максимальна швидкодія. Ця вимога обумовлена малою теплоємністю кремнієвого елемента та, отже, високою чутливістю до величини і тривалості перебігу аварійних струмів.

Селективність. Вимкнення тільки пошкоджених вентилів без порушення роботи справних та перетворювача в цілому. При спрацьовуванні захисту, що відключає перетворювач в цілому, не повинен спрацьовувати захист, що відключає вентилі.

Чутливість. Це спрацьовування захисту при найменших значеннях аварійних струмів.

Надійність, стійкість до перешкод, простота налаштування та обслуговування.

Захист тиристорних перетворювачів від к.з. та перекидання інвертора здійснюють плавкі запобіжники, автоматичні вимикачі, швидкодіючі роз'єднувачі, короткозамикачі, захист за управлінням тиристорами.

Перехідні процеси в ланцюгах перетворювачів супроводжуються перенапругами, як правило, зумовленими різкою зміною струму в індуктивності.

Основні види перенапруг, що впливають на тиристори: перенапруження, зумовлені фізичними процесами в тиристорах у моменти комутації струму за рахунок ефекту накопичення носіїв; комутаційні перенапруги у моменти відключення ланцюгів з індуктивностями; перенапруги, зумовлені резонансними явищами у перетворювачах; зовнішні перенапруги, що надходять з мережі живлення при переривчастих коротких замикання на землю, розрядах блискавки та ін.

Перенапруги можуть призвести до електричного пробоя вентилів, що зазвичай викликає виникнення коротких замикань.

Для захисту від комутаційних перенапруг застосовуються RC-ланцюжки.

3.2. ПЛАВКІ ЗАПОБІЖНИКИ

Для захисту потужних тиристорних перетворювачів від струмів короткого замикання застосовують швидкодіючі запобіжники серій ПБВ, ПНБ5 і ПНБ5М. Запобіжники забезпечують захист тиристорів від струмів короткого замикання та не захищають від перевантаження.

Плавкі запобіжники для захисту тиристорів вибираються за режимом внутрішнього к.з. При цьому вибір здійснюється за двома параметрами запобіжника: за номінальним струмом та інтегралом Джоуля.

Запобіжник вибирається за найближчим більшим номінальним значенням діючого струму гілки тиристорів з урахуванням циклічності їх роботи. Потім визначається інтеграл Джоуля для запобіжника, що захищає тиристор:

$$W_{\text{пр}} \leq \frac{W_{\text{в}} n^2}{K_3}, \quad (3.1)$$

де $W_{\text{пр}}$ – верхнє значення Джоулевого інтеграла запобіжника;

$W_{\text{в}}$ – інтеграл Джоуля тиристора;

n – число тиристорів у вентильній гілці схеми перетворювача;

K_3 – коефіцієнт запасу, що дорівнює 1,2 - 1,5.

Зважаючи на те, що у сучасних запобіжників $W_{\text{пр}} \gg W_{\text{в}}$, для дотримання нерівності (3.1) необхідно брати велику кількість тиристорів у вентильній гілці схеми ($n = 3 - 8$). Це веде до зростання вартості перетворювача та його габаритів. Тому використання запобіжників для захисту тиристорів у перетворювачах малої та середньої потужності недоцільне.

На закінчення слід зазначити, що плавкі запобіжники використовуються тільки для захисту від струмів короткого замикання і не можуть бути використані для захисту від перевантажень, тому необхідне встановлення додаткового захисного апарату.

3.3. АВТОМАТИЧНІ ВИМИКАЧІ

Перевага автоматичних вимикачів у тому, що в них поєднані пристрій захисту та комутаційний апарат. Автоматичні вимикачі забезпечують багаторазовість дії та можливість дистанційного керування.

У тиристорних перетворювачах малої та середньої потужності (на струми 50 - 1000 А, при напругах 115, 230 та 460 В) для захисту від зовнішніх к.з. та перекидань інвертора застосовуються, як правило, автоматичні вимикачі серії А3700.

Вимикачі встановлюються на стороні змінного струму у разі живлення перетворювача від мережі напругою 380 В та служать для захисту трансформаторів або анодних струмообмежуючих реакторів, а в перетворювачах з одним тиристором у плечі трифазної схеми – і для захисту при внутрішніх к.з. (пробіі тиристорів).

Такі самі автомати встановлюються в ланцюгу постійного струму перетворювача для захисту двигуна.

Автоматичні вимикачі вибираються за номінальними параметрами силової частини перетворювача (струм та напруга) з урахуванням їхньої комутаційної здатності.

Дані автоматичних вимикачів серії А3700 у триполюсному виконанні для змінного струму та двополюсному виконанні для постійного струму наведено у табл. ПЗ.1, ПЗ.2.

3.4. РОЗРАХУНОК І ВИБІР РЕЗИСТОРІВ ДИНАМІЧНОГО ГАЛЬМУВАННЯ

Для гальмування електроприводу найчастіше застосовується режим динамічного гальмування. Якір двигуна відключається від перетворювача і підключається до резистора динамічного гальмування. З'являється контур протікання струму від ЕРС якоря. Цей струм створює гальмівний момент. Допустимий струм динамічного гальмування не повинен перевищувати номінальний струм двигуна I_H . Виходячи з цього, опір резистора динамічного гальмування слід розрахувати за формулою

$$R_{дт} = \frac{U_H - I_H R_{дв}}{I_H} - (R_{я} + R_{дп} + R_{ко}) , \quad (3.2)$$

температурний коефіцієнт β (збільшення опору при нагріванні двигуна) не враховують, оскільки гальмування можливе і для холодного двигуна.

Резистор слід вибрати з каталогу (табл. П4.1) за допустимим струмом. Через короткочасність режиму динамічного гальмування допускається перевантаження резистора до значень $3 - 4 I_n$. Для отримання необхідних параметрів ящики опорів з'єднують послідовно та/або паралельно. Для більш точного підбору опору $R_{дт}$ деякі ступені резистора не підключають. За потреби кількох ящиків опорів слід використовувати однакові.

4. ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ КООРДИНАТ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

4.1. УНІФІКОВАНІ БЛОКИ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

Функція керування електроприводом реалізується за допомогою великої кількості різних елементів - задаючих, регулюючих, узгоджувальних, функціональних та ін..

Конструктивно всі ці елементи виконуються у вигляді уніфікованих блоків, які застосовують у різних системах управління для будь-яких електроприводів. Комплекс всіх цих елементів утворює уніфіковану блокову систему регуляторів УБСР, в аналоговому виконанні УБСР-АІ та в дискретному виконанні УБСР-ДІ. Функціонально-технічною одиницею УБСР є осередок – друкована плата з мікросхемами та іншими елементами. Комплект осередків утворює блок управління. Комплект блоків збирається в шафу управління.

