

Ю.В. Степанковський

**«Перетворюючі пристрої приладів»
Ч2. «Інформаційні електричні мікромашини»**

Навчальний посібник

**Київ
2014**



ББК 32.96-04

С-79

*Гриф надано Методичною радою НТУУ «КПІ»
(протокол № 8 від 17 квітня 2014 р.)*

Рецензенти: Нестеренко О.І., начальник відділу ТОВ «Гіротех», к.т.н., доцент;
Шостак О.М., зам. начальника відділу КП СПБ «Арсенал»

Відповідальний редактор д.т.н., професор **Бурау Н.І.**

Степанковський Ю.В.

С-79 Перетворюючі пристрої приладів. Ч2. Інформаційні електричні мікромашини. Навчальний посібник // Електронне видання. – К.: НТУУ «КПІ», 2014, –53 с.

Навчальний посібник присвячений розгляду питань застосування в приладах інформаційних електричних мікромашин таких як обертові трансформатори, сельсини, тахогенератори.

Призначений для студентів приладобудівних спеціальностей вищих технічних учбових закладів.

УДК 621.313-181.48

ББК 32.96-04

©Степанковський Ю.В.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Тахогенератори.....	5
1.1. Тахогенератори постійного струму	5
1.2. Тахогенератори змінного струму	9
1.3. Динамічні властивості тахогенераторів	14
1.4. Приклади використання тахогенераторів	15
Питання для самоперевірки	16
2. Обертові трансформатори	17
2.1. Робота обертового трансформатора у режимі синусно – косинусного трансформатора. Симетрування обертових трансформаторів.....	19
2.2. Лінійний обертовий трансформатор.....	23
2.3. Масштабні ОТ	26
2.4. Обертові трансформатори в режимі фазообертача	26
2.5. Побудовні ОТ	27
2.6. Обертові трансформатори в системах дистанційної передачі кута	28
2.7. Рекомендації щодо вибору і застосуванню обертових трансформаторів	32
Питання для самоперевірки	34
3. Сельсини	35
3.1. Індикаторний режим роботи сельсинів.....	36
3.2. Трансформаторний режим роботи сельсинів	39
Питання для самоперевірки	40
Література	41
Додатки.....	42
Д.1. характеристики деяких тахогенераторів.....	42
Д.1.1. Тахогенератори типу ТГП і ТП	42
Д.1.2. Тахогенератор типу ДИГ-3	43
Д.1.3. Двигун-генератори серії ДГМ	44
Д.1.3. Двигун-генератори серії ИЭ-1	45
Д.2. Характеристики деяких обертових трансформаторів.....	46
Д.2.1. Обертові трансформатори серії ВТ-5.....	46
Д.2.2. Обертові трансформатори серії СКТ-225-2.....	48
Д.2.3. Безкорпусні двополюсні обертові трансформатори серії СКТ	49
Д.3. Характеристики деяких сельсинів	51
Д.3.1. Трансформаторні безконтактні сельсини серії СБ	51

Вступ

Цей навчальний посібник є другою частиною книги «Перетворюючі пристрої приладів». Він присвячений розгляду питань застосування в приладах інформаційних електричних мікромашин (ЕМ). Ці машини перетворюють механічні величини (кут, кутову швидкість) в електричний сигнал. До інформаційних мікромашин відносять обертові трансформатори, сельсини, індуктосини, тахогенератори та ін.

Якщо однією з основних вимог, що пред'являються до силових мікромашин, є високий коефіцієнт корисної дії, то для інформаційних машин найбільш важливою величиною є точність перетворення і стабільність характеристик, а енергетичні показники мають другорядне значення.

На точність перетворення впливають різного роду похибки, які за своєю природою можна розбити на чотири групи:

- похибки, що впливають з принципу роботи; наприклад, похибки, обумовлені обмеженою лінійністю перетворення;
- похибки від конструктивних обмежень електричної машини - несинусоїдальності розподілу обмотки, наявності пазів на статорі і роторі, нелінійності кривої намагнічування;
- технологічні похибки від неточності виготовлення;
- температурні похибки, похибки від зміни амплітуди і частоти живлення.

Для зменшення похибок перших трьох типів в інформаційних електричних мікромашинах вибирають відносно невеликі електромагнітні навантаження і збільшений магнітний зазор, а також матеріали з високою магнітною проникністю. Для зниження впливу температури на похибки перетворення зазвичай використовується той чи інший спосіб термостатирования або термокомпенсації.

У процесі розвитку електромагнітної техніки в 20 - му сторіччі були досягнуті значні результати в галузі створення аналогових обчислювачів на базі електричних мікромашин. Однак швидкий розвиток електроніки та обчислювальної техніки в останні десятиліття обумовив створення цифрової техніки, яка значною мірою витіснила мікромашини у складі обчислювачів.

1. Тахогенератори

Тахогенератори (ТГ) - електричні інформаційні мікромашини для перетворення механічного обертання вала в електричний сигнал.

По роду струму тахогенератори поділяють на ТГ постійного струму (ТГПС) і ТГ змінного струму, останні, у свою чергу - на асинхронні і синхронні.

Тахогенератори застосовуються:

- для вимірювання швидкості обертання машин і механізмів;
- для осцилографування кривих зміни швидкості обертання валів у функції часу, наприклад, при розгоні, гальмуванні, реверсі електродвигунів;
- для здійснення зворотного зв'язку в слідкуючих системах.

Основні вимоги, які пред'являються до ТГ відносно точності:

- лінійність вихідної характеристики $U_{вих} = f(n)$, де $U_{вих}$ - вихідна напруга ТГ, n - швидкість обертання. Практично це означає мінімум амплітудної похибки, що виражається як різниця між ординатами ідеальної (лінійної) і реальної вихідних характеристик;

- мінімум фазової похибки - мінімум зміни фази вихідної напруги при зміні швидкості обертання (для ТГ змінного струму);

- симетричність вихідної характеристики - незмінність її крутизни при зміні напрямку обертання;

- мінімальна вихідна напруга при нерухомому роторі і мінімальна зона нечутливості;

- мінімальні пульсації вихідної напруги.

Крім вимог точності, слід зазначити інші:

- велика крутість вихідної характеристики;

- стабільність вихідних характеристик при зміні умов експлуатації - температури, тиску, вологості, вібрацій при припустимих коливаннях напруги збудження;

- надійність, простота конструкції;

- мінімум радіоперешкод і шумів;

- мінімум власного моменту опору (особливо при русанні) і інерційності ротора;

- мінімальна вага і габарити.

1.1. Тахогенератори постійного струму

Залежно від системи збудження ТГ постійного струму бувають із збудженням від постійних магнітів (з магнітоелектричним збудженням) і з електромагнітним збудженням. Електричні схеми відповідних тахогенераторів показані на рис. 1.1.

Конструкції тахогенераторів постійного струму практично нічим не відрізняються від конструкцій виконавчих двигунів постійного струму і можуть мати барабанний якір, або полий чи дисковий якір.

При незмінному потоці збудження Φ ЕРС генераторної (якірної) обмотки пропорційна швидкості обертання n :

$$E = c_e \Phi n = kn, \quad (1.1)$$

де c_e - конструктивний коефіцієнт, що залежить тільки від конструктивних особливостей машини; k - постійний коефіцієнт.

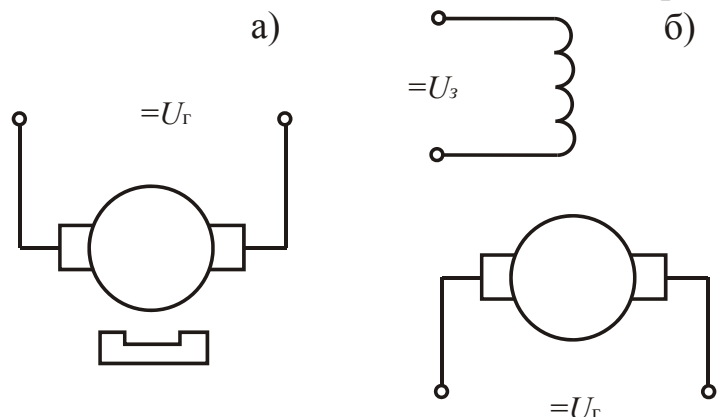


Рис.1.1. Електричні схеми ТГ постійного струму
а) з магнітоелектричним збудженням;
б) з електромагнітним збудженням.

Вираз (1.1) є основою для використання машини постійного струму як тахогенератора і є рівнянням вихідної характеристики ТГ при холостому ході, тобто при розімкненому ланцюзі якоря.

При підключенні обмотки якоря до пристрою з кінцевим значенням вхідного опору і при сталості магнітного потоку

збудження вихідна напруга буде менше ЕРС якоря на величину падіння напруги в ланцюзі якоря:

$$U = E - I_{\text{я}} R_{\text{я}} = E - \left(\frac{U}{R_{\text{н}}} \right) R_{\text{я}}, \quad (1.2)$$

де $I_{\text{я}} R_{\text{я}}$ падіння напруги в обмотці якоря; $R_{\text{я}}, R_{\text{н}}$ - опори обмотки якоря і навантаження, відповідно; $I_{\text{я}}$ - струм якоря.

З виразів (1.1) і (1.2) отримаємо рівняння вихідної характеристики тахогенератора

$$U = \frac{E}{1 + R_{\text{я}}/R_{\text{н}}} = \frac{c_e \Phi n}{1 + R_{\text{я}}/R_{\text{н}}} = kn, \quad (1.3)$$

де $k = \frac{c_e \Phi}{1 + R_{\text{я}}/R_{\text{н}}}$ - крутість вихідної характеристики ТГ.

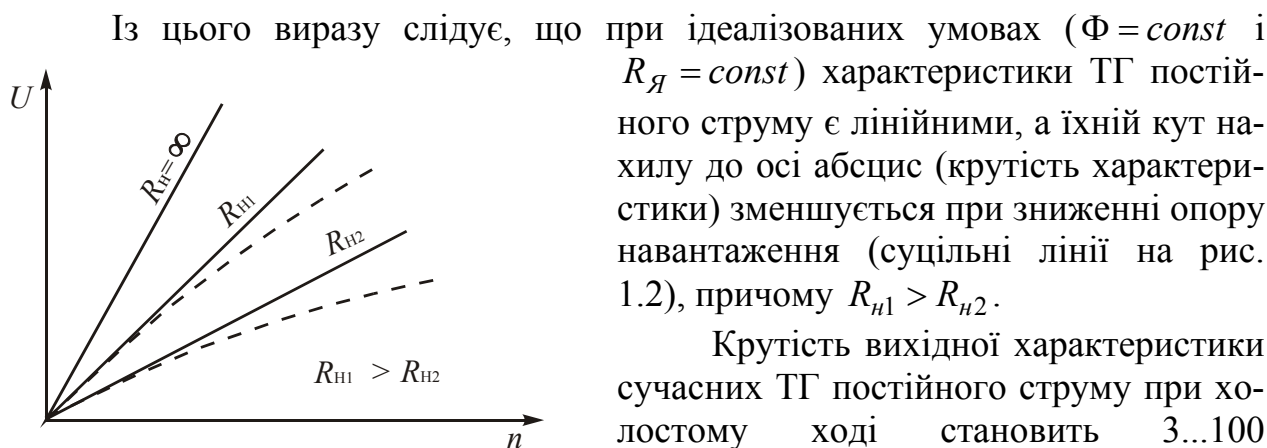


Рис. 1.2. Вихідна характеристика ТГ

Із цього виразу слідує, що при ідеалізованих умовах ($\Phi = const$ і $R_{\text{я}} = const$) характеристики ТГ постійного струму є лінійними, а їхній кут нахилу до осі абсцис (крутість характеристики) зменшується при зниженні опору навантаження (суцільні лінії на рис. 1.2), причому $R_{\text{н1}} > R_{\text{н2}}$.

Крутість вихідної характеристики сучасних ТГ постійного струму при холостому ході становить 3...100 мВ/(об/хв).

Практично вихідна характеристи-

ка відхиляється від лінійної залежності в результаті наступних причин:

- 1) дії реакції якоря, що розмагнічує (пунктирні лінії на рис. 1.2);
- 2) зміни струму збудження через збільшення опору обмотки збудження при її нагріванні (для ТГ з електромагнітним збудженням);
- 3) наявності нелінійного опору в перехідному контакті між колектором і щітками.

Нелінійність зміни вихідної напруги є напівсумою абсолютних значень найбільшої позитивної і найбільшої негативної похибок вихідної напруги в окремих точках характеристики. При цьому похибка вихідної напруги при деякій усталеній швидкості обертання у відсотках обчислюється за формулою

$$\Delta U = (U/U_{ном} - n/n_{ном}) \cdot 100,$$

де U - вихідна напруга при усталеній швидкості обертання n ; $U_{ном}$ - вихідна напруга при номінальній швидкості обертання $n_{ном}$.

Вплив реакції якоря в ТГ постійного струму проявляється в зменшенні потоку збудження Φ на деяку величину $\Delta\Phi$ при протіканні по якорній обмотці струму і створенні відповідного потоку якоря. Оскільки струм $I_{я}$ збільшується при збільшенні швидкості обертання, відповідно зменшується і крутість характеристики. Щоб зменшити вплив дії реакції якоря, що розмагнічує, у ланцюзі навантаження бажано мати максимально великий опір R_H і працювати при невеликих відносних швидкостях обертання (до 0,5 від $\omega_{допустимої}$). В цьому випадку реакція якоря буде малою.

Зменшення крутизни характеристики викликається також зменшенням потоку збудження Φ через зменшення струму збудження (у ТГ із електромагнітним збудженням). Останнє відбувається при зменшенні напруги живлення і нагріванні обмотки збудження. Причому вплив нагрівання звичайно виявляється більше істотним, ніж коливання напруги джерела збудження. На-

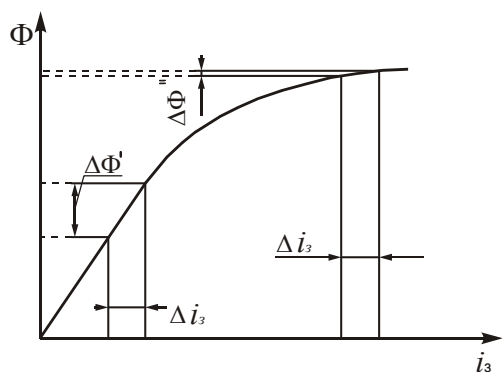


Рис. 1.3. Зміна потоку збудження

приклад, нагрів обмотки на 25°C викликає збільшення її опору на 10%. Рис. 1.3 показує ступінь зміни потоку збудження в сильно насичених ($\Delta\Phi''$) і слабо насичених ($\Delta\Phi'$) магнітних ланцюгах. Тому магнітна система ТГ із електромагнітним збудженням звичайно виконується сильно насиченою, тобто робочу точку на кривій намагнічування вибирають вище коліна, де навіть значні зміни струму збудження не викликають великих змін магнітного потоку. При цьому зводиться до мінімуму вплив реакції якоря і нагрівання обмотки збудження. Крім того, часто послідовно з обмоткою збудження включають або терморезистор, що стабілізує опір ланцюга збудження, або досить великий додатковий резистор, зроблений з матеріалу з малим температурним коефіцієнтом

опору.

Тахогенератор з магнітоелектричним збудженням не має похибок, що виникають в результаті коливань магнітного потоку від вказаних причин. Істотним достоїнством такого ТГ є також те, що він не потребує джерела живлення.

Нелінійний характер опору щіткового контакту також може створювати певну похибку у порівнянні з ідеалізованою характеристикою. З огляду на те, що спадання напруги під парою щіток ($2\Delta U_{Щ}$) можна приблизно вважати постійним і незалежним від струму навантаження, рівняння (1.3) можна записати у вигляді

$$U = \frac{E - 2\Delta U_{Щ}}{1 + R_{Я}/R_{Н}} = \frac{c_e \Phi \cdot n}{1 + R_{Я}/R_{Н}} - \frac{2\Delta U_{Щ}}{1 + R_{Я}/R_{Н}}.$$

При цьому вихідна характеристика залишається лінійною, однак в об-

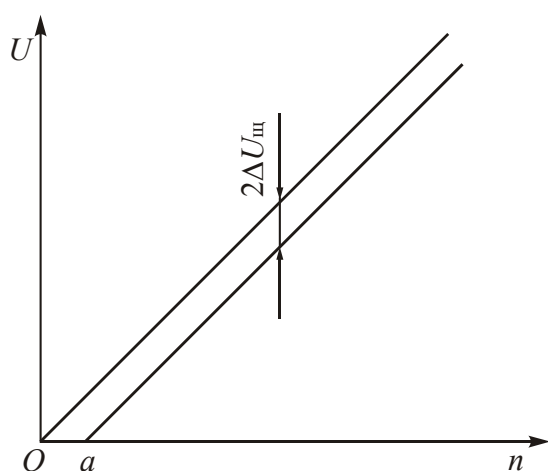


Рис. 1.4. Зона нечутливості

ласті малих швидкостей обертання ТГ стає нечутливим до зміни n - з'являється зона нечутливості Oa (рис. 1.4). Для зменшення цього виду похибки в ТГ постійного струму застосовуються щітки з низьким падінням напруги перехідного контакту (металографітові, зі срібними і золотими напайками). При цьому зона нечутливості практично зводиться до нуля.

Вихідна напруга ТГ постійного струму має певні пульсації. Розрізняють наступні види пульсацій: якірні, зубцеві і колекторні.

Якірні пульсації мають частоту $f_{Я} = 2n/60$ Гц, зубцеві мають частоту $f_{З} = zn/60$ Гц і колекторні – частоту $f_{К} = k_k n/60$ Гц. Тут n - швидкість обертання ротора, об/хв; z - число зубців якоря; k_k - число колекторних пластин. Величина пульсацій може досягати декількох відсотків від середнього значення вихідної напруги.

Особливо на якість роботи ТГ впливає низькочастотна складова пульсації вихідної напруги в системах автоматичного регулювання при малих швидкостях обертання тахогенератора, коли період пульсацій стає близьким до постійної часу виконавчого елемента.

Основними методами боротьби із зазначеними пульсаціями є конструктивно - технологічні і використання фільтрів.

Крім зазначених, можливі також похибки, обумовлені неточністю установки щіток на геометричну нейтраль. Таке явище приводить, зокрема, до асиметрії вихідної напруги, тобто до різної крутизни характеристики при правому і лівому обертанні ротора. При цьому під помилкою асиметрії вихідної напруги розуміють різницю між вихідними напругами при правому і лі-

вому обертанні з однаковою швидкістю.

Класифікація тахогенераторів постійного струму по точності проводиться за значеннями нелінійності та асиметрії вихідної напруги у відповідності з табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Класи точності ТГПС.

Показник	Тахогенератори						
	Високоточні		Точні		Низькоточні		
	Клас точності						
	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	2,5
Нелінійність зміни вихідної напруги, %, не більше	±0,02	±0,05	±0,1	±0,2	±0,5	-	-
Асиметрія вихідної напруги, %, не більше	±0,025	±0,05	±0,125	±0,25	±0,5	±1,25	±2,5

Високоточні тахогенератори постійного струму рекомендується застосовувати в прецизійних швидкісних слідкуючих системах, точні - в ланцюгах стабілізації швидкісних систем середньої точності, низькоточні - в ланцюгах корекції позиційних слідкуючих систем.

Достоїнствами тахогенераторів постійного струму є:

- відсутність для них похибки (амплітудної і фазової), пов'язаної з характером навантаження (активної, індуктивної, ємнісної);
- досить висока крутість характеристики.

