

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 104 стор., 28 рис., 8 табл., 10 бібл. найм.

У дипломному проекті виконано розрахунок вибухозахищеного електродвигуна з короткозамкнутим ротором для приводу скребкового конвеєра стругового комплексу.

В процесі проектування визначені електромагнітні навантаження і параметри електродвигуна. Виконаний розрахунок робочих і пускових характеристик, а також тепловий і механічні розрахунки двигуна. Вибрано відповідне електроустаткування управління електродвигуна і комутації електромережі живлення двигуна. Розглянуті можливості використання системи управління електроприводом скребкового шахтного конвеєра, побудованого по схемі «перетворювач частоти – асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором».

**Ключові слова:** двигун асинхронний, конвеєр скребковий, ротор, пускової момент, система автоматичного керування, ковзання.

## ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	7
1 ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПОДІБНИХ КОНСТРУКЦІЙ ДВИГУНІВ. ВИБІР БАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ	8
1.1 Огляд існуючих конструкцій електродвигунів	8
1.2 Техніко-економічне обґрунтування вибору базової конструкції електродвигуна	9
2 ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА КОМПЛЕКСУ «СТРУГ–КОНВЕЙЕР» І ОПИС РОБОТИ СХЕМИ	12
3 РОЗРАХУНОК І КОНСТРУЮВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНА	15
3.1 Вибір головних розмірів	15
3.2 Електромагнітний розрахунок	16
3.3 Параметри робочого режиму	18
4 РОЗРАХУНОК ВТРАТ	33
5 РОЗРАХУНОК РОБОЧИХ І ПУСКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК	35
5.1 Розрахунок робочих характеристик	35
5.2 Розрахунок пускових характеристик	38
6 ТЕПЛОВИЙ І ВЕНТИЛЯЦІЙНИЙ РОЗРАХУНОК. МЕХАНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК	43
6.1 Тепловий розрахунок обмотки статора	43
6.2 Розрахунок вентиляції	45
6.3 Розрахунок валу на міцність	45
6.4 Вибір підшипників	53
7 ТЕХНІЧНІ ДАНІ СПРОЕКТОВАНОГО ДВИГУНА	54
7.1 Розрахунок показників технологічності конструкції	
8 ВИБІР ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ І СХЕМИ УПРАВЛІННЯ ДВИГУНАМИ ПРИВОДУ СКРЕБКОВОГО КОНВЕЄРА	59
8.1 Вибір магнітних пускачів для електродвигунів	59

8.2	Схема електрична принципова магнітного пускача для управління двигунами. Опис роботи схеми	59
8.3	Перелік елементів електричної схеми пускача	66
9	МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНЕЙНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ	68
9.1	Основні типи нелінійних характеристик	68
9.2	Властивості й методи дослідження нелінійних систем	71
9.3	Зображення рухів у фазовій площині	73
9.4	Автоколивання	86
10	ОХОРОНА ПРАЦІ	93
	ВИСНОВКИ	103
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	104

## ВСТУП

Процес розвитку сучасної науки і техніки нерозривно зв'язаний із застосуванням електричної енергії в різних виробничих процесах і пристроях. Оскільки електричні машини є основними елементами енергетичних установок, різних машин і механізмів, технічного устаткування, сучасних засобів транспорту і зв'язку і багато іншого, тому до галузі електромашинобудування і зокрема до виробництва сучасніших асинхронних двигунів необхідно приділяти велику увагу при вирішенні економічних завдань нашої держави України.

Як відомо, електричні машини виробляють електричну енергію і здійснюють перетворення її в механічну; виконують всілякі функції з перетворення і посилення різних сигналів у системах автоматичного регулювання й управління. Електричні машини широко застосовуються у всіх галузях народного господарства. Їх перевага – високий ККД, що досягає в потужних електричних машинах 95 – 98% ; порівняно мала маса і габаритні розміри, а також економічне використання матеріалів. Електричні машини можуть бути виконані на різні потужності (від доль вата до сотень мегават), частоти обертання і напруги.

Вони характеризуються високою надійністю, простотою управління й обслуговування, зручністю підведення і відведення електроенергії, а також невеликою вартістю при масовому і багатосерійному виробництві.

Особливу увагу в Україні необхідно приділяти розробці й освоєнню випуску електроустаткування, що має вищу надійність і енергетичні показники, меншу трудомісткість, металоємність і питому витрату електротехнічних матеріалів.

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПОДІБНИХ КОНСТРУКЦІЙ ДВИГУНІВ. ВИБІР БАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ

### 1.1 Огляд існуючих конструкцій двигунів

Вибухозахисні асинхронні електродвигуни – основа електроприводу машин і механізмів в умовах вибухонебезпечних виробництв вугільною, нафтовою, хімічною, газовою і інших галузях промисловості. На Україні виробляють вибухозахищені асинхронні електродвигуни потужністю в межах  $0,25–2000\text{кВт}$  напругою  $220–10000\text{В}$  і частотою  $50\text{Гц}$ . Створені серії основного виконання і модифікацій, пристосовані для експлуатації з конкретними механізмами в спеціальних умовах.

Двигуни трифазні асинхронні короткозамкнуті вибухозахищені серії *ЭДКОФ*, *2ЭДКОФ*, *ЭДК*, *ЭДКО*, *ЭКВ*, *ЭКВЖ* призначені для приводу скребкових конвеєрів, стругових установок, вугільних комбайнів і інших вуглевидобувних, транспортуючих механізмів у вугільних і сланцевих шахтах, небезпечних по газу метану і вугільному (сланцевою) пилу.

Двигуни є вибухобезпечними і мають копальневого вибухобезпечного виконання РВ .

Позначення двигунів розшифровується таким чином: *Э* – електричний, *Д* – двигун, *К* – конвеєрний (для серій *ЭДКОФ*) і комбайновий для останніх вказаних типів, *О* – що обдувається, тобто повітряноохолоджуваний, *В* – водяне охолодження, *Ж* – рідинне заповнення внутрішньої частини двигуна.

Режими роботи електродвигунів в приводі шахтних механізмів можуть бути самими різними і можуть бути визначені імовірнісними методами. Проте, на кожного типа двигунів є певні рівні по його режиму роботи, встановлені заводом – виготівником.

Електродвигуни серії *ЭКВ* працюють в повторно–короткочасному режимі з частими пусками. Мають водяне охолодження корпусу, тепло –

волого – і вібростійку ізоляцію обмоток, захист від перегріву обмоток. Електродвигуни серії *ЭДКОФ* працюють в тривалому режимі, а в деяких випадках в повторно–короткочасному з частими пусками, наприклад, при розгойдуванні конвеєра.

Відрізняються високими енергетичними характеристиками, якісною запалі – влаго – і маслозащитой, підвищеною надійністю і довговічністю. Електродвигуни серії *ЭДКОФ* мають безпосереднє охолодження активних частин статора і ротора діелектричною рідиною, охолоджувану у свою чергу проточною водою. Завдяки цьому ці двигуни мають підвищену потужність (у 1,7 – 2 рази) в порівнянні з електродвигунами серії *ЭКВ* тих же габаритів і розмірів.

## **1.2 Техніко-економічне обґрунтування вибору базової конструкції двигуна**

Проектований двигун і комплект електроустаткування управління електродвигуна повинні задовольняти технічним і виробничий – економічним вимогам, правилам виготовлення вибухозахищеного і копальневого електроустаткування згідно *ГОСТ12.2.020–76*. Двигун повинен володіти покращувальними енергетичними характеристиками. Технологія виготовлення і експлуатація електродвигуна повинні задовольняти вимогам техніки безпеки і охорони праці. Проектований електродвигун має бути економічним, ніж базовий. По конструкції асинхронні двигуни діляться на двох основних типів – з короткозамкнутим і фазним ротором. Найбільшого поширення набули двигуни з короткозамкнутим ротором. Обмотки короткозамкнутих роторів виконуються литими з алюмінієвих сплавів. Залежно від необхідних характеристик двигуна і режиму його роботи використовують сплави марок *АЛ–7*; *АЛ–10*; *СИЛ–00*; *АКМ<sub>ц</sub>–11*; *АК10М<sub>ц</sub>2*; *АК12М<sub>ц</sub>2* і ін. для поліпшення пускових характеристик двигуна застосовують ротор з подвійною білячою кліткою. При заливці пазів ротора алюмінієвим сплавом одночасно

відбувається відливання струмоведучих стержнів і короткозамикаючих кілець обмотки ротора, а також вентиляційних лопаток, розміщених на торцях цих кілець. Виконання двигуна по вибухозахисту – рудничний вибухобезпечний - *PВ*. Статор асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором складається з пакету магнітопровода, в якому розміщується обмотка, литої або зварної станини. Магнітопровід статора набирається з листів електротехнічної сталі, ізольованих один від одного. Після збірки пакет статора скріплюють скобами і запресовують в станину. При збірці пакетів магнітопровода статора може бути виконаний скіс пазів. У виробництві двигунів використовується гарячекатана ізотропна тонколистова електротехнічна сталь марки *1312 ГОСТ21427.3–75* завтовшки *0,35–0,5мм*. Інші деталі двигуна як підшипникові щити, кришки підшипників також виготовляються шляхом відливання з сірого чавуну марки *СЧ12–28* або *СЧ21–20*.

Обмотка статора виконується з прямокутного дроту марки *ПСД* або *ПСДК*, температурний індекс ізоляції  $180^{\circ}\text{C}$  (колишній клас нагрівостійкості *H*). Обмотка виконана жорсткими секціями, оскільки навантаження таких двигунів не є стабільним і постійним. В основному навантаження має імовірнісний характер і номінальний рівень, що перевищує. Окрім цього, двигуни в гірничодобувних механізмах працюють у важких режимах, наприклад  $S_3, S_4$ . До лобових частин обмотки кріпляться датчики температури – термореле, що служать для захисту обмотки двигуна від надмірного нагріву при перевантаженнях. Датчики приєднані до коробки виводів. Через ці клеми датчики підключаються до ланцюга управління двигуна.

У проекті за базову модель прийнятий електродвигун асинхронний з короткозамкнутим ротором типу *ЭДКОФ* потужністю  $37\text{кВт}$ ,  $U_H = 660/380\text{В}$ ,  $n_1 = 1500\text{об/хв}$ . У вуглевидобувних механізмах групи забійних в приводах стругових установок скребкових конвеєрів застосовуються, як правило, два електродвигуни, які працюють одночасно. Режим роботи цих механізмів в

основному відноситься до режиму  $S_1$ . Проте, при експлуатації механізмів можливі зупинки, гальмування, наприклад, конвеєра унаслідок заштибовки ланцюга породю. Можлива також робота стругової установки на упор або зрушення з місця навантаженого конвеєра, так зване «розгойдування». У таких випадках двигун працює з частими пусками, тобто у важкому режимі, що відноситься до режиму  $S_4$ . Тому для таких двигунів потрібні високі пусковий і максимальний моменти, а також оптимальна величина пускового струму, погоджена з нормованою температурою нагріву обмотки статора і теплостійкістю ізоляції. Таким чином, основним завданням проекту є, проектування електродвигуна, який повинен працювати не лише, як базовий в режимі  $S_1$ , але і в режимі  $S_4$  при задовільному тепловому стані ізоляції обмоток статора і ротора і прийнятних технічних параметрах. Одночасно потрібна стійка і надійна робота комутаційної апаратури, ланцюгів управління і захисту електродвигуна.



## РОЗДІЛ 2. ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА КОМПЛЕКСУ СТРУГА – КОНВЕЄР. ОПИС РОБОТИ СХЕМИ

Умовні позначення окремих блоків схеми приведені на рис. 2.1.

Електропостачання комплексу здійснюється від двох трансформаторних підстанцій *ТКШВП – 320/6*. Живлення від підстанцій подається на магнітні станції конвеєра і струга. Від станції управління за допомогою блоку дистанційного керування *БДУ* або через виносний пульт управління *ПУ* живлення подається відповідно на виконавчі електродвигуни *ДК1* і *ДК2* приводу конвеєра і двигуни *ДС1* і *ДС2* приводу струга.

Причому, залежно від напрямку руху конвеєра і струга один з двигунів включається першим, а другий двигун включається на  $1,5 \div 2,5с$  пізніше.

Як правило двигуни конвеєра працюють в один бік руху конвеєра, тобто у бік відкаточного штреку. Реверс необхідний при розгойдуванні конвеєра або повернення при стопоренні струга. Рух струга здійснюється в прямому і зворотному напрямі – човниковий режим.

Двигуни конвеєра включаються раніше двигунів струга, тобто приводи струга і конвеєра блокуються від неправильної послідовності їх включення.

У приведеній схемі спочатку мають бути включені маслостанції *МС1 ÷ МС3*, службовці для переміщення ставу конвеєра і крепи, а також опорних балок струга. Маслостанції отримують живлення також від магнітних станцій. Крім того, привід маслостанцій блокується з приводом конвеєра і струга в послідовному включенні цих приводів.

Від магнітної станції отримує живлення установка зрошування – *УО*. Включення цієї установки виробляється одночасно з включенням приводу струга.

У комплексі струг-конвеєр передбачена система датчиків, які контролюють фізичні і лінійні параметри:

## Умовні позначення:

- БДК - блок дистанційного керування  
 ПК - пульт керування машиніста стругової установки  
 ДК1 ДК2 - ближній та дальній двигуни струга  
 ДС1 ДС2 - ближній та дальній двигуни струга  
 МС1 МС2 МС3 - маслососні станції  
 РТС1 РТС2 РТС3 - реле контролю тиску насосних станцій  
 УЗ - установка зрошення  
 1СВ 1СД - ближній та дальній датчик стопорних механізмів струга  
 2СВ 2СД - ближній та дальній датчик стопорних механізмів конвеєру  
 ДПС - датчик переміщення струга  
 ДПБ ДПД - датчик положення ближній та дальній (вимикачі кінцеві)  
 РКТО - реле контролю тиску типу РДСО у магістралі зрошення

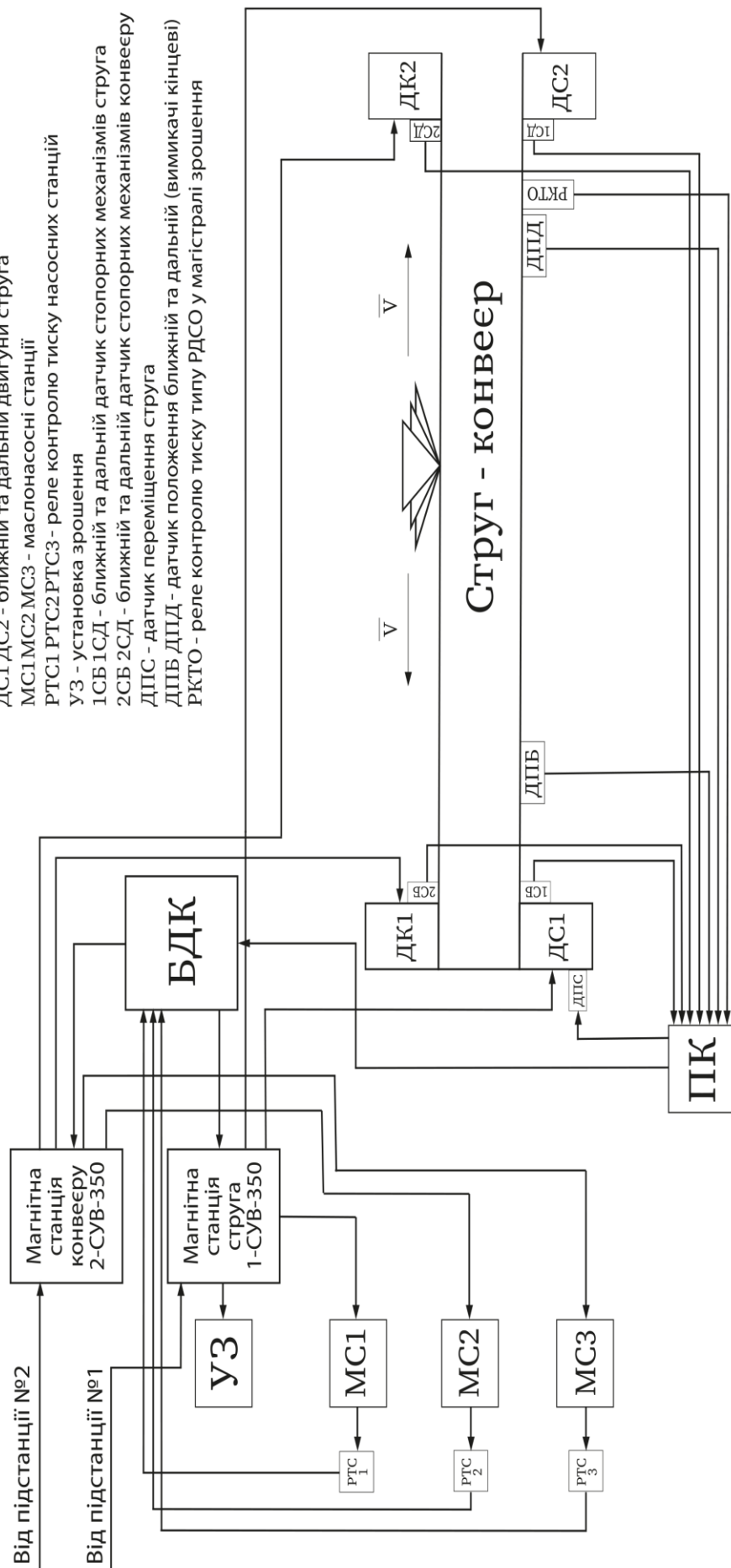


Рис. 2.1 - Функціональна схема комплексу струг - конвеєр

Датчики тиску  $РДС1 \div РДС3$  контролюють тиск в гідросистемі маслonaсосних станцій.

Датчики (тензодатчики)  $2СБ$  і  $2СД$  контролюють перевантаження конвеєра при роботі в ліву або праву сторону.

Аналогічно працюють датчики  $1СБ$  і  $2СБ$ , коли відбувається різке збільшення подачі (притиснення до пласта вугілля) ріжучого органу струга. Сигнал на відключення установки передається через пульт управління  $ПУ$  в блок  $БДУ$  і далі у відповідну магнітну станцію.

Датчики  $ДПБ$  і  $ДПД$  положення струга призначені для використання як кінцеві вимикачі, що відключають приводи струга при підході робочого органу до місця установки датчиків, конструкція датчиків нерозбірна.

Елементи електричної схеми, розміщені в корпусі датчика залиті компаундом.

Датчик  $РКДО$  контролює величину тиску в системі зрошування; при зниженні тиску в системі зрошування спрацьовує попереджувальна сигналізація, а за відсутності тиску відбувається повне виключення всього комплексу, як і в разі відсутності тиску в системі гідравліки маслостанцій  $МС1 \div МС3$ .

## РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК І КОНСТРУЮВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

### 3.1 Вибір головних розмірів

Розрахунок ведемо з використанням методики, викладеної в [1].

Для магнітопроводів статора і ротора вибираємо ізотропну листову електротехнічну сталь марки 1312 (ГОСТ21427.2–85) завтовшки 0,5мм. Ізолювання листів лаком, коефіцієнт заповнення сталлю сердечників статора і ротора  $k_c = 0,95 - 0,97$  [1,табл. 14-1].

Число пар полюсів

$$p = \frac{60f}{n_1};$$

$$p = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2.$$

Для вибраної базової конструкції двигуна висота осі обертання  $h = 250\text{мм}$ .

З табл. 6.6 найближче значення зовнішнього діаметру статора  $D_a$  для  $h = 250\text{мм}$  рівно 0,437м. Проте, базовий двигун має  $D_a = 0,365\text{м}$  унаслідок специфіки умов роботи електроустаткування в середніх і тонких вугільних пластах. Тоді внутрішній діаметр статора по 6.2

$$D = k_{\Delta} \cdot D_a,$$

$$D = 0,64 \cdot 0,365 = 0,234\text{м}.$$

де  $k_{\Delta} = 0,64$  з табл. 6.7 для  $p = 2$ .

Полюсне ділення

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p};$$

$$\tau = \frac{3,14 \cdot 0,234}{4} = 0,184\text{м}.$$

Розрахункова потужність двигуна

$$P' = P_H \frac{K_E}{\eta \cdot \cos \varphi};$$

$$P' = 37 \cdot \frac{0,96}{0,89 \cdot 0,88} = 44,3 \text{ кВт}$$

де  $K_E = 0,96$  з рис. 6.8.

Заздалегідь приймаємо по рис. 6.9

$$\eta = 0,89; \quad \cos \varphi = 0,88.$$

Розрахункова довжина повітряного зазору

$$l_\delta = \frac{P'}{K_\epsilon \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot K_{об1} \cdot A \cdot B_\delta},$$

де  $K_\epsilon$  – коефіцієнт форми поля;  $K_\epsilon = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$ ;

$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1500}{60} = 157 \text{ рад/с};$$

$A = 34 \cdot 10^3 \text{ А/м}$ , рис. 6.12,б;  $B_\delta = 0,78 \text{ Тл}$ ;  $K_{об1} = 0,96$ .

$$l_\delta = \frac{44,3 \cdot 10^3}{1,11 \cdot 0,234^2 \cdot 157 \cdot 0,96 \cdot 34 \cdot 10^3 \cdot 0,78} = 0,226 \text{ м}.$$

Відношення  $\lambda = l_\delta / \tau$ ;  $\lambda = \frac{0,226}{0,184} = 1,228$ .

Значення  $\lambda = 1,228$  знаходиться в межах, що рекомендуються.

Остаточно приймаємо:

$$D = 0,234 \text{ м}; \quad D_a = 0,365 \text{ м}; \quad l = l_\delta = 0,23 \text{ м}.$$

## 3.2 Електромагнітний розрахунок

### 3.2.1. Розрахунок зубцевої зони і обмотки статора

Число пазів статора по 6.16.

$$z_{1\min} - z_{1\max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1\max}} - \frac{\pi \cdot D}{t_{1\min}} = \frac{\pi \cdot 234}{17} - \frac{\pi \cdot 234}{14} = 43,2 - 52,5.$$

$$t_{1\max} = 17; \quad t_{1\min} = 14.$$

Приймаємо  $z_1 = 48$ .

Число пазів на полюс і фазу

$$q = \frac{z_1}{2p \cdot m};$$

$$q = \frac{48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 4.$$

Зубцеве ділення статора

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D}{2p \cdot m \cdot q};$$

$$t_1 = \frac{3,14 \cdot 234}{2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} = 15,3 \text{ мм} = 15,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Число ефективних провідників в пазу

$$U'_\Pi = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1H} \cdot z_1},$$

де  $I_{1H} = \frac{P_{H^2}}{m \cdot U_H \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{37 \cdot 10^3}{3 \cdot 380 \cdot 0,88 \cdot 0,89} = 42,4 \text{ А}.$

$$U'_\Pi = \frac{3,14 \cdot 0,234 \cdot 34 \cdot 10^3 \text{ А}}{42,4 \cdot 48} = 11,9 \approx 12.$$

Вибираємо двошарову обмотку з числом паралельних гілок  $a = 1$ . Число ефективних провідників для двошарової обмотки при  $a = 1$   $U_\Pi = (6 + 6) = 12$ .

Число витків у фазі обмотки

$$W_1 = \frac{U'_\Pi \cdot z_1}{2 \cdot a \cdot m};$$

$$W_1 = \frac{12 \cdot 48}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 96 \text{ витків}.$$

Тоді остаточне значення лінійного навантаження

$$A = \frac{2I_{1H} \cdot W_1 \cdot m}{\pi \cdot D};$$

$$A = \frac{2 \cdot 42,4 \cdot 96 \cdot 3}{\pi \cdot 0,234} = 33,2 \cdot 10^3 \text{ А/м}.$$

Магнітний потік в повітряному зазорі, розрахункове значення

$$\Phi = \frac{K_E \cdot U_H}{4 \cdot K_\epsilon \cdot W_1 \cdot K_{\sigma_1} \cdot f},$$

де  $K_{\sigma_1} = K_{p_1} \cdot K_{y_1} = 0,958 \cdot 0,966 = 0,925$ ;

$$\text{для } q = 4: K_{p_1} = 0,958; \quad K_{y_1} = \sin \frac{\pi}{2} \cdot \beta; \quad \beta = \frac{y}{\tau};$$

$$y = 10; \quad \tau = \frac{z_1}{2p} = \frac{48}{4} = 12; \quad \beta = \frac{10}{12} = 0,834.$$

$$K_{y_1} = 0,966.$$

$$\Phi = \frac{0,97 \cdot 380}{4 \cdot 1,11 \cdot 96 \cdot 0,925 \cdot 50} = 18,75 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}.$$

Індукція в повітряному зазорі, розрахункове значення

$$B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_\delta} = \frac{2 \cdot 18,75 \cdot 10^{-3}}{0,234 \cdot 0,266} = 0,71 \text{ Тл}.$$

Перетин ефективного провідника (попередньо)

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_{1H}}{a \cdot j_1},$$

$$q_{\text{эф}} = \frac{42,4}{1,5,45 \cdot 10^3} = 9,3 \text{ мм}^2.$$

$$j_1 = \frac{(AJ)}{A} = \frac{205 \cdot 10^9}{33,2 \cdot 10^3} = 5,45 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2;$$

$$(AJ) = 205 \cdot 10^9 \text{ А/м}^2 \text{ по рис. 6.16.}$$

Приймаємо  $n_{\text{ел}} = 1$ .

Вибираємо обмотувальний дріт марки ПСД прямокутний з розмірами

сторін  $\frac{1,68 \times 6,4}{2,07 \times 6,67}$ , тоді  $q_{\text{ел}} = 9,865 \text{ мм}^2$ ;  $q_{\text{ізол.}} = 13,8 \text{ мм}^2$ .

Уточнене значення щільності струму в обмотці статора

$$J_1 = \frac{I_{1H}}{a \cdot q_{\text{ел}} \cdot n_{\text{ел}}} = \frac{42,4}{1 \cdot 9,865 \cdot 1} = 4,53 \text{ А/мм}^2.$$

Набуваємо заздалегідь (по таблиці. 6.10) значень індукцій в зубцях і в ярмі статора  $B_{z_1} = 1,7Тл$ ;  $B_a = 1,35Тл$ .

Коефіцієнт заповнення пакету статора  $K_C = 0,97$ .

Мінімальна ширина зубця

$$b_{z_1 \min} = \frac{B_\delta \cdot t_1 \cdot l_\delta}{a \cdot q_{el} \cdot n_{el}} = \frac{0,71 \cdot 15,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,23}{1,75 \cdot 0,23 \cdot 0,97} = 6,4 \text{ мм.}$$

Висота ярма статора

$$h_a = \frac{\Phi}{2B_a \cdot l_{CT} \cdot K_C} = \frac{18,75 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,35 \cdot 0,23 \cdot 0,97} = 30,8 \text{ мм.}$$

Розміри паза:

$$\text{у штампі } h_{II} = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{(0365 - 0,234) \cdot 10^3}{2} - 30,8 = 34,7 \text{ мм.}$$

$$b_1 = t_1 - b_{z_1} = 15,65 - 6,4 = 9,25 \text{ мм.}$$

$$b_{1/3} = t_{1/3} - b_{z_1} = 16,8 - 6,4 = 10,4 \text{ мм.}$$

$$t_{1/3} = \frac{\pi D + \frac{2}{3} h_a}{z_1} = \frac{\pi \cdot 234 + \frac{2}{3} \cdot 30,8}{48} = 16,8 \text{ мм.}$$

$$\text{у світлу } b'_1 = b_1 - \Delta b_{II} = 9,25 - 0,12 = 9,13 \text{ мм.}$$

$$h'_{II} = h_{II} - \Delta h_{II} = 34,7 - 0,3 = 34,4 \text{ мм.}$$

За даними результатів проведених розрахунків складаємо таблицю заповнення паза.

