

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
до лабораторних робіт  
з дисципліни «Надійність і діагностика електрообладнання»  
для студентів спеціальності  
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Освітньої програми «Електричні машини і апарати»  
усіх форм навчання

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Надійність і діагностика електрообладнання» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньої програми «Електричні машини і апарати» усіх форм навчання /Укл.: Т.П. Солодовнікова, Д.О. Літвінов, С.О. Лапкіна. – Запоріжжя: НУЗП, 2023. - 62 с.

Укладачі: Т.П. Солодовнікова, ст. викл.  
Д.О. Літвінов, ст. викл.  
С.О. Лапкіна, асист.

Відповідальний  
за випуск: С.О. Лапкіна, асист.

Затверджено  
на засіданні кафедри  
«Електричні машини»  
Протокол №1  
від 14.08.2023 р.

Рекомендовано до видання  
НМК Електротехнічного  
факультету  
Протокол №1  
від 21.09.2023 р.

**ЗМІСТ**

Вступ .....	4
Лабораторна робота № 1 Критерії та кількісні характеристики надійності невідновлюємих виробів.....	5
Лабораторна робота № 2 Критерії та кількісні характеристики надійності відновлюємих виробів.....	14
Лабораторна робота № 3 Розрахунок характеристик надійності невідновлюємих резервованих виробів.....	24
Лабораторна робота № 4 Розрахунок надійності виткової ізоляції всипних обмоток асинхронних двигунів.....	35
Лабораторна робота № 5 Контроль надійності.....	40
Лабораторна робота № 6 Розрахунок надійності синхронних генераторів.....	51
Перелік джерел посилань .....	59
Додаток А.....	60
Додаток Б.....	62

## ВСТУП

Мета дисципліни "Надійність і діагностика електрообладнання"  
- навчити студента самостійно вирішувати питання надійності електрообладнання і електричних машин, їх удосконалення на базі експлуатаційної статистики, використовуючи методи обробки статистичних даних.

Завданням дисципліни є розвиток у кожного студента, молодого фахівця інтересу до дослідної діяльності, потреби пошуку нових технічних рішень надійності, навчитись творчо застосовувати отримані знання.

В результаті вивчення курсу студенти повинні:

- знати актуальність питань надійності розвитку технічних систем, техніко-економічні показники нових технічних рішень, основні показники безвідмовної роботи та відмови.

- вміти застосувати на практиці сучасні прийоми і методи розрахунку характеристик надійності електротехнічних систем, критеріїв надійності, структурної надійності, а так же визначати закони розподілу оцінюваних параметрів;

- мати уявлення про області технічної діагностики, принципи будування діагностичних моделей, категорії об'єктів та використання одержаних результатів до майбутньої діяльності.

Дисципліна "Надійність і діагностика електрообладнання" використовує знання вищої математики; прикладної механіки; загального курсу електричних машин; монтаж, налагоджування і експлуатація електрообладнання; знання комп'ютерної техніки; використання різнопланової літератури та читається з виконанням студентами лабораторних робіт.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

### КРИТЕРІЇ ТА КІЛЬКІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДІЙНОСТІ НЕВІДНОВЛЮЄМИХ ВИРОБІВ

**Мета роботи:** ознайомлення з основними характеристиками надійності невідновлюємих виробів, визначити кількісні характеристики виробів.

#### 1.1 Загальні відомості

*Критерієм надійності назвемо ознаку, за якою оцінюється надійність різноманітних виробів.*

Для кількісної оцінки надійності електричних машин та інших пристроїв доцільно використовувати наступні критерії надійності:

— ймовірність безвідмовної роботи протягом визначеного часу  $P(t)$ ;

— середній наробіток до першої відмови  $T_{\text{ср}}$ ;

— наробіток на відмову  $t_{\text{ср}}$ ;

— частота відмов  $a(t)$ ;

— інтенсивність відмов  $\lambda(t)$ ;

— параметр потоку відмов  $\omega(t)$ ;

— функція готовності  $K_{\Gamma}(t)$ ;

— коефіцієнт готовності  $K_{\Gamma}$ .

*Характеристикою надійності будемо називати кількісне значення критерію надійності конкретного виробу.*

Вибір кількісних характеристик надійності залежить від типу виробу.

Основні критерії надійності можна розбити на дві групи:

— критерії, що характеризують надійність невідновлюємих виробів,

— критерії, що характеризують надійність відновлюємих виробів.