До недоліків ТГ постійного струму, в першу чергу, варто віднести наявність ковзного контакту, що знижує надійність, вносить похибку і нестабільність вихідної напруги і появу іскріння під щітками, що створює радіоперешкоди. Останнє в більшості випадків потребує використання фільтрів. Крім того, вихідна напруга ТГ постійного струму має пульсації.

1.2. Тахогенератори змінного струму

Тахогенератори змінного струму поділяються на синхронні і асинхронні.

Синхронні ТГ звичайно виконуються як однофазні із зіркоподібним ротором з постійних магнітів. У їхній конструкції відсутні ковзні контакти. При обертанні ротора в генераторній обмотці наводиться ЕРС, амплітуда і частота якої пропорційні швидкості обертання ротора. Це призводить до зміни реактивних опорів як самого ТГ, так і навантаження, що істотно спотворює вихідну характеристику. У приладобудуванні синхронні ТГ використовуються порівняно рідко, в основному в системах, де інформаційним параметром є частота сигналу.

Асинхронні ТГ (АТ) конструктивно нічим не відрізняються від двофазних виконавчих асинхронних двигунів з порожнім немагнітним ротором. Електрична схема такого ТГ наведена на рис. 1.5. АТ має два статори (зовнішній і внутрішній), у повітряний зазор між якими поміщається немагнітний ротор у вигляді порожнього циліндра. Дві обмотки виконуються так, щоб їхні

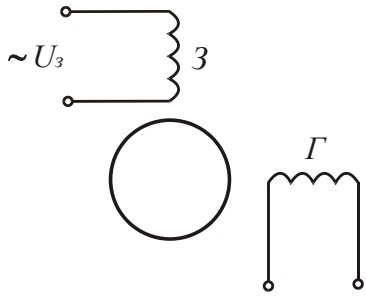


Рис. 1.5. Електрична схема асинхронного ТГ

осі були зсунуті одна відносно одної на 90° . Одна обмотка називається обмоткою збудження (3), інша - генераторною (Г). Конструктивно обмотки можуть розташовуватися: а) обидві обмотки на зовнішньому статорі; б) одна обмотка на зовнішньому статорі, а інша - на внутрішньому статорі. В останньому випадку шляхом відносного зсуву статорів вдається одержати більш точну взаємну перпендикулярність осей обмоток.

Обмотка збудження включається в мережу змінного струму напругою U_3 і при протіканні по ній змінного струму створює потік Φ_d , що пульсує із частотою f_1 , тобто із частотою прикладеної напруги. Вісь цього потоку збігається з віссю обмотки збудження (рис. 1.6), що називається поздовжньою віссю $d-d$. Відповідно потік, створюваний обмоткою збудження, називають поздовжнім. Вісь $q-q$, перпендикулярну осі обмотки збудження, називають поперечною.

При нерухомому роторі пульсуючий магнітний потік Φ_d наводить у

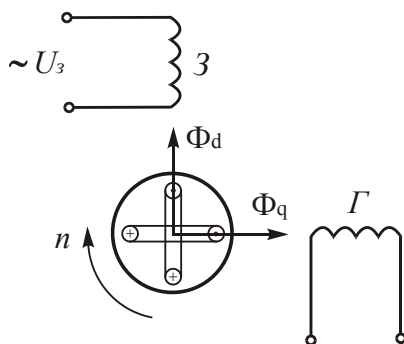


Рис. 1.6. До принципу дії асинхронного ТГ

роторі трансформаторну ЕРС, що створює струм I_d . Оскільки цей потік перпендикулярний до осі генераторної обмотки Г, то ЕРС у ній при нерухомому роторі наводитися не буде.

При обертанні ротора яким-небудь стороннім механізмом з кутовою швидкістю n в кожному елементі тіла ротора крім трансформаторної ЕРС індуктується ще і ЕРС обертання, пропорційна Φ_d і n . Напрямок її може бути визначені за правилом правої руки. Під дією цієї ЕРС виникають поперечний струм ротора

I_p і поперечний потік Φ_q , які змінюються в часі із частотою мережі і пропорційні швидкості обертання ротора. Поперечний магнітний потік Φ_q індуктує у генераторній обмотці Г ЕРС у відповідності з виразом (1.1).

Частота ЕРС генераторної обмотки не залежить від кутової швидкості обертання ротора і завжди дорівнює частоті мережі, від якої живиться обмотка збудження.

Таким чином, в ідеалізованому тахогенераторі ЕРС у вихідній обмотці прямо пропорційна швидкості обертання ротора (його вихідна характеристика є лінійною). У реальних умовах роботи ТГ ця характеристика відхиляється від лінійної залежності, тобто з'являється амплітудна похибка. Причинами, що викликають появу цієї похибки, є:

- технологічні неточності при виготовленні;

б) електромагнітна реакція ротора, що змінює величину потоків Φ_d і Φ_q при зміні режиму роботи ТГ (швидкості обертання і навантаження);

в) зміна деяких параметрів ТГ при зміні швидкості обертання (наприклад, опору порожнього ротора);

г) зміна опору обмоток і магнітного опору по різних осях при зміні зовнішніх умов.

Через технологічні погрішності при виготовленні ТГ (насамперед відхилень обмоток З і Г від взаємно перпендикулярного положення, допусків у величині повітряного зазору і товщині порожнього ротора) у вихідній обмотці при нульовій швидкості ротора індуктується деяка залишкова ЕРС $E_{зал}$, що називається нульовим сигналом.

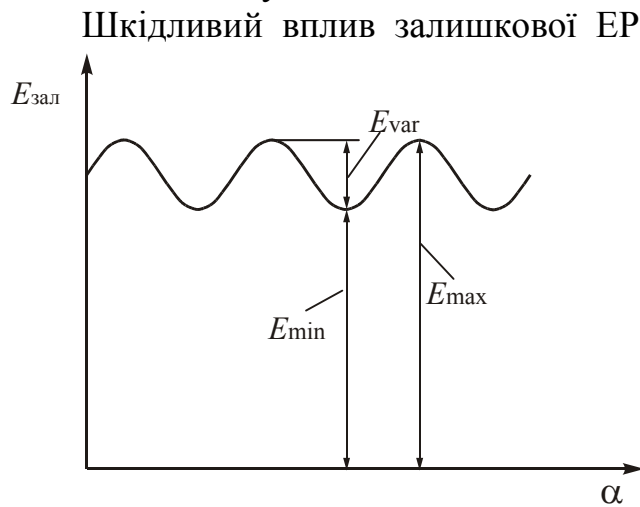


Рис. 1.7. Характер зміни залишкової ЕРС

Шкідливий вплив залишкової ЕРС полягає в тому, що відбувається зміщення вихідної характеристики з початку координат і з'являється до-додаткова змінна амплітудна і фазова похибка, особливо в зоні малих швидкостей обертання ротора. Приблизний характер зміни залишкової ЕРС залежно від кута повороту ротора показаний на рис. 1.7. У асинхронних ТГ, що випускаються серійно, залишкова ЕРС становить 25...100 мВ; змінна складова її має значення 3...10 мВ. При малих

швидкостях обертання ротора, коли E_G має невелику величину, це дає велику відносну погрішність. Для зменшення постійної складової залишкової ЕРС дослідним шляхом здійснюють відносне зміщення внутрішнього і зовнішнього статорів, якщо обмотки З і Г розміщені на двох статорах.

При розгляді ідеалізованого ТГ передбачається, що величина потоку Φ_d залишається незмінною у всіх режимах роботи машини. У дійсності цей потік змінюється при зміні швидкості обертання і струму навантаження в обмотці Г через такі фактори.

По-перше, під дією потоку Φ_q в елементах порожнього ротора індуктується ЕРС обертання E'_{BP} і виникають відповідні струми I'_{BP} , які розподілені щодо осей машини так само, як і струми I_{TP} , створювані трансформаторними ЕРС E_{TP} . При цьому в машині з'являється додаткова поздовжня складова потоку, що змінює струм в обмотці збудження. У результаті змінюється ЕРС, поздовжній потік і ЕРС E_G у вихідній обмотці. Потік Φ_q пропорційний швидкості обертання ротора, тому ЕРС E'_{BP} і струми I'_{BP} будуть пропорційні вже квадрату цієї частоти. Зі збільшенням швидкості обертання вони будуть

нелінійно зменшувати магнітний потік Φ_q і ЕРС E_r . Похибки, викликані зміною поздовжнього потоку від реакції ротора, можна зменшити підвищенням активного опору ротора. Для цього застосовують як матеріал ротора фосфористу бронзу, питомий опір якої в 2 рази вище, ніж в алюмінію при досить малому температурному коефіцієнті опору. При цьому, щоправда, знижується крутість вихідної характеристики. Для її підвищення приходиться збільшувати число витків генераторної обмотки, що пов'язане зі збільшенням її внутрішніх опорів.

По-друге, при підключенні генераторної обмотки до зовнішнього навантажувального опору z_H по ній протікає струм I_r і створюється відповідний потік. Тому результуючий потік по поперечній осі в цьому випадку відрізняється від потоку при холостому ході. Крім того, вихідна напруга ТГ при навантаженні буде менше, ніж при холостому ході, за рахунок падіння напруги у генераторній обмотці.

Похибка, обумовлена зміною потоку Φ_d і підключенням навантаження, буде тим більше, чим більше опір z_B і z_r обмоток статора і менше опір навантаження. Тому часто ТГ працюють у режимі, близькому до режиму холостого ходу ($z_H \approx \infty$).

Досить ефективним способом одержання вихідної характеристики ТГ, близької до лінійної, є обмеження діапазону робочих швидкостей обертання тахогенератора разом з підвищенням частоти живлення (для збереження діапазону виміру абсолютних швидкостей). Практично залежно від необхідної точності ТГ вибирають діапазон вимірювання відносної швидкості $v = 0,1 \dots 0,7$, що дає значення амплітудної похибки (0,1...2)%.

Амплітудну похибку можна зменшити також шляхом відповідного калібрування ТГ, під яким

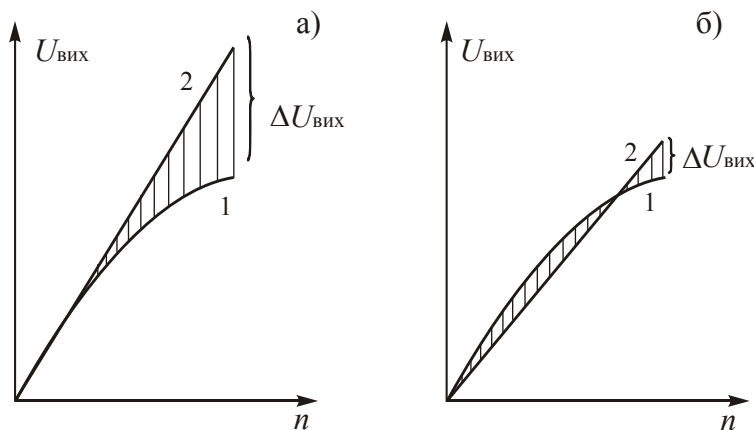


Рис. 1.8. Вихідні характеристики некаліброваного (а) та каліброваного (б) АТГ

розуміють установа такого нахилу ідеальної характеристики (рис. 1.8, б, крива 2), при якій відхилення в середньому реальної характеристики 1 від ідеальної було б мінімальним. На рис. 1.8, а показані характеристики некаліброваного ТГ.

В асинхронних ТГ похибка вихідної характеристики є комплексною величиною, тобто при

зміні режиму роботи машини вихідна напруга змінюється не тільки за величиною, але і за фазою, що іноді призводить до небажаних наслідків. У всіх випадках при зміні швидкості обертання, зовнішнього навантаження, опору ротора від нагрівання, має місце зміна фази вихідного сигналу. Фазову пог-

рішність звичайно визначають як різницю між фазовими зсувами ідеального $\psi_{вих.ід}$ і реального $\psi_{вих}$ ТГ:

$$\Delta\psi = \psi_{вих.ід} - \psi_{вих}$$

Оскільки величина фазової похибки $\Delta\psi$ залежить від тих же причин, що і величина амплітудної похибки, шляхи зменшення їх ті самі. Однак є і деякі особливості. На рис. 1.9 наведені графіки зміни амплітуди (рис. 1.9, а) і фази (рис. 1.9, б) від величини і характеру навантаження при постійній швидкості обертання, а на рис. 1.10 - амплітудної і фазової похибки від характеру навантаження і швидкості обертання. Із цих залежностей видно, що фазова

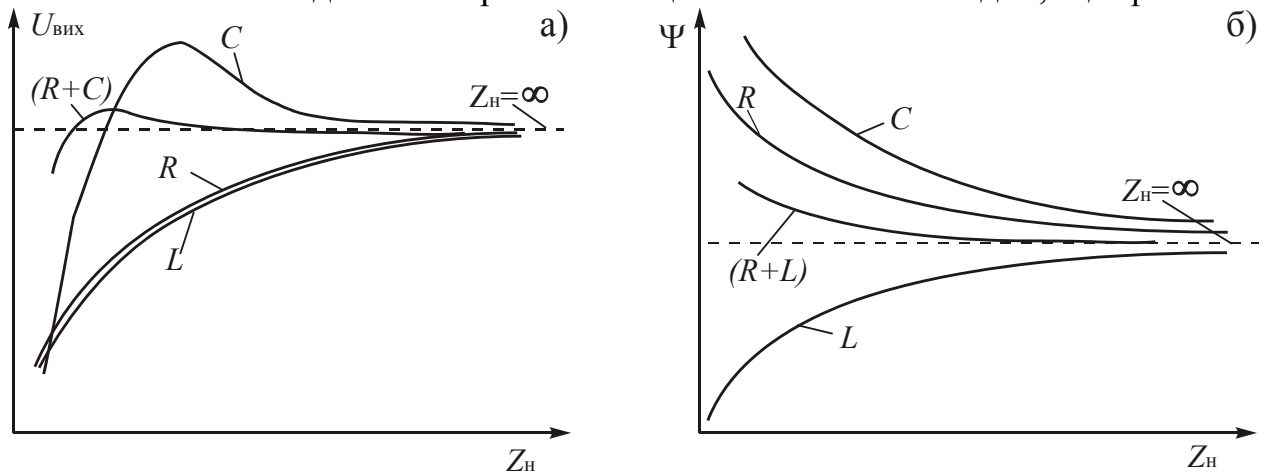


Рис. 1.9. Графіки зміни амплітуди (а) і фази (б) вихідного сигналу АТГ від величини і характеру навантаження

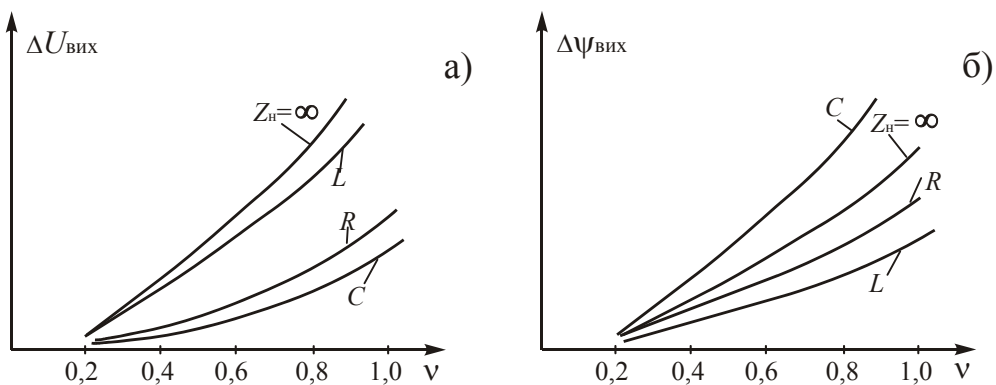


Рис. 1.10. Залежність похибок АТГ від швидкості
а) амплітудна похибка; б) фазова похибка.

похибка зменшується при активно - індуктивному навантаженні, але при цьому зростає амплітудна похибка. Найменша амплітудна погрішність має місце при ємнісному навантаженні; найменша фазова погрішність - при індуктивному навантаженні.

Для зменшення фазової похибки треба до активного навантажувального опору додавати індуктивний; але при цьому зростає амплітудна погрішність. Для зменшення амплітудної похибки треба до активного навантажувального опору додавати ємнісний; але при цьому зростає фазова похибка.

Істотний вплив на точність асинхронного ТГ має зміна його опорів при нагріванні під час роботи. Для усунення температурної погрішності ротор звичайно виконують із матеріалів з низьким температурним коефіцієнтом опору або застосовують спеціальну температурну компенсацію.

Класифікація асинхронних ТГ по точності проводиться за значеннями основних показників у відповідності з таблицею 1.2.

Таблиця 1.2. Класи точності асинхронних ТГ.

Показник	Тахогенератори					
	Високоточні		Точні		Низькоточні	
	Клас точності					
	0,025	0,05	0,1	0,25	0,5	1,0
Нелінійність зміни вихідної напруги, %, не більше	±0,025	±0,05	±0,1	±0,25	±0,5	-
Відношення залишкової ЕРС до крутизни, об/хв, не більше	15	20	20	20	25	50
Відношення змінної складової залишкової ЕРС до крутизни, об/хв, не більше	2	3	3	5	-	-
Фазова похибка від зміни швидкості обертання, кут. хв., не більше	±20	±20	±25	±30	-	-

Переваги асинхронних тахогенераторів перед ТГ постійного струму полягають у наступному:

- простота конструкції, відсутність ковзних контактів і більш висока надійність;

- малий момент інерції ротора і малий власний момент тертя.

До недоліків асинхронних ТГ варто віднести наявність фазової погрішності, залежність крутизни вихідної характеристики від характеру навантаження, наявність нульового сигналу при нерухомому роторі, малу крутизну вихідної характеристики, малу вихідну потужність.

1.3. Динамічні властивості тахогенераторів

Динамічні властивості ТГ визначаються їх електромагнітною постійною часу T_{em} . Диференціальне рівняння, що пов'язує вихідний сигнал $U_{вих}$ із вхідним – кутом повороту його вала θ , має вигляд

$$T_{em} \frac{dU_{вих}}{dt} + U_{вих} = k_n \frac{d\theta}{dt}, \quad (1.4)$$

де k_n - статичний коефіцієнт підсилення по напрузі, що обумовлений крутизною вихідної характеристики ТГ.

Відповідно до виразу (1.4) передатна функція тахогенератора відносно кута повороту його вала має вигляд

$$W_{\theta}(p) = \frac{\theta(p)}{U_{вих}(p)} = \frac{k_n p}{T_{ем} p + 1}, \quad (1.5)$$

а відносно кутової швидкості обертання його вала вид

$$W_{\omega}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{вих}(p)} = \frac{k_n}{T_{ем} p + 1}. \quad (1.6)$$

Таким чином, тахогенератор, як інерційна ланка, виконує диференціювання кута повороту вала з деяким спотворенням, що визначається постійною часу $T_{ем}$.

Постійна часу $T_{ем}$ визначається в основному швидкістю протікання електромагнітних процесів у машині, тобто активними і реактивними опорами машини і її навантаження, тому

$$T_{ем} \approx \frac{(L_{mг} + L_H)}{(R_{mг} + R_H)}.$$

Істотне зменшення $T_{ем}$ може бачь досягнуто при використанні в якості ТГ постійного струму машин з порожнистим немагнітним якорем або з дисковим з печатною обмоткою, у яких мала власна індуктивність якоря.