Таблиця 3.1 -Заповнення паза статора

Найменування	Розміри, мм	
	по ширині	по висоті
Дріт обмотувальний ізолюваний	6,67	$2,07 \times 12 = 24,84$
Пазова ізоляція і допуск на укладання (табл. 3.5)	$2,2 + 0,2 = 2,4$	$5,26 \times 1,5 + 0,2 = 6,96$
Всього на паз без клину	9,07	31,8



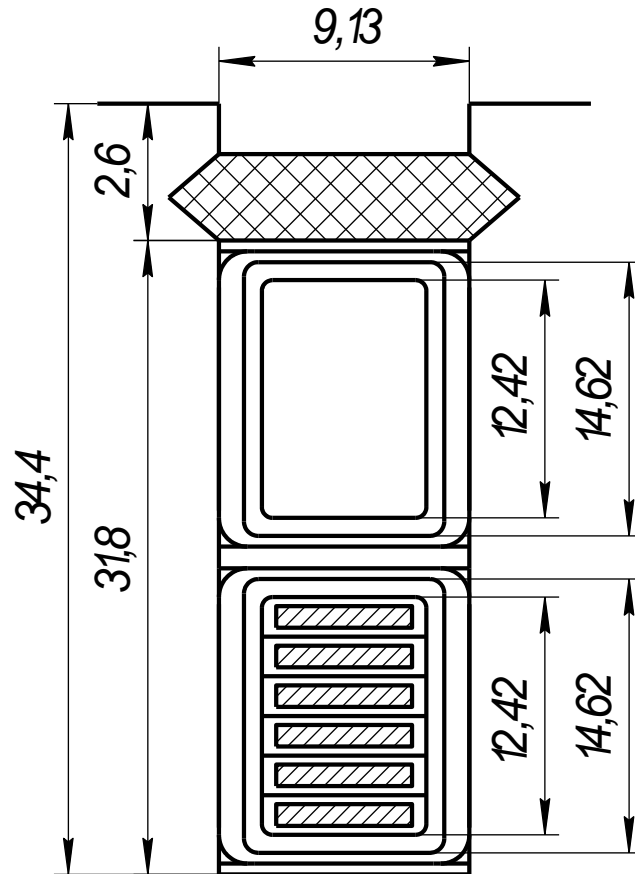


Рис. 3.1 - Паз статора

Площа поперечного перетину паза

$$S_{\Pi} = b'_1 \cdot h'_{\Pi} - S_{\text{ізол}} - S_{\text{прокл}} = 9,12 \cdot 34,4 - 82,7 - 4,6 = 226,8 \text{ мм}^2 .$$

$$S_{\text{ізол}} \approx 82,7 \text{ мм}^2; \quad S_{\text{ізол}} = 0,94(2 \cdot h_{\Pi} + 2b_{\Pi}) = 0,94(69,4 + 18,5) \approx 82,7 \text{ мм}^2 .$$

$$S_{\text{прокл}} \approx 0,5 \cdot b_1 = 0,5 \cdot 9,25 = 4,6 \text{ мм}^2 .$$

### 3.2.2. Розрахунок ротора

Зовнішній діаметр ротора

$$D_2 = D - 2\delta ,$$

де  $\delta$  – повітряний зазор. По рис. 6.2.  $\delta = 0,75 \text{ мм}$ .

$$D_2 = 234 - 2 \cdot 0,75 = 232,5 \text{ мм} .$$

Число пазів ротора по табл. 6.15

$$z_2 = 42.$$

Довжина ротора

$$l_2 = l_1 + 5 = 230 + 5 = 235 \text{ мм}.$$

Зубцеве ділення ротора

$$t_2 = \frac{\pi D_2}{z_2} = \frac{\pi \cdot 232,5}{42} \approx 17,382 \approx 17,39 \text{ мм}.$$

Внутрішній діаметр ротора дорівнює діаметру валу –  $D_g$ , тобто сердечник ротора безпосередньо насаджений на вал двигуна.

$$D_J = D_g = K_g \cdot D_a,$$

де  $K_g = 0,26$ .

$$D_J = 0,26 \cdot 0,365 = 94,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Для забезпечення надійної роботи двигуна, враховуючи його механічні перевантаження приймаємо діаметр валу  $D_j = 105 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Струм в стержні ротора

$$I_2 = K_i \cdot I_1 \cdot v_i,$$

де  $K_i = 0,9$ ;  $v_i = \frac{2m \cdot W_1 \cdot K_{об1}}{z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 96 \cdot 0,925}{42} = 12,48$ .

$$I_2 = 0,9 \cdot 42,4 \cdot 12,48 = 551,49 \text{ А}.$$

Площа поперечного перетину стержня

$$q_C = \frac{I_2}{J_2},$$

де  $J_2$  – щільність струму в стержні литої к.з. клітки рівна  $2,5 \cdot 10^6 \text{ А/мм}^2$ .

$$q_C = \frac{551,49}{2,5} = 220,6 \text{ мм}^2.$$

Паз ротора – двохклітинний. Приймаємо розміри шліца:  $b_{III} = 1,5 \text{ мм}$ ;  
 $h_{III} = 0,6 \text{ мм}$ .

Розміри перемички:  $b_{II} = 1,5 \text{ мм}$ ;  $h_{II} = 2 \text{ мм}$ .

Допустима ширина зубця ротора

$$b_{z_2\text{доп}} = \frac{B_\delta \cdot t_2 \cdot l_2}{B_{z_2} \cdot l_{cm_2} \cdot K_C},$$

де  $B_{z_2} = 1,65 - 1,9Tл$  для двигунів з  $h = 160 - 250\text{мм}$ ,  $p = 2$ , мірою захисту  $IP44$ .

$$b_{z_2\text{доп}} = \frac{0,71 \cdot 17,38 \cdot 235}{1,8 \cdot 235 \cdot 0,97} = 7,06\text{мм}.$$

Перетин стержня без врахування площі шліца і площа перемички

$$q'_c = q_c - q_{ш} - q_{п} = 220,6 - 1,5 \cdot 0,6 - 1,5 \cdot 2 = 216,7\text{мм}.$$

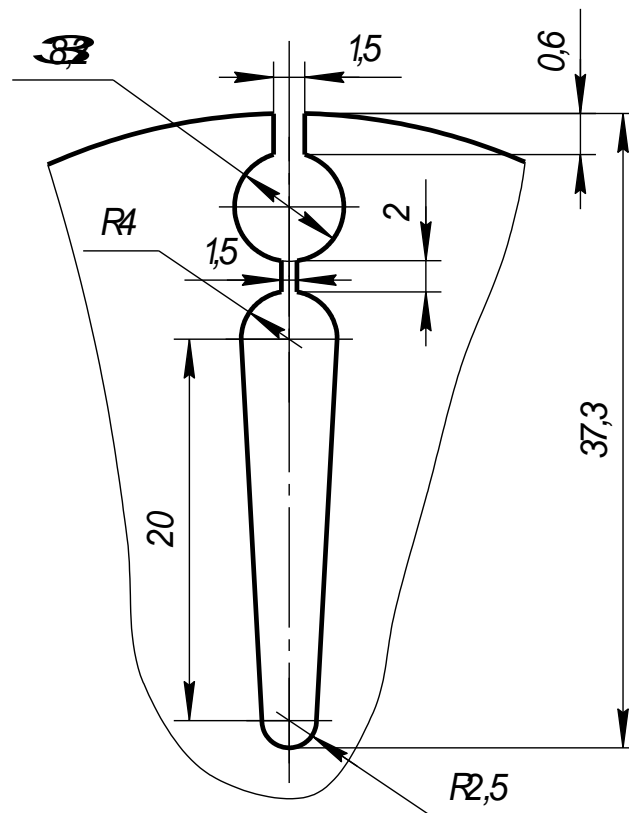


Рис. 3.2 - Паз ротора

Для електродвигунів з подвійною кліткою ротор найбільш оптимальне співвідношення перетинів верхнього і нижнього стержнів рівне трьом, тобто  $q_{c.v.}/q_{c.n.} = 1/3$ .

Тоді з рівності  $q_{c.v.} + q_{c.n.} = q'_c$  визначаємо перетин стержнів

$$q_{в.с.} = \frac{q'_c}{4} = \frac{216,7}{4} = 54,175 \text{ мм}^2.$$

Діаметр верхнього стержня

$$d_1 = \sqrt{\frac{4q_{в.с.}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 54,175}{3,14}} = 8,3 \text{ мм}.$$

Використовуючи дані заводу – виготівника базових двигунів приймаємо значення

$$d_1 = 8,2 \text{ мм}.$$

Діаметр  $d_2$  – верхня частина нижнього стержня

$$d_2 = \frac{\pi(D_2 - 2h_{III} - 2h_{II} - 2d_1) - z_2 \cdot b_{z_2}}{z_2 + \pi};$$

$$d_2 = \frac{3,14(232,5 - 2 \cdot 0,6 - 2 \cdot 2 - 2 \cdot 8,3) - 42 \cdot 7,06}{42 + 3,14} =$$

$$= \frac{661,598 - 296,52}{45,14} = 8,08 \approx 8 \text{ мм}.$$

Діаметр  $d_3$  – нижня частина нижнього стержня

$$d_3 = \sqrt{\frac{d_2^2 \left( \frac{z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2} \right) - 4q_{сн}}{\frac{z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}},$$

де  $q_{сн} = q'_c - q_{св} = 216,7 - 54,175 = 162,525 \text{ мм}^2$ .

$$d_3 = \sqrt{\frac{8,08^2 \left( \frac{42}{3,14} - \frac{3,14}{2} \right) - 4 \cdot 162,525}{\frac{42}{3,14} - \frac{3,14}{2}}} = 3,196 \text{ мм}.$$

Найменший допустимий розмір нижнього закруглення нижньої частини паза має бути не менше трьох мм. Використовуючи дані заводу – виготівника базових двигунів приймаємо  $d_3 = 5 \text{ мм}$ , що забезпечить якіснішу заливку обмотки ротора.

Висота паза ротора.

Спочатку визначуваний розмір між центрами діаметрів  $d_2$  і  $d_3$

$$h_{1_{III}} = (d_2 - d_3) \frac{z_2}{2\pi} = (8 - 5) \frac{42}{2 \cdot 3,14} = 20,06 \approx 20 \text{ мм}.$$

Висота паза (у штампі)

$$h_{II_2} = h_{1_{III}} + h_{III} + h_{II} + r_2 + r_3 + d_1 = 20 + 0,6 + 2 + 4 + 2,5 + 8,2 = 37,3 \text{ мм}.$$

Перетин стержня

$$\begin{aligned} q_C &= \frac{\pi}{8} (d_2^2 + d_3^2) + \frac{1}{2} (d_2 + d_3) \cdot h_{1_{III}} + \frac{\pi d_1^2}{4} + h_{III} \cdot b_{III} + h_{II} \cdot b_{II} = \\ &= \frac{\pi}{8} (8^2 + 5^2) + \frac{1}{2} (8 + 5) \cdot 20 + \frac{3,14 \cdot 8,2^2}{4} + 0,6 \cdot 1,5 + 2 \cdot 1,5 = 221,61 \text{ мм}^2. \end{aligned}$$

Щільність струму в стержні

$$J_1 = \frac{I_2}{q_C} = \frac{551,49}{221,61} = 2,488 \approx 2,49 \text{ А/мм}^2.$$

Короткозамикаючі кільця.

Площа поперечного перетину кільця

$$q_{KL} = \frac{I_{KL}}{J_{KL}}; \quad q_{KL} = \frac{1850,6}{2,142} = 863,958 \approx 864 \text{ мм}^2,$$

$$\text{де } I_{KL} = \frac{I_2}{\Delta}; \quad \Delta = 2 \sin \frac{\alpha z}{2} = 2 \sin \frac{\pi p}{z_2} = 2 \sin \frac{3,14 \cdot 2}{42} = 0,298.$$

$$I_{KL} = \frac{551,49}{0,298} = 1850,6 \text{ А}.$$

Щільність струму в кільці має бути на  $15 - 20^\circ\text{C}$  менше, ніж в стержні, тобто

$$J_{KL} = 0,85 J_2 = 0,85 \cdot 2,52 \cdot 10^6 = 2,142 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Розміри короткозамикаючих кілець

$$b_{KL} = 1,25 \cdot h_{II_2} = 1,25 \cdot 37,3 = 46,625 \approx 47 \text{ мм}.$$

$$a_{KL} = \frac{q_{KL}}{b_{KL}} = \frac{864}{47} = 18,382 \approx 18,5 \text{ мм}.$$

Остаточна  $q_{KL} = a_{KL} \cdot b_{KL} = 18,5 \cdot 47 = 869,5 \approx 870 \text{ мм}^2.$

$$D_{к.середн.} = D_2 - b_{КЛ} = 232,5 - 47 = 185,5 \text{ мм} .$$

### 3.2.3. Розрахунок струму, що намагнічує

Значення індукцій в елементах магнітного ланцюга

$$B_{z_1} = \frac{B_\delta \cdot t_1 \cdot l_\delta}{b_{z_1} \cdot l_{cm_1} \cdot K_C} = \frac{0,71 \cdot 15,3 \cdot 230}{6,06 \cdot 230 \cdot 0,97} = 1,84 \text{ Тл};$$

$$B_{z_{1/3}} = \frac{B_\delta \cdot t_{1/3} \cdot l_\delta}{b_{z_{1/3}} \cdot l_{cm_1} \cdot K_C} = \frac{0,71 \cdot 16,8 \cdot 230}{7,55 \cdot 230 \cdot 0,97} = 1,62 \text{ Тл};$$

$$B_{z_2} = 1,8 \text{ Тл};$$

$$B_a = \frac{\Phi}{2h'_a \cdot l_{cm_1} \cdot K_C} = \frac{18,75 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 31,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,230 \cdot 0,97} = 1,32 \text{ Тл},$$

де  $h'_a$  – розрахункова висота ярма статора

$$h'_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{Л_1} = \frac{365 - 234}{2} - 34,4 = 31,1 \text{ мм};$$

$$B_j = \frac{\Phi}{2h'_j \cdot l_{cm_2} \cdot K_C} = \frac{18,75 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 49,34 \cdot 10^{-3} \cdot 0,235 \cdot 0,97} = 0,83 \text{ Тл},$$

$$h'_j = \frac{2+p}{3,2p} \left( \frac{D_2}{2} - h_{П_1} \right) = \frac{2+2}{3,2 \cdot 2} \left( \frac{232,5}{2} - 37,3 \right) = 49,34 \text{ мм}.$$

Магнітна напруга повітряного зазору

$$F_\delta = 1,59 \cdot 10^6 \cdot B_\delta \cdot K_\delta \cdot \delta,$$

$$\text{де } K_\delta = \frac{t_1}{t_1 - \gamma \delta}, \quad \gamma = \frac{(b_{Ш_1} / \delta)^2}{5 + b_{Ш_1} / \delta} = \frac{(9,07 / 0,75)^2}{5 + 9,07 / 0,75} = 8,56.$$

$$K_\delta = \frac{15,3}{15,3 - 8,56 \cdot 0,75} = 1,72.$$

$$F_\delta = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,71 \cdot 1,72 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3} = 1458,75 \text{ А}.$$

Магнітна напруга зубцевих зон.

Статор.

$$F_{z_1} = 2h_{z_1} \cdot H_{z_1},$$

де  $h_{z_1} = h_{II_1} = 34,4 \text{ мм}$ . По таблиці. П 2 – 2 [3] для сталі 1312 при  $B_{z_1/3} = 1,62 \text{ Тл}$  і  $H_{z_1} = H_{z_1/3} = 575 \text{ А/м}$ .

$$F_{z_1} = 2 \cdot 34,4 \cdot 575 = 39,56 \text{ А}.$$

Ротор.

$$b_{z_{B_{\max}}} = \frac{\pi(D_2 - (2h_{III} + d_1))}{z_2} = \frac{3,14(232,5 - (2 \cdot 0,6 + 8,2))}{42} = 8,4 \text{ мм};$$

$$b_{z_{g_{\min}}} = \frac{\pi(D_2 - 2h'_g)}{z_2} - d_1,$$

де  $h'_g = d_1 + h_{III} = 8,2 + 0,6 = 8,8 \text{ мм}$ ;

$$b_{z_{B_{\min}}} = \frac{3,14(232,5 - 2 \cdot 8,8)}{42} - 8,2 = 7,86 \text{ мм};$$

$$b_{z_{H_{\max}}} = \left[ \frac{\pi D_2 - 2(h'_g + \frac{1}{3} d_2)}{z_2} \right] - 0,94 \cdot d_2 =$$

$$= \left[ \frac{3,14 \cdot 232,5 - 2(8,8 + \frac{1}{3} \cdot 8)}{42} \right] - 0,94 \cdot 8 = 9,3 \text{ мм};$$

$$b_{z_{H_{\min}}} = 0,9 d_1 = 0,9 \cdot 8,2 = 7,3 \text{ мм}.$$

$$B_{z_2 B_{\max}} = \frac{B_\delta \cdot t_2 \cdot l_\delta}{b_{z_{B_{\max}}} \cdot l_{ст_2} \cdot K_C} = \frac{0,71 \cdot 17,38 \cdot 230}{8,42 \cdot 235 \cdot 0,97} = 1,48 \text{ Тл}.$$

Аналогічно:  $B_{z_2 B_{\min}} = 1,55 \text{ Тл}$  ;

$$B_{z_2 H_{\max}} = 1,67 \text{ Тл} ;$$

$$B_{z_2 H_{\min}} = 1,73 \text{ Тл}.$$

По таблиці. П 2 – 2 [3] для сталі марки 1312 вибираємо при:

$$\begin{aligned}
 B_{z_2 B_{\max}} &= 1,48 \text{ Тл} & H_{z_2 B_{\max}} &= 1020 \text{ А/м}; \\
 B_{z_2 B_{\min}} &= 1,55 \text{ Тл} & H_{z_2 B_{\min}} &= 1360 \text{ А/м}; \\
 B_{z_2 H_{\max}} &= 1,67 \text{ Тл} & H_{z_2 H_{\max}} &= 1780 \text{ А/м}; \\
 B_{z_2 H_{\min}} &= 1,73 \text{ Тл} & H_{z_2 H_{\min}} &= 2600 \text{ А/м}.
 \end{aligned}$$

$$F_{z_2 B} = h_{z_2 B} (H_{z_2 B_{\max}} + H_{z_2 B_{\min}}) = 10,8 \cdot 10^{-3} (1020 + 1360) = 25,7 \text{ А}.$$

$$h_{z_2} = h_{III} + h_{II} + d_1 = 0,6 + 2 + 8,2 = 10,8.$$

$$F_{z_2 H} = h_{z_2 H} (H_{z_2 H_{\max}} + H_{z_2 H_{\min}}) = 26 \cdot 10^{-3} (1780 + 2600) = 113,88 \text{ А}.$$

$$h_{H_{z_2}} = h_{IIH} - 0,1 \cdot d_3 = 26,5 - 0,5 = 26 \text{ мм}.$$

$$F_{z_2} = 2(F_{z_2 B} + F_{z_2 H}) = 2(25 + 113,88) = 277,76 \text{ А}.$$

Коефіцієнт насичення зубцевої зони

$$K_2 = 1 + \frac{F_{z_1} + F_{z_2}}{F_\delta} = 1 + \frac{39,56 + 277,76}{1458,75} = 1 + 0,217 = 1,22.$$

Ярмо статора і ротора

$$F_a = L_a \cdot H_a = 0,262 \cdot 334 = 87,5 \text{ А}.$$

$$L_a = \frac{\pi(D_a - h_a)}{2p} = \frac{\pi(0,365 - 0,0311)}{4} = 0,262 \text{ м}.$$

$$H_a = 344 \text{ А/м при } B_a = 1,32 \text{ Тл}.$$

$$F_j = L_j \cdot H_j;$$

$$L_j = \frac{\pi(D_\delta - h_j)}{2p} = \frac{3,14(105 + 26,45)}{4} = 103,2 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$h_j = \frac{D_2 - D_\delta}{2} - h_{II_2} = \frac{232,5 - 105}{2} - 37,3 = 26,45 \text{ мм}.$$

$$H_j = 132 \text{ А/м при } B_j = 0,83 \text{ Тл}.$$

$$F_j = 103,2 \cdot 10^{-3} \cdot 132 = 13,62 \text{ А}.$$

Магнітна напруга на пару полюсів

$$F_{M.Ц.} = F_\delta + F_{z_1} + F_{z_2} + F_a + F_j = 1458,75 + 39,56 + 277,76 + 87,5 + 13,62 = 1877,19 \text{ А}.$$

Коефіцієнт насичення магнітного ланцюга



$$K_{\mu} = \frac{F_{M.ц.}}{F_{\delta}} = \frac{1877,19}{1458,75} = 1,296 \approx 1,3.$$

Струм двигуна, що намагнічує

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{M.ц.}}{0,95 \cdot m \cdot W_1 \cdot K_{об_1}} = \frac{2 \cdot 1877,19}{3 \cdot 96 \cdot 0,925} = 14,83 A.$$

Відносне значення струму, що намагнічує

$$I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu}}{I_{1H}} = \frac{14,83}{42,4} = 0,34.$$

### 3.3 - Розрахунок параметрів робочого режиму

Довжина провідників фази

$$L_{np} = l_{cp1} \cdot W_1,$$

де  $l_{cp1} = 2(l_{n1} + l_{Л1})$ ;  $l_{n1} = l_1 = 0,23 м$  – довжина пазової частини.

Довжина лобової частини

$$l_{Л1} = K_{Л} \cdot b_{КТ} + 2B + h_{П1},$$

де  $K_{Л} = 1,55$ ;  $B = 0,025 м$  (по таблиці. 6.20 [5]);

$$b_{КТ} = \frac{\pi(D + h_{П1})}{2p} \beta_1 = \frac{3,14(234 + 34,4)}{2 \cdot 2} \cdot 0,834 = 175,7 = 0,1757 м.$$

$$\beta_1 = \frac{y}{\tau} = 0,834.$$

$$l_{Л1} = 1,55 \cdot 0,1757 + 2 \cdot 0,025 + 0,0344 = 0,3567 м.$$

$$l_{cp1} = 2(l_{n1} + l_{Л1}) = 2(0,23 + 0,3567) = 1,1734 м.$$

$$L_{np} = 1,1734 \cdot 96 = 112,65 м.$$

Довжина вильоту лобової частини котушки

$$l_{вил} = K_{вил} \cdot b_{КТ} + B + 0,5h_{П1} = 0,5 \cdot 0,1757 + 0,025 + 0,5 \cdot 34,4 \cdot 10^{-3} = 0,13 м,$$

де  $K_{вил} = 0,5$ .

Активний опір фази обмотки статора.

Для теплового індексу ізоляції  $155^{\circ}\text{C}$  (колишній індекс нагрівостійкості  $F$ )  $\vartheta_{розр} = 115^{\circ}\text{C}$ , тобто для мідного дроту обмотки

$$\rho_{115^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{41} \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{ м}.$$

$$r_1 = \rho_{115^{\circ}\text{C}} \frac{W_1 \cdot l_{CP1}}{a \cdot q_{эф}} = \frac{96 \cdot 1,1734 \cdot 10^{-6}}{41 \cdot 9,865 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 0,2785 \text{ Ом}.$$

Відносне значення

$$r_1^* = r_1 \cdot I_{H1} / U_1 = 0,2784 \cdot 42,4 / 380 = 0,031.$$

Активний опір фази обмотки ротора

$$r_2 = r_e (1 - \alpha) + \frac{2r_{КЛ}}{\Delta^2},$$

$$\text{де } r_B = \rho_{B,9^{\circ}} \frac{l_{cm}}{q_B} = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{0,235}{10^{-6} \cdot 54,175} = 211,59 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

$$r_H = \rho_{H,9^{\circ}} \frac{l_{cm}}{q_H} = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{0,235}{10^{-6} \cdot 162,525} = 70,53 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

$$\rho_{B,9^{\circ}} = \rho_{H,9^{\circ}} = \frac{10^{-6}}{20,5} \text{ Ом} \cdot \text{ м};$$

$$r_{КЛ} = \rho_{КЛ} \frac{\pi D_{КЛ.ср}}{z_2 \cdot q_{КЛ}} = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{3,14 \cdot 0,1855}{10^{-6} \cdot 864 \cdot 42} = 0,783 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

$$\alpha = \frac{r_B}{r_B + r_H} = \frac{211,59 \cdot 10^{-6}}{211,59 \cdot 10^{-6} + 70,53 \cdot 10^{-6}} = \frac{211,59}{282,12} = 0,75;$$

$$r_2 = 211,59 \cdot 10^{-6} (1 - 0,75) + \frac{2 \cdot 0,783 \cdot 10^{-6}}{0,298^2} = 52,8975 \cdot 10^{-6} + 17,635 \cdot 10^{-6} = 70,53 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

Опір фази обмотки ротора, приведений до витків обмотки статора

$$r_2' = r_2 \frac{4m(W_1 \cdot K_{об1})^2}{z_2} = 70,53 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 3(96 \cdot 0,925)^2}{42} = 0,159 \text{ Ом}.$$

Відносне значення приведенного опору

$$r_2'^* = r_2' \cdot \frac{I_{H1}}{U_1} = 0,159 \cdot \frac{42,4}{380} = 0,0177.$$

Індуктивний опір обмотки статора

$$x_1 = 1,58 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left( \frac{W_1}{100} \right)^2 \frac{l_\delta}{pq} \cdot (\lambda_{\Pi_1} + \lambda_{\partial_1} + \lambda_{Л_1}),$$

де по табл. 6.22 [5] коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання

$$\lambda_{\Pi_1} = \frac{h_2 - h_0}{3b_{\Pi}} \cdot K_\beta + \frac{h_1}{b_{\Pi}} \cdot K'_\beta + \frac{h_0}{4b_{\Pi}} = \frac{31,8 - 1}{3 \cdot 9,13} \cdot 1 + \frac{2,6}{9,13} \cdot 1 + \frac{1}{4 \cdot 9,13} = 1,436,$$

де  $b_{\Pi} = 9,13 \text{ мм}$ ;  $h_0 = 1 \text{ мм}$ ;  $h_1 = 2,6 \text{ мм}$ ;  $K_\beta = K'_\beta = 1$ ;  $h_2 = 31,8 \text{ мм}$ .