Елементною базою УБСР служать операційні підсилювачі та інтегральні мікросхеми. Номенклатура, схемні рішення та основні характеристики осередків УБСР наведені в [5, 6]. Деякі типи осередків представлені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Номенклатура та функції осередків УБСР

	Призначення	Тип	Функція
1	Осередок ступінчастого завдання швидкості	СЗ-6АИ	Формування напруги, що задає, від положення ступінчастого командоапарата
2	Осередок сельсинного завдання швидкості	СЛЗ-3АИ	Фазочутливе випрямлення вихідної напруги сельсинного командоапарата
3	Осередок задатчика інтенсивності	ЗИ-2АИ	Перетворення ступінчастого сигналу в лінійно змінний
4	Осередок задатчика інтенсивності	ЗИ-3АИ	Перетворення ступінчастого сигналу в лінійно змінний з регулюючим темпом прискорення і уповільнення
5	Осередок регулятора струму	РТ-1АИ	ІІ-регулятор струму
6	Осередок регулятора швидкості	РС-1АИ	ІІ- та ІІІ-регулятор швидкості або ЕРС
7	Осередок регулятора універсального	N200	Універсальний ІІ- та ІІІ-регулятор
8	Осередок регулятора положення	N214	Регулятор положення з нелінійним перетворювачем сигналу неузгодженості
9	Осередок датчика напруги	ДН-2АИ	Введення сигналу ОС за напругою з гальванічним поділом (до 1000 В)
10	Осередок датчика струму	ДТ-3АИ	Введення сигналу ОС по струму з посиленням напруги вимірювального шунта та гальванічним поділом (до 1000 В)
11	Осередок потенційного поділу	ПР-3АИ	Гальванічний поділ ланцюгів управління та вихідних ланцюгів (до 120 В)
12	Осередок гальванічного поділу	РГ-4АИ	Гальванічне поділ ланцюгів керування та вихідних ланцюгів (до 250 В)
13	Осередок функціонального перетворювача	ПФ-2АИ	Відтворення нелінійних залежностей (число відрізків апроксимації 5)
14	Осередок функціонального перетворювача	N219	Відтворення нелінійних залежностей (число відрізків апроксимації 7)
15	Осередок виділення модуля	ВМ-2АИ	Випрямлення двополярного вхідного сигналу або виділення із двох сигналів більшого
16	Осередок фільтрів	Ф-4АИ	Набір конденсаторів з можливістю заміни
17	Осередок живлення	N702	Джерело стабілізованої напруги (+/- 15 В)
18	Осередок живлення	СН-6АИ	Джерело стабілізованої напруги (+/- 5 В)

4.2. ЗАДАТЧИКИ ВИХІДНИХ РЕГУЛЬОВАНИХ КООРДИНАТ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Командні пристрої видають сигнали за певних станів схеми. До подібних пристроїв насамперед слід зарахувати задатчики швидкості, лінійного та кутового переміщення, моменту, натягу тощо.

Як задатчики координат застосовують командоапарати, резистивні ступеневі, резистивні безперервні і сельсинні задатчики. Всі ці пристрої сполучаються із системою керування за допомогою відповідних осередків. Крім того, сигнали завдання, можуть надходити від системи вищого рівня - АСУТП (автоматична система управління технологічним процесом).

Осередки задатчиків регульованих величин забезпечують перетворення сигналу ступінчастого або сельсинного командоапарата в напругу завдання регульованих координат електроприводу - положення, швидкості та ін., а також введення та обробку різного роду блокувань від релейних і безконтактних апаратів, що забороняють завдання швидкості в один або в обидва боки, обмежують прискорення, ривок та ін.

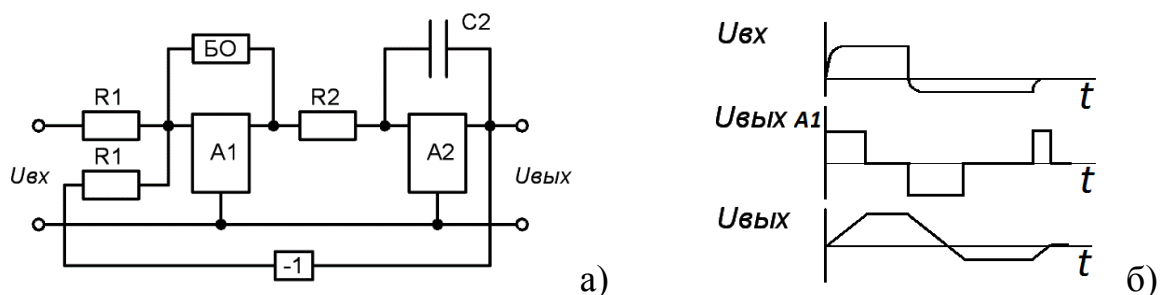
4.3. ЗАДАТЧИКИ ІНТЕНСИВНОСТІ

Для плавної зміни задаючого сигналу під час переходу від одного рівня до іншого застосовують задатчики інтенсивності (ЗІ).

ЗІ забезпечує лінійну зміну вихідного сигналу при ступінчастому сигналі на вході. Застосовується для обмеження швидкості зміни струму при регулюванні струму та для обмеження прискорення при регулюванні швидкості.

Спрощена схема та часові діаграми роботи ЗІ показані на рис. 4.

Підсилювач А1 з розірваним зворотним зв'язком і блоком обмеження БО є компаратором. Його вихідна напруга залежить від $U_{вх}$, а визначається блоком обмеження. Підсилювач А2 є інтегратором. Оскільки напруга з його вході постійно – $U_{вх}$ змінюється лінійно до того часу, поки стане рівним $U_{вх}$. Після цього на виході А1 встановиться нульовий сигнал і припиниться інтегрування. При зміні сигналу на вході – на виході знову відбуватиметься зміна за лінійним законом (збільшення чи зниження).



Постійна часу задатчика інтенсивності визначається рівнянням

$$T_{зи} = \frac{J \omega_H}{k\Phi_H I_{дин}} = \frac{T_M k\Phi_H \omega_H}{R_{\Sigma} I_{дин}}, \quad (4.1)$$

де $I_{дин}$ – значення динамічного струму (найчастіше $I_{дин} = I_H$).

4.4. РЕГУЛЯТОРИ

Регулятори виконують функцію перетворення завдання та інших вхідних впливів і виробляють необхідний закон управління для регулювання з необхідною точністю координат електроприводу. Основу аналогових регуляторів складають операційні підсилювачі (ОП).