У тому випадку, якщо $T_{ем}$ можна знехтувати, вирази (1.5) і (1.6) приймають вигляд

$$W_{\theta}(p) = \frac{\theta(p)}{U_{вих}(p)} = k_n p; \quad W_{\omega}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{вих}(p)} = k_n. \quad (1.7)$$

Обертові частини тахогенератора створюють додатковий момент інерції для виконавчих двигунів, з валом яких вони пов'язані. Тому для зменшення електромеханічної постійної часу системи виконавчий двигун - тахогенератор і для збільшення швидкодії цієї системи слід застосовувати ТГ з роторами, які мають малі моменти інерції.

1.4. Приклади використання тахогенераторів

На рис. 1.11 показано приклад вимірювання за допомогою тахогенератора швидкості обертання двигуна. Ротор тахогенератора ТГ пов'язаний з валом привідного двигуна Дв. Вихідна напруга тахогенератора подається на

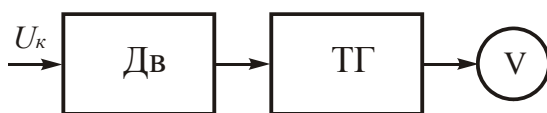


Рис. 1.11. ТГ як показчик швидкості

вольтметр V, шкала якого проградуована в одиницях кутової швидкості. За показаннями цього вольтметра є можливість безперервно контролювати і в разі необхідності (в ручному режимі) регулювати швидкість обертання, змінюючи напругу керування U_k .

На рис. 1.12 показано використання тахогенератора для здійснення зворотного зв'язку в системі, що стежить, на прикладі роботи приводу антени радіолокаційної станції в режимі кругового обертання з постійною швидкіс-

тю. Тут ВД - виконавчий двигун, що приводить в обертання антену А; ТГ - тахогенератор, механічно пов'язаний з валом двигуна; П – підсилювач; ПЕ - елемент порівняння, Р – редуктор. Необхідна швидкість обертання задається відповідною величиною базової напруги U_6 .

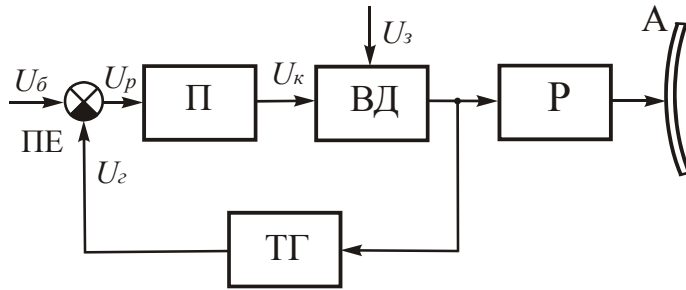


Рис. 1.12. Схема приводу антени РЛС

ТГ і через редуктор Р антену А. Вихідна напруга тахогенератора U_2 порівнюється в елементі порівняння з базовою напругою U_6 і на виході підсилювача встановлюється постійне значення U_k , яке визначається величиною напруги неузгодженості U_p . Ротор двигуна і антена безперервно обертаються з постійною швидкістю.

Знаки (при роботі на постійному струмі) або фазування (при роботі на змінному струмі) напруг U_6 та U_2 проводиться таким чином, що збільшення U_2 призводить до зменшення напруги неузгодженості U_p . Тому будь-яка зміна швидкості обертання ротора двигуна і антени викликає таку зміну напруг U_2 та U_p і, відповідно, напруги U_k , що швидкість двигуна буде прагнути до початкового значення. У даному випадку застосування тахогенератора для зворотного зв'язку дозволяє стабілізувати швидкість обертання антени.

Питання для самоперевірки

1. Де і для чого в даний час використовуються тахогенератори?
2. Які переваги і недоліки тахогенераторів постійного струму?
3. Які переваги і недоліки асинхронних тахогенераторів?
4. Поясніть принцип дії тахогенератора постійного струму.
5. Поясніть принцип дії асинхронного тахогенератора.
6. Поясніть принцип дії синхронного тахогенератора.
7. Поясніть, чому в синхронному тахогенераторі при зміні швидкості обертання його ротора змінюється і амплітуда і частота вихідної напруги.
8. Яка передатна функція тахогенератора?

Привод працює таким чином. Напруга U_6 через елемент порівняння ПЕ надходить на вхід підсилювача П, а потім в обмотку управління виконавчого двигуна, обмотка збудження якого постійно підключена до джерела напруги U_3 . Ротор двигуна починає обертатися і повертати ротор тахогенератора

2. Обертові трансформатори

Обертові (поворотні) трансформатори (ОТ) - електричні інформаційні мікромашини змінного струму, призначені для перетворення кута повороту в напругу, пропорційну деяким функціям кута (наприклад, синусу або косинусу) або самому куту повороту ротора. Обертові трансформатори використовуються: в системах дистанційної передачі кута підвищеної точності; як датчики кута; як лічильно – вирішальні елементи аналогових і аналогово-цифрових обчислювальних пристроїв для розв'язання геометричних, тригонометричних і векторних задач, пов'язаних з аналізом трикутників, перетворенням координат, розкладанням і побудовою векторів і т.д. Для цих цілей звичайно використовуються ті самі ОТ при різних способах включення їхніх обмоток. Слід відмітити, що в теперішній час ОТ як лічильно – вирішальні елементи використовуються дуже рідко.

Є кілька режимів роботи обертових трансформаторів в залежності від схеми включення їхніх обмоток.

1. Синусно - косинусні ОТ (СКОТ), у яких вихідна напруга однієї обмотки пропорційна синусу кута повороту ротора, а іншої обмотки - косинусу цього кута.

2. Лінійні ОТ (ЛОТ), у яких вихідна напруга пропорційна в досить великому діапазоні куту повороту ротора.

3. Масштабні ОТ (МОТ), у яких вихідна напруга пропорційна вхідній і коефіцієнт пропорційності (масштаб) визначається кутом повороту ротора.

4. Перетворювачі координат, що здійснюють поворот осей декартової системи координат або перехід від декартової до полярної системи координат (ОТ - побудовники вектора).

5. Первинні перетворювачі кута для індукційних фазообертачів, що перетворюють просторовий кут у часовий.

6. Трансформаторна синхронна передача.

Основна вимога, що пред'являється до ОТ, як і до всіх інформаційних пристроїв, - висока точність перетворення вхідної величини (у цьому випадку кута) у вихідну (у даному випадку напругу по заданому функціональному закону).

У загальному випадку на статорі і роторі СКОТ розміщують по дві, звичайно однакові, однофазні розподілені обмотки, що зміщені між собою в просторі на 90° . Магнітопровід виготовляють із листів пермалоя або електротехнічної сталі, ізольованих один від одного. Первинні обмотки, які в більшості ОТ розташовуються на статорі, називаються: одна - обмоткою збудження (ОЗ), інша – квадратурною (поперечною) або компенсаційною обмоткою (ОК), а вторинні - синусною і косинусною. Виводи обмоток статора ОТ, незалежно від їх призначення, маркуються буквами С1...С4, а ротора - Р1...Р4.

Відмінною особливістю деяких ЛОТ в порівнянні з СКОТ є те, що їх ротор має два явно виражених полюса, на яких розташована ОЗ, а на статорі

розміщено дві розподілені взаємно перпендикулярні обмотки, одна з яких вихідна, а друга компенсаційна.

Масштабні ОТ відрізняються від СКОТ наявністю спеціального фіксуючого пристрою, що дозволяє фіксувати ротор в потрібному положенні.

Залежно від розташування обмоток збудження ОТ можуть бути з живленням з боку статора або ротора. За значенням діапазону кутових переміщень ротора розрізняють обертові трансформатори обмеженого і необмеженого обертання, за характером струмопроводу (або струмознімання) до роторних обмоток - контактні і безконтактні.

Особливістю ОТ, що використовуються в бортових системах, зокрема, гіроскопічних, є відсутність в деяких випадках корпусу і струмопідводів. При цьому центрування ротора і статора і підведення живлення здійснюється за допомогою елементів, що входять в пристрій, в якому застосовуються обертові трансформатори.

Істотна особливість використання ОТ, як і інших електричних машин, викликана в першу чергу складністю кінематичних зв'язків. Це практично унеможлиблює їх резервування, у зв'язку з чим до цих елементів пред'являються високі вимоги по надійності.

Крім двополюсних випускаються також багатополюсні ОТ різного конструктивного виконання. Вони застосовуються у двоканальних системах синхронного зв'язку для каналу точного відліку.

В даний час досить широко поширені багатополюсні ОТ типу індуктосін і редуктосін.

Зазвичай для ОТ важливими є наступні показники.

Повний вхідний опір холостого ходу - опір змінному струму, який чиниться вхідною обмоткою ОТ при розімкнутих вторинних обмотках. Вхідний опір різних типів знаходяться в межах від 100 до 4000 Ом.

Коефіцієнт трансформації - відношення максимального діючого значення ЕРС вторинної обмотки до діючого значенню напруги збудження, виміряного на основній гармоніці в режимі холостого ходу.

Похибка відображення синусної (косинусної) залежності - відхилення діючого значення вихідної напруги в залежності від кута повороту ротора від ідеальної синусоїди (косинусоїди). Вона дорівнює напівсумі абсолютних значень максимальних позитивної та негативної похибок і виражається у відсотках

$$\varepsilon = (\Delta U_{вих} / U_{вих \max}) \cdot 100 = \sin \Delta \alpha \cdot 100$$

чи в кутових хвилинах

$$\varepsilon = (\cos \alpha / 34,4) \Delta \alpha',$$

де $U_{вих \max}$ - максимальне значення вихідної напруги; $\Delta \alpha$ і $\Delta \alpha'$ - похибка відповідно в радіанах та кутових хвилинах.

Похибка відображення синусної залежності викликається технологічними похибками при виробництві ОТ, а також є наслідком об'єктивних властивостей конструкції. При цьому найбільш істотний вплив робить зубчаста структура статора і ротора, ексцентриситет і магнітна асиметрія пакетів ста-

тора і ротора.

Похибка відображення лінійної залежності - відхилення діючого значення вихідної напруги в залежності від кута повороту ротора від ідеальної прямої лінії. Похибка відображення лінійної залежності дорівнює напівсумі абсолютних значень максимальних позитивної та негативної похибок в діапазоні кутів $-60 \dots +60^\circ$ і виражається у відсотках

$$\varepsilon_{\text{л}} = (\Delta U_{\text{вих}} / U_{\text{вих max}}) \cdot 100 = (\Delta \alpha / \alpha_{\text{max}}) \cdot 100,$$

де α_{max} - максимальний кут повороту ротора.

Так як для ЛОТ максимальний кут повороту ротора дорівнює $\pm 60^\circ$, то $\varepsilon_{\text{л}} = \Delta \alpha' / 36$.

Асиметрія нульових положень ротора характеризує електричну перпендикулярність статорних і роторних обмоток. Під асиметрією нульових положень ротора розуміють відхилення ротора (при живленні ОТ з боку кожної з первинних обмоток) від кутів, кратних 90° , коли ЕРС вторинних обмоток дорівнює мінімальному значенню $e_{\text{ост}}$. Асиметрія нульових положень ротора оцінюється напівсумою максимальних значень максимального позитивного та максимального негативного відхилень.

Похибка слідування в ТДП - відхилення положення узгодження ОТ - приймача від кутового положення, що задається ОТ - датчиком. За похибку слідування, що виражається в кутових хвилинах, приймають напівсуму абсолютних значень найбільших відхилень різних знаків положень узгодження приймача.

Розглянемо коротко основні схеми включення обертових трансформаторів.

2.1. Робота обертового трансформатора у режимі синусно – косинусного трансформатора. Симетрування обертових трансформаторів

Розглянемо дві обмотки ОТ – обмотку збудження (ОЗ) на статорі С1-С2 і обмотку на роторі Р1-Р2 (рис. 2.1). При подачі синусоїдальної напруги U_1 на обмотку збудження створюється пульсуючий поздовжній магнітний потік Φ_1 , що індукуює в ОЗ ЕРС E_1 . У режимі холостого ходу ($Z_H = \infty$) у роторній обмотці виникає трансформаторна ЕРС

$$E_S = kE_1 \sin \vartheta = E_2 \sin \vartheta, \quad (2.1)$$

де $k = E_2 / E_1 = w_{\vartheta 2} / w_{\vartheta 1}$ - коефіцієнт трансформації, що визначається як відношення діючих значень ЕРС в обмотках при $\vartheta = 0$ або ефективних витків обмоток Р1-Р2 і С1-С2; ϑ - кут повороту ротора, значення якого визначається кутом між перпендикуляром до нерухомої осі ОЗ на статорі і віссю обмотки ротора.

Оскільки обмотка ротора Р3-Р4 зміщена щодо обмотки Р1-Р2 на кут 90° , те ЕРС, наведена в ній, має вигляд

$$E_C = E_2 \cos \vartheta. \quad (2.2)$$

Таким чином, при холостому ході в обмотках ротора індукуються ЕРС, пропорційні синусу і косинусу кута повороту ротора відносно потоку

збудження. Відповідно обмотка P1-P2 називається синусною (S), а P3-P4 – косинусною (C).

Обмотка C3-C4 перпендикулярна до обмотки C1-C2, тому потік у ній не індукує ЕРС.

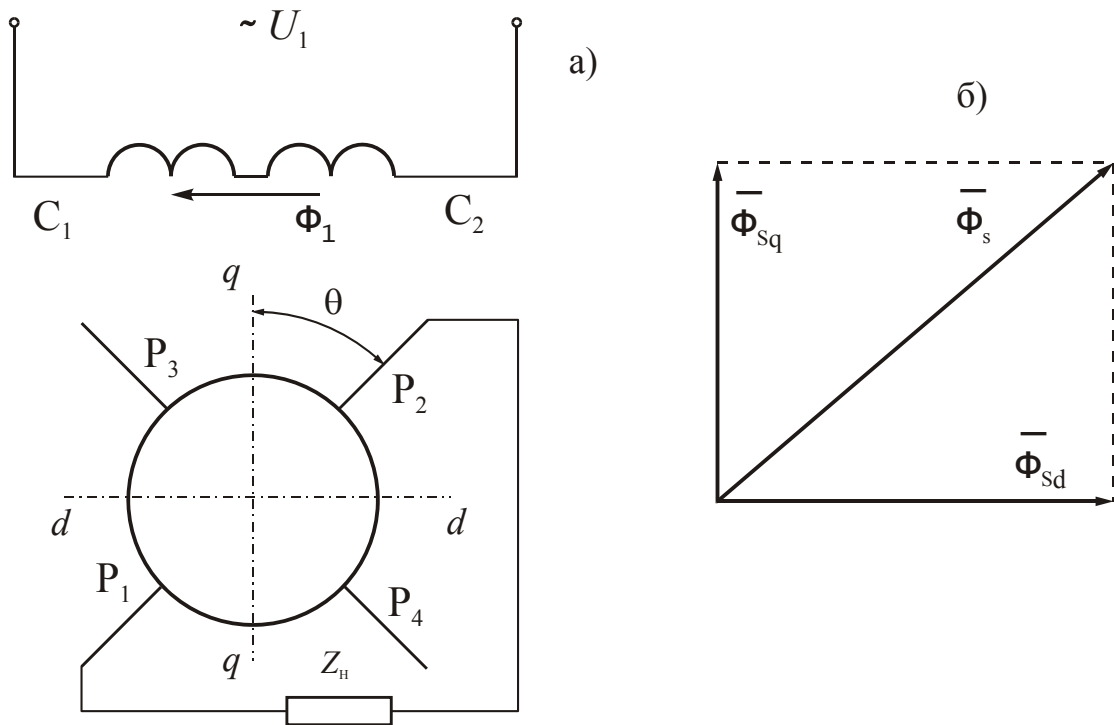


Рис.2.1. Схема СКОТ (а) і діаграма потоків (б) при підключенні опору до синусної обмотки

При підключенні до обмотки P1-P2 опору навантаження $Z_H \neq \infty$ залежність ЕРС роторної обмотки від α не буде синусоїдальною, якщо не прийняти спеціальних заходів. Причина порушення синусоїдальної залежності полягає в тому, що при цьому по обмотці P1-P2 протікає струм і створюється магнітний потік Φ_s , спрямований по осі обмотки P1-P2. Цей потік можна розкласти на дві складові – поздовжню Φ_{sd} (по осі $d-d$), спрямовану уздовж осі основного потоку збудження, але зустрічно йому, і поперечну Φ_{sq} (по осі $q-q$), перпендикулярну потоку збудження.

Як видно з рис. 2.1, поздовжня складова потоку Φ_{sd} спрямована проти потоку збудження Φ_1 , і прагне розмагнітити ОТ. Однак цього практично не відбувається, тому що зменшення Φ_1 знижує протиЕРС первинної обмотки. Це викликає збільшення струму обмотки збудження, що призводить до зростання потоку, що компенсує поздовжню складову потоку. Таким чином, розмагнічуюча дія поздовжньої складової компенсується збільшенням струму збудження в первинному ланцюзі, що доводить потік збудження до попереднього значення. Таким чином, розмагнічування практично не відбувається, однак зміна струму збудження істотно залежить від навантаження і кута повороту ротора.

Поперечна складова потоку Φ_{sq} перпендикулярна основному потоку і нічим не компенсується. Цей потік наводить в обмотці P1-P2 додаткову ЕРС, порушуючи синусоїдальну залежність (2.1).

Основна вимога, що висувається до СКОТ, полягає в тому, щоб вихідна напруга як можна точніше відповідала закону синуса або косинуса кута повороту ротора.

Для виконання цієї вимоги необхідно усунути вплив поперечної складової магнітного потоку Φ_{sq} . Це може бути досягнуто або роботою ОТ на високоомне навантаження (наближення до режиму холостого ходу - що проблематично), або її компенсацією. Останнє досягається симетруванням обмоток ротора і статора. Суть симетрування полягає в ослабленні (часткове симетрування) або в усуненні (повне симетрування) поперечного потоку. Розрізняють два види симетрування: первинне і вторинне.

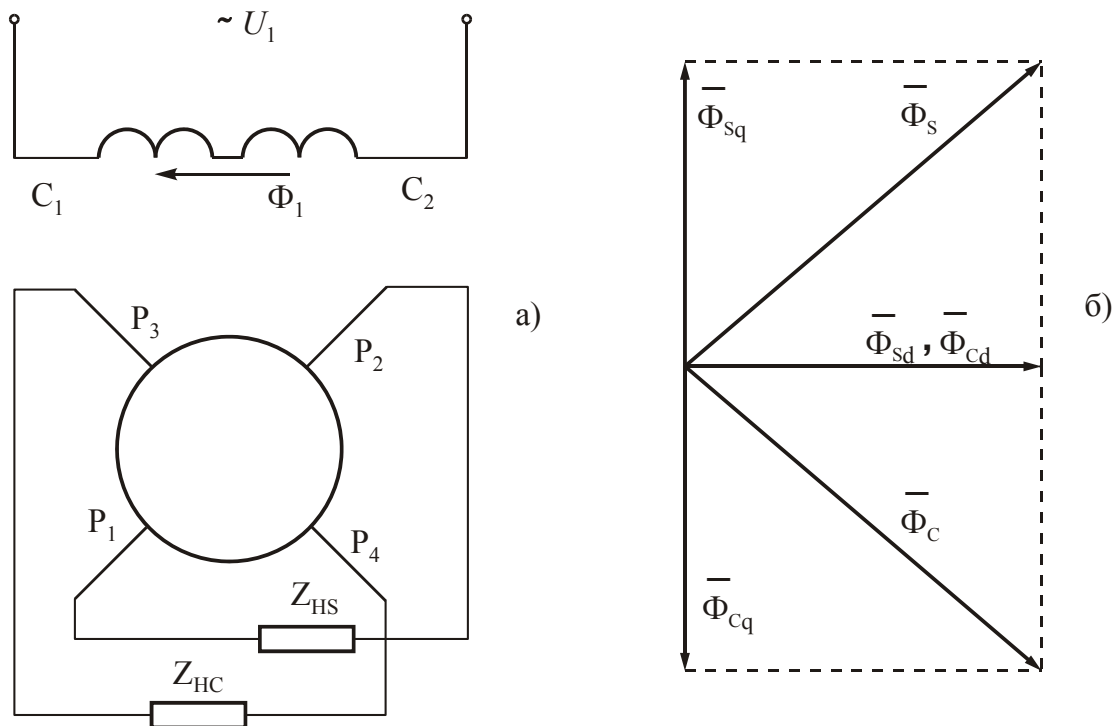


Рис.2.2. Схема СКОТ з вторинним симетруванням (а) і діаграма потоків, що створюються обмотками ротора (б)

Вторинне симетрування здійснюється за допомогою другої роторної (косинусної) обмотки P3-P4. Електрична схема ОТ із вторинним симетруванням показана на рис. 2.2. При цьому до обох роторних обмоток підключаються опори навантаження: Z_{HS} - до синусної і Z_{HC} - до косинусної. У цьому випадку струм протікає по обох обмотках. Магнітний потік Φ_c , створений косинусною обмоткою, перпендикулярний до Φ_s і відносно до осей машини має поздовжню Φ_{cd} і поперечну Φ_{cq} складові.