Коефіцієнт магнітної провідності лобового розсіювання

$$\begin{aligned} \lambda_{Л_1} &= 0,34 \frac{q}{l_\delta} (l_{Л_1} - 0,64\beta \cdot \tau) = 0,34 \frac{4}{0,230} (0,3567 - 0,64 \cdot 0,834 \cdot 0,18369) = \\ &= 5,913(0,3567 - 0,098) = 1,53. \end{aligned}$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання

$$\lambda_{\partial} = \frac{t_1}{12 \cdot \delta \cdot K_\delta} \xi,$$

де  $\xi = K'' \cdot q^2 + 2K'_\beta - K_{\sigma\sigma}^2 (1 + \Delta z) = 0,0034 \cdot 4^2 + 2 \cdot 1 - 0,925^2 (1 + 0,2) = 1,027 \approx 1$ ,

$$K'' = 0,0034; \quad K'_\beta = 1; \quad \Delta z = 0,2.$$

$$\lambda_{\partial} = \frac{15,3}{12 \cdot 0,75 \cdot 1,2} \cdot 1 = 1,4.$$

$$x_1 = 1,58 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left( \frac{96}{100} \right)^2 \frac{230}{2 \cdot 4} \cdot (1,436 + 1,53 + 1,4) = 0,913 \text{ Ом}.$$

Відносне значення індуктивного опору статора

$$x_1^* = \frac{x_1 \cdot I_1}{U_1} = \frac{0,913 \cdot 42,4}{380} = 0,1.$$

Індуктивний опір фази обмотки ротора

$$x_2 = x_{\Pi.B.} + x_O + x_{E.XX.};$$

$$x_{\Pi.B.} = 7,9 f_1 \cdot l'_\delta \cdot \lambda_{\Pi.B.} \cdot 10^{-6};$$

$$x_O = 7,9 f_1 \cdot l'_\delta \cdot (\lambda_{\partial 2} + \lambda_{KL_2}) \cdot 10^{-6};$$

$$x_{E.XX.} = x_{\Pi.H.} \cdot \alpha^2 = 7,9 f_1 \cdot l'_\delta \cdot \lambda_{\Pi.H.} \cdot \alpha^2 \cdot 10^{-6}.$$

Коефіцієнт магнітної провідності потоків пазового розсіяння відповідно верхньої і нижньої кліток (табл. 6.29 [5])

$$\lambda_{П.В.} = \left(0,785 - \frac{b_{III}}{2d_1}\right) K_{\delta.в.} + \frac{h_{III}}{b_{III}} = \left(0,785 - \frac{1,5}{2 \cdot 8,2}\right) \cdot 1 + \frac{0,6}{1,5} = 1,002,$$

$K_{\delta.в.} = K_{\delta.н.} = 1$  – при розрахунку параметрів холостого ходу і номінального режиму.

$$\begin{aligned} \lambda_{П.Н.} &= \left[ \frac{h'_H}{3d_2} \left(1 - \frac{\pi d_2^2}{8q_H}\right)^2 + 0,66 - \frac{h_{II}}{2d_2} \right] K_{\delta.н.} + \frac{h_{II}}{b_{II}} = \\ &= \left[ \frac{20}{3 \cdot 8} \left(1 - \frac{\pi \cdot 8^2}{8 \cdot 162,525}\right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 8} \right] \cdot 1 + \frac{2}{1,5} = 2,5. \end{aligned}$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіяння

$$\lambda_{\delta_2} = \frac{t_2}{12 \cdot \delta \cdot K_{\delta}} \xi,$$

де  $\xi = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi p}{z_2}\right)^2 - \frac{\Delta z}{1 - (p/z_2)^2}$ ; при  $z_2/p \geq 10$   $\xi = 1 - \Delta z$ ;  $\Delta z = 0,01$ , тоді  $\xi = 1 - 0,01 \approx 1$ .

$$\lambda_{\delta_2} = \frac{17,38}{12 \cdot 0,75 \cdot 1,2} = 1,6.$$

Коефіцієнт магнітної провідності ділянок замикаючого кільця

$$\begin{aligned} \lambda_{КЛ_2} = \lambda_{Л_2} &= \frac{2,3 D_{КЛ.СР}}{z_2 \cdot l'_\delta \cdot \Delta^2} \lg \frac{4,7 \cdot D_{КЛ.СР}}{2a_{КЛ} + b_{КЛ}} = \\ &= \frac{2,3 \cdot 0,1855}{42 \cdot 0,230 \cdot 0,298^2} \lg \frac{4,7 \cdot 0,1855}{2 \cdot 0,0185 + 0,047} = 0,49 \cdot \lg 9,79 = \\ &= 0,49 \cdot 0,9574 = 0,469 \approx 0,47. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_2 &= 7,9 f_1 \cdot l'_\delta \cdot (\lambda_{П.В.} + \lambda_{П.Н.} \alpha^2 + \lambda_{\delta_2} + \lambda_{КЛ_2}) \cdot 10^{-6} = \\ &= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,230 (1,002 + 2,5 \cdot 0,75^2 + 1,6 + 0,47) \cdot 10^{-6} = 406,85 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Приведене до витків обмотки статора індуктивний опір фази ротора

$$x'_2 = x_2 \frac{4m(W_1 \cdot K_{об1})^2}{z_2} = 406,85 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 3(96 \cdot 0,925)^2}{42} = 0,9166 \text{ Ом}.$$

Відносне значення

$$x_2^* = \frac{x'_2 \cdot I_{1H}}{U_{1H}} = \frac{0,9166 \cdot 42,4}{380} = 0,102.$$

## РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ВТРАТ

Втрати в сталі основні

$$P_{ст.осн.} = p_{1,0/5,0} \left( \frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot (K_{\delta_a} \cdot B_a^2 \cdot m_a + K_{\delta_z} \cdot B_{z_1}^2 \cdot m_{z_1}) =$$

$$= 2,2 \left( \frac{50}{50} \right)^{1,6} \cdot (1,14 \cdot 1,32^2 \cdot 57,083 + 1,8 \cdot 1,84^2 \cdot 23,85) = 569,2 \text{ Вт}.$$

Для сталі 1312  $p_{1,0/5,0} = 2,2 \text{ Вт/кг}$ ;  $K_{\delta_a} = 1,14$ ;  $K_{\delta_z} = 1,8$  для машин з  $P_H \leq 250 \text{ кВт}$ ;  $\beta = 1,4 \cdot K_{\delta_a} = 1,6$ .

$$m_a = \pi(D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_{cm_1} \cdot K_C \cdot \gamma_C =$$

$$= \pi(0,365 - 0,0311) \cdot 0,0311 \cdot 0,23 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 57,083 \text{ кг}.$$

$$m_{z_1} = h_{z_1} \cdot b_{z_1cp} \cdot z_1 \cdot l_{cm_1} \cdot K_C \cdot \gamma_C =$$

$$= 34,4 \cdot 10^{-3} \cdot 8,3 \cdot 10^{-3} \cdot 48 \cdot 0,230 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 23,85 \text{ кг}.$$

Поверхневі втрати в роторі

$$P_{нов.2} = p_{нов.2}(t_2 - b_{III}) \cdot z_2 \cdot l_{cm_2},$$

де  $p_{нов.2} = 0,5 K_{O_2} \left( \frac{z_1 \cdot n_1}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{O_2} \cdot t_1 \cdot 10^3)^2 = 0,5 \cdot 1,5 \cdot \left( \frac{48 \cdot 1500}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,0852 \cdot 15,3 \cdot 10^3)^2 = 1072 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2};$

$$K_{O_2} = 1,5; \quad B_{O_2} = \beta_{O_2} \cdot K_\delta \cdot B_\delta = 0,1 \cdot 1,2 \cdot 0,71 = 0,0852 \text{ Тл}; \quad \beta_{O_2} \quad \text{для} \quad \frac{b_{III}}{\delta} = \frac{1,5}{0,75} = 2$$

рівний 0,1.

$$P_{нов.2} = 1072(17,38 - 1,5) \cdot 10^{-3} \cdot 42 \cdot 0,235 = 148,1 \text{ Вт}.$$

Пульсаційні втрати в зубцях ротора

$$P_{нул.2} = 0,11 \left( \frac{z_1 \cdot n}{100} \cdot B_{нул.2} \right)^2 m_{z_2} = 0,11 \cdot \left( \frac{z_1 \cdot 1500}{100} \cdot 0,24 \right)^2 \cdot 24 = 788 \text{ Вт}.$$

$$B_{нул.2} = \frac{\gamma \cdot \delta}{2t_2} B_{z_2cp} = \frac{8,5 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 17,38 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,3 = 0,24 \text{ Тл},$$

$$\gamma = 8,56; \quad B_{z_2cp} = 1,3 \text{ Тл}.$$

$$m_{z_2} = z_2 \cdot h_{z_2} \cdot b_{z_2cp} \cdot l_{cm_2} \cdot K_C \cdot \gamma_C =$$

$$= 42 \cdot 37,3 \cdot 10^{-3} \cdot 8,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,235 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 23,954 \approx 24 \text{ кг}$$

Сума додаткових втрат в сталі

$$P_{ст.дод} = P_{пов_2} + P_{нул_2} = 148,1 + 788 = 936,1 \text{ Вт}.$$

Повні втрати в сталі

$$P_{ст.} = P_{ст.осн} + P_{нул.дод} = 569,2 + (788 + 148,1) = 1505,3 \text{ Вт}.$$

Механічні втрати

$$P_{мех} = K_T \left( \frac{n}{10} \right)^2 \cdot D_a^4 = 0,8255 \cdot \left( \frac{1500}{10} \right)^2 \cdot 0,365^4 = 330 \text{ Вт},$$

$$K_T = 1,3(1 - D_a) = 1,3(1 - 0,365) = 0,8255.$$

Струм холостого ходу

$$I_{X.X} \approx \sqrt{I_{X.X.a}^2 + I_{\mu}^2},$$

$$\text{де } I_{X.X.a} = \frac{P_{ст.} + P_{мех} + P_{\partial 1 X.X.}}{m \cdot U_{1H}} = \frac{1505,3 + 330 + 183,75}{3 \cdot 380} = \frac{2019,05}{3 \cdot 380} = 1,77 \text{ А}.$$

$$P_{\partial 1 X.X.} = 3I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 14,83^2 \cdot 0,2785 = 183,75 \text{ Вт}.$$

Додаткові втрати при номінальному режимі

$$P_{дод.H} = 0,005 P_{1H} = 0,005 \frac{P_{2H}}{\eta} = 0,005 \frac{37 \cdot 10^3}{0,9} = 205,5 \text{ Вт}.$$

$$I_{X.X.} \approx \sqrt{1,77^2 + 14,83^2} = 14,935 \text{ А}.$$

$$\cos \varphi_{X.X.} = \frac{I_{X.X.a}}{I_{X.X.}} = \frac{1,77}{14,935} = 0,1185.$$

## РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК РОБОЧИХ І ПУСКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК

### 5.1 Розрахунок робочих характеристик

Опір, що враховує вплив втрат в сталі статора на характеристики двигуна

$$r_{12} = r_{\mu} = \frac{P_{ст.осн.}}{m \cdot I_{\mu}^2} = \frac{569,2}{3 \cdot 14,83} = 0,8627 \text{ Ом}.$$

Опір взаємній індуктивності обмоток статора і ротора

$$x_{12} = \frac{U_{1H}}{I_{\mu}} - x_1 = \frac{380}{14,83} - 0,913 = 24,71 \text{ Ом}.$$

Відношення векторів напруги фази  $\dot{U}_1$  до вектора ЕДС  $\dot{E}_1$  при синхронному обертанні машини

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0,913}{24,71} = 1,037.$$

Активна складова струму синхронного холостого ходу

$$I_{o_a} = \frac{P_{ст.осн.} + 3I_{\mu}^2 \cdot r_1}{3U_{1H}} = \frac{569,2 + 3 \cdot 14,83^2 \cdot 0,27}{3 \cdot 380} = 0,66 \text{ А}.$$

Реактивна складова струму синхронного холостого ходу

$$I_{o_p} \approx I_{\mu} = 14,83 \text{ А}.$$

Розрахункові коефіцієнти:

$$\begin{aligned} a' &= c_1^2 = 1,037^2 = 1,07536; \\ b' &= 0; \quad a = c_1 \cdot r_1 = 1,037 \cdot 0,2785 = 0,2888; \\ b &= c_1(x_1 + c_1 \cdot x_2') = 1,037(0,913 + 1,037 \cdot 0,9166) = 1,932. \end{aligned}$$

Втрати, не змінні при зміні ковзання

$$P_{ст} + P_{мех} = 1505,3 + 330 = 1835,3 \text{ Вт}.$$



Заздалегідь приймаємо  $S_{ном} \approx r_2'^* \approx 0,0177$  і розраховуємо робочі характеристики, задаючись величинами ковзання  $S = 0,005; 0,01; 0,015; 0,02; 0,025; 0,03$ .

Вихідні дані для розрахунку:  $P_{2н} = 37 \text{кВт}$ ;  $U_{1н} = 660/380 \text{В}$ ;  $2p = 4$ ;  
 $I_{1ном} = 42,4 \text{А}$ ;  $P_{ст} + P_{мех} = 1505,3 + 330 = 1835,3 \text{Вт}$ ;  $P_{доб.н} = 205,5 \text{Вт}$ ;  
 $I_{оа} = 0,66 \text{А}$ ;  $I_{ор} \approx I_{\mu} = 14,83 \text{А}$ ;  $r_1 = 0,2785 \text{Ом}$ ;  $r_2' = 0,159 \text{Ом}$ ;  $c_1 = 1,037$ ;  
 $a' = 1,07536 \text{Ом}$ ;  $a = 0,2888 \text{Ом}$ ;  $b' = 0$ ;  $b = 1,932 \text{Ом}$ .

Результати розрахунку приведені в табл. 5.1. Характеристики представлені на рис. 5.1.

Після побудови кривих уточнюємо значення номінального ковзання  $S_n$ . За результатами розрахунку і побудованих кривих  $S_n = 0,0177$ .

Номінальні дані спроектованого двигуна:  $P_{2н} = 37 \text{кВт}$ ;  $U_{1н} = 660/380 \text{В}$ ;  
 $I_{1ном} = 38,4 \text{А}$ ;  $\cos \varphi_n = 0,863$ ;  $\eta_n = 91\%$ ;  $S_n = 0,0177$ .

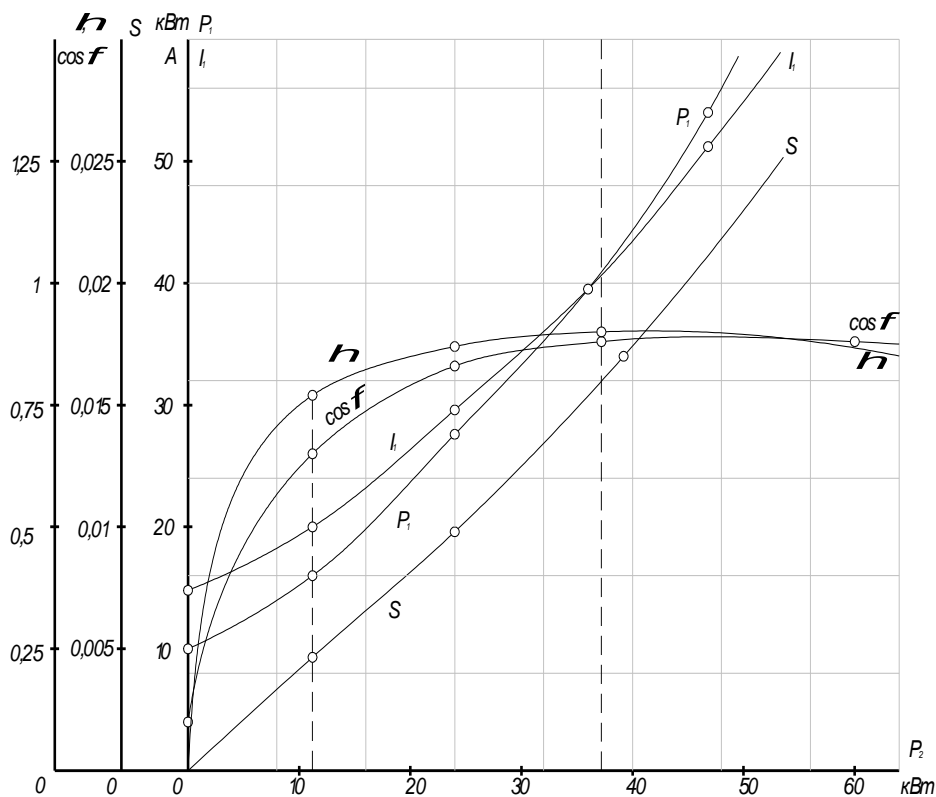


Рис. 5.1 - Робочі характеристики

Таблиця 5.1 - Розрахунок робочих характеристик

№ п/п	Розрахункова формула	Од.	Ковзання						
			0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	$S_n = 0,0177$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	$a' \cdot r_2' / S$	Ом	34,2	17,098	11,3986	8,549	6,839	5,7	9,66
2	$b' \cdot r_2' / S$	Ом	0	0	0	0	0	0	0
3	$R = a + a' \cdot r_2' / S$	Ом	34,488	13,3868	11,6866	8,8378	7,127	5,988	9,9488
4	$X = b + b' \cdot r_2' / S$	Ом	1,932	1,932	1,932	1,932	1,932	1,932	1,932
5	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	34,54	13,52	11,84	9,05	7,384	6,29	10,13
6	$I_2'' = U_{1н} / Z$	А	11,00	28,10	32,09	41,99	51,46	60,41	37,5
7	$\cos \varphi_2' = R / Z$	–	0,99849	0,99014	0,98704	0,97655	0,96514	0,95198	0,98211
8	$\sin \varphi_2' = X / Z$	–	0,0559	0,14289	0,16317	0,21348	0,26164	0,30715	0,19072
9	$I_{1а} = I_{оа} + I_2'' \cos \varphi_2'$	А	11,643	28,48	35,334	41,66	50,33	58,17	37,49
10	$I_{1р} = I_{ор} + I_2'' \sin \varphi_2'$	А	15,44	18,84	20,07	23,79	28,29	33,38	21,98
11	$I_1 = \sqrt{I_{1а}^2 + I_{1р}^2}$	А	19,337	34,147	40,63	47,97	57,73	67,06	42,4
12	$I_2' = c_1 \cdot I_2''$	А	11,407	29,14	36,28	43,54	53,36	62,64	38,88
13	$P_1 = 3U_{1н} \cdot I_{1а} \cdot 10^{-3}$	кВт	13,27	32,47	42,02	47,79	57,38	66,31	42,73
14	$P_{\Sigma 1} = 3I_1'^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт	0,312	0,974	1,209	1,92	2,78	3,76	1,578
15	$P_{\Sigma 2} = 3I_2'^2 \cdot r_2' \cdot 10^{-3}$	кВт	0,062	0,405	0,528	0,904	1,358	1,87	0,721
16	$P_{\text{доб}} = P_{\text{доб.н}} (I_1 / I_{1н})^2$	кВт	0,042	0,133	0,165	0,263	0,38	0,514	0,216
17	$\sum P = P_{\text{см}} + P_{\text{мех}} + P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} + P_{\text{доб}}$	кВт	1,836	1,8368	1,8372	1,8384	1,84	1,841	1,838
18	$P_2 = P_1 - \sum P$	кВт	11,434	30,63	40,18	45,65	55,54	64,47	40,89
19	$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_1}$	–	0,86164	0,905	0,918	0,903	0,898	0,89	0,91
20	$\cos \varphi = \frac{I_{1а}}{I_1}$	–	0,6021	0,834	0,8497	0,868	0,8718	0,8674	0,863

## 5.2 Розрахунок пускових характеристик

Розрахунок пускових характеристик проводимо по методиці, викладеній в [1].

Детальний розрахунок наводиться для ковзання проектованого двигуна рівним  $S = 1$ .

Матеріал к.з. клітки ротора – *алюміній*.

Для даної обмотки, коефіцієнт зміни еквівалентних опорів  $r_E$  і  $x_E$  залежно від ковзання визначається по формулах:

$$K'_x = \frac{x_E}{x_{E,x.x.}} = \frac{1}{1 + \beta^2 \cdot S^2};$$

$$K'_r = \frac{r_E}{r_{E,x.x.}} = \frac{1}{1 + \alpha} \cdot \left( 1 - \frac{\alpha}{1 + \beta^2 \cdot S^2} \right) = \frac{1}{1 - \alpha} (1 - \alpha K'_x),$$

де  $\alpha = \frac{r_6}{r_6 + r_n}$ .

У цьому виразі

$$r_6 = \rho_6 \frac{l_6}{q_6} = \rho_6 \frac{l_{cm2}}{\pi \frac{d_1^2}{4}} = 211,59 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

$$r_n = \rho_n \frac{l_n}{q_n} = \rho_n \frac{l_{cm}}{q_n} = 70,53 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

$\rho_6 = \rho_n$  – питомий опір алюмінієвого стержня;

$$\rho_{AL} = \frac{10^{-6}}{20,5} \text{ Ом} \cdot \text{м}; \quad \alpha = \frac{r_6}{r_6 + r_n} = 0,75.$$

$$\beta = \frac{x_{ПН}}{r_6 + r_n};$$

$$x_{ПН} = 7,9 f_1 \cdot l'_s \cdot \lambda_{П.Н} \cdot 10^{-6} = 7,9 \cdot 50 \cdot 0,235 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} = 232,06 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

$$\beta = \frac{232,06 \cdot 10^{-6}}{(211,59 + 70,53) \cdot 10^{-6}} = 0,82;$$

$$K'_x = \frac{1}{1 + 0,82^2 \cdot 1^2} = 0,6;$$

$$K'_r = \frac{1}{1 - 0,75} \cdot (1 - 0,75 \cdot 0,6) = 2,2.$$

Активний опір фази ротора

$$\begin{aligned} r_{2\xi} &= r'_s(1 - \alpha K'_x) + \frac{2r_{KL}}{\Delta^2} = 211,59 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,75 \cdot 0,6) + \frac{2 \cdot 0,783 \cdot 10^{-6}}{0,298^2} = \\ &= 116,37 \cdot 10^{-6} + 17,635 \cdot 10^{-6} = 134 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Індуктивний опір фази обмотки ротора

$$\begin{aligned} x_{2\xi} &= 7,9 f_1 \cdot l'_s \cdot (\lambda_{П.Н} + \lambda_{П.В} \cdot \alpha^2 \cdot K'_x + \lambda_{KL} + \lambda_\theta) \cdot 10^{-6} = \\ &7,9 \cdot 50 \cdot 0,235(1,002 + 2,5 \cdot 0,75^2 \cdot 0,6 + 0,47 + 1,6) \cdot 10^{-6} = 363,48 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Приведений активний опір фази обмотки ротора з врахуванням дії ефекту витіснення струму

$$r'_{2\xi} = r_{2\xi} \frac{4m(W_1 \cdot K_{об1})^2}{z_2} = 134 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 3(96 \cdot 0,925)^2}{42} = 0,301 \text{ Ом}.$$

Приведений індуктивний опір фази ротора з врахуванням ефекту витіснення струму

$$x'_{2\xi} = x_{2\xi} \frac{4m(W_1 \cdot K_{об1})^2}{z_2} = 363,48 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 3(96 \cdot 0,925)^2}{42} = 0,8189 \text{ Ом}.$$

Для випадку, коли  $S = 1$ , тобто момент пуску двигуна, коефіцієнт насичення зубцевої зони  $K_{нас} = 1,14$ . Приведений індуктивний опір фази ротора з врахуванням ефекту витіснення і насичення

$$x'_{2\xi_{нас}} = x'_{2\xi} \cdot K'_x \cdot K_{нас} = 0,9166 \cdot 0,6 \cdot 1,14 = 0,626 \text{ Ом}.$$

Струм ротора без врахування впливу насичення

$$\begin{aligned} I'_2 &= U_{1н} / \sqrt{(r_1 + r'_{2\xi}/S)^2 + (x_1 + x'_{2\xi})^2} = 380 / \sqrt{(0,2785 + 0,301/1)^2 + (0,913 + 0,8189)^2} = \\ &= 380 / \sqrt{0,3358 + 2,99} = 380 / 1,567 = 242,5 \text{ А}. \end{aligned}$$

Струм статора  $I_1 \approx I'_2 = 242,5 \text{ А}$ .

Далі розрахунок проводимо для струму  $K_{нас} \cdot I_1 = 1,14 \cdot 242,5 = 276,45 \text{ А}$ .

Середня магніторушійна сила обмотки, віднесена на один паз обмотки статора

$$F_{П.СР.} = 0,7 \cdot K_{нас} \cdot I_1 \cdot U_{П_1} \left( K'_\beta + K_{y_1} \cdot K_{об1} \cdot \frac{z_1}{z_2} \right) / a, A.$$

$$F_{П.СР.} = 0,7 \cdot 1,14 \cdot 242,5 \cdot 12 \left( 1 + 0,834 \cdot 0,925 \cdot \frac{48}{42} \right) / 1 = 4369,5 A.$$

Фіктивна індукція потоку розсіяння в повітряному зазорі

$$B_{\phi_\delta} = F_{П.СР.} \cdot 10^{-6} / (1,6 \cdot \delta \cdot C_N), Tл$$

де  $C_N = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}} = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{0,75}{15,3 + 17,39}} = 1,019.$

$$B_{\phi_\delta} = 4369,5 \cdot 10^{-6} / (1,6 \cdot 0,75 \cdot 10^{-6} \cdot 1,019) = 3,573 Tл.$$

Коефіцієнт зміни потоку розсіяння при насиченні машини при значенні  $B_{\phi_\delta} = 3,573 Tл.$  Складе  $\chi_\delta \approx 0,6.$

Додаткове розкриття паза статора

$$c_1 = (t_1 - e_{П_1}) \cdot (1 - \chi_\delta) = (15,3 - 9,13) \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,6) = 2,468 \cdot 10^{-3} м.$$

Викликане насиченням від полів розсіяння зменшення коефіцієнта провідності розсіяння паза статора

$$\begin{aligned} \Delta \lambda_{П_1,нас} &= (h_{Ш} + h_K) \cdot c_1 / [e_{П_1} (e_{П_1} + c_1)] = \\ &= (0,6 + 2) \cdot 10^{-3} \cdot 2,468 \cdot 10^{-3} / [9,13 \cdot 10^{-3} (9,13 \cdot 10^{-3} + 2,468 \cdot 10^{-3})] = 0,0605. \end{aligned}$$

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіяння статора при насиченні

$$\lambda_{П_1,нас} = \lambda_{П_1} - \Delta \lambda_{П_1,нас} = 1,436 - 0,0605 = 1,3755.$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіяння при насиченні ділянок зубців статора

$$\lambda_{\delta_1,нас} = \lambda_{\delta_1} \cdot \chi_\delta = 1,4 \cdot 0,6 = 0,84.$$

Індуктивний опір фази обмотки ротора з врахуванням насичення від полів розсіяння

$$x_{1нас} = x_1 \frac{\lambda_{\Pi_1нас} + \lambda_{\partial_1нас} + \lambda_{\mathcal{L}_1}}{\lambda_{\Pi_1} + \lambda_{\partial_1} + \lambda_{\mathcal{L}_1}}, Ом.$$

$$x_{1нас} = 0,913 \frac{1,3755 + 0,84 + 1,53}{1,436 + 1,4 + 1,53} = 0,7832 Ом.$$

Опір взаємній індукції обмоток в пусковому режимі

$$x_{12\Pi} = x_{12} \cdot K_M,$$

де  $K_M = 1,30$ .

$$x_{12\Pi} = 24,71 \cdot 1,30 = 32,12 Ом.$$

Тоді коефіцієнт  $c_{1\Piнас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12\Pi}}$ ;

$$c_{1\Pi} = 1 + \frac{0,7832}{32,12} = 1,025.$$

Струм в обмотці ротора, приведений до витків, обмотки статора з врахуванням насичення

$$I'_{2нас} = \frac{U_{1н}}{\sqrt{a_{\Pi}'^2 + \mathfrak{e}_{\Pi}'^2}}, A$$

де  $a_{\Pi} = r_1 + c_{1\Piнас} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{S}$ , Ом,  $\mathfrak{e}_{\Pi} = x_{1нас} + c_{1\Piнас} \cdot x'_{2\xiнас}$ , Ом.

$$a_{\Pi} = 0,2785 + 1,025 \cdot \frac{0,301}{1} = 0,587 Ом,$$

$$\mathfrak{e}_{\Pi} = 0,7832 + 1,025 \cdot 0,626 = 1,424 Ом.$$

$$I'_{2нас} = \frac{380}{\sqrt{0,587^2 + 1,424^2}} = 246,7 A.$$

Струм обмотки статора

$$I_1 = I'_{2нас} \frac{\sqrt{a_{\Pi}^2 + (\mathfrak{e}_{\Pi} + x_{12\Pi})^2}}{c_{1\Piнас} \cdot x_{12\Pi}} =$$

$$= 246,7 \frac{\sqrt{0,587^2 + (1,424 + 32,12)^2}}{1,025 \cdot 32,12} = 251,39 A.$$

Набутого значення струму  $I_1$  складає 91,5% прийнятого при розрахунку впливу насичення на параметри машини, що допустимо.

$$I_{II*} = \frac{I_{1II}}{I_{1H_{расч}}} = \frac{251,39}{38,4} = 6,55.$$

$$M_{II*} = \left( \frac{I'_{2II}}{I'_{2H}} \right)^2 \cdot K_r \cdot \frac{S_H}{S_{II}} = \left( \frac{246,7}{34} \right)^2 \cdot 2,2 \cdot \frac{0,0177}{1} = 2,05.$$

Критичне ковзання

$$S_{кр} = \frac{r'_2}{\frac{x_{1нас}}{c_{1IIнас}} + x'_{2\xiнас}},$$

де в проміжку  $S = 0,1 \dots 0,2$   $r'_2 = 0,159 \text{ Ом}$ .

$$x_{1нас} = \frac{0,856 + 0,893}{2} = 0,8745,$$

$$x'_{2\xiнас} = \frac{1,016 + 1,037}{2} = 1,0265,$$

$$c_{1IIнас} = \frac{1,026}{1,0259} \approx 1.$$

$$S_{кр} = \frac{0,159}{1,901} = 0,0836 \approx 0,084.$$

Кратність максимального моменту для такої величини  $S_{кр}$  рівна

$$M_{*K} \approx 3 \div 3,1.$$

Пускові характеристики представлені на рис. 5.2.