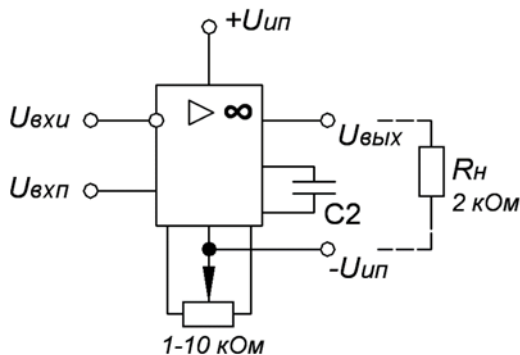


Рис. 5. Схема підключення ОП

Операційний підсилювач живиться напругою $\pm 15V$, має вихідну напругу $\pm 10V$ і смугу пропускання $f = 1MГц$, має два входи: прямий та інверсний. У розімкненому стані має коефіцієнт посилення $K_{y0} = 10000 \div 50000$.

Потенціометр забезпечує вихідну напругу $U_{вых} = 0$ при вхідних прямій та інверсній напругах $U_{вхП} = U_{вхИ} = 0$, а ємність - відсутність самозбудження ОП. Ці ланцюги забезпечують нормальну роботу ОП і надалі не показуються.

Схеми включення операційних підсилювачів.

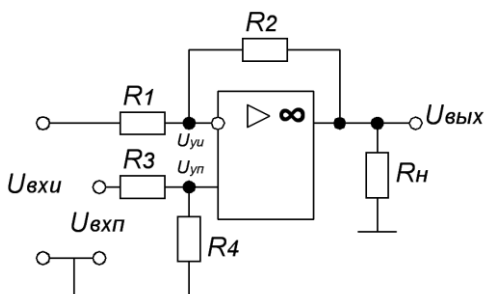


Рис. 6. Ланцюги підключення ОП

Щодо вихідної напруги можна записати

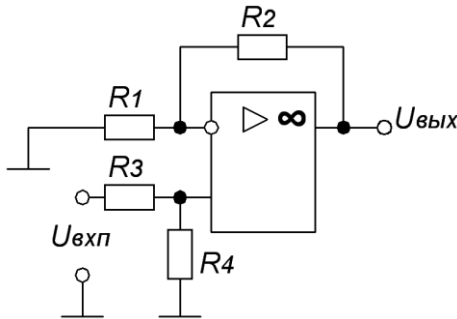
$$U_{вых} = K_{y0} \cdot (U_{вхП} - U_{вхИ}), \quad (4.2)$$

$$U_{вых} = K_{yП} U_{вхП} - K_{yИ} U_{вхИ}, \quad (4.3)$$

де $K_{yП}$, $K_{yИ}$ – коефіцієнти посилення відповідно по прямому та інверсному входам.

1. Припустимо задіяний прямий вхід, $U_{exII} = 0$, тоді

$$U_{вых} = K_{y0} \cdot \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot U_{exI} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{вых} \right).$$



Перетворимо

$$U_{вых} = \frac{K_{y0} \cdot R_4}{R_3 + R_4} U_{exI} - \frac{K_{y0} \cdot R_1}{R_1 + R_2} U_{вых} ;$$

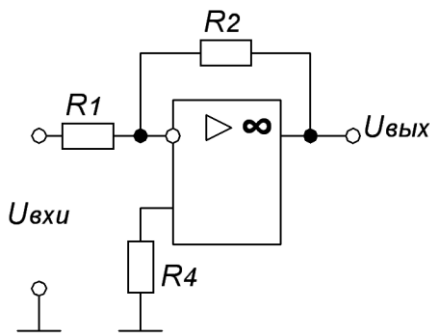
$$U_{вых} = \frac{K_{y0} \cdot R_4}{(R_3 + R_4) \cdot \left(1 + \frac{K_{y0} \cdot R_1}{R_1 + R_2} \right)} U_{exI} ,$$

Рис. 7. Пряме включення ОП

$$K_{y0} \gg 1, \text{ тоді } U_{вых} = \frac{K_{y0} \cdot R_4 \cdot (R_1 + R_2)}{(R_3 + R_4) \cdot K_{y0} \cdot R_1} U_{exI} \text{ і отримаємо}$$

$$K_{yII} = \frac{R_4 \cdot (R_1 + R_2)}{(R_3 + R_4) \cdot R_1}. \quad (4.4)$$

2. Припустимо $U_{exII} = 0$ і задіяний інверсний вхід, тоді



$$K_{yII} = \frac{U_{вых}}{U_{ex}} = -\frac{R_2}{R_1},$$

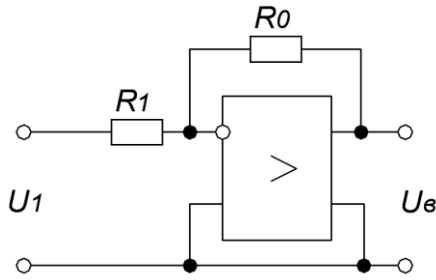
або в загальному випадку

$$K_{yII} = -\frac{Z_0}{Z_{ex}}. \quad (4.5)$$

Рис. 8. Інверсне включення ОП

Більшість сучасних систем управління електроприводом виконуються як системи з підлеглим регулюванням координат. Найчастіше застосовувані регулятори П-, ІІ- та ІІД-регулятори. Їхні схеми та передавальні функції наведені нижче:

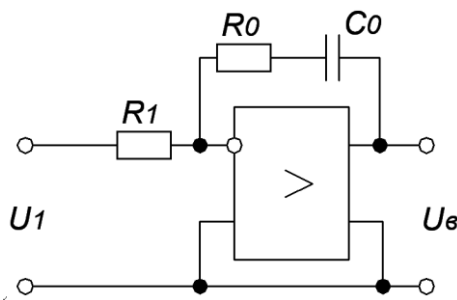
П-регулятор



$$W(p) = \frac{Z_0}{Z_1} = \frac{R_0}{R_1} = K_p.$$

Рис. 9. Схема включения П-регулятора

ПИ-регулятор



$$Z_0 = R_0 + \frac{1}{C_0 p} = \frac{R_0 C_0 p + 1}{C_0 p}; \quad Z_1 = R_1;$$

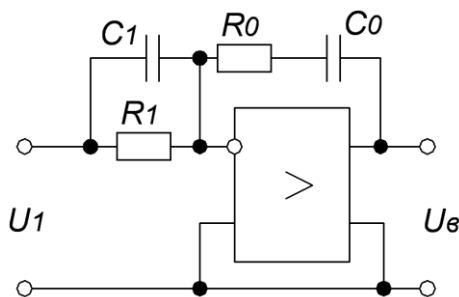
$$W(p) = \frac{Z_0}{Z_1} = \frac{R_0}{R_1} + \frac{1}{R_1 C_0 p} = K_p + \frac{1}{T_H p}$$