Повздовжня складова потоку Φ_{cd} діє так само, як і Φ_{sd} , тобто призводить до подальшого збільшення струму збудження для компенсації Φ_{cd} .

Поперечні ж складові Φ_{Sq} й Φ_{Cq} направлені зустрічно (рис. 2.2,б) і при ідентичності обмоток P1-P2 і P3-P4, а також рівності навантажувальних опорів Z_{HS} і Z_{HC} , взаємно компенсуються. Тому спотворень вихідних ЕРС, викликаних його впливом, не буде при будь-яких поворотах ротора. Крім того, симетрія вторинних ланцюгів СКОТ характеризується ще однією важливою властивістю - сталістю струму збудження і потужності збудження незалежно від кута повороту ротора (тобто сталістю вхідного опору з первинної сторони).

Очевидно, що якщо виконано неповне вторинне симетрування, то спотворення у вихідних напругах зберігаються, однак при цьому вони будуть значно менші, ніж у випадку, якщо одна з обмоток навантажена, а друга працює в режимі холостого ходу.

Розглянутий метод симетрування має практичне застосування тільки при постійному опорі навантаження.

При первинному симетруванні для зменшення поперечного потоку

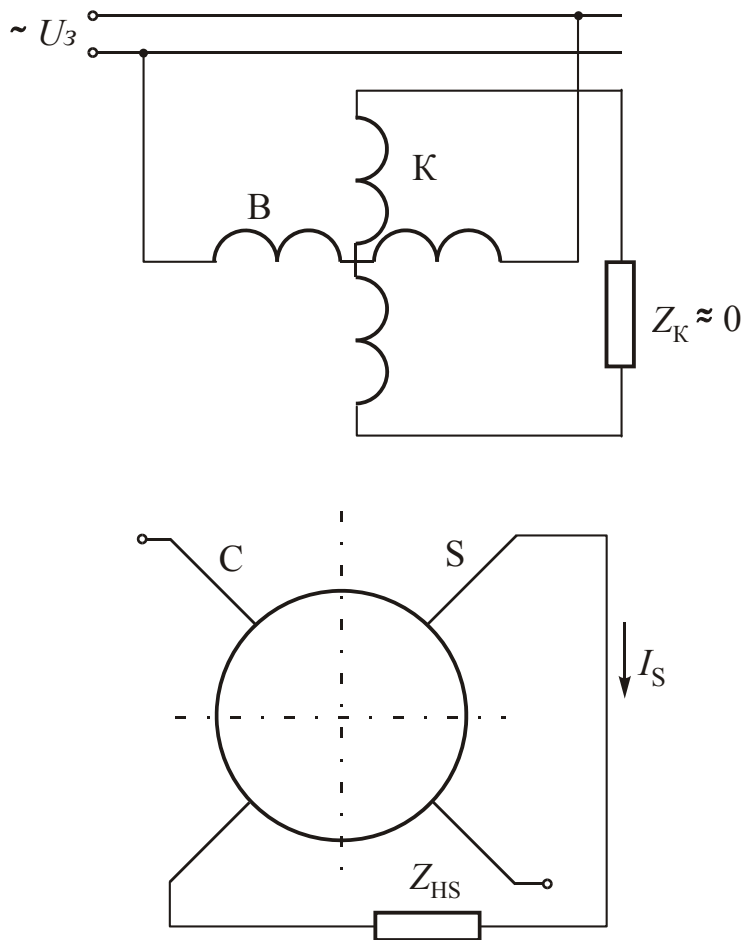


Рис.2.3. Первинне симетрування СКОТ

джерела цю умову можна записати у вигляді

$$z_K \approx 0.$$

компенсаційну (квадратурну) обмотку ОК підключають до опору (рис 2.3). Тому що вісь ОК збігається з напрямком поперечного магнітного потоку ротора, останній наводить у ній ЕРС і в ОК протікає струм, тобто по відношенню до поперечної складової потоку ОК є вторинною обмоткою трансформатора. При малому значенні z_K взаємна розмагнічуюча дія обмоток S і ОК настільки велика, що результуючий магнітний потік Φ_q прагне до нуля при будь-якому значенні z_{HS} . Умовою первинного симетрування, якщо обмотки S і ОК ідентичні, є рівність симетруючого опору зовнішньому опору ланцюга ОЗ, тобто вихідному опору джерела живлення. Для досить потужного

$$(2.3)$$

Умова симетрування від опору навантаження не залежить.

Для досягнення найменшого спотворення вихідних функціональних залежностей ОТ первинне і вторинне симетрування практично завжди застосовують спільно.

Розглянуті методи компенсації поперечного потоку дозволяють у якості вихідної використати як синусну, так і косинусну обмотки, тобто одержувати вихідну напругу, пропорційну синусу або косинусу кута повороту ротора. Тому такі ОТ називаються синусно - косинусними (СКОТ).

Залежно від величини погрішності СКОТ діляться на шість класів точності (таблиця 1).

Таблиця 1.

Параметр точності	Клас точності					
	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2
Погрішність відображення синусної залежності, %	±0,005	±0,01	±0,02	±0,05	±0,1	±0,2
Асиметрія нульових точок, кут.сек	±10	±20	±40	±100	±200	400
ЕРС квадратурної обмотки, %, не більше	0,04	0,08	0,12	0,3	0,6	1,2
Залишкова ЕРС, %, не більше	0,003	0,006	0,01	0,025	0,05	0,1
Різниця коефіцієнтів трансформації, %, не більше	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2

2.2. Лінійний обертовий трансформатор

Розглянуті схеми СКОТ можуть бути використані для одержання лінійної залежності вихідної напруги від кута повороту ротора для малих змін останнього. Наприклад, при невеликій зміні кута ϑ можна вважати, що $\sin \vartheta \approx \vartheta$ і отримувати необхідну лінійну залежність від синусної обмотки. Однак у цьому випадку точність лінійної апроксимації 0,1% може бути отримана тільки при зміні кута в межах $\pm 4,5^\circ$. При розширенні діапазону зміни кута до $\pm 14^\circ$ точність відтворення лінійної залежності СКОТ знижується до 1%. Тому для лінійного обертового трансформатора (ЛОТ) використовувати одну синусну обмотку нераціонально.

У набагато більших межах зміни кута ϑ лінійною є функція виду

$$f(\vartheta) = \frac{\sin \vartheta}{(1 + k \cos \vartheta)} \quad (2.4)$$

при значеннях k , близьких до 0,5.

Для оцінки відхилення цієї функції від лінійної залежності необхідно представити її чисельник і знаменник у вигляді ступеневих рядів і поділити многочлен на многочлен. Тоді, нехтуючи членами другого порядку малості, можна отримати при $\vartheta < 60^\circ$:

$$\frac{\sin \vartheta}{(1 + k \cos \vartheta)} \approx \frac{2}{3} \vartheta (1 - \vartheta^4/180). \quad (2.5)$$

Відхилення функції (2.4) від лінійної залежності визначається в основ-

ному членом $\vartheta^4/180$ в рівнянні (2.5). При $\vartheta = \pm 60^\circ$ це відхилення досягає 1% максимального значення функції.

Більш високу точність наближення функції (2.4) до лінійної залежності будемо мати в межах $\vartheta = \pm 37^\circ$. При цьому відхилення від лінійності не перевищує 0,1%.

Вибір коефіцієнта k визначається діапазоном зміни кута ϑ . Функція (2.4) при $k=0,5$ дає досить точну лінійну залежність в межах зміни $\vartheta = \pm 30^\circ$. При подальшому збільшенні ϑ відхилення в лінійності швидко зростає. Незначне збільшення коефіцієнта k призводить до деякого збільшення похибки для малих ϑ , але при цьому значно розширюється діапазон зміни кута ϑ . Так, для $k=0,52$ кут ϑ зростає до $\pm 55^\circ$ при похибці 0,1%. Коефіцієнт $k=0,53$ є ще більш сприятливим у сенсі збільшення діапазону зміни кута ϑ . У цьому випадку при $\vartheta = \pm 45^\circ$ похибка досягає 0,15%, при $\vartheta = \pm 60^\circ$ вона стає рівною нулю, а при подальшому збільшенні ϑ похибка в лінійності швидко зростає (рис. 2.4).

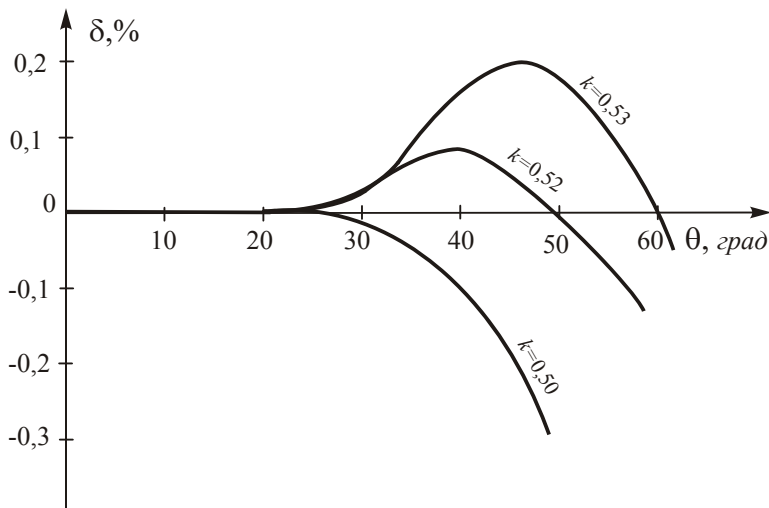


Рис. 2.4. Залежність похибки від коефіцієнта k

Реальний коефіцієнт трансформації k повинен дещо відрізнятися від значення його в рівнянні (2.4), так як в ньому не враховано опір обмоток. Практично вибирають $k=0,565$. Тоді залежність вихідної напруги від кута повороту ротора лінійна в зазначених раніше межах.

Властивість функції (2.4) покладено в основу створення ЛОТ. Для отримання вихідної напруги лінійного трансформатора, що змінюється при повороті ротора за законом (2.4), з'єднання його первинних і вторинних обмоток повинно бути виконано так, як показано на рис. 2.5 (первинне симетрування) або на рис. 2.6 (вторинне симетрування).

У схемі ЛОТ з первинним симетруванням зміна опору навантаження не вносить спотворення в лінійну залежність вихідної напруги, що є перевагою цієї схеми. Вихідний опір ОТ з первинним симетруванням залежить від кута повороту ротора.

У ЛОТ із вторинним симетруванням при зміні навантаження умови симетрування порушуються, що призводить до істотних похибок відтворення лінійної залежності. Крім того, навантаження повинне мати чисто індуктивний характер. Зазначені недоліки ЛОТ із вторинним симетруванням не до-

зволяють широко використовувати цю схему.

На противагу СКОТ лінійний обертовий трансформатор зі змішаним

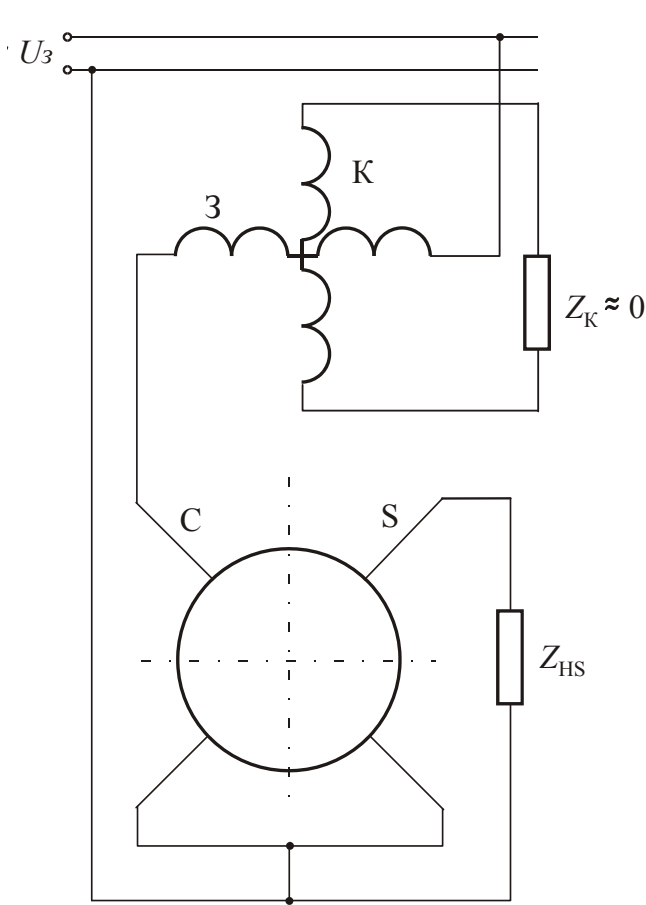


Рис. 2.5. Первинне симетрування ЛОТ

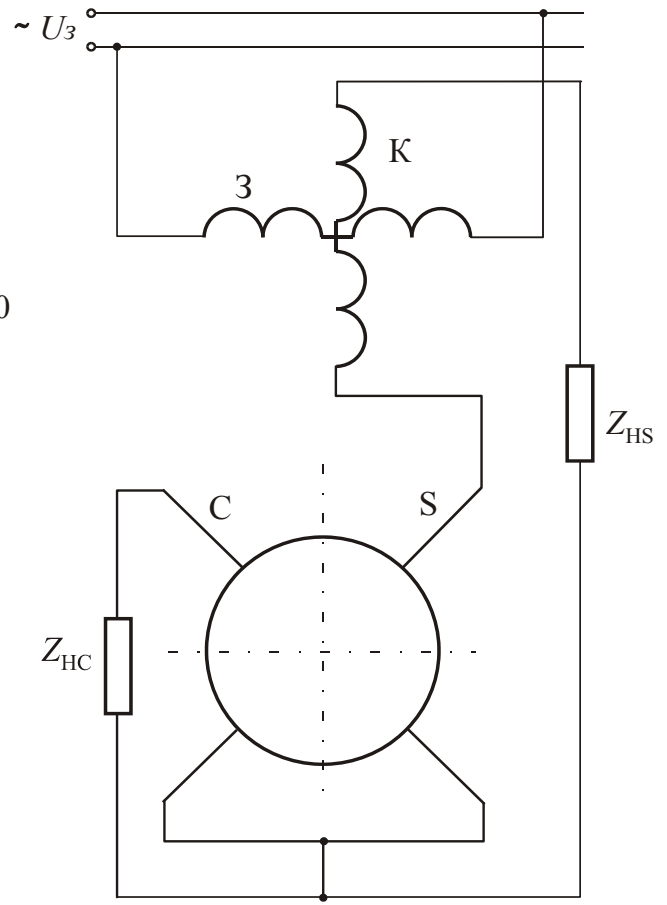


Рис. 2.6. Вторинне симетрування ЛОТ

симетруванням створити неможливо. Тому з двох відомих схем ЛОТ застосовують, як правило, схему з первинним симетруванням. Її недоліком є залежність

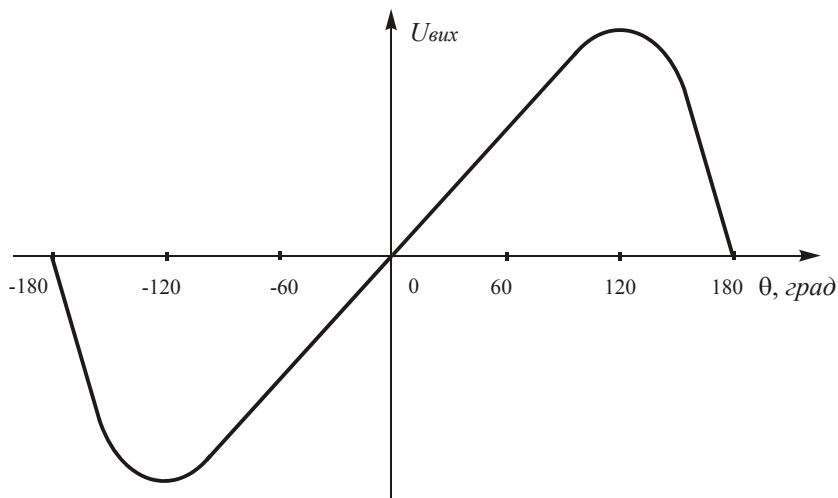


Рис. 2.7. Залежність вихідної напруги ЛОТ від кута повороту ротора

напруги змінюється на 180° .

вихідного опору ЛОТ від кута повороту ротора, а перевагою - незалежність вихідного опору від цього кута.

Графік вихідної напруги ЛОТ при повороті його ротора на $\pm 180^\circ$ зображений на рис. 2.7, де $U_{вих}$ змінюється лінійно в межах $\vartheta \pm 60^\circ$. При переході через нуль фаза вихідного сиг-

При повороті ротора на один оберт його вихідна напруга має дві нульові точки - "істинну" і "помилкову". Лінійну зону роботи можна визначити за наступною ознакою: від положення "істинного" нуля вихідна напруга безперервно зростає при повороті ротора на кут, що приблизно дорівнює 120° , а від "помилкового" нуля - тільки на 60° .

При каскадному (послідовному) з'єднанні декількох ОТ, коли напруга з одного трансформатора подається на вхід іншого, через те, що вихідний опір ЛОТ залежить від кута повороту ротора, необхідно ЛОТ включати тільки на початку каскаду, тому що в протилежному випадку непостійність навантажувального опору (вихідного опору ЛОТ) попереднього ОТ може призводити до зниження його точності.

Включення ж ОТ на початку каскаду викликає лише непостійність навантаження джерела живлення, що несуттєво.

З цієї ж причини небажано послідовне включення двох ЛОТ.

Похибку відображення лінійної залежності оцінюють відхиленням діючого значення вихідної напруги (залежно від кута повороту ротора) від ідеальної прямої лінії. Ця похибка дорівнює напівсумі абсолютних значень максимальних позитивної та негативної похибок в діапазоні кутів $-60^\circ \dots +60^\circ, \%$.

Залежно від величини погрешності ЛОТ діляться на три класи точності (табл. 2).

Таблиця 2.