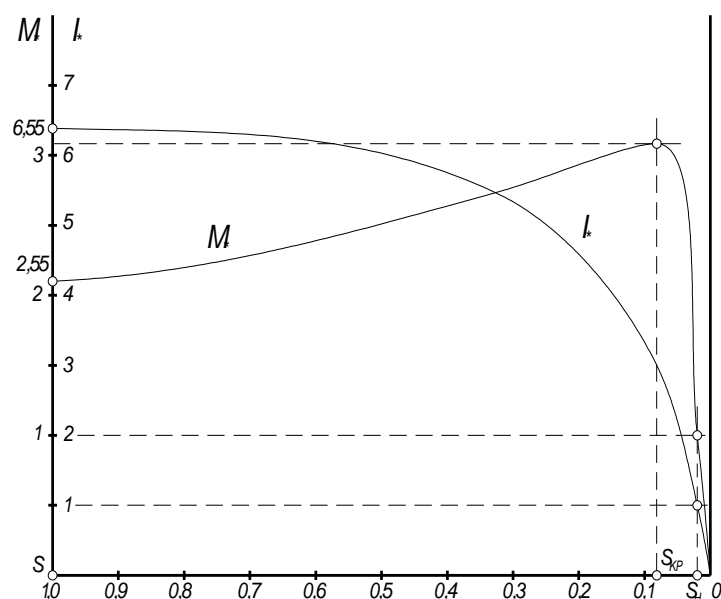


Рис. 5.2 - Пускові характеристики

## РОЗДІЛ 6. ТЕПЛОВИЙ І ВЕНТИЛЯЦІЙНИЙ РОЗРАХУНОК. МЕХАНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК

### 6.1 Тепловий розрахунок обмотки статора

Перевищення температури внутрішньої поверхні сердечника статора над температурою повітря усередині двигуна

$$\Delta V_{\text{ПОВ}_1} = K \frac{P'_{\text{Э.П1}} + P_{\text{ст.осн.}}}{\pi \cdot D_1 \cdot l_1 \cdot \alpha_1},$$

де  $K = 0,2$  [1, табл. 6–30];

$$P'_{\text{Э.П1}} = K_{\rho} \cdot P_{\text{Э1}} \frac{2l_1}{l_{\text{сп1}}} = 1,45 \cdot 1502 \cdot \frac{2 \cdot 0,23}{1,1734} = 853,8 \text{ Вт},$$

$K_{\rho} = 1,45$  для обмоток з ізоляцією класу нагрівостійкості  $H \left( K_{\rho} = \frac{\rho_{165}}{\rho_{115}} = 1,45 \right)$ ;

$$\alpha_1 = 115 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \text{ [1, рис. 6–59г,б].}$$

$$\Delta V_{\text{П1}} = 0,2 \frac{853,8 + 569,2}{\pi \cdot 0,234 \cdot 0,23 \cdot 115} = 14,64^\circ\text{C}.$$

Перепад температури в ізоляції пазової частини обмотки статора

$$\Delta V_{\text{ИЗ.П1}} = \frac{P'_{\text{Э.П1}}}{z_1 \cdot \Pi_{\text{П1}} \cdot l_1} \left( \frac{b_{\text{ИЗ.П1}}}{\lambda'_{\text{эКВ}}} + \frac{b_1 + b_2}{16\lambda'_{\text{эКВ}}} \right),$$

де  $\Pi_{\text{П1}} = 2 \cdot (h_{\text{П}} + b_{\text{П}}) = 2(34,4 + 9,13) = 87,06 \text{ мм}$ ;

$$b_{\text{ИЗ.П1}} = (b_{\text{П}} - n_{\text{ЭЛ}} b_{\text{П}}) \cdot 0,5 = (9,13 - 1 \cdot 6,4) \cdot 0,5 = 1,365 \text{ мм}.$$

для ізоляції класу нагрівостійкості  $F$  (тепловий індекс  $155^\circ\text{C}$ )

$$\lambda'_{\text{эКВ}} = 0,16 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}};$$

для обмоток з прямокутного дроту вираження  $\frac{b_1 + b_2}{16\lambda'_{\text{эКВ}}}$  приймаємо рівним нулю

[1, стор. 237].

$$\Delta V_{\text{ИЗ.П1}} = \frac{853,8}{48 \cdot 0,087 \cdot 0,23} \left( \frac{1,365 \cdot 10^{-3}}{0,16} \right) = 7,854^\circ\text{C}.$$



Перепад температури по товщині ізоляції лобових частин

$$\Delta V_{ИЗ.Л1} = \frac{P'_{Э.Л1}}{2z_1 \cdot \Pi_{Л1} \cdot l_{Л1}} \left( \frac{b_{ИЗ.Л1}}{\lambda_{эКБ}} + \frac{b_{Л1}}{12\lambda'_{эКБ}} \right),$$

де  $P'_{Э.Л1} = K_{\rho} \cdot P_{Э1} \frac{2l_{Л1}}{l_{сп1}} = 1,45 \cdot 1502 \cdot \frac{2 \cdot 0,3567}{1,1734} = 1324,11 \text{ Вт};$

$\Pi_{Л1} = \Pi_{Л1} = 87,06 \text{ мм}; \frac{h_{Л1}}{12\lambda'_{эКБ}} = 0$  для котушки з прямокутного дроту.

По таблиці. 3.16 [1]  $b_{ИЗ.Л1} = 3 \text{ мм}.$

$$\Delta V_{ИЗ.Л1} = \frac{1324,11}{2 \cdot 48 \cdot 0,087 \cdot 0,3567} \cdot \frac{0,003}{0,16} = 8,33^{\circ}\text{C}.$$

Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин над температурою повітря усередині машини

$$\Delta V_{П.Л1} = \frac{K \cdot P'_{Э.Л1}}{2\pi \cdot D \cdot l_{ввЛ1} \cdot \alpha_1} = \frac{0,2 \cdot 1324,11}{2\pi \cdot 0,234 \cdot 0,13 \cdot 115} = 12,05^{\circ}\text{C}.$$

Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою повітря усередині машини

$$\begin{aligned} \Delta V'_1 &= \left( \Delta V_{ПОВ.1} + \Delta V_{ИЗ.П.1} \right) \frac{2l_1}{l_{сп1}} + \left( \Delta V_{ИЗ.Л1} + \Delta V_{ПОВ.Л1} \right) \cdot \frac{2l_{Л1}}{l_{сп1}} = \\ &= (14,64 + 7,584) \cdot \frac{2 \cdot 0,23}{1,1734} + (8,33 + 12,05) \cdot \frac{2 \cdot 0,3567}{1,1734} = 8,712 + 12,39 = 21,1^{\circ}\text{C}. \end{aligned}$$

Середнє перевищення температури повітря усередині двигуна над температурою середовища, що охолоджує

$$\Delta V_{\epsilon} = \sum P'_\epsilon / S_{кор} \cdot \alpha_{\epsilon},$$

де  $\sum P'_\epsilon = \sum P' - (1 - K) \cdot (P'_{Э.Л1} + P_{ст.осн.}) - 0,9P_{мех};$

$$\sum P' = \sum P + (K_{\rho} - 1) \cdot (P_{Э1} + P_{Э2}) = 3145 + (1,45 - 1) \cdot (1502 + 931,46) = 4240 \text{ Вт}.$$

$$\sum P'_\epsilon = 4240 - (1 - 0,2) \cdot (853,8 + 569,2) - 0,9 \cdot 330 = 4240 - 1138,4 - 297 = 2804,6 \text{ Вт}.$$

$$S_{кор} = (\pi D_a + 8\Pi_p) \cdot (l_1 + 2l_{ввЛ1}),$$

де по рис. 6.63 [1]  $\Pi_p = 0,44 \text{ м}^2$  для  $h = 250 \text{ мм}.$

$$S_{кор} = (\pi \cdot 0,365 + 8 \cdot 0,44) \cdot (0,23 + 2 \cdot 0,130) = (1,146 + 3,52) \cdot 0,49 = 2,29 \text{ м}^2.$$

$$\alpha_e = 23 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}, \text{ по рис. 6.59, б [1] для } D_a = 0,365 м.$$

$$\Delta V_e = \sum P'_e / S_{кор} \cdot \alpha_e = 2804,6 / 2,29 \cdot 23 = 53,24^\circ C.$$

Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою середовища, що охолоджує

$$\Delta V_1 = \Delta V'_1 + \Delta V_e = 21,1 + 53,24 = 74,34^\circ C.$$

Набутого значення  $\Delta V_1$  на 40% менше, ніж допустиме перевищення температури для прийнятого класу (температурного індексу) ізоляції  $H = 125^\circ C$  згідно ГОСТ183–74 (табл. 5.1 [1]).

## 6.2 Розрахунок вентиляції

Потрібна для охолодження витрата повітря

$$Q_e = \frac{K_m \cdot \sum P'_e}{1100 \cdot \Delta V_e},$$

$$\text{де } K_m = m \sqrt{\frac{n}{100} D_a} = 2,5 \sqrt{\frac{1500}{100} \cdot 0,365} = 5,85.$$

$$m = 2,5.$$

$$Q_e = 5,85 \frac{2804,6}{1100 \cdot 53,24} = 0,28 м^3/с.$$

Витрата повітря забезпечувана зовнішнім вентилятором

$$Q'_e = 0,6 D_a^3 \frac{n}{100} = 0,6 \cdot 0,365^3 \frac{1500}{100} = 0,438 м^3/с.$$

Необхідно, аби дотримувати умову

$$Q'_e > Q_e, \text{ в даному випадку отримано}$$

$$Q'_e = 0,438 > Q_e = 0,28 м^3/с.$$

Таким чином, за результатами розрахунку умова дотримується, тобто зовнішній вентилятор забезпечує охолодження двигуна.

## 6.3 Розрахунок валу на міцність

Номінальний момент, що обертає

$$M_{ном} = 9,55 \cdot P_n / n_n = 9,55 \cdot 37000 / 1473,5 = 239,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальна частота обертання

$$n_n = n_c (1 - S_n) = 1500 (1 - 0,0177) \approx 1473,5 \text{ об/мин}.$$

Маса ротора

$$m_p = 6500 \cdot D_K^2 \cdot l_2 = 6500 \cdot 0,2325^2 \cdot 0,235 = 82,6 \text{ кг}.$$

Сила тягаря ротора

$$G_p = 9,81 \cdot m_p = 9,81 \cdot 82,6 = 810,3 \text{ Н}.$$

Поперечна сила, прикладена до кінця валу:

$$F_{II} = K_{II} \cdot M_n / R = \frac{0,3 \cdot 239,8}{0,0975} = 737,85 \text{ Н},$$

де  $K_{II}$  – коефіцієнт; при передачі пружною муфтою  $K_{II} = 0,3$ ;  $R$  – радіус по центрах пальців муфти;

$$R \approx 0,0975 \text{ м}.$$

Для визначення міцності валу, вал розбиваємо на ділянки (рис. 6.1).

Механічні розмірні параметри валу приведені в табл. 6.1.

Прогин валу посередині магнітопровода під дією сили тяжіння ротора

$$f_G = \frac{G_p}{3EI^2} \cdot (S_b \cdot c^2 + S_c \cdot b^2),$$

де  $E = 2,06 \cdot 10^{11} \text{ Па}$  – модуль пружності;  $\left. \begin{array}{l} S_b \text{ у } S_c \\ \tau_i = \frac{\pi d_i^4}{64} \end{array} \right\}$  – див. табл. 6.1;  $\tau_i$  –

екваторіальний момент і інерція валу.

$$l = (b + c) = 255 + 231 = 486 \text{ мм} = 0,486 \text{ м}.$$

Величини  $S_a$  і  $S_b$  беремо з розрахункової таблиці 3.

$$\begin{aligned} f_G &= \frac{810,3}{3 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 0,486^2} \cdot (28,88 \cdot 10^2 \cdot 23,1^2 \cdot 10^{-4} + 20,44 \cdot 10^2 \cdot 25,5^2 \cdot 10^{-4}) = \\ &= 555,12 \cdot 10^{-11} \cdot (154,1 + 132,91) = 1,33 \cdot 10^{-5} \text{ м}. \end{aligned}$$

Прогин валу посередині магнітопровода від поперечної сили муфти

$$f_{II} = \frac{F_{II} \cdot a}{3EI^2} \cdot \left[ \left( \frac{3}{2} \cdot l \cdot S_o - S_b \right) c + S_c \cdot b \right],$$

де  $S_o = 1,327 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$  (по рис. 6.1 і табл. 6.1);  $a$  – відстань від точки додатка сили  $F_{II}$  до найближчої опори;  $a = 0,175 \text{ м}$ .

$$f_{II} = \frac{737,85 \cdot 0,175}{3 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 0,486^2} \cdot \left[ \left( \frac{3}{2} \cdot 0,486 \cdot 1,327 \cdot 10^4 - 28,88 \cdot 10^2 \right) \cdot 0,231 + 20,44 \cdot 10^2 \cdot 0,255 \right] =$$

$$= 88,46 \cdot 10^{-11} \cdot (1567,53 + 521,22) = 0,1848 \cdot 10^{-5} \text{ м}.$$

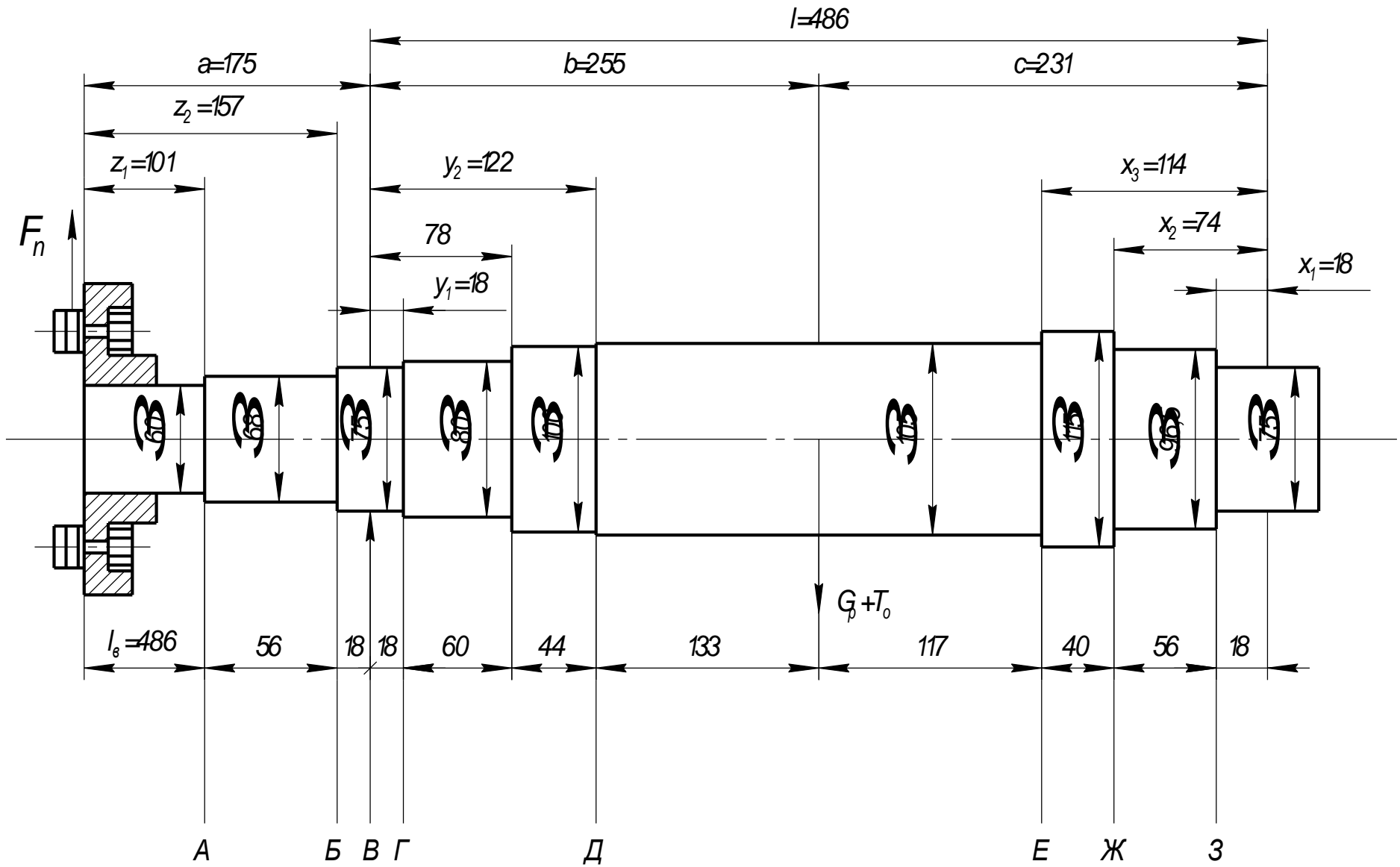


Рис. 6.1 - Розрахунковий ескіз валу електродвигуна

Таблиця 6.1

№ ділянки ліва частина	$d_i, м$	$\tau_i, м^4$	$y_i, м$	$y_i^3, м^3$	$y_i^3 - y_{i-1}^3, м^3$	$\frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{\tau_i}, м^{-1}$	$y_i^2, м^2$	$y_i^2 - y_{i-1}^2, м^2$	$\frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{\tau_i}, м^{-2}$
1	0,075	$155 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$5,832 \cdot 10^{-6}$	$5,832 \cdot 10^{-6}$	3,76	$3,24 \cdot 10^{-4}$	$3,24 \cdot 10^{-4}$	$0,021 \cdot 10^4$
2	0,080	$200,66 \cdot 10^{-8}$	$7,8 \cdot 10^{-2}$	$474,55 \cdot 10^{-6}$	$468,7 \cdot 10^{-6}$	233,6	$60,84 \cdot 10^{-4}$	$57,6 \cdot 10^{-4}$	$0,284 \cdot 10^4$
3	0,10	$490,6 \cdot 10^{-8}$	$12,2 \cdot 10^{-2}$	$1815,85 \cdot 10^{-6}$	$1341,3 \cdot 10^{-6}$	273,4	$153,76 \cdot 10^{-4}$	$92,92 \cdot 10^{-4}$	$0,189 \cdot 10^4$
4	0,105	$596,1 \cdot 10^{-8}$	$25,5 \cdot 10^{-2}$	$16581,37 \cdot 10^{-6}$	$14765,5 \cdot 10^{-6}$	2477	$650,25 \cdot 10^{-4}$	$496,49 \cdot 10^{-4}$	$0,833 \cdot 10^4$

$$\tau_i = \frac{\pi d_i^4}{64}; \quad S_b = \sum \frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{\tau_i} = 28,88 \cdot 10^2 м^{-1}.$$

$$S_o = \sum \frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{\tau_i} = 1,327 \cdot 10^4 м^{-2}$$

№ ділянки права частина	$d_i, м$	$\tau_i, м^4$	$x_i, м$	$x_i^3, м^3$	$x_i^3 - x_{i-1}^3, м^3$	$\frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{\tau_i}, м^{-1}$
1	0,075	$155 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$5,832 \cdot 10^{-6}$	$5,832 \cdot 10^{-6}$	3,76
2	0,0965	$425,4 \cdot 10^{-8}$	$7,4 \cdot 10^{-2}$	$405,224 \cdot 10^{-6}$	$405,224 \cdot 10^{-6}$	95,25
3	0,115	$857,6 \cdot 10^{-8}$	$11,4 \cdot 10^{-2}$	$1481,54 \cdot 10^{-6}$	$1076,316 \cdot 10^{-6}$	125,5
4	0,105	$596,1 \cdot 10^{-8}$	$23,1 \cdot 10^{-2}$	$12326,39 \cdot 10^{-6}$	$10844,85 \cdot 10^{-6}$	1819,3

$$S_c = \sum \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{\tau_i} = 20,44 \cdot 10^2 м^{-1}$$

Початковий зсув ротора

$$e_o = 0,1\delta + f_G + f_{II},$$

де  $\delta$  – повітряний зазор між ротором і статором;  $\delta = 0,00075\text{м}$ ;

$$e_o = 0,1 \cdot 0,00075 + 1,33 \cdot 10^{-5} + 0,1848 \cdot 10^{-5} = 9,0148 \cdot 10^{-5} \approx 0,009 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Початкова сила однобічного магнітного тяжіння

$$T_o = 2,94 \cdot D_{H_2} \cdot l_2 \frac{e_o}{\delta} \cdot 10^5 = 2,94 \cdot 0,2325 \cdot 0,242 \frac{0,009 \cdot 10^{-2}}{0,00075} \cdot 10^5 = 1985,02 \text{ Н}.$$

Прогин валу від сили  $T_o$

$$f_T = \frac{f_G \cdot T_o}{G_p} = \frac{1,33 \cdot 10^{-5} \cdot 1985,02}{810,3} = 0,0326 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Сталий прогин під дією сил магнітного тяжіння

$$f_M = \frac{f_T}{1-m},$$

$$\text{де } m = f_T/e_o = \frac{0,0326 \cdot 10^{-3}}{0,009 \cdot 10^{-2}} = 0,362.$$

$$f_M = \frac{0,0326 \cdot 10^{-3}}{1-0,362} = 0,0511 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Результуючий прогин валу

$$f = f_M + f_G + f_{II} = 5,11 \cdot 10^{-5} + 1,33 \cdot 10^{-5} + 0,1848 \cdot 10^{-5} = 6,625 \cdot 10^{-5} \text{ м}.$$

Прогин складає 8,8% повітряного зазору, що допустимо.

Критична частота обертання

$$n_{кр} \approx 30 \sqrt{\frac{1-m}{f_G}} = 30 \sqrt{\frac{1-0,362}{1,33 \cdot 10^{-5}}} = 6570,6 \text{ об/мин},$$

Умова  $n_{кр} > 1,3n_{ном}$ , тобто  $6570,6 > 1,3 \cdot 1473,5$ ; умова нерівності швидкостей дотримана.

*Розрахунок валу на міцність*

З розрахунку на міцність приймаємо коефіцієнт перевантаження  $K = 2$ .

Напруга на вільному кінці валу в перетині А

$$M_{u_A} = k \cdot F_{II} \cdot z_1 = 2 \cdot 737,85 \cdot 0,101 \approx 149 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент опору в перетині А

$$W_A = 0,1 \cdot d_A^3 = 21,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Напруга вигину в перетині А

$$\sigma_{np_A} = \frac{1}{W_A} \cdot \sqrt{M_{u_A}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_{ном})^2} = \frac{1}{21,6 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{149^2 + (2 \cdot 0,6 \cdot 239,8)^2} = 15 \text{ МПа},$$

тут  $\alpha = 0,6$  для нереверсивних машин.

Перетин Б

$$M_{u_B} = k \cdot F_{II} \cdot z_2 = 2 \cdot 737,85 \cdot 0,157 = 231,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$W_B = 0,1 \cdot d_B^3 = 0,1 \cdot 0,068^3 = 31,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

$$\sigma_{np_B} = \frac{1}{W_B} \cdot \sqrt{M_{u_B}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_{ном})^2} = \frac{1}{31,4 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{231,7^2 + (2 \cdot 0,6 \cdot 239,8)^2} = 11,8 \text{ МПа}.$$

Перетин Г

$$\begin{aligned} M_{u_\Gamma} &= k \cdot F_{II} \cdot c \left( 1 - \frac{y_1}{l} \right) + (G_p + T) \cdot \frac{a \cdot y_1}{l} = \\ &= 2 \cdot 737,85 \cdot 0,175 \left( 1 - \frac{1,8 \cdot 10^{-2}}{0,486} \right) + (810,3 + 3111,32) \cdot \frac{0,231 \cdot 1,8 \cdot 10^{-2}}{0,486} = 260,65 \text{ Н} \cdot \text{м}, \end{aligned}$$

$$\text{де } T = \frac{T_o}{1-m} = \frac{1985,02}{1-0,362} = 3111,32 \text{ Н}.$$

$$W_\Gamma = 0,1 \cdot d_\Gamma^3 = 0,1 \cdot 0,075^3 = 42,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

$$\sigma_{np_\Gamma} = \frac{1}{W_\Gamma} \cdot \sqrt{M_{u_\Gamma}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_{ном})^2} = \frac{1}{42,1 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{260,65^2 + (2 \cdot 0,6 \cdot 239,8)^2} = 9,22 \text{ МПа}.$$

Перетин Д



$$M_{u_D} = k \cdot F_{II} \cdot c \left(1 - \frac{y_2}{l}\right) + (G_p + T) \cdot \frac{a \cdot y_2}{l} =$$

$$= 2 \cdot 737,85 \cdot 0,175 \left(1 - \frac{0,122}{0,486}\right) + (810,3 + 3111,32) \cdot \frac{0,231 \cdot 0,122}{0,486} = 420,82 \text{ H} \cdot \text{м}.$$

$$W_D = 0,1 \cdot d_D^3 = 0,1 \cdot 0,1^3 = 100 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

$$\sigma_{npB} = \frac{1}{W_D} \cdot \sqrt{M_{u_D}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_{ном})^2} = \frac{1}{100 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{420,82^2 + (2 \cdot 0,6 \cdot 239,8)^2} = 5,1 \cdot 10^6 \text{ МПа}.$$

Перетин *E*

$$M_{u_E} = [k \cdot F_{II} \cdot c + (G_p + T) \cdot b] \cdot \frac{x_3}{l} =$$

$$= [2 \cdot 737,85 \cdot 0,175 + (810,3 + 3111,32) \cdot 0,255] \cdot \frac{0,114}{0,486} = 295,15 \text{ H} \cdot \text{м}.$$

$$W_E = 0,1 \cdot d_E^3 = 0,1 \cdot 0,105^3 = 115,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

$$\sigma_{npE} = \frac{1}{W_E} \cdot \sqrt{M_{u_E}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_{ном})^2} = \frac{1}{115,7 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{295,15^2 + (2 \cdot 0,6 \cdot 239,8)^2} = 3,563 \text{ МПа}.$$

Перетин *Ж*

$$M_{u_{Ж}} = [k \cdot F_{II} \cdot c + (G_p + T) \cdot b] \cdot \frac{x_2}{l} =$$

$$= [2 \cdot 737,85 \cdot 0,175 + (810,3 + 3111,32) \cdot 0,255] \cdot \frac{0,074}{0,486} = 191,59 \text{ H} \cdot \text{м}.$$

$$W_{Ж} = 0,1 \cdot d_{Ж}^3 = 0,1 \cdot 0,0965^3 = 89,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

$$\sigma_{npЖ} = \frac{1}{W_{Ж}} \cdot \sqrt{M_{u_{Ж}}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_{ном})^2} = \frac{1}{89,8 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{191,59^2 + (2 \cdot 0,6 \cdot 239,8)^2} = 3,85 \text{ МПа}.$$

Перетин *З*

$$M_{u_3} = [k \cdot F_{II} \cdot c + (G_p + T) \cdot b] \cdot \frac{x_1}{l} =$$

$$= [2 \cdot 737,85 \cdot 0,175 + (810,3 + 3111,32) \cdot 0,255] \cdot \frac{0,018}{0,486} = 46,6 \text{ H} \cdot \text{м}.$$

$$W_3 = 0,1 \cdot d_3^3 = 0,1 \cdot 0,075^3 = 42,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

$$\sigma_{np3} = \frac{1}{W_3} \cdot \sqrt{M_{u_3}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_{ном})^2} = \frac{1}{42,1 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{46,6^2 + (2 \cdot 0,6 \cdot 239,8)^2} = 6,92 \text{ МПа}.$$

Із зіставлення отриманих даних виходить, що найбільш навантаженим є перетин  $\dot{A}$ , для якого  $\sigma_{np} = 15 \text{ МПа} < 0,7 \cdot 360 \cdot 10^6 \text{ Па}$ , тобто значно нижче за межу текучості сталі марки 45.