$$W(p) = \frac{R_0}{R_1} \cdot \frac{(R_0 C_0 p + 1)}{R_0 C_0 p} = \frac{K_p (\tau_H p + 1)}{\tau_H p};$$

$$K_p = \frac{R_0}{R_1}; \quad T_H = R_1 C_0; \quad \tau_H = R_0 C_0.$$

Рис. 10. Схема включения ПИ-регулятора

ПИД-регулятор



$$Z_0 = R_0 + \frac{1}{C_0 p} = \frac{R_0 C_0 p + 1}{C_0 p}; \quad Z_1 = \frac{R_1}{R_1 C_1 p + 1};$$

$$W(p) = \frac{Z_0}{Z_1} = \frac{(R_0 C_0 p + 1)(R_1 C_1 p + 1)}{R_1 C_0 p};$$

$$W(p) = \frac{R_0}{R_1} \frac{(R_0 C_0 p + 1)(R_1 C_1 p + 1)}{R_0 C_0 p} =$$

$$= K_p \frac{(\tau_H p + 1)(\tau_D p + 1)}{\tau_H p}$$

Рис. 11. Схема включения ПИД-регулятора

$$K_p = R_0 / R_1; \quad \tau_H = R_0 C_0; \quad \tau_D = R_1 C_1; \quad T_H = R_1 C_0; \quad T_D = R_0 C_1;$$

$$W(p) = \frac{R_0 C_0 R_1 C_1 p^2}{R_1 C_0 p} + \frac{R_0 C_0 p}{R_1 C_0 p} + \frac{R_1 C_1 p}{R_1 C_0 p} + \frac{1}{R_1 C_0 p} = R_0 C_1 p + \frac{R_0}{R_1} \left(1 + \frac{\tau_D}{\tau_H} \right) + \frac{1}{R_1 C_0 p} =$$

$$= T_D p + K_p \left(1 + \frac{\tau_D}{\tau_H} \right) + \frac{1}{T_H p}$$

Вибір та розрахунок регуляторів виконується на підставі технологічних вимог. Залежно від виконуваних функцій основного регулятора електроприводи поділяють на системи:

- регулювання положення виконавчого органу (або валу двигуна);
- регулювання швидкості електродвигуна;
- регулювання ЕРС чи напруги електродвигуна;
- регулювання струму електродвигуна;
- регулювання потужності.

Для побудови таких систем потрібні відповідні датчики координат електроприводу та технологічних параметрів.

5. РОЗРАХУНОК І ВИБІР ДАТЧИКІВ КООРДИНАТ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

У системах автоматизованого електроприводу контрольованими та регульованими координатами є кут повороту, швидкість, прискорення, напруга, струм, ЕРС, потужність та ін. Для вимірювання цих координат використовуються відповідні датчики. Датчики виробляють електричні сигнали (як правило, напруга) пропорційні електричним та механічним величинам.

5.1. ДАТЧИКИ НАПРУГИ ТА СТРУМУ

Це датчики електричних величин. Крім виміру відповідних координат, їх завдання – забезпечення гальванічної розв'язки силових ланцюгів та ланцюгів системи керування. Структура типового датчика показано на рис. 12.

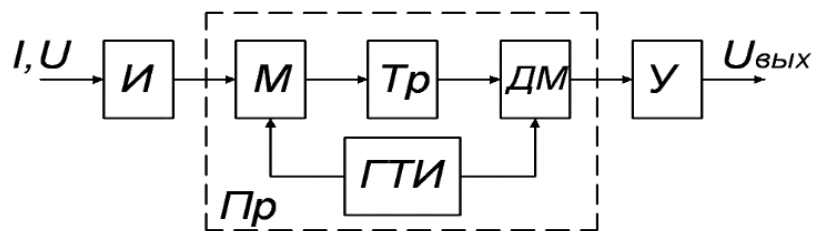


Рис. 12. Структура типового датчика електричних величин

Власне датчиком є вимірювач на вході И. Вимірник напруги – потенціометр, вимірювач струму – шунт. Для гальванічної розв'язки на постійному струмі застосовують потенційний роздільник, який складається з модулятора М, трансформатора Тр і демодулятора ДМ. Синхронність їхньої роботи забезпечує генератор тактових імпульсів ГТИ. Вихідний підсилювач забезпечує необхідний рівень вихідного сигналу.

Вихідна напруга датчика струму визначається як

$$U_{\text{вых}} = K_{\text{ш}} K_{\text{тр}} K_{\text{у}} I , \quad (5.1)$$

а датчика напруги

$$U_{\text{вих}} = K_n K_{np} K_y U_{\text{вх}}, \quad (5.2)$$

де $K_{np} = 1$ – коефіцієнт посилення потенційного роздільника;

$K_{ш} = U_{нш} / I_{нш}$ – коефіцієнт передачі шунта;

$K_n = K_{\text{дел.напряж}} = U_{\text{сy}} / U_{\text{вх}}$ – коефіцієнт передачі потенціометра.

Для датчиків напруги $K_y = 1$, для датчиків струму - залежить від способу вибору шунта.

5.2. ВИБІР ШУНТУ І КОЕФІЦІЄНТА ПОСИЛЕННЯ ПІДСИЛЮВАЧА ДАТЧИКА СТРУМУ

Завдання на струм надходить від зовнішнього регулятора і визначається елементною базою, що використовується. При використанні уніфікованої блокової системи регуляторів УБСР-АІ $U_{3.Т.макс} \leq 10В$. Таким чином, вихідний сигнал датчика струму має відповідати $U_{3.Т.макс}$. Струм двигуна у всіх режимах не повинен перевищувати допустимого значення $I_{\text{дв}} \leq I_{\text{макс}} = \lambda I_{\text{ном}}$ і повинно виконуватись співвідношення $U_{\text{Д.Т.макс}} = U_{3.Т.макс} \leq 10В$.

Вихідна напруга датчика струму визначиться виходячи з рівняння (5.1) при $K_{np} = 1$ у вигляді

$$U_{\text{Д.Т.макс}} = K_{ш} K_{ут} I_{\text{макс}}, \quad (5.3)$$

де $K_{ш}$ – коефіцієнт передачі шунта;

$K_{ут}$ – коефіцієнт посилення підсилювача датчика струму.