Параметр точності	Клас точності		
	0,05	0,1	0,2
Похибка відображення лінійної залежності, %	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$
Остаточна ЕРС, %, не більше	0,025	0,05	0,1

2.3. Масштабні ОТ

Масштабні ОТ застосовуються для узгодження напруг різних малопотужних каскадів. У цьому випадку ОТ використовуються як регулятори напруги. Принцип дії розглянутих машин нічим не відрізняється від принципу дії СКОТ, розглянутого раніше. Повертаючи ротор трансформатора, змінюють напругу його вихідної обмотки. Після того, як потрібне значення вихідної напруги досягнуто, ротор фіксується спеціальним стопорним пристроєм, яким забезпечуються трансформатори. Наявністю цього пристрою і понижуючого редуктора, що дозволяє плавно повертати ротор, масштабні обертові трансформатори відрізняються від ОТ інших типів.

2.4. Обертові трансформатори в режимі фазообертача

У схемах автоматики та обчислювальної техніки ОТ досить часто використовуються як однофазні та двофазні фазообертачі, наприклад для перетворення кута в двійковий код.

При використанні ОТ в якості двофазного фазообертача на його статорні обмотки подаються напруги, рівні по амплітуді і зсунуті по фазі на 90° .

Такі напруги можуть бути отримані або від симетричної двофазної мережі, або від однофазної мережі за допомогою конденсатора. У машині створюється кругове обертове поле, яке, перетинаючи обмотки ротора, наводить в них постійні по амплітуді ЕРС. Фаза цих ЕРС залежить від положення ротора – кута ϑ :

$$\dot{U}_{\text{вixs}} = U_m e^{-j\vartheta}; \dot{U}_{\text{вixc}} = U_m e^{-j(90^\circ + \vartheta)}.$$

Останній вираз є справедливим в ідеальному випадку.

Існуючі двополюсні синусно - косинусні ОТ забезпечують точність в режимі фазообертвача в межах від $\pm 15 \dots 45$ кутових хвилин.

Багатополюсні ОТ мають похибку в кілька разів менше.

У фазообертвачів з електричною редукцією, призначених для перетворювачів кут - код, доцільно мати число пар полюсів, кратне 2^n .

Такі передатні відношення можуть бути отримані на базі редуктосинів. Число зубців ротора редуктосина має дорівнювати 32, 64, 128 і т.д. При цьому відношення зубців статора і ротора може бути різним.

2.5. Побудовні ОТ

Обертовий трансформатор - практично ідеальний пристрій з точки зору пристосованості до вирішення різних задач з перетворення координат. За допомогою ОТ можна перетворювати координати вектора з декартової системи в полярну і з однієї декартової системи в іншу, повернену щодо першої на деякий кут. Працюючий у такому режимі ОТ називається побудовником.

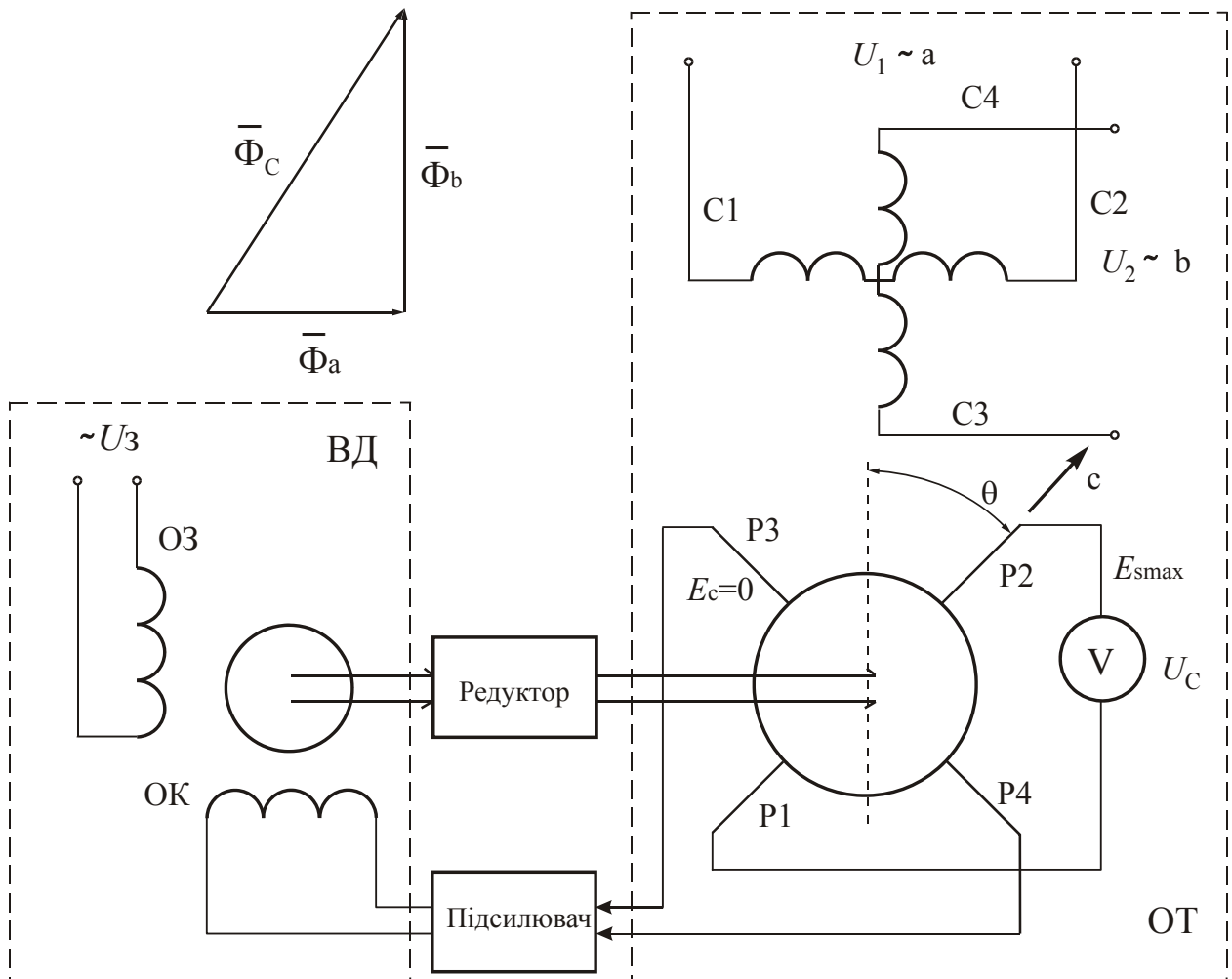
Робота схеми перетворення декартових координат у полярні зводиться до визначення гіпотенузи (як по модулю, так і куту) прямокутного трикутника за двома заданими катетами a і b . При цьому на обмотки статора С1-С2 і С3-С4 (рис. 2.8) подаються напруги, пропорційні катетам: $U_1 \sim a$, $U_2 \sim b$. Результуючий потік первинних обмоток Φ_c буде дорівнює геометричній сумі поздовжнього Φ_a і поперечного Φ_b потоків. Значення потоку можна визначити за значенням ЕРС кожної з обмоток ротора, якщо його повернути на кут ϑ так, щоб вісь обмотки збігалася з напрямком потоку. Прийнемо за таку обмотку Р1-Р2. При збігу її осі з напрямком потоку Φ_c ЕРС обмотки Р1-Р2 буде максимальною. ЕРС іншої обмотки ротора, Р3-Р4 (назвемо її сигнальною), буде в цьому випадку дорівнювати нулю, тому що її вісь перпендикулярна потоку Φ_c :

$$E_s = U_1 \cos \vartheta + U_2 \sin \vartheta = k\Phi_c; E_c = 0.$$

Максимальна ЕРС ($U_{\text{P1-P2}}$) прямо пропорційна модулю вектора. Таким чином, $U_{\text{P1-P2}}$ у деякому масштабі виражає модуль вектора в полярній системі координат, а кут повороту ротора ϑ - аргумент вектора.

На практиці розглянуте перетворення координат відбувається автоматично за допомогою нескладної слідкуючої системи, у яку, крім ОТ, входять підсилювач, виконавчий двигун ВД і редуктор (рис. 2.8). Напруга сигнальної обмотки Р3 -Р4 подається через підсилювач на обмотку керування (ОК) ВД,

вал якого через редуктор з'єднаний з валом ротора ОТ. При подачі напруги на обмотки С1-С2 і С3-С4 у сигнальній обмотці Р3-Р4 наводиться ЕРС, що через



ОК - обмотка керування двигуна
ОЗ - обмотка збудження двигуна

Рис.2.8. ОТ в режим будівника вектора

підсилювач впливає на виконавчий двигун. Ротор двигуна обертається доти, поки обмотка Р3-Р4 не займе положення, перпендикулярного до потоку Φ_c .

При необхідності перетворення координат вектора з однієї декартової системи в іншу, повернену щодо першої на кут ϑ , необхідно ротор трансформатора повернути на кут ϑ . При подачі на обмотки С1-С2 і С3-С4 напруги, пропорційної абсциссі і ординаті кінця вектора в першій системі координат, ЕРС обмоток ротора Р1 –Р2 і Р3 -Р4 будуть пропорційні абсциссі і ординаті кінця вектора в другій координатній системі.

2.6. Обертові трансформатори в системах дистанційної передачі кута

Системи синхронного зв'язку знаходять застосування в ланцюгах автоматичного контролю, керування і регулювання.

Під системою синхронного зв'язку розуміють сукупність пристроїв, що слугують для передачі на відстань кутових або лінійних переміщень, а також

для синхронного і синфазного обертання двох або більше механічно не зв'язаних осей.

Систему синхронного зв'язку, що підтримує синхронне обертання осей (валів), часто називають системою електричного валу. Систему синхронного зв'язку, що передає електричним шляхом на відстань кутові переміщення, називають системою передачі кута або синхронного повороту.

В якості датчика і приймача в таких системах застосовуються однофазні сельсіни, кільцеві потенціометричні датчики і синусно – косинусні обертові трансформатори.

Так як ОТ найбільш точні з перерахованих машин, то точність схем синхронного зв'язку на обертових трансформаторах вище точності інших систем синхронного зв'язку, у зв'язку з чим в даний час вони набули найбільшого поширення.

На рис. 2.9 показана одна з таких схем. До її складу входять два ОТ, пі-

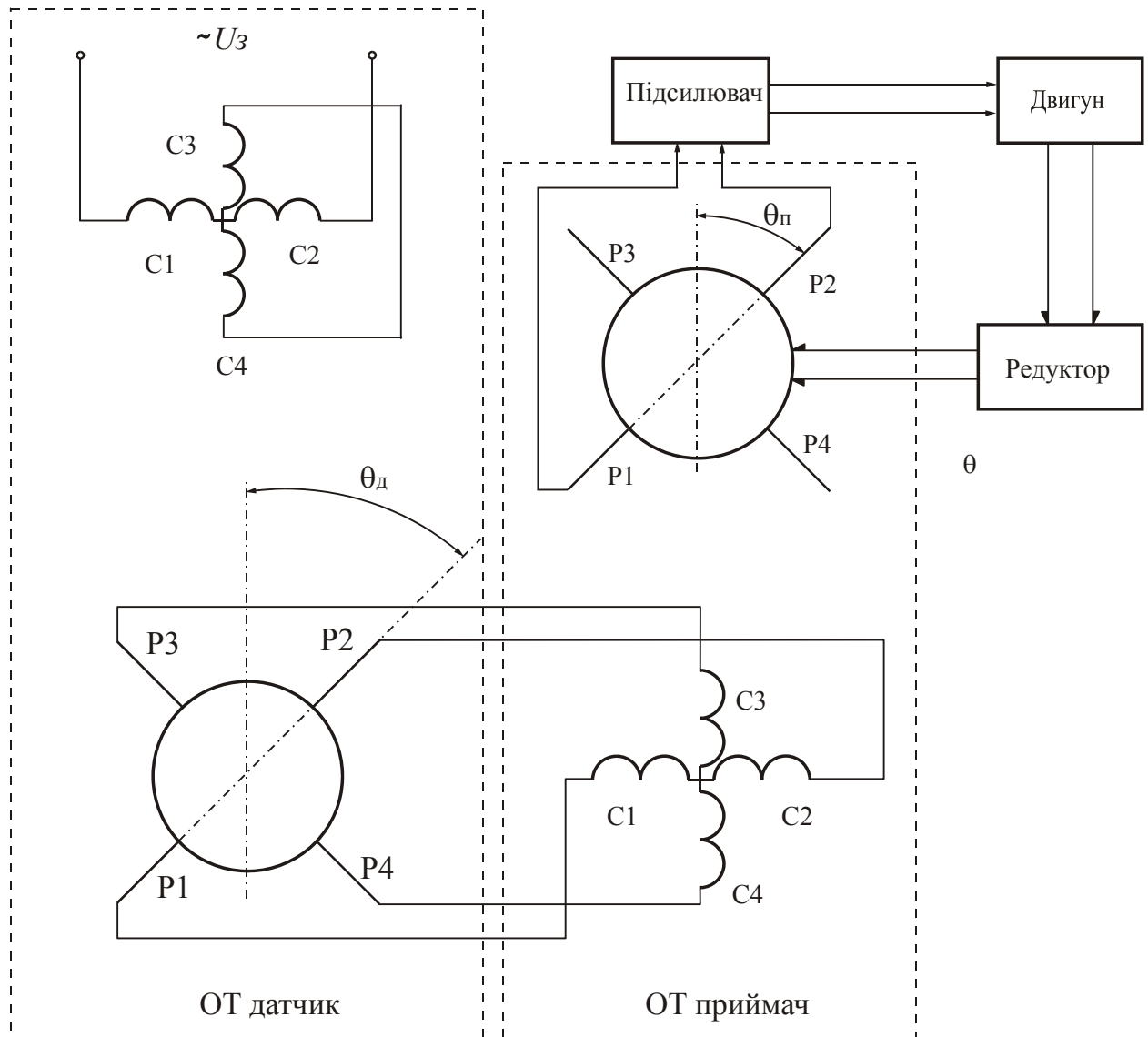


Рис. 2.9. Трансформаторна дистанційна передача кута

дсилювач і виконавчий двигун з редуктором. Один з поворотних трансформаторів виконує роль датчика (ОТД), другий – приймача (ОТП). Ротори їх кінематично пов'язані з відповідними валами систем. Така система - приклад найпростішого і, можна сказати, найпоширенішого каскадного з'єднання двох ОТ: ОТД працює в режимі СКОТ, ОТП - у режимі побудовника вектора. Відповідні обмотки їх з'єднані між собою, напруга живлення подається на первинну обмотку датчика ОЗ. Квадратурна обмотка його зазвичай закорочується.

Якщо ротор ОТ датчика повернути на кут ϑ_0 , з його роторних обмоток будуть зніматися напруги, обумовлені виразами (2.1) і (2.2), які подаються на обмотку збудження і квадратурну обмотку ОТ приймача.

Струми, що проходять по статорних обмотках приймача, викликають появу двох магнітних потоків (подовжнього і поперечного), зсунутих один щодо іншого на 90 електричних градусів. Значення кожного з цих потоків буде пропорційне відповідним напругам на роторних обмотках датчика.

Результуючий магнітний потік приймача буде дорівнює геометричній сумі подовжнього і поперечного потоків і повернутий на кут ϑ_n щодо осі обмотки збудження приймача. Якщо ротор ОТП повернути на кут $\vartheta_n = \vartheta_0$, одна з його обмоток установиться перпендикулярно до осі результуючого магнітного потоку і напруга на ній дорівнюватиме нулю. При погодженому положенні вихідного і вхідного валів системи напруга на вході підсилювача відсутня і виконавчий двигун не обертається. При наявності кута неузгодженості між осями задаючого і приймаючого пристроїв ($\vartheta_n \neq \vartheta_0$) на вході підсилювача з'являється напруга - сигнал неузгодженості. Ця напруга підсилюється до значення, необхідного для керування виконавчим двигуном ВД. Двигун обертається і через редуктор повертає ротор ОТП і навантаження. При цьому в ідеальному випадку напруга керування стає рівною нулю і двигун зупиняється.

Похибку слідування в ТДП оцінюють відхиленням положення узгодження ОТ - приймача від кутового положення, що задається ВТ - датчиком. За похибку слідування, відображену в кутових хвилинах, приймають напівсуму абсолютних значень найбільших відхилень різних знаків положення узгодження приймача.

В залежності від величини погрішності в трансформаторній системі передачі кута ОТ діляться на сім класів точності (див. таблицю 3).

Таблиця 3.

Параметр точності	Клас точності						
	1	2	3	4	5	6	7
Погрішність слідування в дистанційній передачі кута в трансформаторному режимі, кут. хв.	±1	±2	±3	±5	±10	±20	±30

У реальних схемах після відпрацювання сигналів неузгодженості в

сталому режимі існує деяка неузгодженість між вхідними і вихідними валами, яка називається статичною помилкою. Причини її появи - погрішності ОТ, тертя в механізмі, погрішності підсилювача.

При безперервному обертанні датчика виникає додатковий кут неузгодженості.

Один зі шляхів підвищення статичної точності синхронної передачі - створення двоканальних систем, що працюють за методом грубого і точного відліків.

У двоканальній системі з механічною редукцією осі дво полюсних датчиків грубого і точного відліків пов'язані за допомогою прискорюючого редуктора (мультиплікатора) з передавальним відношенням $n:1$, тобто кути повороту датчиків каналів грубого $\mathcal{G}_{\text{дг}}$ і точного $\mathcal{G}_{\text{дт}}$ відліків пов'язані співвідношенням $\mathcal{G}_{\text{дт}} = n \mathcal{G}_{\text{дг}}$, а осі дво полюсних приймачів - за допомогою редуктора, що сповільнює, з передавальним відношенням $1:n$.

Крутизна вихідної напруги каналу точного відліку буде в n разів більше (рис.2.10).

Вихідні напруги каналів грубого і точного відліків поступають на під-

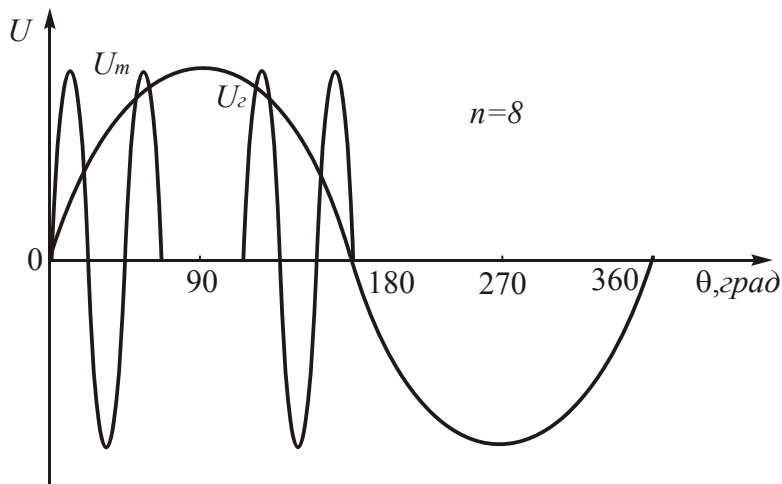


Рис. 2.10. Напруга з ОТД грубого і точного відліків

силювач, який живить обмотку керування виконавчого двигуна. Останній через редуктор повертає об'єкт управління і ротори приймачів на заданий кут.

Введення редуктора призводить до порушення властивості самосинхронізації каналу точного відліку при великих кутах неузгодженості. Це пояс-

нюється тим, що повний період зміни вихідної напруги каналу точного відліку дорівнює $360^\circ/n$, тобто в межах 360° існують n стійких положень, при яких напруга на роторній обмотці приймача дорівнює нулю. Наприклад, при $n=30$ повний період зміни вихідної напруги $360^\circ:30=12^\circ$. Тоді при неузгодженості на кут, більший $\pm 6^\circ$, система буде узгоджуватися біля найближчого сталого нуля.