#### 6.4 Вибір підшипників

Шпонка знаходиться на вільному кінці валу.

Розміри шпонки:

висота –  $h_{ШП} = 15 \text{ мм} = 0,015 \text{ м}$ ;

довжина –  $l_{ШП} = 70 \text{ мм} = 0,07 \text{ м}$ ;

діаметр кінця валу –  $d_B = 60 \text{ мм} = 0,06 \text{ м}$ .

Матеріал шпонки сталь *Ст5*, для якої допустима напруга приймається приблизно рівною  $150 \cdot 10^6 \text{ Па}$ .

Вибрана шпонка перевірятимуться на те, що зім'яло.

Напругу того, що зім'яло визначимо по 9 – 102 [1]:

$$\sigma_{CM} = \frac{K \cdot M_H}{0,25 \cdot d_B \cdot h_{ШП} \cdot l_{ШП}},$$

де  $K$  – коефіцієнт перевантаження, який вибирається в межах від 2 до 3;  $M_H$  – номінальний момент електродвигуна рівний  $239,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

$$\sigma_{CM} = \frac{2,5 \cdot 239,8}{0,25 \cdot 0,06 \cdot 0,015 \cdot 0,07} \approx 38,06 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Оскільки розрахункове значення  $\sigma_{CM} \ll \sigma_{дон}$ , тому вибрана шпонка задовольняє вимогам умов експлуатації електродвигуна.

## РОЗДІЛ 7. ТЕХНІЧНІ ДАНІ СПРОЕКТОВАНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Таблиця 7.1 – Технічні дані спроектованого електродвигуна

№ п/п	Технічна характеристика	Показник технічної характеристики		
		Базовий	Спроектований	± %
1	Номінальна потужність, <i>кВт</i>	37	37	–
2	Номінальна напруга, <i>В</i>	660/380	660/380	–
3	Синхронна частота обертання, <i>об/хв</i>	1500	1500	–
4	<i>ККД</i> , %	91,5	91	абс. – 0,5 в.о. – 0,005
5	<i>cos φ</i> , в.о.	0,85	0,863	в.о. + 0,013
6	Ковзання. в.о.	0,013	0,0177	в.о. 0,047
7	Кратність пускового струму, <i>K<sub>I</sub></i> , в.о.	7,00	6,55	– 6,88 %
8	Кратність пускового моменту, <i>K<sub>M</sub></i> , в.о.	1,9	2,05	+ 12,2 %
9	Кратність максимального моменту, <i>K<sub>M</sub></i> , в.о.	3,1	3,08	– 0,64 %
10	Маса, <i>кг</i>	470	470	–

За базу порівняння для спроектованого електродвигуна з номінальною потужністю  $P_{ном} = 37 \text{ кВт}$  вибираємо серійний електродвигун ЕДКОф4-37У2-5. Двигун використовується в приводі забійних механізмів і вуглевидобувних комплексах – вугільних комбайнів, стругових установок, а також в приводі скребкових конвеєрів. При цьому вказаний двигун призначений для роботи в тривалому режимі включення, що обмежує його використання в процесі видобутку вугілля. Удосконалення двигуна за рахунок розрахунково-конструктивних рішень наводить до розширення

використання двигуна в реальних режимах роботи приводів всього стругового комплексу.

### Аналіз впливу конструктивних особливостей проектного електродвигуна на показники його технічного рівня

Для кількісного обґрунтування переваг проектного електродвигуна розглянемо приведені в карті аналізу технічного рівня показники, що дають порівняльні переваги проектного електродвигуна над базовим.

Таблиця 7.2 -Карта аналізу технічного рівня проектного електродвигуна

№	Показник	Од. вим.	Значення		Технічне рішення, що забезпечує зміну параметра
			Базовий	Проект- ваний	
1	Номінальна потужність	кВт	37	37	–
2	Потужність втрат холостого ходу	Вт	$2225 \cdot 10^{-3}$	$2019 \cdot 10^{-3}$	Вживання ел. техн. стали з меншим $R_{уд}$ .
3	Маса	кг	470	470	–
4	Трудомісткість	норм. г.	45,86	43,93	Зниження $T_p$ за рахівниць механізації просочувально-обмотувальних операцій і складальних робіт
5	Термін служби	років	10	11	Збільшення терміну служби за рахунок зниження втрат потужності і збільшення терміну служби ізоляції

### 7.1 Розрахунок показників технологічності конструкції

Вихідні дані для розрахунку показників технологічності представлені в табл. 7.3.

Таблиця 7.3 - Вихідні дані для розрахунку показника технологічності

№ п.п.	Показники	Варіанти	
		Базовий	Проектований
		Кількість типорозмірів вузлів, деталей	
1	Запозичені, $N_3$	5	6
2	Стандартні, $N_{cm}$	70	73
3	Купувальні, $N_{нок}$	7	7
4	Оригінальні, $N_{ор}$	1132	1128
5	Загальна кількість складових частин, $N_{заг}$	1214	1214

Для кількісного обґрунтування переваг проектного електродвигуна по технологічності конструкції розрахуємо наступні показники технологічності:

Коефіцієнт спадкоємності

$$K_{cn} = \frac{N_3}{N_{заг}};$$

$$K_{cn.б} = \frac{N_{3б}}{N_{заг.б}} = \frac{5}{1214} = 0,0041;$$

$$K_{cn.n} = \frac{N_{3n}}{N_{заг.n}} = \frac{6}{1214} = 0,0049.$$

Коефіцієнт стандартизації електродвигуна

$$K_{cm} = \frac{N_{cm}}{N_{заг}};$$

$$K_{cm.б} = \frac{N_{cm.б}}{N_{заг.б}} = \frac{70}{1214} = 0,0577;$$

$$K_{cm.n} = \frac{N_{cm.n}}{N_{заг.n}} = \frac{73}{1214} = 0,06.$$

Коефіцієнт вживаності купувальних деталей

$$K_{нок} = \frac{N_{нок}}{N_{заг}};$$

$$K_{нок.б} = \frac{N_{нок.б}}{N_{заг.б}} = \frac{7}{1214} = 0,0057;$$

$$K_{нок.n} = \frac{N_{нок.n}}{N_{заг.n}} = \frac{7}{1214} = 0,0057.$$

Питома матеріаломісткість базового і проектного електродвигуна

$$q_m = \frac{Q_{i3d}}{P_{ном}};$$

$$q_{m\bar{b}} = \frac{Q_{i3d\bar{b}}}{P_{ном\bar{b}}} = \frac{470}{37} = 12,7 \text{ кг/кВт};$$

$$q_{mn} = \frac{Q_{i3dn}}{P_{номn}} = \frac{470}{37} = 12,7 \text{ кг/кВт}.$$

Коефіцієнт обліку відмінностей в масі двигунів

$$K_m = \sqrt[3]{\left(\frac{M_n}{M_{\bar{b}}}\right)^2};$$

$$K_m = \sqrt[3]{\left(\frac{470}{470}\right)^2} = 1,0.$$

Коефіцієнт обліку відмінностей в складності

$$K_{сл.} = \frac{N_n}{N_{\bar{b}}} = \frac{1214}{1214} = 1,0.$$

Коефіцієнт обліку відмінностей в новизні

$$K_{нов.} = \frac{N_{ор.n}}{N_{ор.\bar{b}}} = \frac{1128}{1132} = 0,996.$$

Коефіцієнт обліку відмінностей в рівні уніфікації

$$K_{ун.} = \frac{N_{ст.n}}{N_{ст.\bar{b}}} = \frac{0,06}{0,0577} = 1,0398.$$

Трудомісткість виготовлення проектного двигуна

$$T_n = T_{\bar{b}} \cdot K_m \cdot K_{сл.} \cdot K_{нов.} / K_{ун.} = 45,86 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,996 / 1,0398 = 43,93 \text{ норм} \cdot \text{г}.$$

Питома трудомісткість виготовлення базового і проектного електродвигуна

$$q = \frac{T}{P_{ном}},$$

де  $T$  – загальна трудомісткість – трудовитрати на виготовлення, монтаж, регулювання виробу в нормогодин. Для базового електродвигуна  $T_{\bar{b}} = 45,86 \text{ норм} \cdot \text{год}$ . Ці дані узяті з розшифровки трудових витрат і калькуляції собівартості для двигуна ЕДКОФ4-37У2-5 (базового), що випускається Першотравневим електромеханічним заводом.

$$q_{m.\bar{b}} = \frac{45,86}{37} = 1,24 \frac{\text{норм} \cdot \text{г}}{\text{кВт}}.$$

$$q_{m.n} = \frac{43,93}{37} = 1,19 \frac{\text{норм.г.}}{\text{кВт}}$$

Отримані результати показників технологічності приведені в табл. 7.4.

Таблиця 7.4 - Показники технологічності конструкції

Варіанти	Показники технологічності				
	Коефіцієнт спадкоємності	Коефіцієнт стандартизації	Коефіцієнт вживаності покупних деталей	Питома матеріаломісткість $\frac{\text{кг}}{\text{кВт}}$	Питома трудомісткість, $\frac{\text{норм.г.}}{\text{кВт}}$
Базовий	0,0041	0,0577	0,0057	12,7	1,24
Спроектований	0,0049	0,06	0,0057	12,7	1,19

## РОЗДІЛ 8. ВИБІР ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ І СХЕМИ УПРАВЛІННЯ ДВИГУНАМИ ПРИВОДУ СКРЕБКОВОГО КОНВЕЄРА

### 8.1 Вибір магнітних пускачів для електродвигунів $ДК_1$ і $ДК_2$

Живлення двигунів здійснюється від мережі з напругою  $660В$ . По номінальному струму двигуна  $I_n = 42,4А$  з таблиці. прил. 1[10]. Вибираємо магнітний пускач у вибухобезпечного виконання  $U_{ном} = 660/380В$ ;  $I_n = 63А$ .

Найбільша потужність керованого двигуна  $55/32кВт$ . Захист від коротких замикань – вбудована універсальна типа  $УМЗ$ ; уставки максимального захисту  $125 – 375А$ .

Комутаційна здатність магнітного пускача,  $A$ :

на відключення – 1400 (ефективне значення);

на включення – 2400 (амплітудне значення).

Кількість силових виводів – 3;

контрольних виводів – 3.

Маса, кг – 145.

### 8.2 Схема електрична принципова магнітного пускача для управління двигунами $ДК1$ і $ДК2$ . Опис роботи схеми

#### 8.2.1. Функції, що виконуються електричною схемою пускача.

Конструкція і електричні схеми пускачів серії  $ПМВИ$  дозволяють здійснювати:

- дистанційне керування контактором пускача як по трьох-, так і за двопровідною схемою за допомогою окремих кнопкових постів управління або за допомогою кнопок, вбудованих в корпуси гірських машин і механізмів;
- захист підключених до пускача струмоприймачів і кабелів від струмів к.з.;



- нульовий захист машини (установки), електроенергією, що харчується, через даний пускач;
- захист від мимовільного включення контактора пускача при замиканні між собою дротів ланцюга управління;
- контроль цілісності заземлюючої екіли гнучкого кабелю, через який струмоприймач підключений до пускача, а так само контроль максимально-допустимої величини опору ( $150\text{Ом}$ ) заземлюючому ланцюгу установки;
- відключення контактора пускача під дією температурного реле, вбудованого в електродвигун, підключений до пускача;
- обмеження частоти включення контактора пускача до 1200 в годину;
- сигналізацію про спрацьовування (блокувального реле витоку) захисту при коротких замиканнях.

### **8.2.2. Опис роботи схеми управління пускачем (рис. 8.1).**

Схеми електричних з'єднань пускачів *ПМВИ* включають наступні елементи.

#### Силові ланцюги:

- прохідні затиски  $L_1, L_2, L_3$ , що знаходяться в мережевій камері ввідного пристрою;
- блокувальний реверсивний роз'єднувач  $QS$  ;
- контактор  $KM$  ;
- первинні обмотки трансформаторів струму  $TA1$  і  $TA2$  ;
- прохідні затиски  $C_1, C_2, C_3$ , розташовані в моторній камері ввідного пристрою.

#### Схема управління:

- трансформатор знижуючий  $T$ , первинна обмотка якого підключається безпосередньо до мережі, а вторинна на напругу  $38\text{В}$  служить для живлення

стабілізованого трансформатора і зовнішнього навантаження (місцевого освітлення);

– трансформатор ферорезонансний (стабілізований)  $TS$ , в первинну обмотку якого включений конденсатор  $C_3$ , вторинна обмотка трансформатора зашунтована конденсатором  $C_1$ . Вживання стабілізованого трансформатора забезпечує стабілізацію напруги в ланцюзі управління навіть при значних коливаннях напруги в шахтній мережі. У режимі холостого ходу стабілізованого трансформатора напруга на затисках його вторинної обмотки складає  $18B$ ;

– проміжне реле  $KL$ , обмотка якого має високий індуктивний і малий активний опір, завдяки чому реле  $KL$  практично реагує лише на постійний (випрямлений) реле;

– перемикач  $SA4$ , службовець для перекладу схеми пускача з дистанційного керування в режимі «Перевірка».

Дистанційне керування пускачами  $ПМВИ$  може здійснюватися як за трипровідною, так і по двопровідною схемою. Схеми дистанційного керування пускачів працюють таким чином. До натиснення на кнопку «пуск» діод  $VD$  відключений і через обмотку реле  $KL$  протікає змінний струм, величина якого обмежена великим індуктивним опором обмотки, є недостатньою для його спрацьовування. При натисненні на кнопку «пуск» котушка реле  $KL$  індукується діодами  $VD$ . У напівперіод, коли півхвиля має напрям від плюса до мінуса, діод  $VD$  відкритий. Оскільки величина опору відкритого діода у багато разів менше опору обмотки реле  $KL$ , то струм в цій обмотці в даний напівперіод практично не протікає. У другий напівперіод, коли півхвиля має напрям від мінуса до плюса діод  $VD$  закритий. Опір діода при цьому у багато разів більше опору обмотки реле  $KL$ , завдяки чому весь струм протікає по цій обмотці. Таким чином, при натисненні на кнопку «пуск» струм через обмотку реле  $KL$  протікає в одному напрямі, тобто реле в одному випадку харчується однонапівперіодним випрямленим струмом.

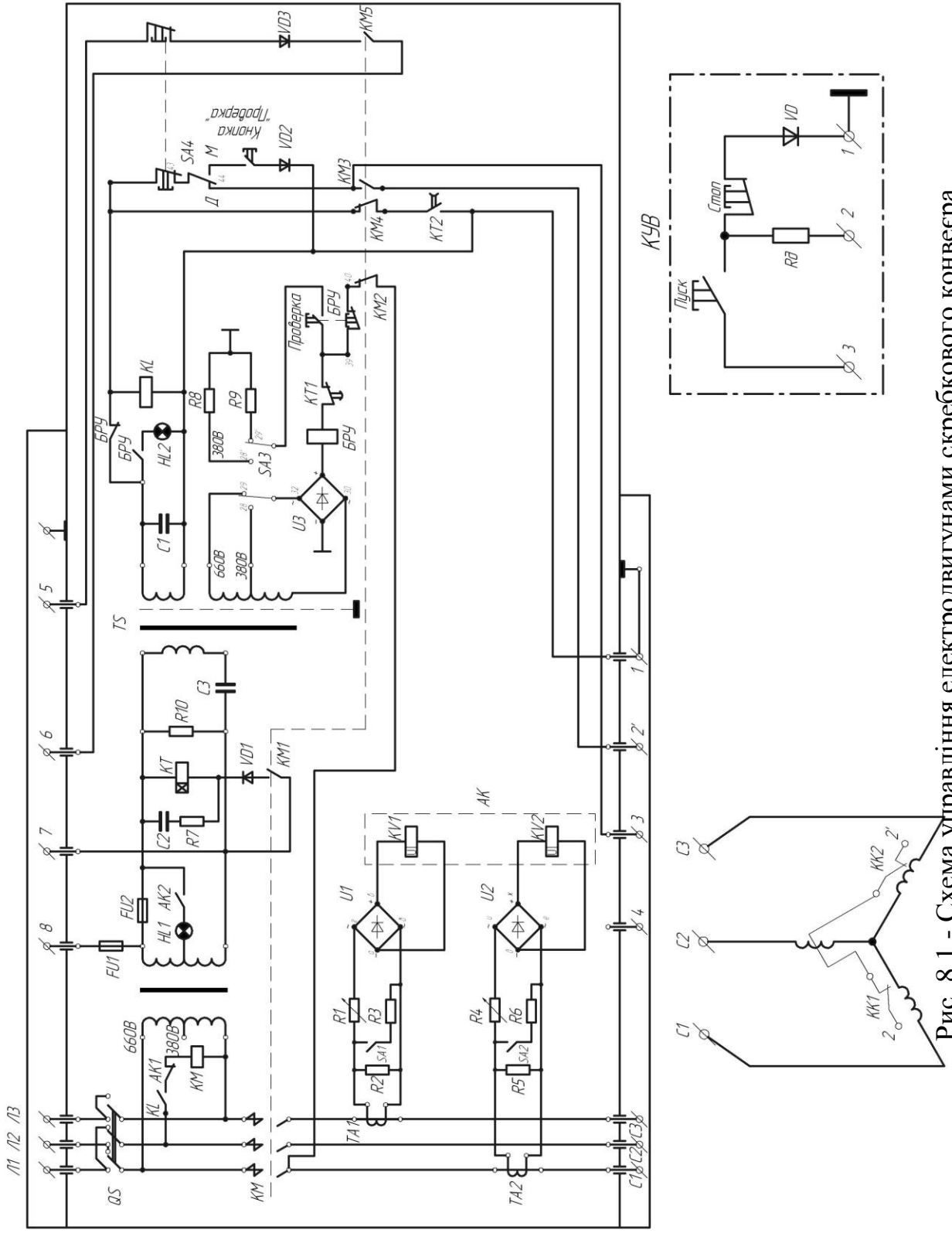


Рис. 8.1 - Схема управління електродвигунами скребкового конвеєра

Зниження величини індуктивного опору обмотки реле викликає зростання величини струму, що протікає по цій обмотці. Параметри елементів ланцюга управління вибрані таким чином, що струм в ланцюзі управління в цьому випадку має достатню величину для спрацьовування реле  $KL$ . Після припинення натиснення на кнопку «пуск» затиски її індуються резистором  $R_d$  через блок-контакт контактора  $KM_3$  при трипрохідній схемі або цим же резистором, підключеним безпосередньо до затисків кнопки «пуску», при двопротидній схемі. При виконанні трипрохідної схеми управління резистор  $R_d$  служить для забезпечення захисту від замикання між дротами ланцюга управління, а при двопротидній схемі – для забезпечення нульового захисту установки.

Після припинення натиснення на кнопку «пуск» і після включення контактора проміжного реле  $KL$  залишається включеним. Кнопка «перевірка», що є на корпусі пускачів  $ПМВИ-13М$ , призначена лише для перевірки справності електричної схеми ланцюгів управління пускача.

При здійсненні такої перевірки необхідно заздалегідь відкрити кришку пускача і встановити перемикач режимів роботи  $SA-4$  в положенні при якому замикаються контакти 43 і 44.

В цьому випадку при натисненні на кнопку «перевірку» (при закритій кришці) обмотка реле  $KL$  індукується діодом  $VD2$ , який змонтований в оболонці пускача. Реле починає обтікатися однапівперіодним випрямленим потоком, що наводить до його виключення. Після припинення натиснення на кнопку «перевірку» реле  $KL$  відключається. У схемах пускачів  $ПМВИ-13М$  застосовано блокувальне реле типа  $БРУ$ . Наявність блокувальних реле унеможливорює включення пускача, якщо в підключеній до нього мережі є витік недопустимої величини. Таким чином за допомогою реле  $БРУ$  здійснюється випереджаючий контроль опору ізоляції мережі, підключеної до пускача. Живлення постійним струмом здійснюється від випрямляча  $V_3$ , на вхід якого (затиски 30 і 32) подається напруга з вторинної обмотки стабілізатора  $TS$ . Ця обмотка має відпаювання, що дозволяють

використовувати одне і теж реле при напрузі дільничної мережі 380 або 660 В. При установці перемикача *SA3* на затиску 28 (ланцюг 32–28) на вхід моста подається напруга *45В*. Якщо при включеному контакторі пускача в підключеній до нього мережі опір ізоляції знизиться нижче за допустимі норми, то спрацьовує реле витоку, встановлене в трансформаторній підстанції, і через автомат фідера відключає живлення пускачів розподільного пункту під лавою.

Контактори пускачів, забезпечені реле *БРУ*, відключаючись, замкнуть свої блок–контакт *КМ2*, через який реле *БРУ* підключене до відключеної ділянки мережі. У пускачах, до яких підключені мережі із справною ізоляцією, замикання блок–контакта *КМ2* не приведе до спрацьовування реле *БРУ*, тому такий пускач може бути включений в роботу. Контроль опору ізоляції в мережі, підключеній пускачем, здійснюється по ланцюгу: плюс моста  $V_3$  – обмотка реле *БРУ* – що розмикає контакт *КТ1* – замкнуті контакти 39–40 кнопки «перевірка *БРУ*» – розмикаючий блок–контакт *КМ2* – одна з фаз відключеної мережі – обмотка підключеного до пускача двигуна – опір витоку – затиск «земля» моста  $V_3$ .

Якщо опір ізоляції відключеної мережі знизиться нижче за допустиму величину, то струм, що протікає через обмотку реле *БРУ*, зростає до значень, при яких це реле спрацьовує. Спрацьовує, реле *БРУ* розриває свій контакт в ланцюзі реле *KL* і замикає контакт в ланцюзі сигнальної лампи  $HL_2$ . Спрацьовування реле *БРУ* відбувається при зниженні опору ізоляції в мережі, що відходить від пускача, нижче  $30\text{кОм}$  при  $U_H = 660\text{В}$  і нижче  $15\text{кОм}$  при  $U_H = 380\text{В}$  контроль справності. Контроль справності реле *БРУ* здійснюється за допомогою кнопки «перевірка *БРУ*». При її натисненні створюється штучний витік через перевірочний опір  $R_9(30\text{кОм})$  або  $R_8(15\text{кОм})$  залежно від номінального перемикача *SA3*, тобто від номінальної напруги мережі. Для виключення помилкових спрацьовувань реле *БРУ* під дією е.р.с. відключеного від мережі, але що продовжує обертатися

електродвигуна, в ланцюг реле включений розмикаючий контакт  $KT_1$  реле часу  $KT$ . Досягається таке блокування тим, що при включеному пускачі ланцюг живлення реле  $БРУ$  розірваний як блок–контактом  $KM_2$ , так і контактом  $KT_1$ .

При підключенні контактора його блок–контакт розмотується і живлення реле часу  $KT$  припиняється. Проте якір реле деякий час (2-3с) залишається в притягнутому стані, оскільки обмотка його продовжує обтікати струмом за рахунок розряду конденсатора  $C_2$  через резистор  $R_7$ . В результаті цього контакт  $KT_1$  в ланцюзі блокувального реле  $БРУ$  замикається з витримкою часу (2 – 3с), який вистачає для того, щоб е.р.с., що генерується відключеним від мережі, але що продовжує обертатися двигуном, знизилася до величин, не здатною викликати помилкове спрацьовування реле  $БРУ$ .

Реле часу  $KT$  так само обмежує частоту включення контактора пускача до 1200 в годині Це досягається тим, що в ланцюг, що шунтує реле  $KL$  включений контакт  $KT_2$ , що розмикається з витримкою часу. Тому після відключення пускача і замикання контакту  $KM_4$ , реле  $KL$  деякий час (2-3 с) виявляється зашунтованим, так як протягом цього часу, контакт  $KT_2$  залишається замкнутим і повторне включення пускача в цей період часу неможливе.

У пускачах  $ПМВИ-13$  застосований універсальний максимально – струмова захист типа  $УМЗ$ , що включає два виконавчі реле  $KV_1$  і  $KV_2$  через випрямлячі  $U_1$  і  $U_2$  що харчуються від трансформаторів  $ТА1$  і  $ТА2$ . При виникненні струмів к.з. напруга, що знімається з резисторів  $R_2$  і  $R_5$ , зростають до величин, які після випрямлення є достатнім для спрацьовування реле захисту  $AK$ . Обоє реле  $KV_1$  і  $KV_2$  впливають на один виконавчий механізм, пов'язаний з кнопковим елементом, що має що один розмикає  $AK_1$  і один замикає  $AK_2$  контакти. Тому при спрацьовуванні захисту  $УМЗ$  контакт  $AK_1$  розмикає ланцюг живлення котушки контактора  $KM$ , а контакт

AK2 замикає ланцюг живлення лампи HL1, загоряння якої сигналізує про спрацьовування захисту.

### 8.3 Перелік елементів схеми

№ п.п.	Позначення в схемі	Найменування	Кільк.	Примітка
1	2	3	4	5
1	$C_1$	МБГП-1-0,5мкФ±10%	1	$U_{раб} = 200В$
	$C_2$	МБГП-2-10мкФ±10%	1	$U_{раб} = 300В$
	$C_3$	МБГП-5-200мкФ±10%	1	$U_{раб} = 50В$
2	$R_2, R_5$	ППБ-3А-1кОм±5%	2	напруга 3Вт
	$R_3, R_6, R_{10}$	ПЭВ-7,5А-180Ом±5%	3	напруга 7,5Вт
	$R_7$	МЛТ-2-22кОм±10%	1	напруга 2Вт
	$R_8$	МЛТ-2-15кОм±10%	1	напруга 2Вт
	$R_9$	МЛТ-2-30кОм±10%	1	напруга 2Вт
	$R_1, R_4$ $R_9$	ПЭВ-7,5-47Ом±5%	1	напруга 7,5Вт
3	КТ	Реле	1	$I_{ср} = 3мА$
	КЛ	Часу РКИ	1	$U_n = 18В$
	KV1, KV2	Проміжне РП-2И	2	$U_{ср} = 12В$
	БРУ	Напруги РП-2И	1	$I_n = 4мА$
		Блокувальне реле витоку РД4Г	1	$I_{ср} = 2мА$ , струм відпускання $I_{омн} = 0,4мА$
4	КТ	Контактор КТУ-2А	1	$U_n = 660В$ $I_n = 100А$
5	VD1, VD2, VD3, VD4	Діод Д-226Е кремнієв.	4	$I_{нр} = 300мА$ $U_{об} = 300В$
6	$U_1, U_2, U_3$	Мости випрямні, діоди Д-226Е	3	$I_{нр} = 300мА$ $U_{об} = 300В$
7	$FU_1$	ПК-45	1	$I_{вст} = 3А$
	$FU_2$	ПК-45	1	$I_{вст} = 1А$
8	HL1	КМ12-90ГОСТ6940-75	1	$I_n = 9мА$ $U_n = 12В$
	HL2	КМ12-90 блок БРУ	1	плафон червоний $I_n = 90мА$

№ п.п.	Позначення в схемі	Найменування	Кільк.	Примітка
1	2	3	4	5
9	T	Трансформатори: ланцюги управління	1	$U_1 = 660B$ $U_2 = 36B$ $S = 100BA$ стабіліз. $U_{ввх} = 18B \mp 5\%$
	TS	стабілізований ферорезонансний	1	
10	QS	Роз'єднувач реверсивний ножового типу РБ – 120PD, РБ – 240PD	1	$I_n = 63; 120 A$ $U_n = 660B$
11	AK	Комплект захисту макс. струму УМЗ	1	
12	SA1, SA2	Тумблер ТП1 – 2	2	$I_n = 2 A$ $U_n = 220B$
13	кнопка «Пуск»	KVB	1	$I_n = 4 A$ $U_n = 660B$ $I_n = 4 A$ $U_n = 660B$
	кнопка «Стоп»	KVB	3	



## РОЗДІЛ 9. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

### 9.1 Основні типи нелінійних характеристик

Лінійні системи автоматичного керування описуються лінійними диференціальними рівняннями. У цих рівняннях змінні та їх похідні зустрічаються лише у першому ступені й відсутні взаємні добутки змінних та їх добутки з похідними.