Шунт це є калібрований опір. Стандартна вихідна напруга шунта визначається напругою відхилення рамки вимірювальних приладів і становить $U_{н.ш} = 75мВ$.

Існує два способи вибору шунта

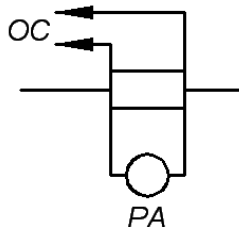


Рис. 13. Універсальний шунт

1. Шунт вибирають за максимальним струмом якоря двигуна $I_{\text{макс.дв}}$ ($I_{н.ш} \geq I_{\text{макс.дв}}$), цей шунт використовується одночасно для організації зворотного зв'язку і для підключення амперметра реєструючого струму двигуна (цей варіант застосовують в основному для малопотужних приводів). Величина коефіцієнта посилення підсилювача датчика струму $K_{ут}$ визначається робочою напругою системи управління (для УБСР-АІ воно становить 10 В), тоді, з рівняння (5.3), з урахуванням $K_{ш} = 0,0075 / I_{н.ш}$ слідує

$$K_{ут} = \frac{U_{Д.Т.макс}}{K_{ш} I_{макс.дв}} = \frac{10 \cdot I_{макс.дв}}{0,075 \cdot I_{макс.дв}} = 133,3 .$$

Для поліпшення перешкодозахищеності системи бажано мати мінімальне значення коефіцієнта посилення, для цього застосовують другий спосіб.

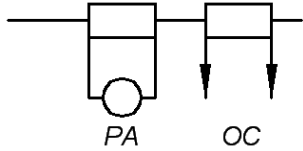


Рис. 14. Приладовий шунт та шунт для зворотного зв'язку

2. Шунт вибирають за номінальним струмом двигуна. У якірному ланцюгу встановлюють два шунти: приладовий вибирають за максимальним струмом, а шунт для зворотного зв'язку вибирають за номінальним струмом двигуна $I_{н.ш} \geq I_{н.дв}$.

Тоді з рівняння (5.3) з урахуванням ($I_{макс} = I_{макс.дв} = \lambda I_{н.дв} = 2,5 I_{н.дв}$) слідує

$$K_{ут} = \frac{U_{Д.Т.макс}}{K_{ш} I_{макс.дв}} = \frac{10 \cdot I_{н.дв}}{0,075 \cdot 2,5 \cdot I_{н.дв}} = 53,3$$

Виходячи зі сказаного, датчики струму системи УБСР-АІ мають два стандартні коефіцієнти посилення 133,3 та 53,3.

Шунт необхідно вибрати одним із описаних способів з табл. П5.1 та прийняти відповідний коефіцієнт посилення підсилювача датчика струму $K_{ут}$.

5.3. ДАТЧИКИ ШВИДКОСТІ

Датчик швидкості перетворює частоту обертання двигуна на електричний сигнал. В електроприводах застосовують тахогенератори з незалежним збудженням та з постійними магнітами.

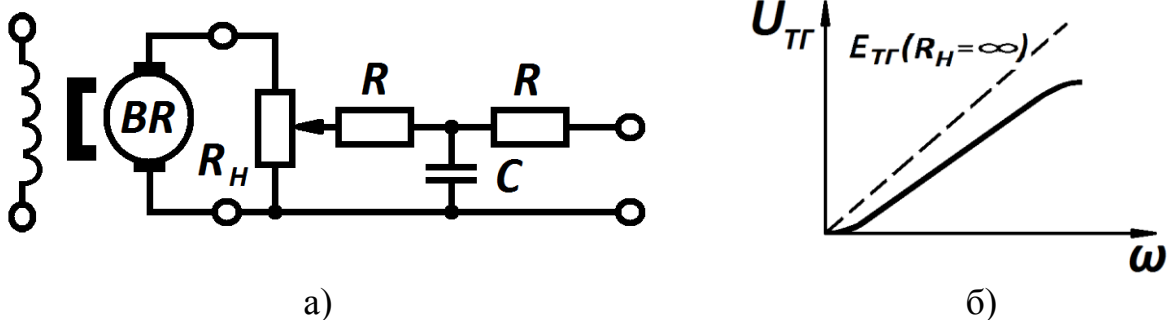


Рис. 15. Схема підключення а) та характеристика б) тахогенератора

Коефіцієнт передачі тахогенератора $K_{ТГ}$ величина не постійна через нелінійність щіткового контакту та реакції якоря. Нелінійність у зоні малих швидкостей усувають використанням спеціальних металізованих щіток з малим падінням напруги (малим перехідним опором).

Нелінійність в області великих швидкостей усувають збільшенням опору навантаження R_H та обмеженням швидкості зверху. Крім того, на вихідний сигнал тахогенератора впливають полюсні, колекторні, зубцеві та оборотні пульсації. Це змушує обмежувати його мінімальну швидкість. Власна постійна часу тахогенератора лежить у межах $T_{\mu TG} = 1 \div 5$ мс.

Для виключення пульсацій на виході тахогенератора встановлюють фільтр з постійною часу $T_\phi = 3 \div 10$ мс. Крім того, для узгодження напруги часто ставлять дільник напруги, оскільки номінальна вихідна напруга тахогенератора $U_{\text{вих TG}} = 110 - 220$ В, а робочі напруги блоків УБСР-АИ в межах 10 В.

Гальванічну розв'язку здійснюють за допомогою датчика напруги. У деяких випадках він може виконувати і фільтрацію, і узгодження напруги.

Вихідна ЕРС тахогенератора визначається рівнянням

$$E_{TG} = \kappa \Phi \omega_{TG} = I(R_{TG} + R_H), \quad (5.4)$$

де κ – конструктивний коефіцієнт;

Φ – магнітний потік;

ω_{TG} – углова швидкість тахогенератора;

I – струм якоря;

R_{TG}, R_H – опір, відповідно, тахогенератора та ланцюга навантаження.

Оскільки опір навантаження не дорівнює нескінченності – вихідна напруга визначиться рівнянням

$$U_{TG} = \frac{\kappa \Phi}{(1 + R_{TG}/R_H)} \omega_{TG} = K_{TG} \omega_{TG}, \quad (5.5)$$

тоді, передатна функція тахогенератора має вигляд

$$W_{TG}(p) = \frac{K_{TG}}{T_{\mu TG} p + 1}. \quad (5.6)$$

Передавальний коефіцієнт дільника напруги розраховується як

$$K_{д TG} = \frac{U_{ЗС макс}}{K_{TG} \omega_{Н ДВ}}, \quad (5.7)$$

де $U_{ЗС макс}$ – максимальне значення напруги завдання швидкості;

$\omega_{Н ДВ}$ – номінальна швидкість двигуна (якщо вона не збігається з ω_{TG}).