Для усунення цього явища як раз і використовується канал грубого відліку з передавальним відношенням $1:1$ і синхронізуючий пристрій. Отримана таким чином двоканальна система має синхронізацію в межах 360° і підвищену точність.

Синхронізуючий пристрій забезпечує послідовну роботу каналів грубого і точного відліків в двоканальній слідкуючій системі. При малому куті не-

узгодженості двигун керується від вихідної напруги каналу точного відліку, а при великому куті синхронізуючий пристрій автоматично перемикає підсилювач на вихідну напругу каналу грубого відліку. При цьому слідкуюча система приводиться в узгоджене положення з точністю каналу точного відліку.

Похибки дистанційної передачі для грубого і точного каналів відліку відповідно мають вигляд:

$$\Delta \vartheta_z = \Delta U / k; \quad (2.6)$$

$$\Delta \vartheta_m = \Delta U / nk, \quad (2.7)$$

де – k - крутість вихідної напруги каналу грубого відліку; ΔU - амплітудна напруга похибки.

Підставивши у вираз (2.6) формулу (2.7), отримаємо

$$\Delta \vartheta_m = \Delta \vartheta_z / n. \quad (2.8)$$

Таким чином, в двоканальній дистанційній передачі статична похибка каналу точного відліку буде в n разів менше, де n - передавальне відношення редуктора між осями датчиків і приймачів.

Вираз (2.8) справедливий лише для випадку, коли кутова похибка в зачепленні редуктора дорівнює нулю. На практиці похибка, що обумовлена неточністю виготовлення шестерень редуктора, може обчислюватися декількома хвилинами (2...5') при найвищому класі точності виготовлення. У зубчастому зачепленні має місце також люфт не менше 1'.

Основним напрямком при створенні дистанційної передачі кута підвищеної точності з похибкою менше 1' є застосування в двоканальній системі принципу електричної редукції. Двоканальна система з електричною редукцією відрізняється від системи з механічною редукцією тим, що: 1) датчик і приймач кута точного відліку є багатополюсними ОТ з числом пар полюсів $h_m > 2$, 2) механічні редуктори замінені прямими механічними зв'язками з передавальним відношенням 1.

2.7. Рекомендації щодо вибору і застосуванню обертових трансформаторів

Умовні позначення ВТ розшифровуються таким чином:

ВТМ-Б, МВТ-2, МВТ-Б - буква М позначає малогабаритний;

ВТ-5, 2,5ВТ, 1,2ВТ-2ТВ – цифри означають зовнішній діаметр корпусу ОТ в сантиметрах, ВТ-20-Д29 - ОТ із зовнішнім діаметром корпусу 20 мм;

СКТ-225-2, СКТ-220-1 - синусно - косінусний трансформатор, перша цифра 2 - двополюсний СКТ, дві наступні цифри (25 і 20 відповідно) - зовнішній діаметр корпусу СКТ в міліметрах і наступна цифра (2 і 1 відповідно) - номер розробки СКТ в корпусному виконанні;

МТ-5, 4МВТ - масштабні ОТ із зовнішнім діаметром корпусу 50 і 40 мм;

БСКТ-232-1, БСКТ-220-1 - безконтактні двополюсні СКТ із зовнішнім діаметром корпусу відповідно 32 і 20 мм;

ВТП-1, ВТП-4 - плоскі ОТ з числом пар полюсів відповідно 1 і 4.

Точнісні можливості тих чи інших виробів необхідно розглядати стосовно до конкретних схемних рішень. При високих вимогах до вагогабаритних показників виробу, до складу якого входить ОТ, необхідно враховувати, що зі зменшенням габаритних розмірів машини точність її знижується (рис. 2.11).

Для забезпечення вимог по надійності більш доцільно застосовувати безконтактні конструкції ОТ. Однак при цьому необхідно враховувати, що параметри і характеристики, що визначають точність у безконтактних ОТ, дещо поступаються контактним.

При роботі ВТ в каскадних схемах напруга живлення їх може мати як постійну амплітуду, так і змінюватися в досить широких межах. Внаслідок того, що при малих значеннях напруг крива намагнічування пермалоя 79НМ

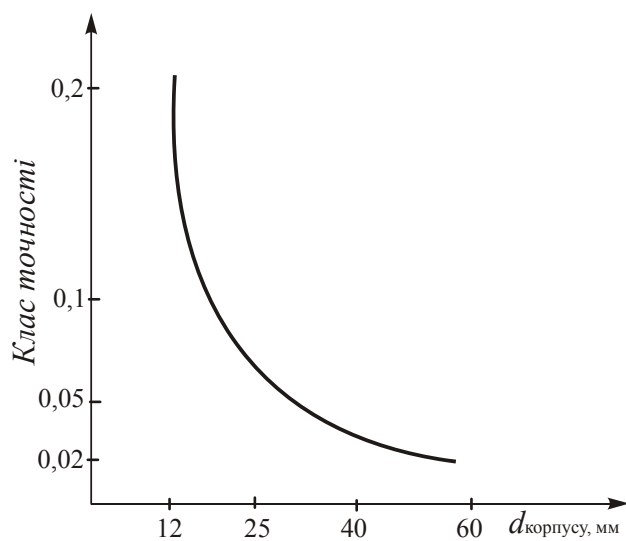


Рис. 2.11. Залежність похибки ОТ від його діаметру

більш лінійна, ніж пермалоя 50Н та електротехнічної сталі, при побудові каскадних схем на початку каскаду рекомендується використовувати ОТ з магнітопроводом з пермалоя 50Н або електротехнічної сталі, а всі наступні ОТ - з магнітопроводом з пермалоя 79НМ.

Трансформаторна дистанційна передача на ОТ являє собою окремий випадок каскадної схеми. Кількість ОТ - приймачів (їх може бути від одиниці до кількох десятків штук) визначається потужністю, а, отже, і габаритними розмірами ОТ-датчика. Зменшення взаємного впливу ОТ-приймачів досягається

вторинним симетруванням, однак крутизна вихідного сигналу при цьому зменшується. Відносна постійність крутизни при великому числі ВТ - приймачів забезпечується застосуванням ОТ - датчиків з малим вхідним опором

Зменшенню похибки трансформаторної дистанційної передачі в більшості випадків сприяє первинне симетрування ОТ - датчика.

Електромагнітні поля впливають на дроти, по яких передаються напруги сигнальних ланцюгів. Зменшити ці впливи можна, в першу чергу, скороченням довжини з'єднувальних проводів. Найбільш поширена міра захисту від зовнішніх полів - укладення проводів з сигнальною напругою в заземлений металевий екрануючу панчоху.

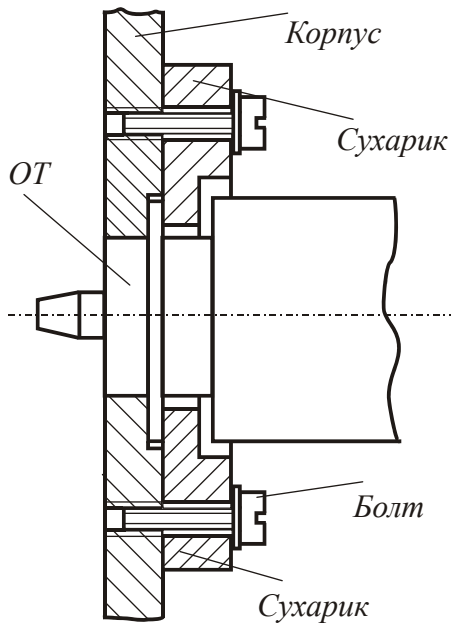


Рис. 2.12. Варіант кріплення ОТ

Для ОТ найбільш раціональне фланцеве кріплення, один з варіантів якого показаний на рис. 2.12. На посадочне місце ОТ встановлюють за допомогою спеціальних накладок (сухариків), що вставляються у виїмку корпусу, при цьому повинна бути забезпечена щільна посадка центруючого буртика в росточку місця кріплення.

Не допускається кріплення ОТ за корпус, так як це може призвести до порушення рівномірності повітряного зазору, а отже, і до втрати точності.

Додаткові похибки механічного походження можуть з'явитися через неточність з'єднання валів ОТ з валами приводних двигунів (неспіввісність зчленування валів зазвичай не повинна перевищувати 0,01 мм). Як з'єднувальні пристрої широко застосовуються пристрої з центруючою втулкою і типу хрестової муфти, а також спеціальні муфти.

вуються пристрої з центруючою втулкою і типу хрестової муфти, а також спеціальні муфти.

Питання для самоперевірки

1. З яких частин складається обертовий трансформатор? Назвіть його обмотки і вкажіть їх призначення.
2. У яких режимах роботи використовуються ОТ? Поясніть принцип роботи в кожному режимі.
3. Назвіть і поясніть способи симетрування ОТ.
4. Які задачі і як можна вирішувати за допомогою ОТ в режимі перетворювача координат?
5. У якому діапазоні кутів повороту ротора ОТ має лінійну вихідну характеристику?
6. Поясніть принцип роботи індукційного компаса, в якому використовується ОТ в режимі перетворювача координат.
7. Як поділяються ОТ за класами точності?
8. Які способи зменшення похибок ОТ застосовують на практиці?
9. У скільки разів потенційно (без урахування інших джерел погрішностей) можна зменшити погрішність одноканальної дистанційної передачі кута на обертових трансформаторах при використанні двоканальної системи, якщо трансформатори точного каналу мають n пар полюсів?

3. Сельсини

Сельсини (від англ. self synchronizing «що самосинхронізуються») - індукційні електричні машини, що використовуються в синхронних передачах, що самосинхронізуються.

Історично склалося так, що першими елементами в системах передачі кута були використані сельсини і така передача була названа індикаторною. Після винаходу обертових синусно - косинусних трансформаторів була запропонована система передачі кута, названа трансформаторною, принцип роботи якої розглянуто в попередньому розділі. Потім з'явилася побудована за цим же принципом система з використанням сельсинів, названа трансформаторною системою дистанційної передачі кута на сельсинах. Оскільки ОТ з меншими інструментальними похибками виконати простіше і функціональні можливості їх більше, ніж сельсинів, системи передачі кута з використанням ОТ в даний час використовуються частіше.

Залежно від функцій, що виконуються сельсином в системах синхронного зв'язку, розрізняють: сельсини - датчики, індикаторні сельсини - приймачі, трансформаторні сельсини - приймачі, диференціальні сельсини - датчики і приймачі.

У системах електричного валу застосовують трифазні сельсини, а в системах передачі кута - однофазні сельсини.

Існують різні конструктивні виконання сельсинів, але при цьому обов'язковою є наявність обмоток збудження і синхронізації. Обмотка збудження в однофазних сельсинах однофазна, а в трифазних - трифазна.

Електрична схема однофазного сельсина представлена на рис. 3.1.

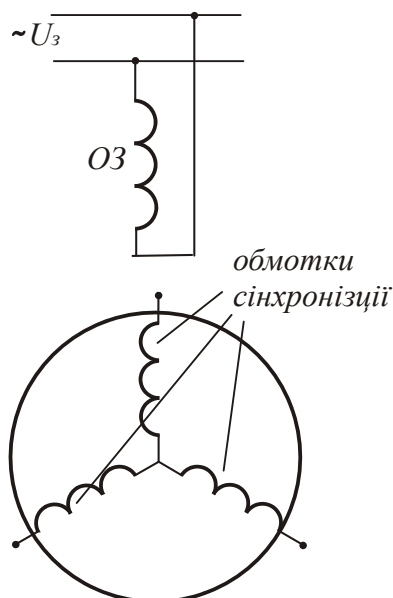


Рис. 3.1. Електрична схема сельсина

Обмотка збудження є однофазною і підключається до джерела змінного струму. Обмотки синхронізації складаються із трьох однофазних обмоток, осі яких зміщені в просторі на кут 120° і з'єднані в зірку. У більшості випадків обмотка збудження розташовується на роторі, а синхронізації - на статорі.

Виводи роторних обмоток сельсина маркуються буквою Р, а статорних - буквою С незалежно від призначення обмоток.

Однофазний сельсин являє собою поворотний трансформатор, в якому обмотка збудження створює пульсуючий магнітний потік. Цей потік, проходячи по магнітопроводу сельсина, перетинає обмотки синхронізації і наводить в них ЕРС, що залежать від кута повороту ротора. Так як при повороті ротора взаємодуктивність між обмоткою збудження і обмоткою синхронізації плавно змінюється за законом косинуса, то в променах обмотки синхронізації будуть наводитися ЕРС, пропорційні коси-

нуса кута повороту ротора.

Для самосинхронізації в межах одного оберту сельсини виконуються з однією парою полюсів.

Конструктивно сельсини діляться на контактні і безконтактні.

Однофазні сельсини використовують в індикаторному і трансформаторному режимах. При цьому система незалежно від режиму роботи складається із сельсина - датчика (СД) і одного або декількох сельсинів - приймачів (СП). СД механічно пов'язаний з об'єктом контролю або органом керування. СП або безпосередньо відпрацьовує кут повороту, що задається датчиком (індикаторний режим), або перетворює його в електричний сигнал, що відпрацьовується виконавчим двигуном (трансформаторний режим).

3.1. Індикаторний режим роботи сельсинів

Індикаторний режим може бути використаний, якщо на валу сельсина - приймача знаходиться вимірювальний прилад з досить малим моментом спротиву (наприклад, шкала, збалансована стрілка) і вимоги до точності передачі не дуже високі.

Електрична схема роботи сельсинів в індикаторному режимі представлена на рис. 3.2.

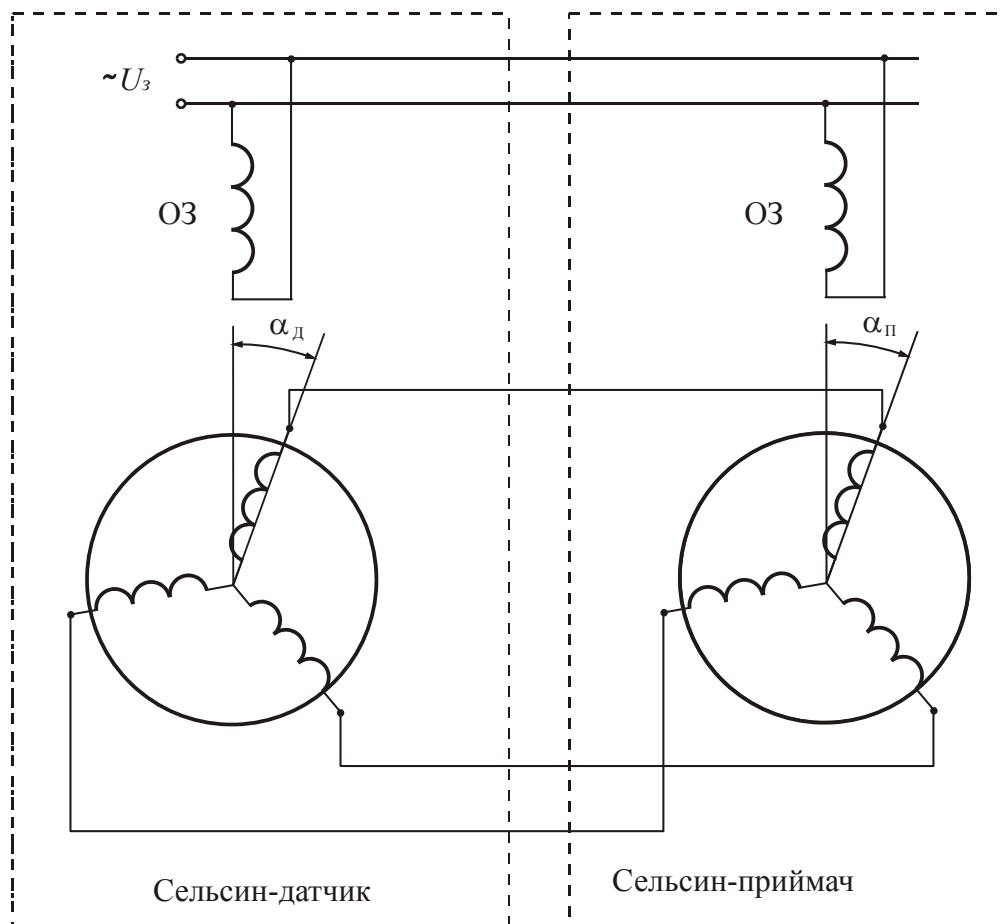


Рис.3.2. Індикаторний режим

Обмотки збудження (ОЗ) сельсинів датчика і приймача живляться від

одного джерела змінного струму. Струми, що протікають в ОЗ, створюють у цих обмотках потоки збудження, які індуктують в обмотках синхронізації ЕРС. Значення цих ЕРС у кожному сельсині залежать від взаємного положення осей обмотки збудження і обмоток синхронізації. Для сельсина – датчика ЕРС в променях обмотки синхронізації:

$$E_{\partial 1} = E_{\max} \cos \alpha_{\partial};$$

$$E_{\partial 2} = E_{\max} \cos(\alpha_{\partial} - 120^{\circ});$$

$$E_{\partial 3} = E_{\max} \cos(\alpha_{\partial} - 240^{\circ}),$$

де α_{∂} - кут повороту ротора сельсина – датчика від узгодженого положення (за узгоджене положення приймається таке, коли промінь обмотки синхронізації сельсина – датчика, в якому наводиться ЕРС $E_{\partial 1}$, співвісний з обмоткою збудження); E_{\max} - найбільше діюче значення ЕРС в промені обмотки синхронізації, що відповідає збігу осі променя обмотки синхронізації і обмотки збудження; $E_{\partial 1}, E_{\partial 2}, E_{\partial 3}$ - ЕРС відповідних променів синхронізації сельсина – датчика.

Для сельсина – приймача ЕРС в променях обмотки синхронізації:

$$E_{n1} = E_{\max} \cos \alpha_n;$$

$$E_{n2} = E_{\max} \cos(\alpha_n - 120^{\circ});$$

$$E_{n3} = E_{\max} \cos(\alpha_n - 240^{\circ}),$$

де α_n - кут повороту ротора сельсина – приймача від узгодженого положення (узгоджене положення те ж, що і для сельсина - датчика); E_{n1}, E_{n2}, E_{n3} - ЕРС відповідних променів синхронізації сельсина - приймача.

Відзначимо, що в цих рівняннях замість векторних величин записані скаляри, так як всі ЕРС в них мають однакову часову фазу (однофазна система).

Якщо в якості датчика і приймача обрані ідентичні сельсини, то при однаковому положенні роторів СД і СП щодо обмоток статорів, ЕРС в обмотках синхронізації будуть рівні за величиною і протилежні за фазою. Струм у лінії зв'язку відсутній. Таке положення датчика і приймача називають погодженим. Кут неузгодженості $\alpha = \alpha_{\partial} - \alpha_n = 0$.

Якщо $\alpha_{\partial} \neq \alpha_n$, то ЕРС в обмотках синхронізації СД і СП будуть відрізнятися. Внаслідок цього у лініях зв'язку і обмотках синхронізації потечуть зрівнювальні струми, які без урахування опорів ліній зв'язку після нескладних тригонометричних перетворень можна представити у вигляді

$$I_1 = \frac{E_1}{2z} = I_{\max} \sin(\alpha_{\partial} - \frac{\alpha}{2}) \sin \frac{\alpha}{2};$$

$$I_2 = \frac{E_2}{2z} = I_{\max} \sin(\alpha_{\partial} - 120^{\circ} - \frac{\alpha}{2}) \sin \frac{\alpha}{2};$$

$$I_3 = \frac{E_3}{2z} = I_{\max} \sin(\alpha_{\partial} + 120^{\circ} - \frac{\alpha}{2}) \sin \frac{\alpha}{2},$$

де I_{\max} - найбільшу діюче значення струму; $E_i = E_{\partial i} - E_{n i}; i = 1, 2, 3$; z - мо-

дуль повного опору променя одного сельсина.