На практиці лінійних САК не існує, бо характеристики більшості елементів, що утворюють системи, нелінійні, й точні диференціальні рівняння систем є нелійними. У них крім першого зустрічаються й інші ступені змінних і їх похідних.

До нелінійних САК належать усі системи, в які входить один або декілька нелінійних елементів. Ми будемо розглядати вузький клас нелінійних САК, що характеризуються такими особливостями:

- САК складається з лінійної частини, яка описується лінійним диференціальним рівнянням із постійними коефіцієнтами, і нелінійного елемента (НЕ);
- нелінійний елемент є безінерційним, і його вхідна та вихідна величини пов'язані нелійними алгебраїчними рівняннями;
- нелінійних елементів може бути декілька, але вони не повинні розділятися лінійними інерційними ланками.

Структурні схеми нелінійних САК, що відповідають цим вимогам, наведено на рис. 9.1.

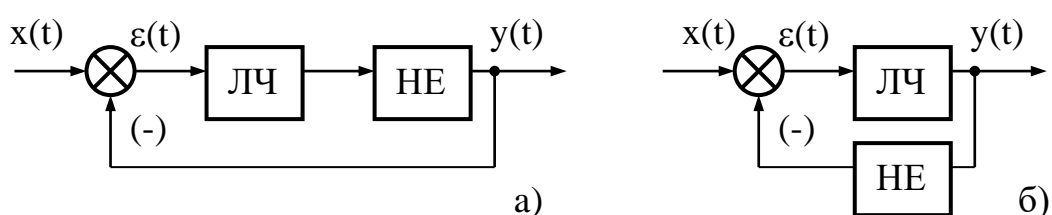


Рис. 9.1 - Структурні схеми нелінійних САК;  
ЛЧ – лінійна частина; НЕ – нелінійний елемент

Таким чином, нелінійність даного класу САК обумовлена нелінійністю статичної характеристики одного з її елементів.

Найпростішими нелінійними елементами є *статичні нелінійності*. У них вихідна величина  $y$  залежить тільки від вхідної величини  $x$ , причому ця залежність однозначна (рис. 9.2 а, в; рис. 9.2 а, б, г).

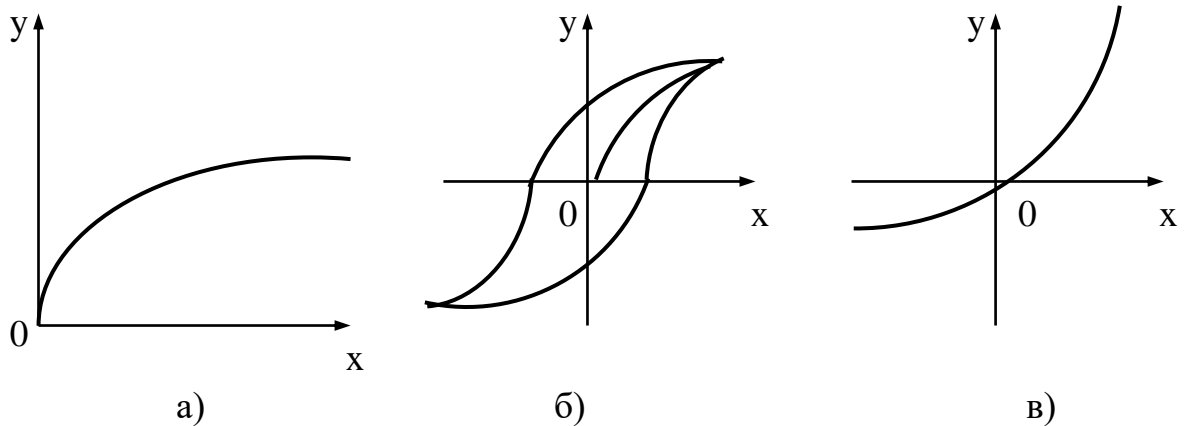


Рис. 9.2 - Типові нелінійні характеристики: а) елемент з насиченням; б) гістерезіс; в) випрямляч

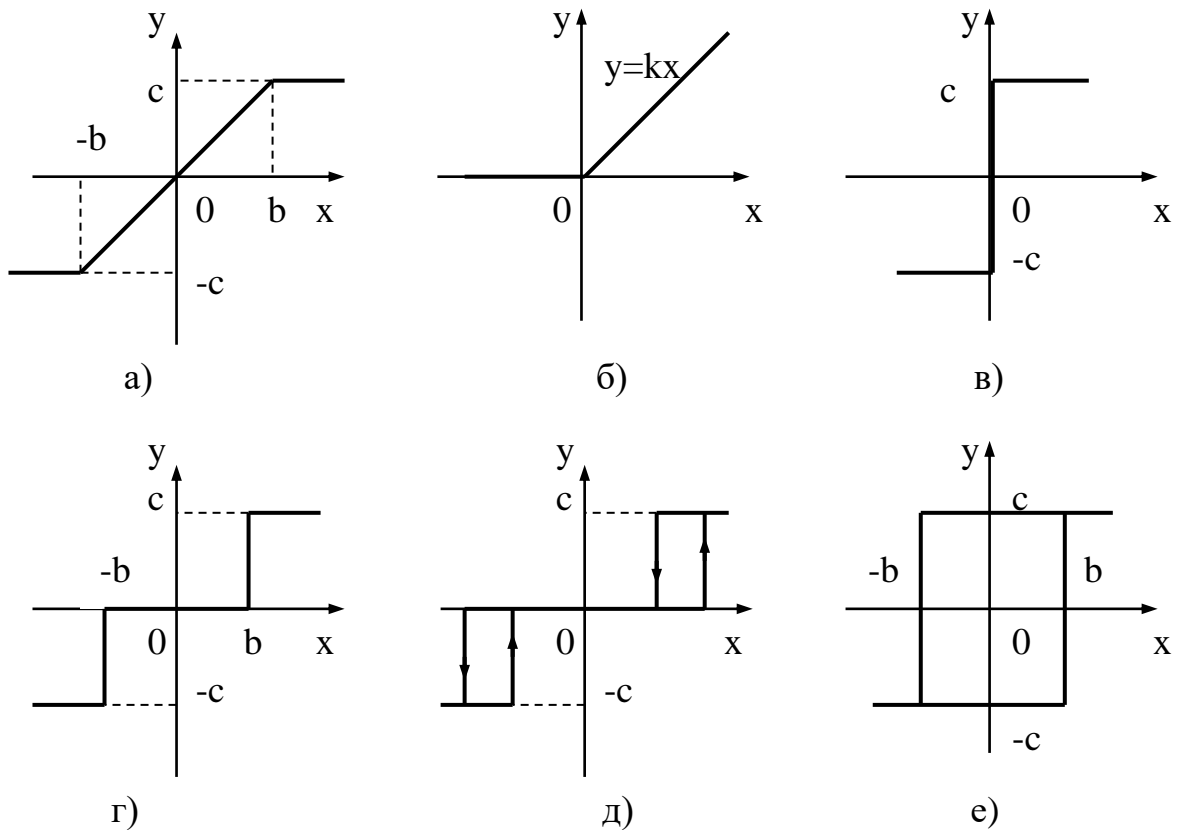


Рис. 9.3 - Типові частково-лінійні характеристики: а) характеристика з насиченням; б) ідеальний випрямляч; в) ідеальне реле; г) трипозиційне реле із зоною нечутливості; д) трипозиційне реле із зоною нечутливості і гістерезісом; е) двопозиційне реле з гістерезісом

У динамічних нелінійностей вихідна величина  $y$  залежить як від вхідної величини  $x$ , так і від її похідної  $x'$ . Характеристика динамічної нелінійності завжди неоднозначна. Це петльові характеристики (рис. 9.2 б; рис. 9.3 д, е). Більш складною динамічною нелінійністю є елемент із сухим тертям або ідеальне реле, що часто зустрічається в технічних пристроях (рис. 9.3 в).

Досить часто зустрічаються елементи, характеристики яких є частково-лінійними або апроксимуються частково-лінійними графіками (рис. 9.3).

Якщо у систему входить декілька нелінійних елементів, з'єднаних послідовно, паралельно або зустрічно-паралельно, то сумарну характеристику можна побудувати за певними правилами.

*Паралельне з'єднання нелінійних елементів.* При паралельному з'єднанні НЕ сумарну характеристику будують як геометричну суму нелінійних характеристик окремих елементів (рис. 9.4).

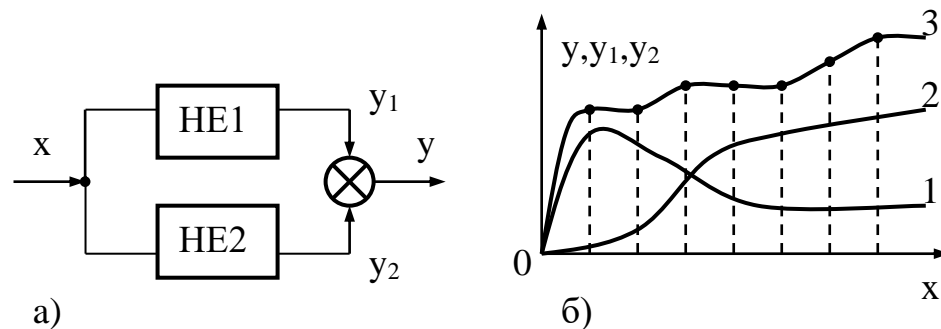


Рис. 9.4 - а) Структурна схема паралельного з'єднання нелінійних елементів; б) нелінійні характеристики елементів (1 і 2) і сумарна характеристика (3)

*Послідовне з'єднання двох нелінійних елементів.* При послідовному з'єднанні нелінійних елементів вихідна величина одного НЕ є вхідною для дальшого НЕ (рис. 9.5 а). Тому під час побудови сумарної нелінійної характеристики систему координат другої характеристики повертають на  $90^\circ$ , сполучаючи вісі  $x_{1\text{вих}}$  і  $x_{2\text{вх}}$ .

У першій чверті будують характеристику НЕ1, в другій – НЕ2, в третій проводять бісектрису, за допомогою якої у четвертій чверті отримують сумарну нелінійну характеристику (рис. 9.5 б).

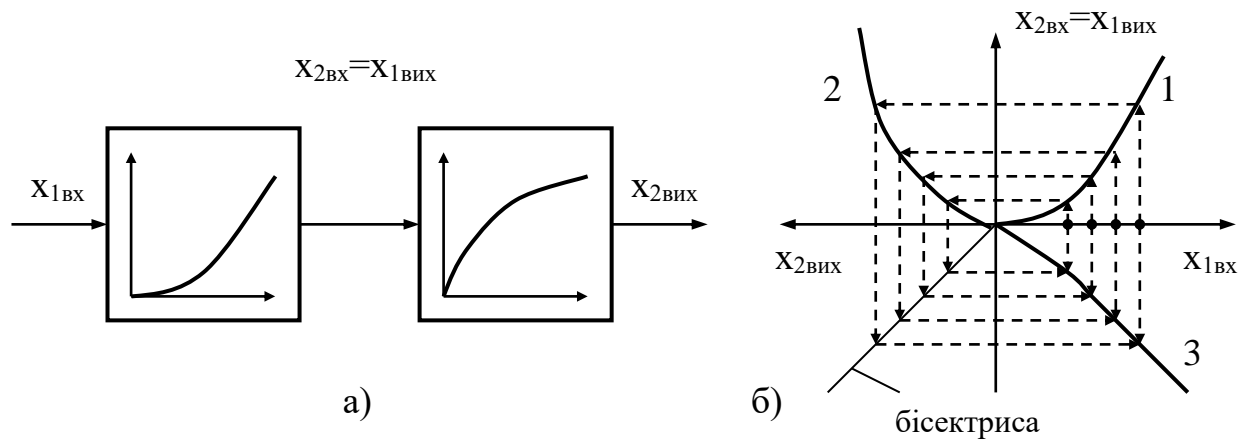


Рис. 9.5 - а) Структурна схема послідовного з'єднання нелінійних елементів; б) побудова сумарної (3) нелінійної характеристики при послідовному з'єднанні НЕ

У керуючих пристроях автоматичних систем поряд з релейними елементами використовуються так звані *особливі нелінійності*: добуткова ланка, елементи зі змінною структурою, елементи логічного типу.

*Добуткова ланка* використовується в обчислювальних блоках систем для обчислення квадрату сигналу і для визначення модуля сигналу.

Використання керуючих пристроїв зі *змінною структурою* створює великі можливості для покращення якості систем. У таких пристроях до основного контуру системи залежно від визначених умов вмикається або лінійна ланка  $W_1$ , або лінійна ланка  $W_2$ .

Нелінійності *логічного типу* залежно від комбінацій значень вхідних змінних видають сигнал, що дорівнює +1, -1 або 0.

## 9.2 Властивості й методи дослідження нелінійних систем

З математичної точки зору найбільш суттєвою відмінністю лінійних систем від нелінійних є те, що до останніх *не застосовується принцип суперпозиції*: реакція нелінійної системи на декілька впливів не дорівнює сумі реакцій на окремі впливи. Якщо, наприклад, є нелінійна квадратична залежність  $y=x^2$ , то при  $x = x_1+x_2$  отримуємо  $y=(x_1+x_2)^2$ , що не дорівнює сумі  $y_1=x_1^2$  і  $y_2=x_2^2$ , тобто  $(x_1+x_2)^2 \neq x_1^2 + x_2^2$ .

До нелінійних систем також *не застосовується принцип комутативності*, тобто у системі не можна міняти місцями між собою нелінійні елементи, а також нелінійні та лінійні елементи.

Для дослідження нелінійних систем *не можна застосовувати перетворення Лапласа і Фур'є* і отримані на їх основі передавальні функції, бо ці перетворення є лінійними.

Особливістю нелінійних систем є можливість виникнення у них стійких коливань певної амплітуди і частоти – *автоколивань*.

*Стійкість* нелінійних систем визначається не тільки структурою і параметрами САК (як у лінійних системах), але *залежить і від початкових відхилень* відносно стану рівноваги.

Усі ці особливості нелінійних САК обумовили необхідність розробки ряду методів для їх дослідження, у результаті якого мають бути розв'язані такі основні задачі:

- аналіз впливу нелінійностей, притаманних реальним елементам, на процеси у лінеаризованих системах;
- аналіз стійкості суттєво нелінійних систем, виявлення автоколивань і визначення їх амплітуди і частоти, визначення точності системи та її реакції на зовнішні впливи;
- корекція САК за допомогою нелінійних коректувальних пристроїв і синтез суттєво нелінійних систем, що мають задані динамічні характеристики.

До методів дослідження нелінійних систем, які отримали практичне застосування, належать:

*Частотні методи.* Вони являють собою розповсюдження частотних методів на нелінійні системи. Це частотний метод В.М. Попова дослідження стійкості й метод гармонічної лінеаризації Л.С. Гольдфарба та Е.П. Попова.

*Метод фазової площини.* Цей метод ґрунтується на зображенні руху системи на фазовій площині за допомогою фазових траєкторій. Він дозволяє порівняно просто досліджувати динаміку нелінійних систем другого порядку.

*Метод припасовування.* Метод полягає у тому, що нелінійна характеристика замінюється декількома лінійними ділянками. Розв'язки, що відповідають цим ділянкам, зшиваються. Метод вирізняється складністю обчислень, особливо при високих степенях рівнянь.

*Графоаналітичні методи.* Серед них найбільш розповсюдженим є метод Д.А.Башкірова побудови перехідних процесів. Ґрунтується на розкладі складного диференціального рівняння на елементарні рівняння, для яких запропонований простий графічний спосіб інтегрування. Метод може бути застосований для систем будь-якого порядку.

*Чисельні методи.* Зводяться до чисельного розв'язування нелінійних диференціальних рівнянь.

*Метод малого параметра або метод еквівалентної лінеаризації.* Метод застосовують для аналізу нелінійних САК, до рівнянь яких входить деякий малий параметр  $\mu$  так, що при нульовому значенні  $\mu$  нелінійні рівняння вироджуються у лінійні.

*Метод моделювання* на електронних моделюючих установках, що дозволяють підвищити точність і швидкість дослідження нелінійних систем. Моделювання є найбільш ефективним, коли через складність системи інші методи не можуть бути використаними.

### 9.3 Зображення рухів у фазовій площині

Існують деякі типи рівнянь другого степеня, які можна тими чи іншими методами привести до рівнянь першого степеня. До них належать рівняння, які не містять незалежної змінної в явній формі  $f(\ddot{y}, \dot{y}, y) = 0$ , і рівняння, які не містять функції  $y$ :  $f(\ddot{y}, \dot{y}, t) = 0$ . Ці рівняння зводяться до системи рівнянь:

$$\frac{dx}{dt} = f_1(x; y) \quad \text{і} \quad \frac{dy}{dt} = f_2(x; y). \quad (9.1)$$

У цьому випадку рух можна зобразити на площині у системі координат  $(x, y)$ , які називаються фазовими координатами. При цьому кожному

моменту часу  $t_k$  відповідає фіксоване значення координат  $x(t_k)$  і  $y(t_k)$ , що зображуються точкою в осях  $x$  і  $y$ . Величини  $x$  і  $y$  показують фази руху при зміні часу  $t$ . Тому площина  $(x, y)$  називається *фазовою площиною*, а

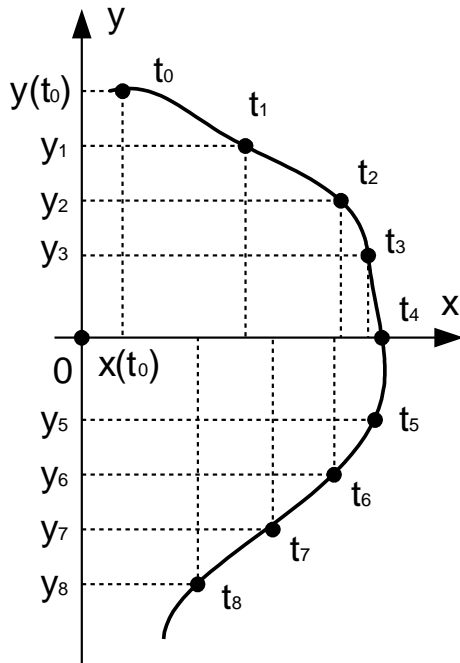


Рис. 9.6 - Зображення руху точки на фазовій площині

лінія, яку прокреслює на ній точка при зміні  $t$ , називається *фазовою траєкторією* (рис. 9.6).

Сукупність фазових траєкторій, яка дає загальне уявлення про характер руху, називається *фазовим портретом системи*.

Найбільш розповсюдженим є спосіб зображення руху, при якому використовуються дві фазові змінні: основна координата  $x$  і швидкість її зміни  $y = dx/dt$ .

Тоді рівняння (9.1) будуть мати вигляд:

$$\frac{dx}{dt} = y; \quad \frac{dy}{dt} = f(x; y). \quad (9.2)$$

Поділивши друге рівняння на перше, отримаємо диференціальне рівняння інтегральної кривої на фазовій площині:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{f(x; y)}{y}. \quad (9.3)$$

Його розв'язок дає рівняння інтегральної кривої у кінцевій формі.

Із рівнянь (9.2) і (9.3) можна встановити такі важливі особливості фазового портрету:

- точка фазової площини, в якій похідна  $dy/dx$  невизначена, тобто одночасно  $y=0$  і  $f(x; y)=0$ , відповідає стану рівноваги системи (зупинці руху) і називається *особливою точкою*;

- якщо  $f(x; y)$  і  $y$  визначені у деякій області, безперервні у ній та мають безперервні частинні похідні за своїми аргументами, то через будь-яку точку

фазової площини, крім особливих, проходить єдина інтегральна крива, тобто фазові траєкторії не перетинаються у неособливих точках;

- оскільки при  $y = dx/dt > 0$  значення  $x$  тільки збільшується, а при  $y < 0$  - тільки зменшується, то у верхній частині фазової площини при збільшенні  $t$  точка рухається за фазовою траєкторією зліва направо, а в нижній частині – справа наліво (рис. 9.7, а). Напрямок руху на траєкторіях відмічають стрілками;

- у точках, де  $y=0$  і  $f(x; y) \neq 0$  (неособливі точки абсцис), фазові траєкторії перетинають вісь абсцис під прямим кутом (рис. 9.7, б).

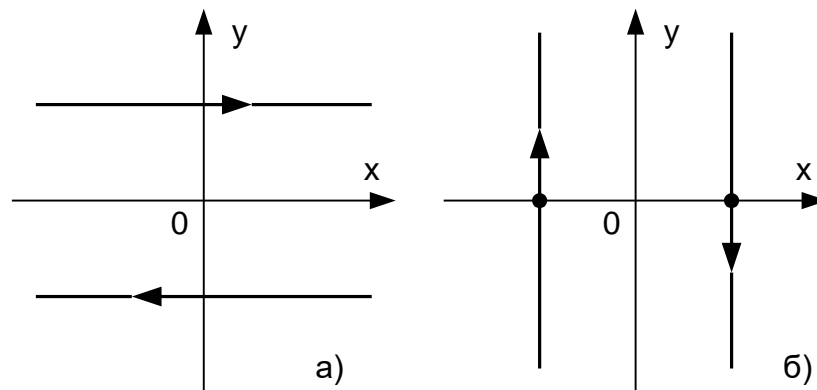


Рис. 9.7 - Напрямок руху точки по фазовій траєкторії

Ці особливості слід враховувати при побудові фазових траєкторій.

Для побудови фазових траєкторій, крім аналітичного розв'язку диференціального рівняння (9.3), використовують деякі інші методи: метод ізоклін, дельта-метод, метод Льенара.

#### Метод ізоклін.

Із геометричного змісту похідної (тангенс кута нахилу дотичної до графіка функції) і рівняння (3) можна записати:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{f(x; y)}{y} = N, \quad (9.4)$$

де  $N$  – нахил фазової траєкторії на фазовій площині  $(x, y)$ .

Значить, у кожній точці фазової площини можна знайти цілком визначену величину нахилу фазової траєкторії, тобто



$$N_1 = \frac{f(x_1; y_1)}{y_1}; \dots, N_i = \frac{f(x_i; y_i)}{y_i}. \quad (9.5)$$

Спосіб побудови полягає у наступному. Із рівняння (9.4) знаходимо функцію

$$y = F(N, X), \quad (9.6)$$

яка являє собою рівняння ізоклін (ізокліна – це геометричне місце точок площини, в яких нахил інтегральних кривих постійний).

Побудуємо ряд ізоклін 1-4 за рівнянням (9.6). У точці  $M_0$  ізокліни 1 (рис. 8) проведемо дві прямі  $M_0A_1$  і  $M_0B_1$  з нахилами  $N_1$  і  $N_2$  відповідно до перетину з ізокліною 2. Отриманий на ній відрізок  $A_1B_1$  поділимо навпіл і через точку  $C_1$  проведемо дві прямі  $C_1A_2$  і  $C_1B_2$  з нахилами  $N_2$  і  $N_3$  до перетину з ізокліною 3. Потім відрізок  $A_2B_2$  поділимо навпіл точкою  $C_2$ , через яку проводимо прямі  $C_2A_3$  і  $C_2B_3$  з нахилами  $N_3$  і  $N_4$  і т.д. Через знайдені точки  $C_1, C_2, C_3, \dots, C_i$  проводимо фазову траєкторію. Точність побудови фазової траєкторії за методом ізоклін буде тим вища, чим частіше на графіку нанесені ізокліни.

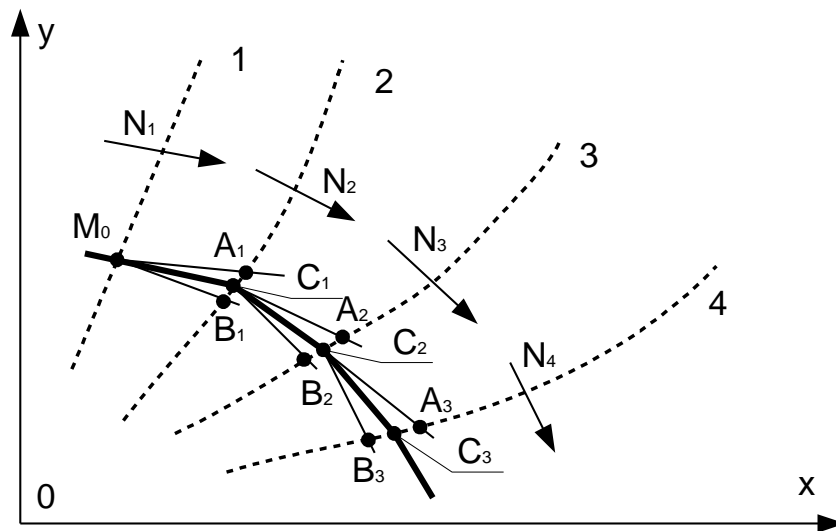


Рис. 9.8 - Побудова фазової траєкторії за методом ізоклін

Розглянемо найбільш характерні види фазових траєкторій, особливих точок та інших специфічних ліній на прикладах. Для цього скористаємося диференціальним рівнянням другого порядку:

$$T^2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + 2\xi T \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = 0. \quad (9.7)$$

Випадок 1.  $\xi = 0$ . Цей випадок відповідає періодичним коливанням с постійною частотою і амплітудою. Рівняння (9.7) приведемо до вигляду:

$$T^2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + x(t) = 0, \text{ або } \ddot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad (9.8)$$

де  $\omega_0^2 = 1/T^2$ .

З урахуванням (9.2) і (9.8) отримуємо:

$$y = dx/dt; \quad dy/dt = d^2x/dt^2 = -\omega_0^2 x.$$

Тоді диференціальне рівняння інтегральної кривої має вигляд:

$$dy/dx = -\omega_0^2 x/y. \quad (9.9)$$

Розв'язуючи це рівняння, отримаємо:  $ydy = -\omega_0^2 xdx$ ;

$$\frac{y^2}{2} + \frac{\omega_0^2 x^2}{2} = \frac{c^2}{2}, \text{ де } c = \sqrt{y_0^2 + \omega_0^2 x_0^2}. \quad (9.10)$$

Це рівняння приводиться до рівняння еліпса:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

де  $a = c/\omega_0$ ;  $b=c$  – півосі еліпса.

Значить, фазові траєкторії у даному випадку являють собою сім'ю

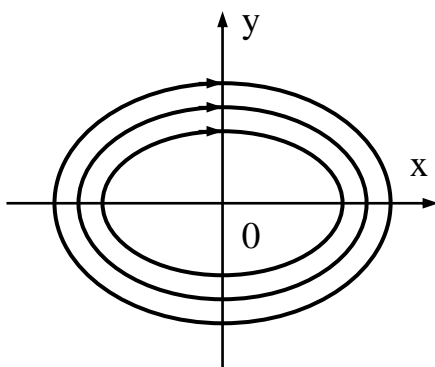


Рис. 9.9 - Фазовий портрет системи з періодичними коливаннями

вкладених один до одного еліпсів з центром у початку координат (рис. 9.9).