*Невідновлюємими* називаються такі вироби, що у процесі виконання своїх функцій не припускають ремонту. Якщо відбувається відмова такого виробу, то операція, що виконується, буде зірвана, і її необхідно починати знову в тому випадку, якщо можливе усунення відмови. До таких виробів відносяться як вироби однократної дії

(ракети, керовані снаряди, штучні супутники Землі, підсилювачі системи підводного і міжконтинентального зв'язку тощо), так і виробі багатократної дії (деякі системи навігаційного комплексу суднового устаткування, системи ППЗ, системи керування повітряним рухом, системи керування хімічними, металургійними та іншими відповідальними виробничими процесами та інші).

*Відновлюємими* називаються такі виробі, які у процесі виконання своїх функцій припускають ремонт. Якщо станеться відмова такого виробу, то він викликає припинення функціонування виробу тільки на період усунення відмови. До таких виробів відносяться телевизор, агрегат харчування, верстат, автомобіль, трактор тощо.

### 1.1.1 Критерії надійності невідновлюємих виробів

Розглянемо наступну модель випробувань. Нехай на випробуванні знаходиться  $N_0$  виробів. Випробування вважаються закінченими, якщо усі вони відмовили. Причому замість зразків, що відмовили, відремонтовані або нові не ставляться. Тоді критеріями надійності даних виробів є:

- ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$ ;
- частота відмов  $a(t)$ ;
- інтенсивність відмов  $\lambda(t)$ ;
- середній наробіток до першої відмови  $T_{ср}$ .

*Ймовірністю безвідмовної роботи  $P(t)$*  називається ймовірність того, що за певних умов експлуатації у заданому інтервалі часу або в межах заданого наробітку не відбудеться жодної відмови. Ймовірність безвідмовної роботи є спадаючою функцією часу та володіє наступними якостями:

$$0 \leq P(t) \leq 1; P(0) = 1; P(\infty) = 0. \quad (1.1)$$

Ймовірність безвідмовної роботи за статистичними даними про відмови оцінюється виразом:

$$\bar{P}(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (1.2)$$

де  $N_0$  - число виробів на початку випробування,  $n(t)$  - число виробів, що відмовили за час  $t$ . На практиці іноді більш зручною характеристикою є ймовірність відмови  $Q(t)$ .

*Ймовірністю відмови* називається ймовірність того, що за певних умов експлуатації в заданому інтервалі часу виникне хоча б одна відмова. Відмова і безвідмовна робота є подіями несумісними та протилежними, тому

$$\bar{Q}(t) = \frac{n(t)}{N_0}, \quad (1.3)$$

$$Q(t) = 1 - P(t).$$

*Частотою відмов* називається відношення числа виробів, що відмовили, в одиницю часу до початкового числа виробів, що випробуються, за умови, що усі вироби, які вийшли зі строю не відновлюються. Відповідно до визначення:

$$\bar{a}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t}, \quad (1.4)$$

де  $n(\Delta t)$  - число зразків, що відмовили, в інтервалі часу від  $t-(t/2)$  до  $t+(t/2)$ .

*Частота відмов є щільність ймовірності (або закон розподілу) часу роботи виробу до першої відмови.*

*Інтенсивністю відмов* називається відношення числа виробів, що відмовили, в одиницю часу до середнього числа виробів, які справно працюють у даний відрізок часу. Відповідно до визначення:

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \Delta t}, \quad (1.5)$$

де  $N_{cp} = (N_i + N_{i+1})/2$  - середнє число виробів, що справно працюють у інтервалі  $\Delta t$ ;  $N_i$  - число виробів, що справно працюють на початку інтервалу  $\Delta t$ ;  $N_{i+1}$  - число виробів, що справно працюють наприкінці інтервалу  $\Delta t$ .

Вираз (1.5) є статистичним визначенням інтенсивності відмов. Ймовірнісна оцінка цієї характеристики знаходиться за допомогою вираза

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)}. \quad (1.6)$$

*Середнім наробітком до першої відмови* називається математичне очікування часу роботи виробу до відмови.

За статистичними даними про відмови середній наробіток до першої відмови обчислюється за формулою

$$\bar{T}_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N_0}, \quad (1.7)$$

де  $t_i$  - час безвідмовної роботи  $i$ -го зразка;  $N_0$  - число зразків, що випробується.

Як видно з формули (1.7), для визначення середнього наробітку до першої відмови необхідно знати моменти виходу зі строю усіх випробуваних елементів. Тому для обчислення  $T_{cp}$  користуватися зазначеною формулою незручно. Маючи дані про кількість елементів  $n_i$ , які вийшли зі строю у кожному  $i$ -му інтервалі часу, середній наробіток до першої відмови краще визначити з рівняння:

$$\bar{T}_{cp} \approx \frac{\sum_{i=1}^m n_i t_{cp,i}}{N_0}, \quad (1.8)$$

У виразі (1.7)  $t_{cp,i}$  і  $m$  знаходиться за наступними формулами:

$$t_{cp,i} = (t_{i-1} + t_i)/2, \quad m = t_k / \Delta t,$$

де  $t_{i-1}$  — час початку  $i$ -го інтервалу;  $t_i$  — час кінця  $i$ -го інтервалу;  $t_k$  — час, протягом якого вийшли зі строю всі елементи;  $\Delta t = t_{i-1} - t_i$  - інтервал часу.