Ці струми, взаємодіючи з потоками збудження, створюють електромагнітні моменти, що прагнуть повернути ротори сельсинів у погоджене положення, тобто до $\alpha = \alpha_0 - \alpha_n = 0$. Ротор датчика звичайно пов'язаний з механізмом, що задає, і позбавлений свободи обертання. Тому повертатися буде тільки ротор приймача, поки не настане знову погоджене положення роторів. Момент, що повертає ротор приймача, називається синхронізуючим. Його значення наближено визначається залежністю

$$M_c \approx k \sin \alpha \quad (3.1)$$

де k - коефіцієнт, що залежить від конструктивних особливостей сельсина і параметрів живлення.

Реальна залежність $M_c = f(\alpha)$ відрізняється від синусоїди за рахунок гальмівного моменту, обумовленого поперечною складовою потоку. Для її зменшення індикаторні сельсини часто виконують із короткозамкненою обмоткою по поперечній осі, або явнополюсними, у яких великий повітряний зазор по поперечній осі.

Найважливішою характеристикою сельсина є питомий синхронізуючий момент. Під ним розуміють величину синхронізуючого моменту, що припадає на один градус кута неузгодженості в початковій точці характеристики:

$$m_{num} = \left(\frac{dM_c}{d\alpha} \right)_{\alpha=0}.$$

Точність роботи сельсинів в індикаторному режимі залежить від наступних факторів:

- питомого синхронізуючого моменту;
- власного моменту тертя СП і моменту опору на його валу;
- опору лінії зв'язку;
- магнітної і електричної асиметрії машини;
- кількості приймачів, що працюють від одного датчика;
- дебалансу ротора приймача;
- напруги і частоти живлення.

Практично між роторами СД і СП завжди існує неузгодженість - кут статичної помилки, що обумовлена перерахованими вище факторами. Найбільший кут статичної похибки визначає величину зони нечутливості системи:

$$\beta = \pm M_T / m_{num} \quad (3.2)$$

де M_T - сума шкідливих моментів; m_{num} - питомий синхронізуючий момент, тобто синхронізуючий момент при $\alpha = 0$.

В залежності від величини погрішності в індикаторній системі передачі кута сельсини діляться на чотири класи точності (табл. 3.1).

Таблиця 3.1.

Параметр точності	Клас точності			
	1	2	3	4
Погрішність проходження в дистанційній передачі кута в індикаторному режимі, кут. хв	±30	±45	±60	±90

Значення синхронізуючого моменту i , відповідно, точність індикаторної передачі, зменшується при збільшенні опорів ліній зв'язку, так як це призводить до зменшення зрівнювальних струмів при однакових кутах неузгодженості.

У схемах автоматики часто застосовують схеми, де від одного датчика працює кілька приймачів. У таких випадках як датчик використовують потужніший сельсин, ніж приймачі.

3.2. Трансформаторний режим роботи сельсинів

Трансформаторний режим застосовується для дистанційної передачі кутових переміщень об'єкту, момент опору якого вище моменту, що розвиває сельсин в індикаторному режимі при досить високій точності відпрацювання переміщення.

Електрична схема роботи сельсинів у трансформаторному режимі представлена на рис. 3.3 і повністю аналогічна відповідній схемі на обертових трансформаторах.

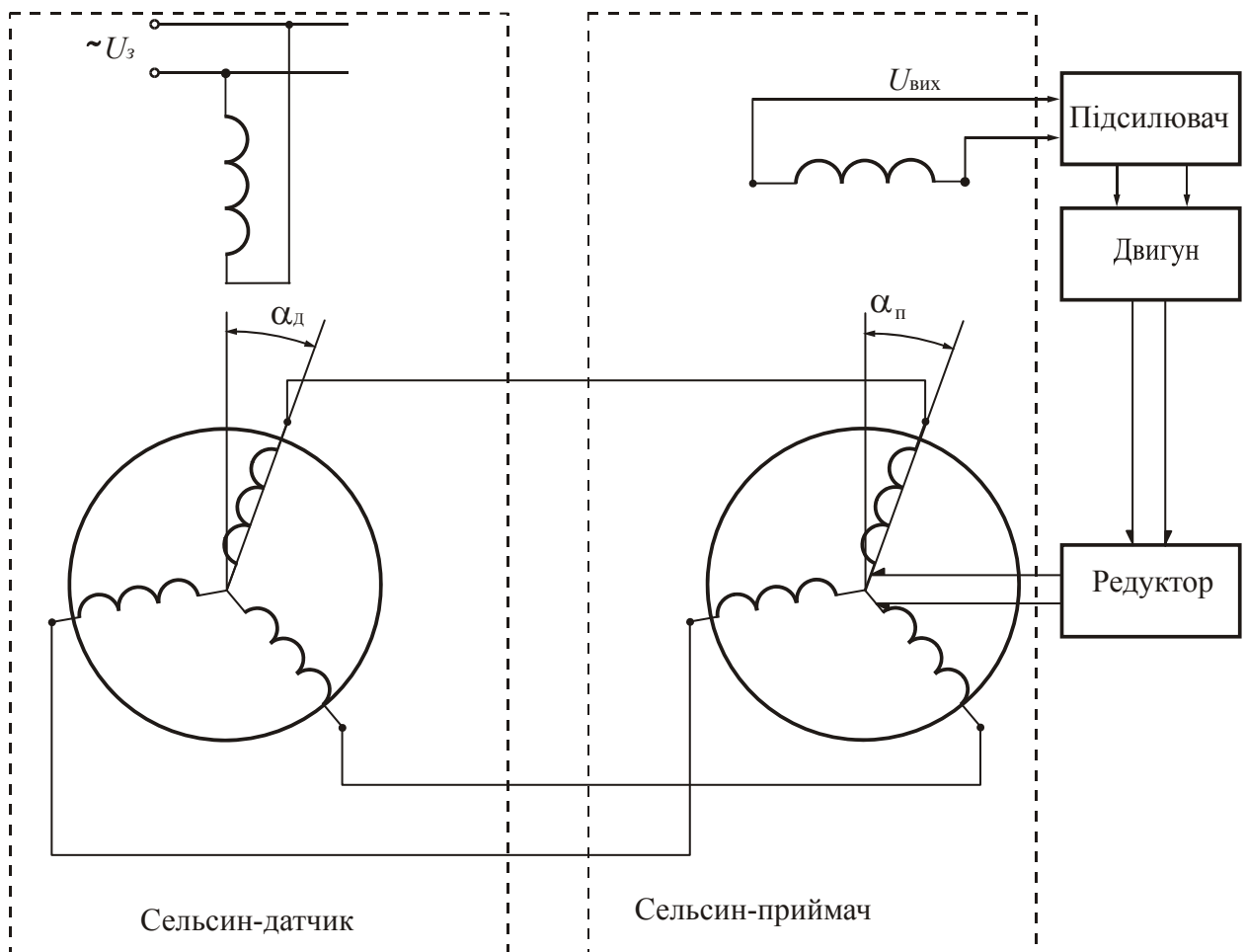


Рис. 3.3. Трансформаторний режим

Схема складається із сельсина - датчика, сельсина - приймача, ліній зв'язку, підсилювача, виконавчого двигуна і редуктора.

При подачі напруги на обмотку збудження СД і деякому куті неузго-

дженості α між положеннями роторів датчика і приймача на обмотці збудження СП виникає напруга $U_{вих}$. Вона підсилюється підсилувачем і надходить на обмотку керування виконавчого двигуна, що через редуктор обертає ротор СП. Обертання здійснюється доти, поки напруга $U_{вих}$ не буде дорівнювати нулю, тобто коли наступить погоджене положення роторів СД і СП.

Точність роботи сельсинів у трансформаторному режимі залежить від наступних факторів:

- значення залишкової ЕРС;
- розподілу індукції в повітряному зазорі;
- крутизни вихідної напруги СП.

Залежно від величини погрішності в трансформаторній системі передачі кута сельсини діляться на сім класів точності (див. табл. 3.2).

Таблиця 3.2.

Параметр точності	Клас точності						
	1	2	3	4	5	6	7
Погрішність проходження в дистанційній передачі кута в трансформаторному режимі, кут. хв..	±1	±2	±3	±5	±10	±20	±30

Точність роботи сельсинів у трансформаторному режимі вище, ніж в індикаторному. Це обумовлено тим, що в трансформаторному режимі момент опору навантаження долається досить великим моментом виконавчого двигуна.

Одним із шляхів подальшого підвищення точності передачі кута є створення двоканальних систем, що працюють за методом грубого і точного відліків точно так, як з використанням обертових трансформаторів.

Питання для самоперевірки

1. Чим конструктивно відрізняється сельсин від синусно - косинусного обертового трансформатора?
2. Назвіть основні переваги і недоліки індикаторної дистанційної передачі кута на сельсинах.
3. Назвіть основні переваги і недоліки трансформаторної дистанційної передачі кута на сельсинах.
4. Наведіть схему індикаторної дистанційної передачі кута на сельсинах.
5. Наведіть схему трансформаторної дистанційної передачі кута на сельсинах.
6. Як поділяються сельсини за класами точності?
8. Які способи зменшення похибок сельсинів застосовують на практиці?
9. Який питомий синхронізуючий момент повинен мати сельсин - приймач в індикаторній системі передачі кута, щоб статична похибка від моментів тертя $M_{TP} = 10^{-3}$ Нм не перевищувала $0,5^\circ$?

Література

1. Баканов М.Ф. Информационные микромашины следящих и счетно-решающих систем/ М.Ф.Баканов. - М.: "Советское радио", 1977.-87 с.
2. Копылов И.П. Справочник по электрическим машинам, т.2/ И.П. Копылов. - М.:Энергоатомиздат, 1989.-688 с.
3. Кухлинг Х. Справочник по физике/ Х. Кухлинг. - М.: "МИР", 1982.-519 с.
4. Баканов М.Ф. Информационные микромашины следящих и счетно-решающих систем/М.Ф. Баканов. М.: "Советское радио", 1977.-87 с.
5. Арменский Е.В. Электрические микромашины/ Е.В. Арменский. - М.: Высшая школа, 1968.-212 с.
6. Брускин А.Э. Электрические машины и микромашины/ А.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. - М.: Высшая школа, 1981.-432 с.

Додатки

Д.1. Характеристики деяких тахогенераторів

Д.1.1. Тахогенератори типу ТГП і ТП

Колекторні тахогенератори постійного струму типу 2,5ТГП-6, ТП32-25-01, ТП32-16-2,5 виконуються з порожнім ротором, інші - з зубчатим. Кріплення - фланцеве з упорним буртиком. Режим роботи - тривалий.

Технічні дані тахогенераторів наведено в табл. Д.1.1, габаритні і установочні розміри - в табл. Д.1.2 і рис. Д.1.1.

Умови експлуатації:

Вібраційні навантаження:

діапазон частот, Гц:

1,6 ТГП-2, 2,5 ТГП-6 1...3000,

ТП20-6-0,5, ТП32-25-0,1, ТП32-16-2,5 1...2000,

прискорення, м/с²

1,6 ТГП-2, 2,5 ТГП-6 150,

ТП20-6-0,5, ТП32-25-0,1, ТП32-16-2,5. 100.

Ударні навантаження, м/с²

2,5 ТГП-10 160,

Інших типів 400.

Температура навколишнього середовища, °С

1,6 ТГП-2 -60...+85,

2,5 ТГП-6, ТП20-6-0,5, ТП32-25-0,1, ТП32-16-2,5 -60...+70,

2,5ТГП-10 -30 ... +50.

Відносна вологість повітря при температурі 40 °С, % 98.

Таблиця Д.1.1. Основні технічні дані тахогенераторів ТГП і ТП

Тип	$n_{\text{ном}}$, об/хв	k , мВ/ (об/хв.)	$R_{\text{н}}$, кОм	J_p , 10^{-7} кгм ²	$M_{\text{тер}}$, 10^{-4} Нм	$\tau_{\text{ем}}$, мс	$t_{\text{гар}}$, годин
1,6 ТГП-2	3000	2	10	0,49	5	0,05	300
2,5 ТГП-6	6000	6	10	6,9	8	0,04	1000
2,5 ТГП-10	3000	10	6	8	20	-	1000
ТП20-6-0,5	3000	6	10	0,23	24,5	0,025	2000
ТП32-25-0,1	3000	25	25	29,5	49	0,01	2000
ТП32-16-2,5	3000	16	2	29,5	49	0,01	2000

Таблиця Д.1.2. Габаритні і установочні розміри, мм і маса тахогенераторів

Тип	d_1	d_2	d_3	l_1	Маса, кг
1,6 ТГП-2	2,8	14	16	40,4	0,025
2,5 ТГП-6	2,8	16	25	54,5	0,1
2,5 ТГП-10	2,4	16	25	56	0,12
ТП20-6-0,5	2,8	18	20	39,7	0,06

Продовження таблиці Д.1.2.

Тип	d_1	d_2	d_3	l_1	Маса, кг
ТПЗ2-25-0,1	4	25	32	65,6	0,22
ТПЗ2-16-2,5	4	25	32	65,6	0,22

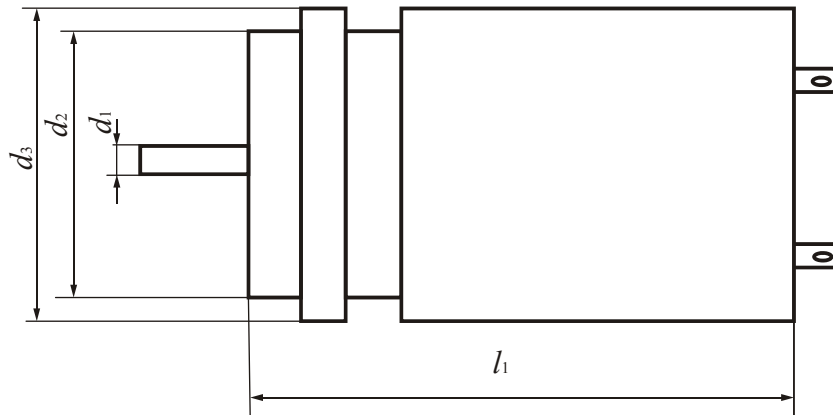


Рис.Д.1.1. Тахогенератори постійного струму ТПП і ТП

Д.1.2. Тахогенератор типу ДИГ-3

Тахогенератор ДИГ-3 - з порожнім немагнітним ротором. Кріплення тахогенератора - фланцеве з упорним буртиком. Режим роботи - тривалий.

Габаритні і установочні розміри тахогенератора ДИГ-3 приведені на рис. Д.1.2.

Технічні дані тахогенератора ДИГ-3:

Напруга збудження, В	36.
Частота напруги збудження, Гц	400.
Струм збудження, що споживається, А	0,2.
Номінальна частота обертання, об/хв.	10000.
Залишкова ЕРС, мВ	60.
Крутість вихідної напруги, мВ/(об/хв.)	2.
Не лінійність, %	2.
Фазова похибка від зміни частоти обертання. Град.	4.
Маса, кг	0,18.

Умови експлуатації тахогенератора ДИГ-3:

Вібраційні навантаження:

діапазон частот, Гц:	51...200,
прискорення, m/s^2	40.
Ударні навантаження, m/s^2	50.
Температура навколишнього середовища, °С	-60 ... +60.
Відносна вологість повітря при температурі 40 °С, %	98.
Гарантійне напруцювання, годин	2250.

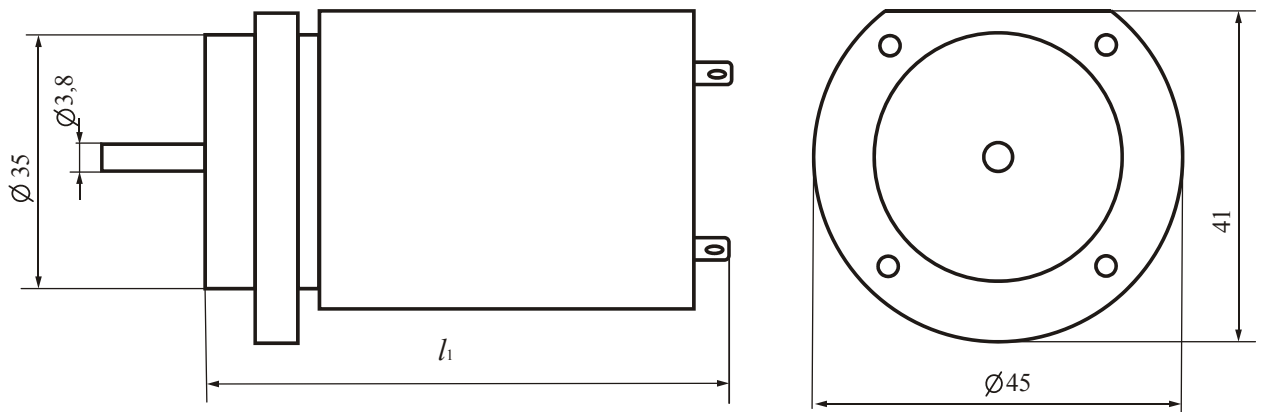


Рис.Д.1.2. Асинхронний тахогенератор ДИГ-3

Д.1.3. Двигуни-генератори серії ДГМ

Двофазні двигуни-генератори серії ДГМ з порожнім немагнітним ротором. Кріплення двигуна-генератора - фланцеве з упорним буртиком. Призначені для тривалого режиму роботи при зсуві фаз між напругами збудження і керування двигуна 90° . Частота напруги живлення 400 Гц.

Основні технічні дані наведені в табл. Д.1.3. Габаритні і установочні розміри - на рис. Д.1.3 та таблиці Д.1.4.

Табл. Д.1.3. Технічні дані двигунів-генераторів серії ДГМ

Параметр	ДГМ-0,1	ДГМ-0,4	ДГМ-1
Напруга, В:			
збудження двигуна	36	36	36
керування двигуном	18	30	30
збудження генератора	36	36	36
Максимальна корисна потужність, Вт	0,1	0,4	1
Швидкість обертання при холостому ході, об/хв	7200	6000	5500
Крутість вихідної характеристики генератора, мВ/(об/хв.)	0,1	0,5	0,5
Залишкова ЕРС генератора, мВ	15	25	25
Змінна складова залишкової ЕРС генератора, мВ	5	10	10
Струм збудження генератора, мА	120	150	150

Табл. Д.1.4. Габаритні та установочні розміри, мм, і маса ДГ серії ДГМ

Тип ДГ	d_1	d_2	d_3	l_1	Маса, кг
ДГМ-0,1А	4,8	12	20	63,9	0,085
ДГМ-0,1Б	2,8	12	20	65,8	0,085
ДГМ-0,4	4,8	16	25	70,2	0,13
ДГМ-1	4,8	20	30	86,5	0,27

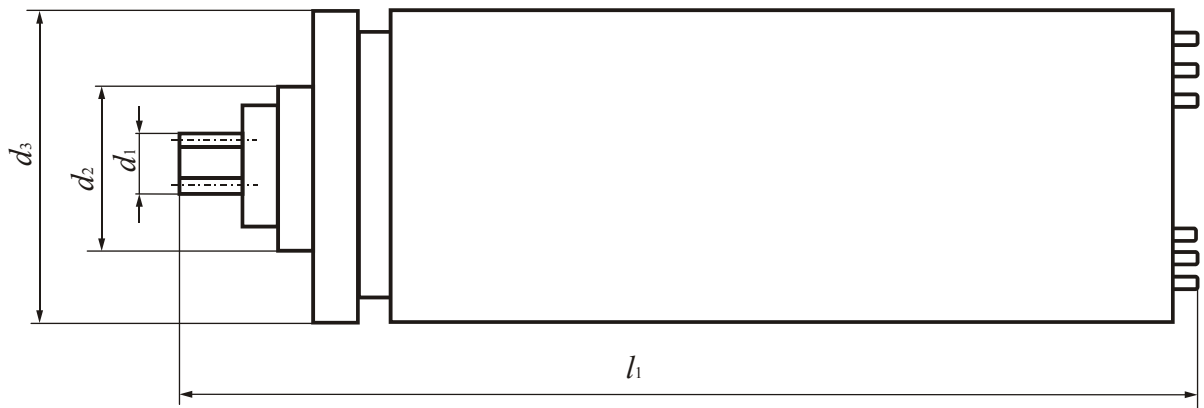


Рис.Д.1.3. Двигуни-генератори серії ДГМ

Д.1.3. Двигуни-генератори серії ИЭ-1

До складу ДГ серії ИЭ-1 входить асинхронний виконавчий двигун і тахогенератор постійного струму. Кріплення двигун-генератора – фланцеве, режим роботи – тривалий.