Рух по еліпсу відповідає незатухаючому коливальному руху з кутовою частотою  $\omega_0 = 2\pi/T$  (автоколиванням). Причому частота наближено дорівнює відношенню відрізка, що відкреслюється траєкторією на вісі  $y$ , до відрізка, що відкреслюється на вісі  $x$ , а

амплітуда коливань дорівнює відрізка, що відкреслюється на вісі  $x$ .

Початок координат у даному випадку є особливою точкою, яка не належить жодній з траєкторій. Вона називається *точкою типу центра*.

На рис. 9.10 наведені фазова траєкторія і відповідний їй перехідний процес у системі другого порядку при  $\xi = 0$ .

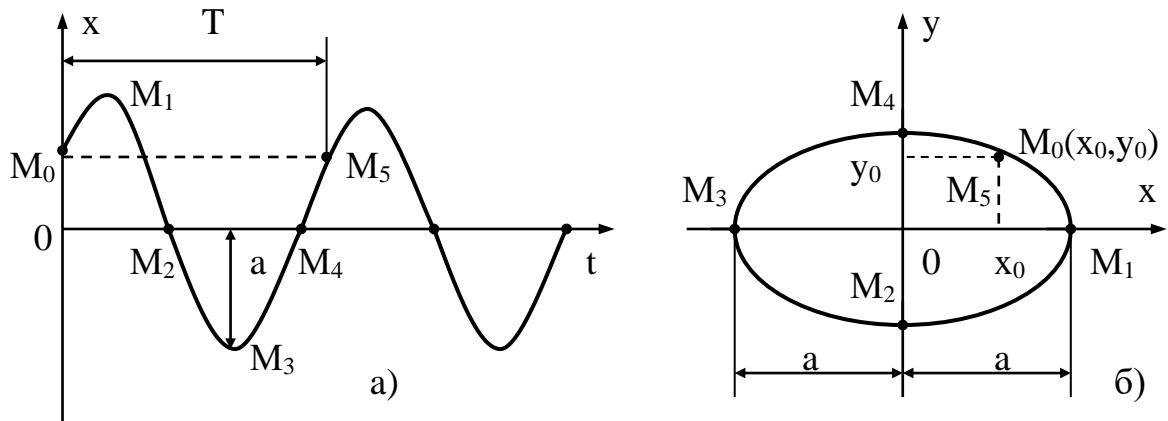


Рис. 9.10 - Перехідна характеристика (а) і фазова траєкторія (б) системи другого порядку з періодичними коливаннями

Випадок 2.  $0 < \xi < 1$ . Рівняння (9.7) можна привести до вигляду:

$$\ddot{x} + 2h\dot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad (9.11)$$

де  $h = \xi/T > 0$ .

Характеристичне рівняння має вигляд:

$$s^2 + 2hs + \omega_0^2 = 0, \quad (9.12)$$

а його корені є комплексно-спряженими, оскільки  $h^2 < \omega_0^2$ :

$$s_{1,2} = -h \pm \sqrt{h^2 - \omega_0^2} = -h \pm j\omega, \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - h^2}.$$

Тоді розв'язок рівняння (9.11) можна записати у вигляді:

$$x(t) = e^{-ht}(C_1 \cdot \cos \omega t + C_2 \cdot \sin \omega t), \quad (9.13)$$

що відповідає затухаючим коливанням (рис. 9.11, а).

Рівняння інтегральної кривої отримаємо з урахуванням (9.11) і (9.2):

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y; \\ \frac{dy}{dt} = -2h\dot{x} - \omega_0^2 x = -2hy - \omega_0^2 x. \end{cases}$$

Звідси

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-2hy - \omega_0^2 x}{y} = -2h - \omega_0^2 \cdot \frac{x}{y}. \quad (9.14)$$

Фазова траєкторія (рис. 9.11 б) являє собою спіраль, яка скручується до початку координат, а початок координат є особливою точкою *типа фокуса* (фокус стійкий).

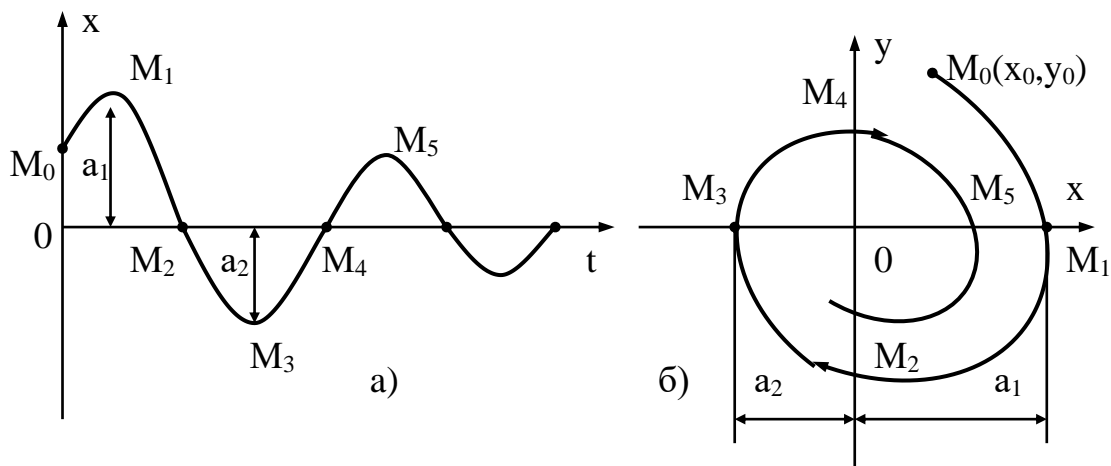


Рис. 9.11 - Перехідна характеристика (а) і фазова траєкторія (б) системи другого порядку із затухаючими коливаннями

Випадок 3.  $-1 < \xi < 0$ . Цей випадок відповідає від'ємному демпфіруванню, коли  $h < 0$ ,  $h^2 < \omega_0^2$ . У цьому випадку корені рівняння (9.12) також є комплексно-спряженими, але рівними  $s_{1,2} = h \pm j\omega$ , а відповідне рішення рівняння (9.11) має вигляд:

$$x(t) = e^{ht} (c_1 \cos \omega t + c_2 \sin \omega t), \quad (9.15)$$

що відповідає коливальному процесу, який розходиться (рис. 9.12, а).

Рівняння інтегральної кривої:

$$\frac{dy}{dx} = 2h - \omega_0^2 \cdot \frac{x}{y}. \quad (9.16)$$

Це рівняння спіралі, що розкручується (рис. 9.12, б). Початок координат є особливою точкою *типа фокуса (фокус нестійкий)*.

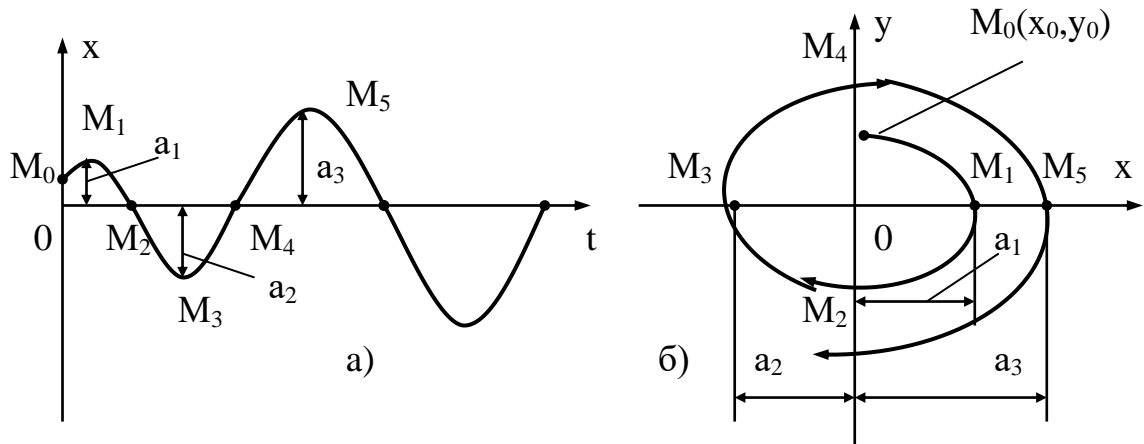


Рис. 9.12 - Перехідна характеристика (а) і фазова траєкторія (б) системи другого порядку з коливальним процесом, що розходиться

Випадок 4.  $\xi > 1$ . У цьому випадку маємо  $h > 0$ ,  $h^2 > \omega_0^2$ , значить, корені рівняння (9.12) дійсні й від'ємні, тобто розв'язок рівняння (9.11) можна записати у вигляді:

$$x(t) = c_1 e^{-s_1 t} + c_2 e^{-s_2 t}, \quad (9.17)$$

що відповідає експоненціальним кривим, які прямують до нуля (рис. 9.13, а).

Диференціальне рівняння інтегральної кривої має вигляд (9.14). Припустимо тепер, що існують прямолінійні фазові траєкторії, тобто  $y = kx$ , тоді  $dy/dx = k$ . З урахуванням (14) маємо:

$$\frac{dy}{dx} = -2h - \omega_0^2 \cdot \frac{x}{y} = -2h - \omega_0^2 \cdot \frac{1}{k};$$

$$k = -2h - \omega_0^2 \cdot \frac{1}{k}, \text{ або } k^2 + 2hk + \omega_0^2 = 0,$$

що співпадає (для  $k=s$ ) з характеристичним рівнянням (9.12). Таким чином, існують прямолінійні фазові траєкторії, що лежать між граничними траєкторіями з кутовими коефіцієнтами, рівними значенням коренів  $s_{1,2}$ . Вигляд фазових траєкторій наведений на рис. 9.13, б), а перехідні аперіодичні

процеси на рис. 9.13, а). Із рисунків видно, що зовні знайдених прямолінійних траєкторій інші фазові траєкторії мають вигляд кривих параболічного типу, що сходяться у початку координат, який є особливою точкою *типа вузла*. Кількість перерегулювань у таких системах – не більше одного.

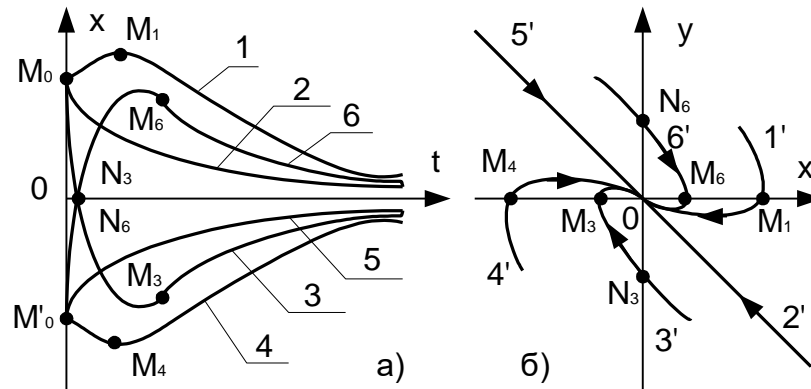


Рис. 9.13 - Перехідні характеристики (а) і фазовий портрет (б) системи із затухаючими аперіодичними процесами

Випадок 5.  $\xi < -1$ . У цьому випадку  $h < 0$ ,  $h^2 > \omega_0^2$ , корені рівняння (9.12) дійсні й додатні. Тому в системі будуть мати місце аперіодичні процеси, що розходяться (рис. 9.14, а), а фазові траєкторії будуть іти від початку координат фазової площини (рис. 9.14, б).

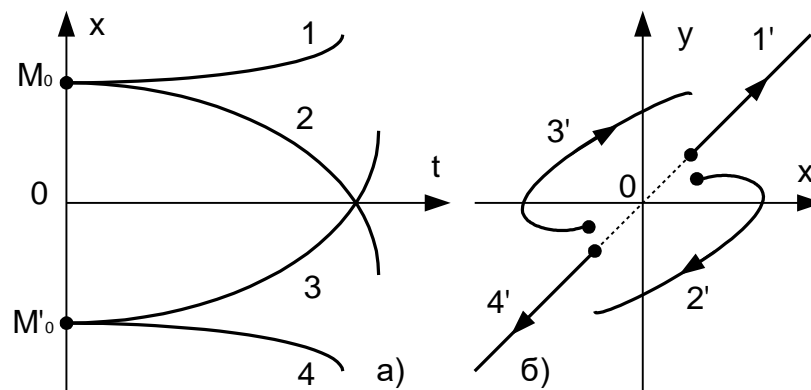


Рис.9. 14 - Перехідні характеристики (а) і фазовий портрет (б) системи з аперіодичними процесами, що розходяться

Із розглянутих фазових портретів можна зробити ще деякі висновки:

- стійкому перехідному процесу відповідає фазова траєкторія, що сходиться до початку координат; нестійкому процесу відповідає фазова траєкторія, що віддаляється від початку координат;
- періодичному процесу відповідає замкнута фазова траєкторія; якщо коливання несинусоїдальні, замкнутий контур буде відрізнятися від еліпса;
- особливі точки можуть бути відокремлені або утворювати цілі особливі відрізки, які називаються *відрізками спокою*. У системах з релейними характеристиками довжина відрізка спокою дорівнює ширині зони нечутливості;
- фазовий портрет нелінійної системи, що має частково-лінійну або розривну характеристику, складається з декількох зон з різними фазовими траєкторіями. Лінії, що відділяють на площині одну зону від іншої, називають *лініями перемикання*. У точках перетину фазовими траєкторіями ліній перемикання відбувається зламування траєкторій. Це відбувається через зміну правої частини рівняння (9.3).

Отже, за заданим рівнянням динаміки САК можна побудувати її фазовий портрет, за яким легко винести судження про те, які перехідні процеси можливі у даній системі.

Побудувати фазовий портрет і оцінити динаміку системи стабілізації температури з нелінійним керуючим пристроєм. Як керуючий пристрій застосовано поляризоване реле – суттєво нелінійний елемент. Структурна схема цієї САК наведена на рис. 9.15, а.

Об'єкт, що керується, представлений аперіодичною ланкою, виконавчий двигун – ідеальною інтегруючою ланкою ( $T_m = T_c = 0$ ), вимірювальна мостова схема і заслінка – пропорційними ланками.

Перетворимо початкову схему до розрахункової (рис. 9.15, б), на якій вхідна величина реле має ту саму розмірність, що й вихідна величина  $\theta$ . При

цьому зона нечутливості реле  $b$  (рис. 15 в) має бути також виражена у градусах:  $b = \frac{b_1}{k_{в.м.}}$ , де  $b_1$  – зона нечутливості, що виражена у ампер-витках.

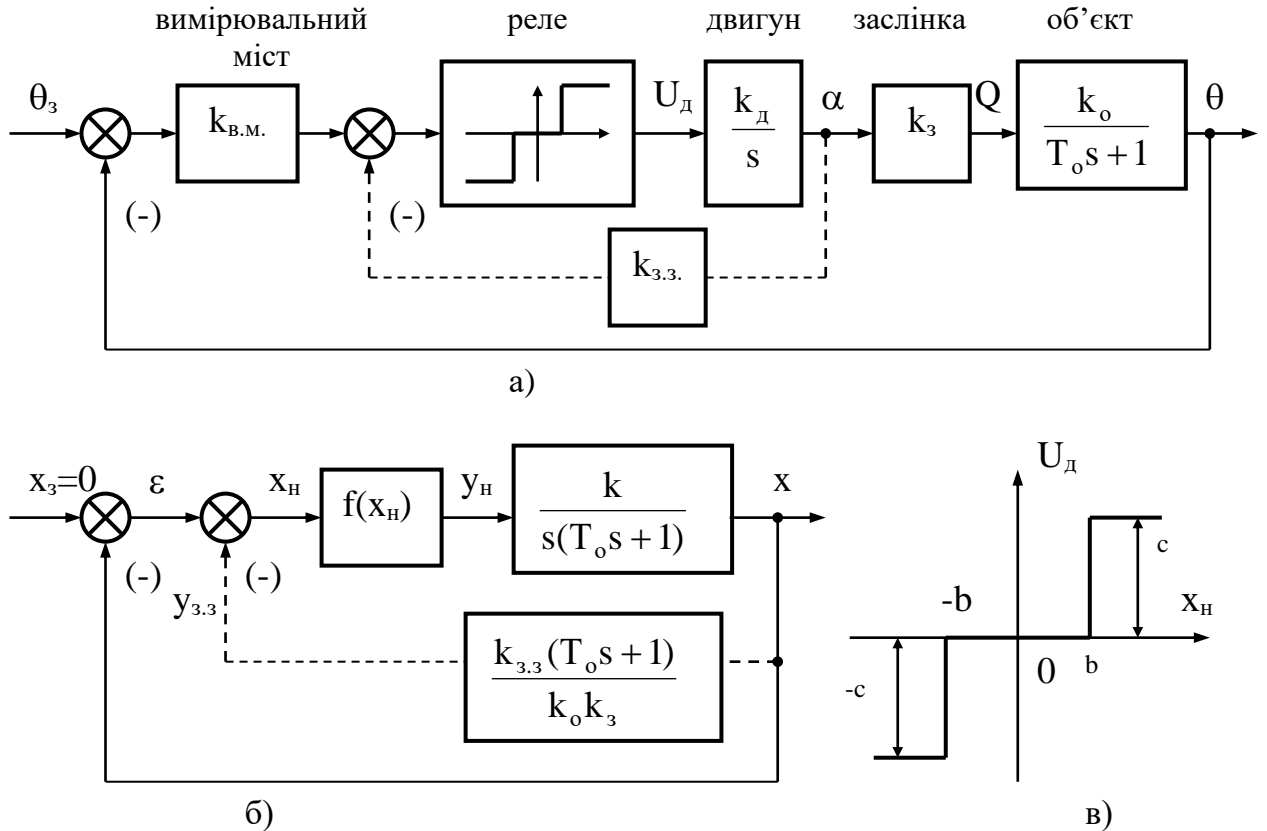


Рис. 9.15 - Структурна схема системи стабілізації температури:

а) – початкова; б) – розрахункова; в) – характеристика реле

Лінійна частина системи (без урахування внутрішнього зворотного зв'язку за положенням заслінки) описується диференціальним рівнянням другого порядку:

$$T_0 \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{d\theta}{dt} = k \cdot u_d, \quad (9.18)$$

де  $k = k_0 k_3 k_d$  – коефіцієнт передачі лінійної частини.

Реле описується нелінійною функцією



$$u_d = f(x_n) = \begin{cases} +c, & x_n > b; \\ 0, & |x_n| < b; \\ -c, & x_n < -b; \end{cases} \quad (9.19)$$

За відсутності внутрішнього зворотного зв'язку сигнал  $x_n = \varepsilon$ .

Будемо розглядати відхилення температури  $\theta$  від її заданого значення  $\theta_3$ , позначаючи їх символом  $x$ . Тоді  $\varepsilon = -x$  (рис. 9.15, б), і з урахуванням непарності функції  $f$  отримуємо:  $k \cdot u_d = k \cdot f(x_n) = k \cdot f(\varepsilon) = k \cdot f(-x) = -k \cdot f(x)$ , а рівняння замкнутої системи у відхиленнях буде мати вигляд:

$$T_0 \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} = -k \cdot f(x). \quad (9.20)$$

Оскільки  $y = \frac{dx}{dt}$ , то отримуємо систему двох рівнянь першого порядку:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y; \\ T_0 \frac{dy}{dt} = -y - kf(x). \end{cases} \quad (9.21)$$

Ділимо друге рівняння на перше і отримуємо нелінійне рівняння фазових траєкторій:

$$T_0 \frac{dy}{dx} = -1 - k \frac{f(x)}{y}. \quad (9.22)$$

Відповідно до (9.19) поділимо фазову площину на три зони (рис. 9.16).

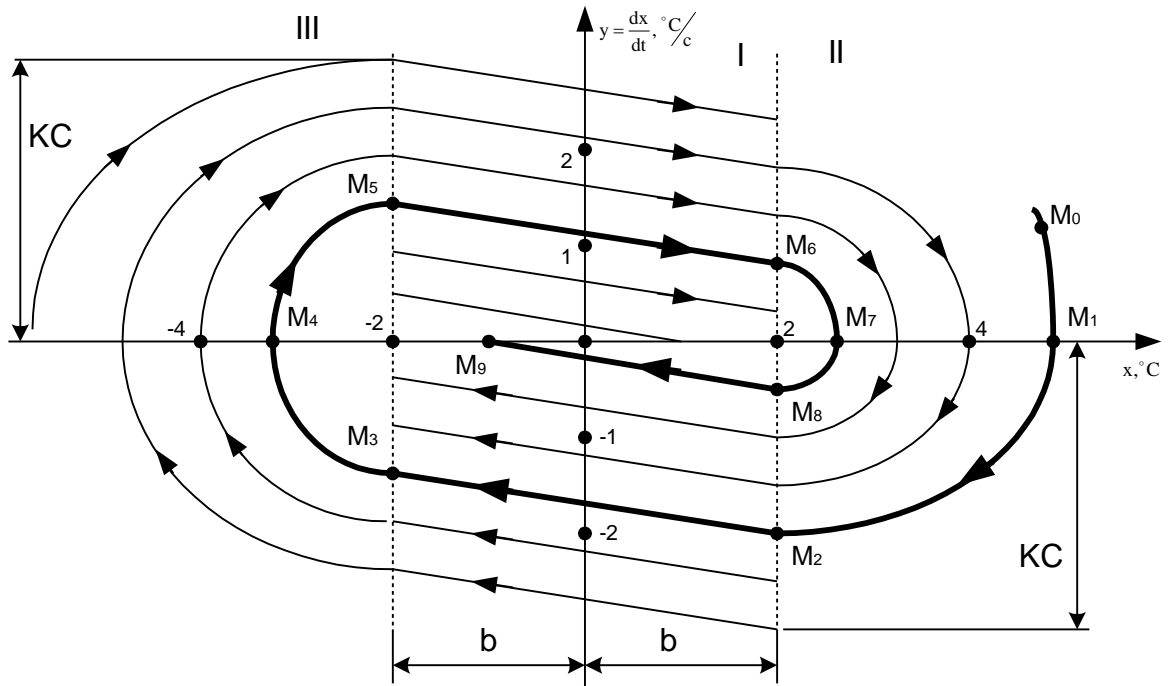


Рис. 9.16 - Фазовий портрет системи стабілізації температури

У зоні I, що відповідає значенням  $|x| < b$ , рівняння (9.22) має вигляд:

$$T_0 \frac{dy}{dx} = -1, \quad (9.23)$$

а його розв'язок:

$$y = -\frac{1}{T_0} x + c_0, \quad (9.24)$$

де  $c_0$  – стала інтегрування.

Це рівняння прямих ліній з від'ємним нахилом  $1/T_0$ .

У зонах I і II, де  $x > b$  і  $x < -b$ , а  $f(x) = +c$  і  $f(x) = -c$  відповідно, рівняння (9.22) набуває вигляду:

$$T_0 \frac{dy}{dx} = -1 \pm k \frac{c}{y}; \quad (9.25)$$

звідси знаходимо:

$$dx = -\frac{T_0 y dy}{y \pm kc}. \quad (9.26)$$

Рівняння фазових траєкторій:

$$x = -T_0 y \pm T_0 kc \ln|y \pm kc| + c_0, \quad (9.27)$$

де верхні знаки належать до зони II, а нижні – до зони III.

Фазові траєкторії, побудовані при різних значеннях змінних  $c_0$  і таких параметрах системи:  $T_0 = 10c$ ;  $k = 0,04 \frac{^\circ\text{C}}{\text{В}\cdot\text{с}}$ ,  $c = 50\text{В}$ ,  $b = 2^\circ\text{C}$ , показані на рис. 9.16 (товста лінія – це фазова траєкторія, що відповідає початковому відхиленню температури  $\Delta\theta = x_0 = +10^\circ\text{C}$ ).

З фазового портрету видно, що після будь-яких початкових відхилень температури та її похідної у системі відбувається затухаючий коливальний процес, який продовжується доти, доки відхилення температури не стануть менше зони нечутливості  $b = 2^\circ\text{C}$  (рис. 9.17).

Даний метод аналізу нелінійних САК, як було зазначено, дуже зручний і наочний для систем другого порядку. При підвищенні порядку збільшується і кількість необхідних координат (вона дорівнює порядку рівняння). Тому фазові траєкторії потрібно було б зображати у тримірному чи n-мірному просторах, що значно ускладнює задачу.

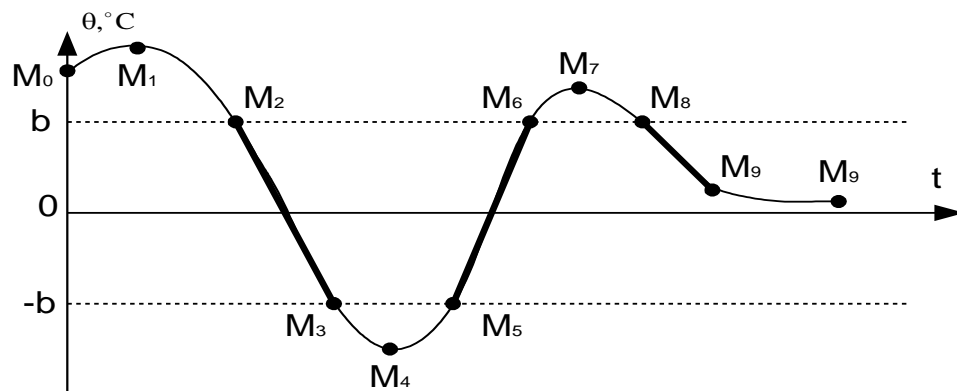


Рис. 9.17 - Перехідний процес у системі стабілізації температури

#### 5.4 Автоколивання

У нелінійних системах за певних умов можуть виникати сили, що приводять до поповнення енергії, яка розсіюється на тертя. У таких системах можуть виникати незатухаючі коливання.

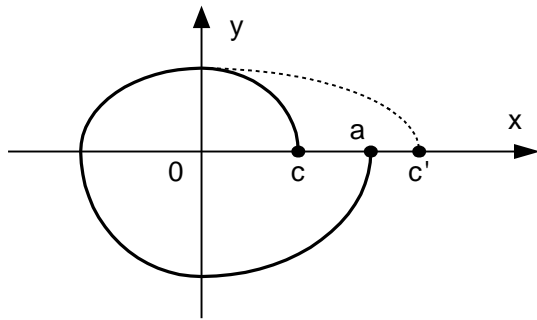


Рис. 9.18 - Рух точки в фазовій площині

Розглянемо рух, що починається в точці  $x_0 = a$  на вісі  $x$  (рис. 9.18).

Через час  $t = 2\pi/\omega$  траєкторія знову перетне вісь  $x$  праворуч від початку координат. Якщо перетин відбудеться у точці  $c$  ( $c < a$ ), траєкторії будуть скручуватись, тобто має місце затухаючий коливальний процес; якщо в точці  $c'$  ( $c' > a$ ) – траєкторії будуть розкручуватись, що відповідає коливанням, що розходяться.

Якщо  $c = a$ , траєкторія перетворюється на замкнутий цикл і коливання стають незатухаючими. Даний замкнутий цикл, який називають *граничним*, є ізольованим, оскільки будь-яка інша точка в околиці точки  $a$  не належить цьому циклу. Граничний цикл обмежений траєкторіями, що навиваються на нього (рис. 9.19, а) або скручуються з нього (рис. 9.19, б).

Якщо у результаті малого зміщення з граничного циклу в будь-якому напрямку ми попадаємо на траєкторію, що необмежено наближається до циклу, то *цикл стійкий* (рис. 9.19, а).