Остаточно, передатна функція датчика швидкості міститиме сам тахогенератор, дільник напруги та фільтр, за їх наявності, а також датчик напруги

$$W_{дс}(p) = \frac{K_{тг} \cdot K_{д тг} \cdot K_{дн}}{(T_{\mu тг} + T_{\phi})p + 1} = \frac{K_{дс}}{T_{\mu дс}p + 1}. \quad (5.8)$$

Датчик напруги, за звичай, має коефіцієнт передачі $K_{дн} = 1$.

Тахогенератор обирають по номінальній або максимальній (при двозонному регулюванні) швидкості двигуна.

У розрахунковій роботі тахогенератор слід обрати відповідно до заданого типу збудження з урахуванням швидкості двигуна (номінальна швидкість тахогенератора повинна дорівнювати або перевищувати номінальну швидкість двигуна). Далі необхідно розрахувати дільник напруги тахогенератора.

Технічні дані тахогенераторів наведено у табл. П5.2.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тукалов І.О., Кунченко Т.Ю. Елементи автоматизованого електропривода. Частина перша. Керовані перетворювачі електричної енергії для електроприводів – Харків.: НТУ «ХПІ», 2022. – 204 с.
2. Тукалов І.О., Кунченко Т.Ю. Елементи автоматизованого електропривода. Частина друга. Елементи керуючої частини для електроприводів – Харків.: НТУ «ХПІ», 2022. – 114 с..
3. Калінов А. П., Мельников В. Елементи автоматизованого електропривода : навч. посібник / А. П. Калінов, В. О. Мельников. – Кременчук : Видавництво ПП Щербатих О. В., 2014. – 276 с.
4. Попович Н.Г. Елементи автоматизованого електропривода /Н.Г.Попович, В.А.Гаврилюк, О.В.Ковальчук, В.І.Теряєв . – К.: УМК ВО, 1990. – 260 с.
5. Комплектні тиристорні електроприводи. Довідник / Під ред. В.М.Перельмутера. – Энергоатоміздат, 1988 р. – 318 с.
6. Євзеров І.Х., Перельмутер В.М., Ткаченко А.А. Тиристорні електроприводи серії КТЕУ потужністю до 2000 кВт. – Энергоатоміздат, 1988 р. – 94 с.
7. Зімін Е. Н .Електрообладнання промислових підприємств і установок: підручник / Е. Н. Зімін, В.І.Преображенський, І. І. Чувашев. – 2-е вид., Перероб. і доп. – К.: Вища школа, 1981. - 552 с.
8. Руденко В.С. Промислова електроніка: Підручник / В.С. Руденко, В.Я. Ромашко, В.В. Трифонюк, – К.: – Либідь, 1993. – 432 с.
9. Перетворювальна техніка. Підручник : Ч. 2/ Ю.П. Гончаров , О.В. Будьонний, В.Г. Морозов та ін., За ред.. В.С. Руденка. – Харків: Фоліо, 2000. – 360 с.

ДОВІДКОВИЙ ДОДАТОК

(Каталожні дані електрообладнання)

Таблиця П1.1 Електродвигуни загальнопромислового застосування захищеного виконання

Тип	Номинальні параметри					Число головних полюсів	Число паралельних гілок	Число витків обмотки якоря	Опір обмоток				Маховий момент		
	P _н кВт	n _н об/хв	U _н В	I _н А	2p				2a	N / 2	R _я	R _{дп}		R _{ко}	R _в
											Ом	Ом		Ом	Ом
П41	3,2	1500	110	37	4	2	243	0,18	0,0756	-	52	0,15			
П52	8	1500	110	86	4	2	124	0,046	0,0196	-	35	0,4			
П62	14	1500	110	147	4	2	93	0,0225	0,0128	-	29,2	0,65			
П81	32	1500	110	342	4	2	81	0,0142	0,00448	-	23,9	2,7			
П51	3,2	1000	220	18,3	4	2	527	0,775	0,276	-	168	0,35			
П62	8	1000	220	43	4	2	279	0,226	0,102	-	136	0,65			
П72	14	1000	220	78	4	2	270	0,172	0,0655	-	108	1,6			
П91	32	1000	220	171	4	2	165	0,0503	0,0163	-	35,8	5,9			
П101	55	1000	220	286	4	2	111	0,0206	0,00858	-	37,8	10,3			
П102	75	1000	220	385	4	2	93	0,0142	0,0057	-	32,5	12			
П112	125	1000	220	632	4	4	126	0,00715	0,00305	-	24	23			
П41	3,2	1500	220	18,4	4	2	486	0,72	0,312	-	198	0,15			
П52	8	1500	220	43,5	4	2	248	0,185	0,084	-	150	0,4			
П62	14	1500	220	73,5	4	2	185	0,0875	0,04	-	116	0,65			
П81	32	1500	220	166	4	2	162	0,057	0,018	-	95,5	2,7			
П91	55	1500	220	287	4	2	105	0,01875	0,0069	-	35,8	5,9			
П111	160	1500	220	809	4	4	108	0,0046	0,00178	-	28	20,4			
П112	200	1500	220	1000	4	4	92	0,00338	0,00157	-	24	23			
П92	32	750	440	85	4	2	330	0,231	0,0815	-	48,4	7			
П112	85	750	440	220	4	2	330	0,0508	0,0199	-	24	23			
П91	32	1000	440	85	4	2	330	0,208	0,0815	-	35,8	5,9			
П111	95	1000	440	240	4	2	330	0,0467	0,0173	-	27,9	20,4			
П112	125	1000	440	316	4	2	246	0,0278	0,0121	-	24	23			
П102	125	1500	440	346	4	2	111	0,0225	0,00858	-	32,9	12			
П111	160	1500	440	400	4	2	210	0,0165	0,00712	-	27,9	20,4			
П112	180	1500	440	450	4	2	368	0,0152	0,00628	-	24	23			

Таблиця П2.1 Силкові трансформатори типів ТСП і ТСЗП
зі схемою і групою з'єднання Y/Yn-0 (нульова схема випрямлення)