ДГ серії ЕМ-1 мають такі дані:

Напруга збудження двигуна, В 36.

Частота напруги збудження двигуна, Гц 400.

Напруга керування двигуном, В 25.

Основні технічні дані наведені в табл. Д.1.5, габаритні і установочні розміри - на рис. Д.1.4.

Табл. Д.1.5. Технічні дані двигунів-генераторів серії ИЭ-1

Тип ДГ	$n_{\text{ном}}$, об/хв	k , мВ/ (об/хв.)	$R_{\text{н}}$, кОм	$\tau_{\text{м}}$, с	$t_{\text{зар}}$, ГОДИН
ИЭ-1	10000	6	1,2	0,25	200
ИЭ-1А	10000	6	1,2	0,25	200
ИЭ-1Б	10000	6	1,2	0,25	50

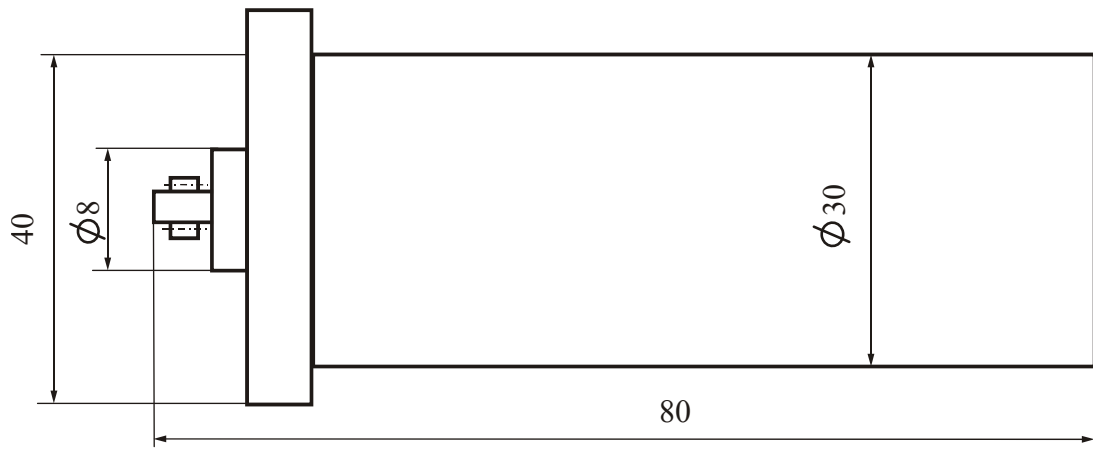


Рис. Д.1.4. Двигуни-генератори серії ІЭ-1

Д.2. Характеристики деяких обертових трансформаторів

Д.2.1. Обертові трансформатори серії ВТ-5

Обертові трансформатори серії ВТ-5 являють собою контактну чотирьохобмоткову машину. Режим роботи - тривалий. Кріплення ОТ – за упорний буртик. Маса ОТ серії ВТ-5 - 0,68 кг.

Точнісні показники ОТ серії ВТ-5 наведено в табл. Д.2.1, основні технічні дані - в табл. Д.2.2, габаритні і настановні розміри - на рис. Д.2.1.

Таблиця Д.2.1. Точнісні показники ОТ серії ВТ-5

Показник	Норма для класу				
	А	Б	0	1	2
Похибка відображення синусної залежності, %	±0,02	±0,04	±0,06	-	-
Асиметрія нульових положень ротора, кут. хв.	±0,2	±1	±1,5	-	-
ЕРС квадратурної обмотки, мВ	0,125	0,25	0,375		
Залишкова ЕРС, %	0,015	0,02	0,03	0,02	0,04
Похибка відображення лінійної залежності, %	-	-	-	±0,11	±0,22

Таблиця Д.2.2. Основні технічні дані ОТ серії ВТ-5

Позначення	Призначення	Напруга, В	Повний вх. опір, Ом	Коэф. трансформації
КФ3.031.048	СКОТ	40	200	0,53
ЛШ3.010.527	ОТДП-Д			
КФ3.031.049	СКОТ	40	200	0,96
КФ3.031.050	СКОТ	60	400	0,53
ЛШ3.010.527-02	ОТДП-Д			
КФ3.031.051	СКОТ	60	400	0,96

Продовження таблиці Д2.2

Позначення	Призначення	Напруга, В	Повний вх. опір, Ом	Коеф. трансформації
КФ3.031.052	СКОТ	60	800	0,53
КФ3.031.053	СКОТ	60	800	0,96
ЛШЗ.010.527-05	ОТДП-П			
КФ3.031.055	СКОТ	60	1600	0,96
КФ3.031.104	СКОТ	127	400	0,56
КФ3.031.105	СКОТ	127	400	1
КФ3.031.064	ЛОТ	40	200	0,373
КФ3.031.065	ЛОТ	40	200	0,746
КФ3.031.066	ЛОТ	60	400	0,373
КФ3.031.067	ЛОТ	60	400	0,746

Технічні дані, загальні для ОТ серії ВТ-5.

Номинальна частота напруги збудження, Гц	12000.
Діапазон робочих частот напруги збудження, Гц	380...1050.
Зміна коефіцієнта трансформації при зміні напруги збудження, %	0,02.
Зміна коефіцієнта трансформації при зміні температури навколишнього середовища на кожні 40° С, %	0,03.
Похибка проходження трансформаторної дистанційної передачі, кут. хв. ±3.	
Момент статичного тертя, 10 ⁻³ Нм	13.

Умови експлуатації ОТ серії ВТ-5

Вібраційні навантаження:

діапазон частот, Гц:	до 2000,
прискорення, м/с ²	100.
Ударні навантаження, м/с ²	750.
Температура навколишнього середовища, °С	-60 ... +100.
Відносна вологість повітря при температурі 40 °С, %.	98.
Гарантійне напруцювання, годин	
КФ3.031	6000,
ЛШЗ.010	12000.

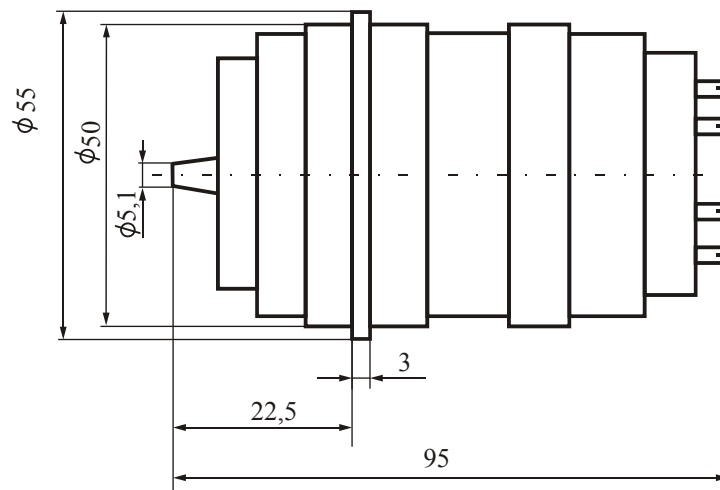


Рис. Д.2.1. Обертовий трансформатор типу ВТ-5

Д.2.2. Обертові трансформатори серії СКТ-225-2

Обертові трансформатори серії СКТ-225-2 являють собою контактну чотирихобмоткову машину. Обмотки збудження і квадратурна мають загальний вивід. Режим роботи - тривалий. Кріплення ОТ – фланцеве з упорним буртиком.

Точнісні показники ОТ серії СКТ -225-2 наведено в табл. Д.2.3, Д.2.4, основні технічні дані - в табл. Д.2.5, габаритні і настановні розміри і маса на рис. Д.2.2.

Таблиця Д.2.3. Точнісні показники ОТ серії СКТ-225-2

Показник	Норма для класу	
	0,1	0,2
Похибка відображення синусної залежності, %	±0,1	±0,2
Асиметрія нульових положень ротора, кут. хв. СКТ-225-2ДФ, інших	±3,5 ±2	±5,0 ±7
ЕРС квадратурної обмотки, мВ СКТ-225-2ДФ, інших	25 200	50 300
Відношення залишкової ЕРС до крутизни, кут. хв.	5	7,5

Таблиця Д.2.4. Точнісні показники системи ТДП, складені з ОТ серії СКТ-225-2

Показник	ОТ, що входять в ТДП			
	СКТ-225-2Д, СКТ-225-2П		СКТ-225-2Д8, СКТ-225-2П	
	Клас точності датчика і приймача			
	0,1	0,2	0,1	0,2
Похибка слідування, кут. хв.	±5	±10	±5	±10
Відношення залишкової ЕРС до крутизни, кут. хв.	10	15	10	15
Крутизна, мВ/хв	7	7	1,7	1,7

Таблиця Д.2.5. Технічні дані ОТ серії СКТ-225-2

Позначення	Призначення	Напруга, В	Повний вх. опір, Ом	Коеф. транс- формації
СКТ-225-2Д	ОТДП-Д	36	1330	1
СКТ-225-2Д8	ОТДП-Д	36	1330	0,22
СКТ-225-2П	ОТДП-П	36	5100	1
СКТ-225-2ДФ	ОТДП- диференціал	8	720	1

Технічні дані, загальні для ОТ серії СКТ-225-2

Номинальна частота напруги збудження, Гц	400.
Діапазон робочих частот напруги збудження, Гц	380...420.
Зміна коефіцієнта трансформації при зміні температури навколишнього середовища на кожні 40° С, %	1,5.
Момент статичного тертя, Нм	0,001.
Маса, кг	0,09.

Умови експлуатації ОТ серії СКТ-225-2

Вібраційні навантаження:	
діапазон частот, Гц:	до 300.
прискорення, м/с ²	100.
Ударні навантаження, м/с ²	100.
Температура навколишнього середовища, °С	-60 ... +100.
Відносна вологість повітря при температурі 40 °С, %.	98.
Гарантійне напрацювання, годин	2200.

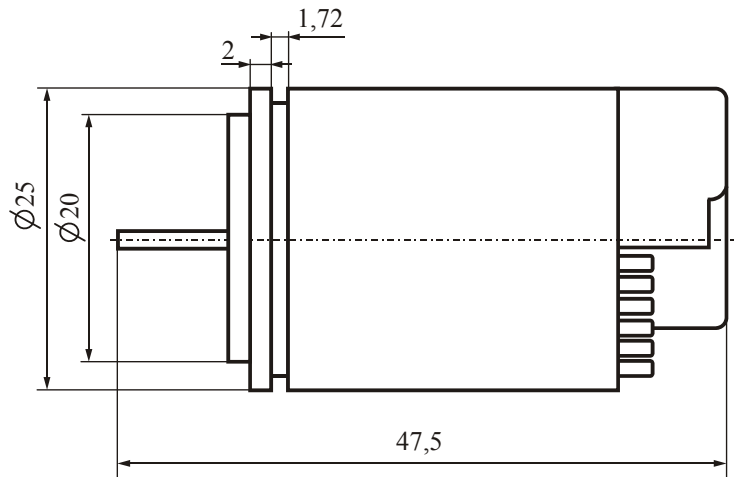


Рис. Д.2.2. Обертовий трансформатор типу СКТ-225-2

Д.2.3. Безкорпусні двополюсні обертові трансформатори серії СКТ

Обертові трансформатори серії СКТ являють собою чотирьохобмоткову машину. Режим роботи - тривалий.

Точнісні показники ОТ серії СКТ наведено в табл. Д.2.6., основні технічні дані - в табл. Д.2.7., габаритні і настановні розміри і маса в табл. Д.2.8. і рис. Д.2.3.

Технічні дані, загальні для ОТ серії СКТ.

Номинальна частота напруги збудження, Гц	
СКТ 232Б	12000,
інших типів	400.
Зміна коефіцієнта трансформації при зміні температури навколишнього середовища на кожні 40° С, %	

СКТ-232	. . . . .	10,
СКТ-232Б	. . . . .	7,
інших типів	. . . . .	3.

Умови експлуатації ОТ серії СКТ

Вібраційні навантаження:

діапазон частот, Гц:

СКТ-232 і СКТ-232Б	. . . . .	до 2000,
інших типів	. . . . .	300;

прискорення, м/с^2

СКТ-232Б	. . . . .	300,
інших типів	. . . . .	100.

Ударні навантаження, м/с^2

СКТ-232Б	. . . . .	250,
інших типів	. . . . .	120.

Температура навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$ -60 ... +100

Відносна вологість повітря при температурі 40°C , % 98.

Гарантійне напруцювання, годин

СКТ-232	. . . . .	2200,
СКТ-232Б	. . . . .	500,
інших типів	. . . . .	3000.

Таблиця Д.2.6. Точнісні показники ОТ серії СКТ (крім СКТ-232Б)

Показник	Норма для класу		
	0,1	0,2	0,35
Похибка відображення синусної залежності, %	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,35$
Асиметрія нульових положень ротора, кут. хв.	$\pm 2,5$	$\pm 5,0$	$\pm 10,0$
ЕРС квадратурної обмотки, мВ	150	200	300
Відношення залишкової ЕРС до крутизни, кут. хв.	5,0	7,0	10,0

Таблиця Д.2.7. Технічні дані ОТ серії СКТ

Позначення	Призначення	Напруга, В	Повний вх. опір, Ом	Коэф. транс-формації
СКТ-265Д	ОТДП-Д, СКОТ	36	800	1
СКТ-265П	ОТДП-П, СКОТ	36	1600	1
СКТ-265Д8	ОТДП-Д, СКОТ	36	800	0,22
СКТ-250	ОТДП-Д, СКОТ	36	1200	0,22
СКТ-232	ОТДП-Д, ОТДП-П, СКОТ	36	750	0,58

Продовження таблиці Д.2.7

Позначення	Призначення	Напруга, В	Повний вх. опір, Ом	Коеф. трансформації
СКТ-232Д8	ОТДП-Д, СКОТ	36	750	0,22
СКТ-232Б	ОТДП-Д, ОТДП-П, СКОТ	12	800	0,58

Примітка: ОТДП - обертовий трансформатор в системі дистанційної передачі кута.

Таблиця Д.2.8. Розміри і маса ОТ серії СКТ

Тип ОТ	d_1 , мм	d_2 , мм	l , мм	Маса, кг
СКТ-265	35	65	16	0,17
СКТ-250	25	50	16	0,1
СКТ-232	12	32	14	0,045
СКТ-232Б	12	32	8	0,025

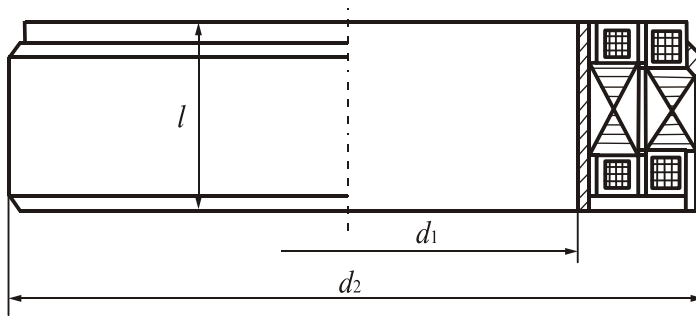


Рис. Д.2.3. Обертовий трансформатор типу СКТ

Д.3. Характеристики деяких сельсинів

Д.3.1. Трансформаторні безконтактні сельсини серії СБ

Сельсини цієї серії призначені для роботи в трансформаторному режимі. Кріплення сельсинів – фланцеве з упорним буртиком. Режим роботи – тривалий.

Напруга збудження – 36 В, частота напруги збудження – 400 Гц. Маса СБ-32-1В 0,16 кг, СБ-20-1В – 0,07 кг.

Основні технічні дані і точнісні показники сельсинів наведено в табл. Д.3.1- Д.3.4.

Умови експлуатації сельсинів серії СБ

Вібраційні навантаження:

діапазон частот, Гц: до 300,
прискорення, m/s^2 100,

Ударні навантаження, м/с^2	120.
Температура навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$	-60 ... +100
Відносна вологість повітря при температурі 40°C , %	98.
Гарантійне напрацювання, годин	
СБ-20-1В	2200,
інших типів	3000.

Таблиця Д.3.1. Технічні дані сельсинів серії СБ

Параметр	СБ-32-1ВД	СБ-32-1ВП	СБ-20-1ВД	СБ-20-1ВП
Струм, що споживається, А	0,145	0,02	0,09	0,012
Максимальна напруга синхронізації, В	62	21	25	11
Різниця максимальних напруг синхронізац., В	3,5	1,5	1,5	1
Момент статичного тертя, 10^{-4} Нм	6	6	4	4
Довжина максимальна, мм	55,2	55,2	55,5	55,5
Діаметр зовнішній, мм	32	32	20	20

Таблиця Д.3.2. Точнісні показники сельсинів серії СБ

Параметр	Норми для класу		
	1	2	3
Асиметрія нульових положень ротора, кут.хв.			
СБ-32-1ВД	± 6	± 15	± 25
СБ-32-1ВП	± 10	± 25	± 40
СБ-20-1ВД	± 6	± 12	± 25
СБ-20-1ВП	± 8	± 16	± 40
Залишкова ЕРС, мВ			
СБ-32-1ВД	200	300	400
СБ-32-1ВП	70	110	150
СБ-20-1ВД	80	120	160
СБ-20-1ВП	40	60	80

Таблиця Д.3.3. Показники ТДП, складені з датчика СБ-32-1ВД і приймача СБ-32-1ВП

Параметр	Норми для класу		
	1	2	3
Похибка слідування, кут. хв.	± 10	± 20	± 30
Залишкова ЕРС на виході СПТ, мВ	60	150	200
Крутість, В/градус	0,35	0,35	0,35
Струм, споживаний обмоткою збудження датчика, А	0,15	0,15	0,15

Таблиця Д.3.4. Показники ТДП, складені з датчика СБ-20-1ВД і приймача СБ-20-1ВП

Параметр	Норми для класу		
	1	2	3
Похибка слідування, кут. хв.	±10	±20	±30
Залишкова ЕРС на виході СПТ, мВ	30	50	70
Крутість, В/градус	0,35	0,35	0,35
Струм, споживаний обмоткою збудження датчика, А	0,1	0,1	0,1