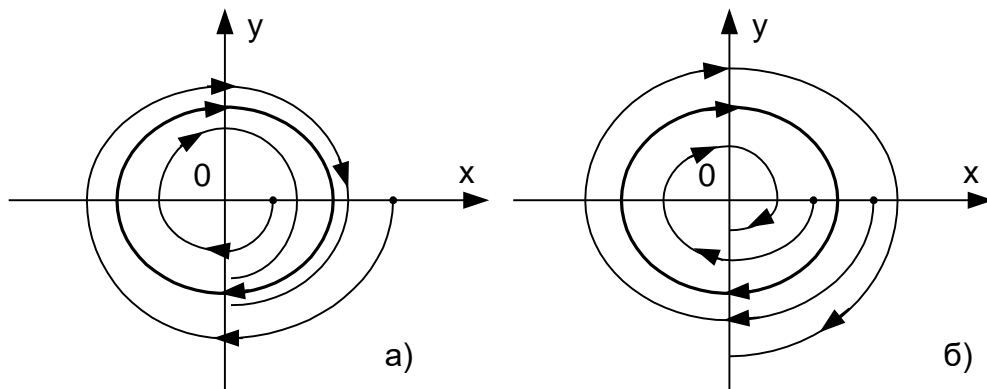


Рис. 9.19 - Граничний цикл з траєкторіями, що навиваються (а) на нього і скручуються з нього (б)

Стійкий граничний цикл відповідає стійким коливанням, які називаються *автоколиваннями*. Автоколивання можуть виникати *тільки у*

*нелінійних системах.* Принципова різниця цих коливань від незатухаючих коливань у лінійних системах полягає у тому, що відхилення параметрів автоколивань (амплітуди, частоти і т.д.) малим зміщенням у процесі подальшого руху зменшується.

Стійкий граничний цикл на фазовій площині розмежовує два процеси:

- коливальний процес, що розходиться (крива 1, рис. 9.20), який виникає при малих початкових відхиленнях;
- затухаючий коливальний процес (крива 2, рис. 9.20), що виникає при значних відхиленнях.

Із рисунка випливає, що рівноважний стан системи *нестійкий*. Але процес розходиться до певної амплітуди  $a_0$ , тобто практично коливальний процес буде стійким, бо при одних початкових значеннях він розходиться, а при інших – затухає.

Слід зазначити, що автоколивання не є змушеними коливаннями. Вони є *власними вільними коливаннями системи і мають цілком визначену амплітуду і частоту*, які не залежать від початкових умов процесу, а залежать тільки від параметрів самої системи, тобто об'єкта і регулятора.

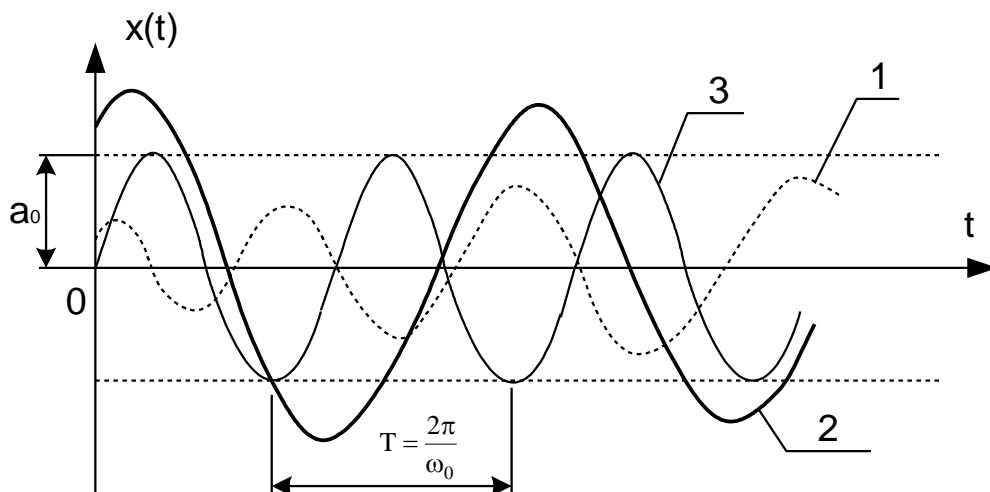


Рис. 9.20 - Автоколивання у нелінійних системах:

- 1 – коливальний процес, що розходиться; 2 – затухаючий коливальний процес; 3 – періодичний коливальний процес з постійною амплітудою  $a_0$  і постійною частотою  $\omega_0$

Система, в якій виникають автоколивання, може вважатись *практично стійкою* і придатною для потреб регулювання, якщо амплітуда коливань  $a_0$  незначна і частота їх безпечна, тобто накладення цих коливань на постійне значення вихідної величини практично допустиме за технічними вимогами.

У системі, фазовий портрет якої наведено на рис. 9.19, а), автоколивання виникають ніби “самі по собі” від як завгодно малого збурення. Збудження коливань такого роду називають *м'яким*.

Уявимо фазовий портрет із двома циклами: внутрішнім нестійким і зовнішнім стійким (рис. 9.21). Початок координат – стійкий фокус. У середині внутрішнього циклу рух з часом зупиняється, автоколивання не виникають. Щоб їх збудити, необхідний досить сильний поштовх, який виведе початкову точку за граничний нестійкий цикл. Це система із *жорстким* збудженням автоколивань.

Нестійкий граничний цикл обмежує у фазовій площині зону допустимих початкових збуджень, при яких стан рівноваги ще залишається стійким.

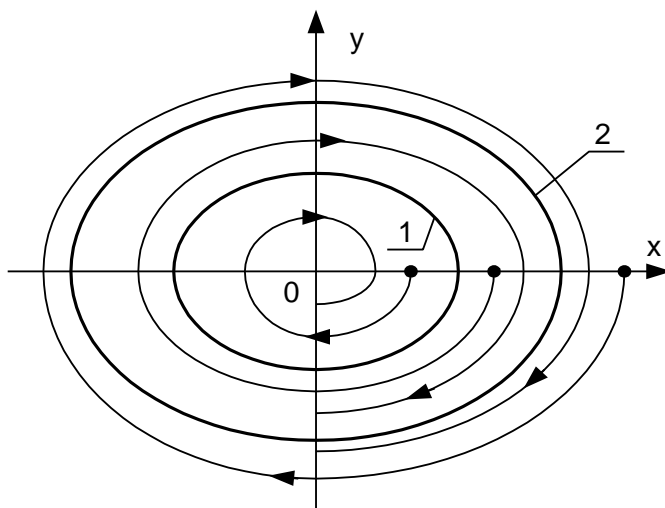


Рис. 9.21 - Фазовий портрет системи з жорстким збудженням автоколивань:  
1 – внутрішній нестійкий граничний цикл;  
2 – зовнішній стійкий граничний цикл

Автоколивання можуть виникати не лише у САК. До автоколивальних систем можна віднести ламповий генератор, годинник, поршневий двигун, духовий інструмент. Автоколивальний характер носять і такі процеси у живих організмах, як дихання та робота серця.

Отже, дамо таке визначення автоколивальної системи: *система, здатна створювати незатухаючі коливання, якщо вона характеризується наявністю: джерела живлення; клапана, що регулює надходження енергії у коливальну систему; зворотного зв'язку з коливальної системи на клапан.*

### **Висновки по розділу**

Лінійні системи автоматичного керування описуються лінійними диференціальними рівняннями. У цих рівняннях змінні та їх похідні зустрічаються лише у першому ступені й відсутні взаємні добутки змінних та їх добутки з похідними.

На практиці лінійних САК не існує, бо характеристики більшості елементів, що утворюють системи, нелінійні, й точні диференціальні рівняння систем є нелійними. У них крім першого зустрічаються й інші ступені змінних і їх похідних.

До нелінійних САК належать усі системи, в які входить один або декілька нелінійних елементів. Ми будемо розглядати вузький клас нелінійних САК, що характеризуються такими особливостями:

- САК складається з лінійної частини, яка описується лінійним диференціальним рівнянням із постійними коефіцієнтами, і нелінійного елемента (НЕ);
- нелінійний елемент є безінерційним, і його вхідна та вихідна величини пов'язані нелійними алгебраїчними рівняннями;
- нелінійних елементів може бути декілька, але вони не повинні розділятися лінійними інерційними ланками.

Якщо у систему входить декілька нелінійних елементів, з'єднаних послідовно, паралельно або зустрічно-паралельно, то сумарну характеристику можна побудувати за певними правилами.

Паралельне з'єднання нелінійних елементів. При паралельному з'єднанні НЕ сумарну характеристику будують як геометричну суму нелінійних характеристик окремих елементів.

Послідовне з'єднання двох нелінійних елементів. При послідовному з'єднанні нелінійних елементів вихідна величина одного НЕ є вхідною для дальшого НЕ.

З математичної точки зору найбільш суттєвою відмінністю лінійних систем від нелінійних є те, що до останніх не застосовується принцип суперпозиції: реакція нелінійної системи на декілька впливів не дорівнює сумі реакцій на окремі впливи.

До нелінійних систем також не застосовується принцип комутативності, тобто у системі не можна міняти місцями між собою нелінійні елементи, а також нелінійні та лінійні елементи.

Особливістю нелінійних систем є можливість виникнення у них стійких коливань певної амплітуди і частоти – автоколивань.

Стійкість нелінійних систем визначається не тільки структурою і параметрами САК (як у лінійних системах), але залежить і від початкових відхилень відносно стану рівноваги.

Усі ці особливості нелінійних САК обумовили необхідність розробки ряду методів для їх дослідження, у результаті якого мають бути розв'язані такі основні задачі:

- аналіз впливу нелінійностей, притаманних реальним елементам, на процеси у лінеаризованих системах;

- аналіз стійкості суттєво нелінійних систем, виявлення автоколивань і визначення їх амплітуди і частоти, визначення точності системи та її реакції на зовнішні впливи;

- корекція САК за допомогою нелінійних коректувальних пристроїв і синтез суттєво нелінійних систем, що мають задані динамічні характеристики.



До методів дослідження нелінійних систем, які отримали практичне застосування, належать:

частотні методи, метод фазової площини, метод припасовування, графоаналітичні методи, чисельні методи, метод малого параметра або метод еквівалентної лінеаризації, метод малого параметра або метод еквівалентної лінеаризації, метод моделювання.

Фазовий портрет нелінійної системи, що має частково-лінійну або розривну характеристику, складається з декількох зон з різними фазовими траєкторіями. Лінії, що відділяють на площині одну зону від іншої, називають лініями перемикавання. У точках перетину фазовими траєкторіями ліній перемикавання відбувається зламвання траєкторій.

Система, в якій виникають автоколивання, може вважатись практично стійкою і придатною для потреб регулювання, якщо амплітуда коливань  $a_0$  незначна і частота їх безпечна, тобто накладення цих коливань на постійне значення вихідної величини практично допустиме за технічними вимогами.

## РОЗДІЛ 10 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 10.1 Аналіз небезпечних чинників

На підприємствах на самопочуття та стан здоров'я людини впливає ряд наступних небезпечних і шкідливих виробничих факторів:

а) фізичні фактори:

- рухомі машини та механізми (конвеєри, вантажні підйомники);
- підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони (можливо при обслуговуванні окремих видів технологічного обладнання);
- підвищена або знижена температура поверхонь обладнання, матеріалів, миючих рідин;
- підвищена температура повітря робочої зони;
- підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини;
- підвищений рівень статичної електрики
- підвищений рівень шуму на робочому місці та вібраційне навантаження на працівника;
- відсутність або нестача природного світла;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищений рівень електромагнітних випромінювань;

б) хімічні фактори:

(хімічні речовини, що проникають в організм людини через органи дихання, шлунково-кишковий тракт, шкірні покриви та слизові оболонки):

- токсичні:  
оксид вуглецю, двоокис вуглецю, спирт етиловий;
- подразнювальні:  
оксиди азоту, акролеїн; аміак; вищі спирти; діхлоретан (склади легкозаймистих і горючих рідин);

в) психофізіологічні чинники:

- важкість трудового процесу:

фізичне та динамічне навантаження за зміну, маса вантажу, що піднімається, стереотипні робочі рухи, статичне навантаження, робоча поза, нахили корпусу, переміщення в просторі (переходи, зумовлені технологічним процесом протягом зміни);

- напруженість трудового процесу:

інтелектуальні навантаження, сенсорні навантаження, емоційні навантаження, монотонність навантажень, режим роботи.

Забезпечуємо безпечний рівень впливу постійного магнітного поля, рівень електростатичного поля, рівень напруженості електричного поля промислової частоти (50 Гц), рівень напруженості магнітного поля промислової частоти (50 Гц), рівні впливу електромагнітних полів радіочастот які не повинні перевищувати допустимі значення.

Фізичні та хімічні фактори, які супроводжують роботи з ручними інструментами: вібрація, шум, силові характеристики, ергономічні характеристики трудового процесу, температура рукояток, теплопровідність матеріалу рукояток, параметри створюваного мікроклімату, вміст шкідливих речовин у робочій зоні не повинні перевищувати встановлені гігієнічні норми безпеки ручних інструментів та робіт з ними.

## **10.2 Загальні вимоги охорони праці**

До роботи електромонтером допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд при вступі на роботу, визнані придатними для виконання зазначеної роботи та одержали посвідчення про наявність кваліфікаційної групи з електробезпеки не нижче третьої.

Електромонтер, якого приймають на роботу, повинен пройти вступний інструктаж з охорони праці, бути ознайомлений під розпис з умовами праці, правами та пільгами щодо роботи в шкідливих та небезпечних умовах праці.

Про проведення вступного інструктажу та інструктажу на робочому місці робляться відповідні записи в Журналі реєстрації вступного інструктажу з питань охорони праці і Журналі реєстрації інструктажів з питань охорони праці.

Повторний інструктаж з правил і прийомів безпечного ведення роботи і охорони праці електромонтер повинен проходити:

- періодично не рідше одного разу на квартал;
- при незадовільних знаннях з охорони праці не пізніше місячного строку;
- у зв'язку з допущеним випадком травматизму або порушенням вимог охорони праці, що не призвело до травми.

Електромонтер повинен працювати в спецодязі та інших засобах індивідуального захисту: діелектричними рукавичками, килимами і діелектричними калошами або ботами, а також інструментами з ізольованими ручками.

Електромонтеру забороняється користуватись захисними засобами, які не пройшли встановлених випробувань, а також такими, у яких минув строк чергового випробування.

Усі монтажні і ремонтні роботи на електричних мережах і пристроях (або поблизу від них), а також роботи по приєднанню і роз'єднанню проводів електромонтери повинні виконувати за умов знятої напруги.

Електромонтер при ремонті і обслуговуванні електроустаткування повинен застосовувати ручні переносні світильники.

Електромонтер повинен включати у мережу електродвигуни, електроінструменти, прилади електричного освітлення за допомогою призначених для цього апаратів і приладів (кнопок, рубильників, вимикачів автоматичних, пускачів магнітних).

### **10.3 Вимоги безпеки перед початком роботи**

Електромонтер перед початком роботи повинен надіти спецодяг і, при потребі, спеціальне взуття та засоби індивідуального захисту, перевіривши строк їх використання.

Перевірити справність електрообладнання, стан ізолюючих підставок, решіток, пускових приладів, заземлення та ін.

Перевірити справність ручного інструменту

Забороняється застосовувати прокладки та подовжувати ключі трубами.

Одержати завдання – наряд або усне розпорядження на наступну роботу.

Усне розпорядження на наступну роботу необхідно записати в оперативний журнал. При цьому зазначається, хто дав розпорядження, місце і найменування роботи, строк її виконання.

Проглянути записи в журналі про несправності, порушення охорони праці за попередню зміну.

Для підготовки робочого місця при роботах з частковим або повним зняттям напруги необхідно виконувати такі технічні заходи:

- провести необхідні відключення та вжити заходів, що перешкоджають подачі напруги до місця роботи внаслідок помилкового або довільного включення комутаційної апаратури (встановити механічний запір приводів вимикачів, рубильників та роз'єднувачів, ізоляційні прокладки в рубильниках та ін.);

- вивісити плакати “Не включати – працюють люди”, “Не включати – робота на лінії”, “Не відкривати – працюють люди”, а при потребі встановити загородження;

- приєднати переносні заземлення до заземлюючого пристрою;

- накласти заземлення на струмоведучі частини (безпосередньо після перевірки відсутності напруги), ввімкнути заземлюючі ножі або, якщо їх немає, накласти переносне заземлення;

- обгородити робоче місце і вивісити плакати: “Стій – висока напруга!”, “Не влізай – уб'є!”, “Працювати тут”;

Перевірити справність покажчика напруги на відсутність напруги. При цьому користуються діелектричними рукавицями.

При веденні робіт на відключеній частині електроустановки заземлення накладається на струмоведучі частини фаз з усіх боків, звідки може бути подана напруга, включаючи і зворотну трансформацію.

#### 10.4 Вимоги безпеки під час роботи

Дозволяється ведення робіт без зняття напруги в електроустановках напругою 500 В і нижче. Ці роботи повинні виконувати не менше, ніж два електрики.

Замінювати плавкі вставки запобіжників при наявності рубильника слід при знятій нарузі.

Замінювати плавкі вставки запобіжників під напругою електрик повинен у захисних окулярах та діелектричних рукавицях, користуючись ізолюючими кліщами.

При виявленні замикання на землю забороняється наближатись до місця замикання на відстань менше, ніж 4 – 5 м у закритих, і менше, ніж 8 – 10 м, у відкритих розподільних пристроях.

Забороняється під час роботи у вибухонебезпечних установках:

- ремонтувати електрообладнання та мережі, що перебувають під напругою;
- експлуатувати електрообладнання при несправному блокуванні кришок апаратів;
- включати електроустановку, що автоматично відключилася, не з'ясувавши і не усунувши причин її відключення;
- перевантажувати понад номінальні параметри вибухозахищене електрообладнання, проводи і кабелі;
- підключати до джерел живлення іскробезпечних приладів інші апарати і кола, які не входять у комплект цього приладу;

Корпус електроінструменту, що працює при нарузі понад 42 В (незалежно від частоти струму), має бути заземлений.

Електрик не повинен вмикати сторонніми предметами рубильники та кнопки пускачів і визначати дотиком руки температуру нагріву електричних машин.

Електричні проводи слід захищати від механічних пошкоджень та від дотику до сталевих канатів, гарячих поверхонь, шлангів газополуменевої

апаратури, масел та кислот, які руйнівню впливають на ізоляцію. У вогких приміщеннях їх слід підвішувати на підставках.

### **10.5 Вимоги безпеки після закінчення роботи**

По закінченні роботи електромонтер повинен:

- прибрати інструмент, прилади, пристрої;
- відключити технологічне електрифіковане обладнання, верстати, вентиляцію;
- зняти спецодяг, захисні та запобіжні засоби і пристрої, очистити від пилу та іншого бруду і віднести у відведене для зберігання місце та переодягтися. Потім вимити обличчя і руки теплою водою з милом або прийняти душ.

При передачі зміни повідомити змінника, майстра або адміністрацію дорожньої організації про всі помічені несправності та зробити про це відповідний запис у журналі.

### **10.6 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях**

При виникненні аварійних ситуацій електромонтер повинен негайно вимкнути струм у разі:

- пожежі в зоні роботи;
- травми, що трапилась з кимсь із обслуговуючого персоналу;
- ураження електричним струмом.

Помітивши загоряння, електромонтер повинен негайно приступити до гасіння пожежі наявними засобами і повідомити старшого по зміні.

Якщо погасити пожежу своїми силами неможливо, електромонтер або старший по зміні повинен негайно викликати найближчу пожежну команду по телефону, радіо чи будь-якими засобами зв'язку.

При нещасних випадках електромонтер повинен уміти надати потерпілому першу медичну допомогу, при необхідності, викликати швидку медичну допомогу і повідомити адміністрацію.

При ураженні електричним струмом електромонтер повинен негайно звільнити потерпілого від дії електричного струму, відключивши

електроустановку від джерела живлення, і – відтягнути його від струмоведучих частин.

При відсутності у потерпілого дихання і пульсу електрик повинен зробити йому штучне дихання і непрямий масаж серця, після чого викликати швидку. Електрик повинен вміти подати першу допомогу при опіках.

Основними джерелами вібрації в гірничій виробці є гірничопрохідницькі транспортні машини та механізми. Робітники, які мають контакт з віброінструментом, забезпечуються засобами індивідуального захисту від вібрації.

Основні організаційно-технічні заходи і засоби щодо шумової та вібраційної безпеки праці на підприємстві вугільної промисловості регламентуються НПАОП 10.0 – 5.19 – 04.

Сучасні шахти являються собою високомеханізовані підприємства з розвинутою електричною мережею і великою кількістю електричних машин. Електричний струм є самим розповсюдженим видом енергії, який використовується при підземному видобутку.

Електродвигун асинхронний трифазний короткозамкнений рудничний вибухобезпечний призначений для приводу шахтних скребкових та стрічкових конвеєрів, небезпечних за змістом газу (метан) ті вугільного пилу. Двигун має рудничне вибухобезпечне виконання ExdI.

Двигун забезпечує нормальну роботу механізмів у наступних умовах:

- температура навколишнього середовища від мінус 40 до плюс 40 °С;
- відсутність безпосереднього впливу на двигун струменів води, емульсій механізмів, а також повного чи часткового занурення двигуна у воду;
- концентрація вугільного та породного пилу не перевищує норми, встановленої діючими правилами безпеки у вугільних та сланцевих шахтах;
- найвище значення відносної вологості повітря 100% при 35 °С без конденсації вологи.



Розроблено інструкцію з охорони праці для електромонтера по ремонту і обслуговуванню електроустановок.

#### 10.7 Заходи щодо пожежної безпеки

У електромеханічній промисловості виникають в основному пожежі, пов'язані з електричним устаткуванням. А саме:

Коротке замикання. Струми коротких замикань досягають дуже великих величин, що супроводжує їх теплові і динамічний впливи, що може викликати руйнування електрообладнання, займання ізоляції і т. д. Профілактичним заходом, який попереджає короткі замикання, є правильний вибір проводів, машин і апаратів, своєчасні профілактичні огляди, ремонти і випробування. Для швидкого відключення струмів короткого замикання служать плавкі запобіжники й автоматичні вимикачі.

Перевантаження провідників струмами, що перевищують допустимі за нормами значення. Щоб уникнути перевантаження при проектуванні електромереж необхідно правильно обирати перетин дротів. Для захисту проводів від перевантаження застосовують плавкі запобіжники або апарати з максимальним захистом (теплові, електромагнітні реле).

Великі перехідні опори в місцях з'єднань, відгалужень і окінцювання проводів, в контактах машин і апаратів, що приводить до місцевого перегріву. Для зменшення перехідних опорів необхідні надійне з'єднання проводів, запобігання контактів від окислення, застосування пружних контактів або спеціальних сталевих пружин.

Іскріння і електрична дуга при роботі і аваріях в електричних пристроях. Іскріння колекторів та контактних кілець електричних машин усувається правильної їх обробкою і шліфуванням. Іскріння в контактах апаратів локалізується іскрогасними камерами. Щоб уникнути появи електричної дуги при перемиканнях в розподільчих пристроях необхідно забезпечити блокування роз'єднувачів і вимикачів і дотримувати певний порядок при операціях з комутаційними апаратами.

Електростатичні заряди і блискавки.

До причин неелектричного характеру належать такі:

1. Неправильне влаштування котелень, печей, несправність опалювальних приладів і порушення режимів топки печей, відсутність іскрогасників, несправність топок котелень, залишення печей без догляду і т. д.
2. Несправність виробничого обладнання та порушення технологічного процесу (порушення герметизації обладнання, що виділяє пил і газу).
3. Халатне і необережне поводження з вогнем.
4. Неправильне влаштування та несправність вентиляційної системи.
5. Самозаймання кам'яного вугілля, торфу, промаслених обтиральних кінців і т. п.

Заходи, що усувають ці причини, поділяються на організаційні, експлуатаційні, технічні і режимні. Забезпечення пожежної безпеки досягається дотриманням протипожежних вимог, регламентованих СНиП 2.01.02-85, Правилами пожежної безпеки для промислових підприємств, правил улаштування електроустановок.

Для профілактики пожеж на ділянці проектом передбачено наступні організаційні заходи, що стосуються виробничого процесу: навчання робітників і службовців протипожежним правилам, проведення бесід, лекцій, інструкцій і т. п.

Експлуатаційні заходи передбачають правильну експлуатацію машин і внутрішньозаводського транспорту, правильне утримання будівель, територій.

До технічних заходів відноситься дотримання протипожежних правил і норм при влаштуванні опалення, виборі електрообладнання, вентиляції, освітлення і т. д.

До заходів режимного характеру відноситься заборона паління у невстановлених місцях, виробництва електрозварювальних робіт в пожежонебезпечних приміщеннях і т. д.

При виникненні пожежі персонал зобов'язаний:

- сповістити пожежну службу за телефоном 101;

- сповістити керівництво;
- організувати винесення найбільш цінних документів;
- використовувати до приїзду пожежних команд первинні засоби гасіння (пожежні крани, пісок, відра, вогнегасники пінні, повітропінні, вуглекислотні).

Згідно СН правилам пожежної безпеки ППБ-01-93 для забезпечення протипожежної безпеки на ділянці проектом передбачається установка датчиків пожежної сигналізації, пожежних щитів та ящиків з піском, а також вогнегасників, ОСП (вогнегасник порошковий), ОХП (хімічний пінний), СОТ (генератори об'ємного аерозольного гасіння пожеж), передбачається наявність пожежного водопроводу.

## ВИСНОВКИ

Спроектований електродвигун виконаний на базі вибухобезпечного електродвигуна *ЭДКОФ4–37* і повинен виготовлятися по технічному процесу базового електродвигуна. Вибухобезпечність оболонки електродвигуна забезпечується вживанням щільного вибухозахисту, який відповідає вимогам *ГОСТ22782.6*.

Електродвигун призначений для експлуатації у вугільних і сланцевих шахтах в середовищах, що містять газ метан і вугільний пил.

Спроектований електродвигун володіє покращувальними енергетичними характеристиками, які приведені в таблиці технічних показників.

Поліпшення техніко-економічних показників здійснено за рахунок вживання електротехнічної листової сталі марки 1312 для магнітопровода. При цьому за рахунок менших питомих втрат вибраної електротехнічної сталі отримано деяке зменшення перетину магнітопровода, але для збільшення міцності підшипникових щитів збільшена їх маса. Загальна маса спроектованого двигуна залишається такою ж, як і маса базового двигуна.

Для захисту статорів обмоток від перегріву на лобових частинах обмоток з боку виводів встановлені датчики–реле контролю температури.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Копилов І.П. Проектування електричних машин: Навчальний посібник для вузів. - У 2-х кн.: кн. 1/І.П. Копилов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкін та ін. - М.: Вища школа, 1993. -464 с.
2. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепіков та ін.; За ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
3. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод (теорія и практика): Учбовий посібник/ За ред. М.Г. Поповича, В.В. Кострицького. - К.: КНУТД, 2008. - 408 с.
4. Зеленов А.Б. Теорія електропривода. Методика проектування електроприводів: Підручник / А.Б. Зеленов. – Луганськ: вид-во «Ноулідж», 2010.– 670 с.
5. Колб А.А., Колб А.А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. - Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2006. - 511 с.
6. Лябук М. Н. Електричні машини: Навчальний посібник / Лябук М. Н. – Луцьк, 2005. – 445 с.
7. ДСТУ ГОСТ 2582:2017 Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия (ГОСТ 2582-2013, IDT; ІЕС 60349-1:2010, NEQ; ІЕС 60349-2:2010, NEQ)
8. Решетник В. Я. Основи електропривода: Навч. Посібник / В. Я. Решетник. – Тернопіль, ТДТУ –2007. – 120 с.
9. David Walter. Energy efficient motors // Power Engineering Journal. 1999.
10. Чорний О.П. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / О.П. Чорний, А.В. Луговой, Д.Й. Родькін, Г.Ю. Сисюк, О.В. Садовой – Кременчук, 2001. - 410 с.