Тип	Потужність	Номинальна напруга			Номинальний струм		Втрати		Напруга КЗ	Струм ХХ
		мережевої обмотки	вентильної обмотки	перетворювача	змінний вентильної обмотки	випрямлений перетворювача	холостого ходу	короткого замикання		
		P_T	$U_{1Л}$	$U_{2Л}$	U_d	I_2	I_d	$P_{ХХ}$		
кВ·А	В	В	В	А	А	Вт	Вт	%	%	
ТСП-10/0,7	5,8	380	182	115	31,9	50	115	320	4,7	14
ТСП-10/0,7	5,8	380	355	230	16,3	25	115	320	4,7	14
ТСП-16/0,7	12	380	182	115	66	100	120	550	5,5	8
ТСП-16/0,7	12	380	355	230	33,8	50	120	550	5,5	8
ТСП-25/0,7	23	380	182	115	126,5	200	190	1100	5,5	6
ТСП-25/0,7	23	380	355	230	64,7	100	190	1100	5,5	6
ТСП-63/0,7	48	380	182	115	264	400	300	1900	5,5	5
ТСП-63/0,7	48	380	355	230	135,2	200	300	1900	5,5	5
ТСП-63/0,7	48	380	710	460	67,5	100	300	1900	5,5	5
ТСЗП-100/0,7	75	380	182	115	412,4	630	400	2300	5,8	4
ТСЗП-100/0,7	75	380	355	230	211,2	320	400	2300	5,8	4
ТСЗП-125/0,7	93	380	710	460	131	200	470	2700	5,8	3

Примітка. Т - трифазний; С - сухий (охолодження повітряне); З - захищений;
П - для живлення перетворюючих агрегатів.

Таблиця П2.2 Силкові трансформатори типів ТСП і ТСЗП
зі схемою і групою з'єднання Δ/Y-11 (мостова схема випрямлення)

Тип	Потужність	Номинальна напруга			Номинальний струм		Втрати		Напруга КЗ	Струм ХХ
		мережевої обмотки	вентильної обмотки	перетворювача	змінний вентильної обмотки	випрямлений перетворювача	холостого ходу	короткого замикання		
		P_T	$U_{1Л}$	$U_{2Л}$	U_d	I_2	I_d	$P_{ХХ}$		
кВ·А	В	В	В	А	А	Вт	Вт	%	%	
ТСП-10/0,7	7,3	380	205	230	20,5	25	130	320	4,7	16
ТСП-16/0,7	14,6	380	205	230	41	50	140	550	5,2	10
ТСП-25/0,7	29,1	380	205	230	82	100	210	1100	5,5	8
ТСП-63/0,7	58	380	205	230	164	200	330	1900	5,5	6
ТСП-63/0,7	58	380	410	460	82	100	330	1900	5,5	6
ТСЗ-100/0,7	93	380	205	230	262	320	440	2300	5,8	5
ТСЗ-125/0,7	117	380	410	460	164	200	520	2700	5,8	4
ТСЗП-160/0,7	143	380	202	230	408	500	795	2400	4,5	5,2
ТСЗП-160/0,7	147	380	416	460	204	250	795	2400	4,7	5,2
ТСЗП-250/0,7	235	380	208	230	653	900	915	3800	4,7	3,4
ТСЗП-250/0,7	235	380	416	460	326	400	915	3700	4,7	3,4
ТСЗП-400/0,7	362	380	205	230	1020	1250	1600	4700	5,3	2,5
ТСЗП-400/0,7	364	380	409	460	514	630	1600	4500	5,3	2,5
ТСЗП-630/0,7	580	380	410	460	816	1000	2100	6000	5,9	2

Примітка. Т - трифазний; С - сухий (охолодження повітряне); З - захищений;
П - для живлення перетворюючих агрегатів.

Таблиця П2.3 Тиристори низькочастотні

Тип тиристора	Максимально допустимий середній прямий струм	Імпульсна пряма / зворотна напруга (відповідає класу 3 1 по 60 x 100)	Максимально допустима швидкість зростання прямої напруги (по групам от 0 до 8)	Час вимкнення (по групам) В3 - 80, А3 - 100, Х2 - 125, Т2 - 160, Р2 - 200	Максимально допустима швидкість зростання анодного струму
	I_{TAV}, A	$U_{DRM} (U_{RRM}), B$	$dU_{DRM}/ dt, B/мкс$	$t_q, мкс$	$di_T/ dt, A/мкс$
T115-6,3	6,3	600 - 1200	20 - 1000	80, 100, 160	100
T115-10	10	600 - 1200	20 - 1000	80, 100, 160	100
T115-16	16	600 - 1200	20 - 1000	80, 100, 160	100
T122-20	20	100 - 1300	200 - 1600	100, 125, 160	160
T122-25	25	100 - 1300	200 - 1600	100, 125, 160	160
T122-32	32	100 - 1200	200 - 1600	100, 125, 160	160
T132-40	40	100 - 1300	500,1000,1600	100, 125, 160	160
T132-50	50	100 - 1300	500,1000,1600	100, 125, 160	160
T132-63	63	100 - 1200	500,1000,1600	100, 125, 160	160
T142-80	80	100 - 1200	200 - 1600	100, 125, 160	160
T152-100	100	600 - 1200	200 - 1600	100, 125, 160	160
T152-125	125	600 - 1200	200 - 1600	100, 125, 160	160
T161-160	160	300 - 1800	20 - 1000	80, 100, 160	160
T161-200	200	300 - 1600	20 - 1000	80, 100, 160	160
T171-250	250	300 - 1800	20 - 1000	80, 100, 160	160
T171-320	320	300 - 1800	20 - 1000	80, 100, 160	320
T233-320	320	1000 - 2400	200 - 1600	100, 160, 200	200
T233-400	400	600 - 1800	200 - 1600	100, 160, 200	200
T143-400	400	2000 - 2400	200 - 1600	100, 125, 160	400
T233-500	500	600 - 1800	200 - 1600	100, 160, 200	200
T243-630	630	1200 - 1800	200 - 1600	100, 160, 200	300
T143-800	800	900 - 1800	200 - 1600	80, 100, 160	200
T243-800	800	1200 - 1800	500,1000,1600	100, 160, 200	300
T143-1000	1000	200 - 1000	500, 1000	100, 125, 160	200
T243-1000	1000	200 - 1200	500,1000,1600	100, 125, 160	200
T553-1000	1000	800 - 1800	500, 1000	80, 100, 160	500
T143-1250	1250	400 - 800	500,1000,1600	80, 100, 160	200
T553-1250	1250	800 - 1800	500, 1000	80, 100, 160	500
T663-1600	1600	1200 - 2600	500, 1000	100, 125, 160	500
T153-2000	2000	400 - 800	500,1000,1600	100, 160, 200	200
T663-2000	2000	1200 - 2000	500, 1000	100, 125, 160	500

Маркування: Т - тиристор; ХХХ - тип та № конструкції;

-Х - максимальний середній струм; -Х - клас за напругою;

-Х - група за допустимою швидкістю зростання прямої напруги

-Х - група за часом вимкнення.

Таблиця П2.4 Згладжуючі реактори серії ФРОС

Тип	Номінальний постійний струм	Допустима напруга	Індуктивність	Активний опір
	I_n, A	U_n, B	$L_p, мГн$	$R_p, мОм$
ФРОС - 65 / 0,5	250	500	1,50	6,80
ФРОС - 65 / 0,5	320	500	1,00	4,50
ФРОС - 125 / 0,5	500	500	0,75	3,00
ФРОС - 250 / 0,5	250	500	6,50	17,60
ФРОС - 250 / 0,5	320	500	4,20	11,50
ФРОС - 250 / 0,5	800	500	0,60	1,70
ФРОС - 250 / 0,5	1000	500	0,35	1,10
ФРОС - 500 / 0,5	500	500	3,25	7,50
ФРОС - 1000 / 0,5	800	500	2,30	4,70
ФРОС - 1000 / 0,5	800	500	5,00	7,20
ФРОС - 1000 / 0,5	1000	500	1,60	3,10

Примітка. Ф - фільтровий; Р - реактор; О - однофазний; С - охолодження повітряне.

Таблиця П.2.5 Згладжуючі реактори серії СРОС

Тип	Номінальний постійний струм	Допустима напруга	Індуктивність	Активний опір
	I_n, A	U_n, B	$L_p, мГн$	$R_p, мОм$
СРОС - 63 / 0,5	100	500	16,00	17,00
СРОС - 63 / 0,5	200	500	4,00	4,25
СРОС - 100 / 0,5	160	500	9,00	18,00
СРОС - 200 / 0,5	100	500	60,00	20,00
СРОС - 200 / 0,5	200	500	15,00	5,00
СРОС - 400 / 0,5	200	500	30,00	11,00

Примітка. С - згладжуючий; Р - реактор; О - однофазний; С - охолодження повітряне.

Таблиця ПЗ.1 Вимикачі автоматичні триполюсові серії А3700 з електромагнітними та тепловими розчеплювачами для ланцюгів змінного струму на напругу 380 В, частотою 50-60 Гц

Тип	Номинальний струм, А			Уставка за струмом спрацьовування, А	
	вимикача	електро-магнітних розчеплювачів	теплових розчеплювачів	теплових	електро-магнітних
А3716Б	160	160	16	18	630
			20	23	
			25	29	
			32	37	630, 1600
			40	46	
			50	57	
			63	72	
			80	92	
			100	115	
			125	145	
			160	185	
А3726Б	250	250	160	185	2500
			200	230	
			250	290	
А3736Б	400	400	250	290	2500
			320	370	3200
			400	460	4000
А3796Б	630	630	250	230	2500
			320	370	3200
			400	460	4000
			500	575	5000
			630	725	6000

Таблиця ПЗ.2 Вимикачі автоматичні двополюсові серії А3700 з електромагнітними та тепловими розчеплювачами для ланцюгів постійного струму на напругу 440 В

Тип	Номинальний струм, А			Уставка за струмом спрацьовування, А	
	вимикача	електро-магнітних розчеплювачів	теплових розчеплювачів	теплових	електро-магнітних
А3715Б	160	160	16	18	600
			20	23	
			25	29	
			32	37	600, 900
			40	46	
			50	57	
			63	72	
			80	92	
			100	115	
			125	145	
			160	185	
А3725Б	250	250	160	185	1500
			200	230	
			250	290	
А3735Б	400	400	250	290	2400
			320	370	
			400	460	
А3795Б	630	630	250	230	2400
			320	370	
			400	460	
			500	575	3800
			630	725	

Таблиця П4.1

Блоки опору типа ЯС4

Каталожний номер	R_p	I_n	Опір ступенів, Ом						
	Ом	А	1	2	3	4	5	6	7
ЯС-4 150701	0,097	218	0,0203	0,0185	0,0185	0,0203	0,0194	-	-
ЯС-4 150702	0,125	187	0,0241	0,0259	0,0259	0,0241	0,025	-	-
ЯС-4 150703	0,187	152	0,0362	0,0388	0,0388	0,0362	0,0375	-	-
ЯС-4 150704	0,292	116	0,0572	0,0598	0,0598	0,0572	0,0585	-	-
ЯС-4 150705	0,388	109	0,0777	0,0777	0,0777	0,0777	0,0777	-	-
ЯС-4 150706	0,5	93,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-
ЯС-4 150707	0,75	76	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	-	-
ЯС-4 150708	1,17	58	0,234	0,234	0,234	0,234	0,234	-	-
ЯС-4 150709	1,56	54,5	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	-	-
ЯС-4 150710	2,06	46	0,412	0,412	0,412	0,412	0,412	-	-
ЯС-4 150801	2,95	38	0,437	0,453	0,432	0,448	0,448	0,432	0,3
ЯС-4 150802	4,08	28,5	0,605	0,627	0,597	0,619	0,619	0,597	0,415
ЯС-4 150803	5,35	27,5	0,766	0,851	0,802	0,79	0,79	0,802	0,547
ЯС-4 150804	6,85	23,5	1,015	1,052	1,003	1,04	1,04	1,003	0,697

Таблиця П5.1

Шунти вимірювальні

Тип	Номінальне падіння напруги, мВ	Номінальний струм, А	Клас точності
75РИ	75	0,3-0,75	0,2
75РИ	75	1,5-7,5	0,2
75РИ	75	15-30	0,2
75РИ	75	75	0,2
75ШС-0.2	75	300; 500; 750;1000; 1500; 2000; 4000	0.2
75ШС	75	5; 10; 20;30; 50	0,5
75ШСМ	75	75; 100; 150;200;300; 500; 750	0.5
75ШСМ	75	1000; 1500; 2000; 4000;5000	0.5

Таблиця П5.2

Тахогенератори

Тип	Тип збудження	Номінальна частота обертання, об/хв	Номінальна напруга, В	Номінальний струм, А
ПТ-22/1	незалежне	2400	230	0,5
ПТ-22	незалежне	800, 1000	230	0,2
ПТ-32/1	незалежне	1000	230	0,5
ТП 130	пост.магніти	1500; 2000; 3000; 4000	200	0,095
ТП 212	пост.магніти	200; 400; 600;1000; 1500; 2000	200	0,095