При вивченні надійності технічних пристроїв найбільше часто застосовуються наступні закони розподілу часу безвідмовної роботи:

експоненціальний, усічений нормальний, Релея, Гама, Вейбулла, логарифмічно-нормальний.

З виразів для оцінки кількісних характеристик надійності очевидно, що усі характеристики, крім середнього наробітку до першої відмови, є функціями часу.

Розглянуті критерії надійності дозволяють достатньо повно оцінити надійність невідновлюємих виробів. Вони також дозволяють оцінити надійність відновлюємих виробів до першої відмови. Наявність кількох критеріїв зовсім не означає, що завжди потрібно оцінювати надійність виробів за всіма критеріями.

Найбільш повно надійність виробів характеризується частотою відмов  $a(t)$ . Це пояснюється тим, що частота відмов є щільністю розподілу, а тому несе в собі всю інформацію про випадкове явище - час безвідмовної роботи.

Середній наробіток до першої відмови є достатньо наочною характеристикою надійності. Проте застосування цього критерію для оцінки надійності складної системи обмежено в тих випадках, коли:

- час роботи системи набагато менший за середній час безвідмовної роботи;
- закон розподілу часу безвідмовної роботи не однопараметричний і для достатньо повної оцінки вимагаються моменти вищих порядків;
- наявність системи резервування;
- інтенсивність відмов не постійна;
- час роботи окремих частин складної системи різний.

Інтенсивність відмов - найбільш зручна характеристика надійності найпростіших елементів, тому що вона дозволяє більш просто розраховувати кількісні характеристики надійності складної системи.

Найбільш доцільним критерієм надійності складної системи є ймовірність безвідмовної роботи. Це пояснюється наступними особливостями ймовірності безвідмовної роботи:

- вона входить у якість співмножника в інші, більш загальні характеристики системи, наприклад у ефективність і вартість;
- характеризує зміну надійності у часі;
- може бути отримана порівняно просто розрахунковим шляхом у процесі проектування системи й оцінена в процесі її випробування.

## 1.2 Порядок виконання лабораторної роботи

На випробуваннях знаходилося  $N_0$  зразків апаратури, що не підлягає ремонту. Число відмов  $n(\Delta t)$  фіксувалося через  $\Delta t$  часів роботи. Дані про відмови приведені у таблиці 1.1. Потрібно обчислити кількісні характеристики надійності ( $\bar{P}(t)$ ,  $\bar{Q}(t)$ ,  $\bar{a}(t)$ ,  $\bar{\lambda}(t)$ ,  $\bar{T}_{\text{ср}}$ ) і побудувати залежності характеристик від часу. Результати розрахунку звести у таблицю 1.2.

**Таблиця 1.1** - Варіанти індивідуальних завдань до п. 1.2

№	$N_0$	$\Delta t$	$n(\Delta t)$
1	1000	100	50;40;32;25;20;17;16;16;15;14;15;14;14;13;14;13;13;13;14;12;12;13;12;13;14;16;20;25;30;40
2	1000	1000	20;25;35;50;30;50;40;40;50;30;40;40;50;40;50;40;50;40;50;35;35;50;35;25;30;20
3	1000	500	145;86;77;69;62;56;51;45;41;37;33;35;60;75;62;42;16
4	1000	1000	190;153;125;102;82;66;54;43;35;29;23;19;15;13;10;8;6;5;4;4;2;3;2;1;1;1;1;1;1;1
5	100	500	1;2;3;3;5;6;7;7;8;7;8;7;6;6;5;4;4;3;3;2;1
6	500	5000	0;9;23;39;50;55;55;52;45;39;32;25;20;15;11;8;6;5;3;2;2;1;1;1
7	1000	2000	95;86;78;70;64;58;52;47;43;39;35;31;29;26;23;22;19;17;16
8	1000	1000	173;143;118;98;81;67;55;46;38;31;26;21;18;15;12;10;8;7;5;5;4;3;3;2;2
9	1000	200	7;23;37;50;60;68;73;75;75;74;69;64;57;51;44;37;31;25;20;16;12;9;6;5;4;2;2;1;1;1
10	1000	100	95;151;159;145;123;97;73;52;37;25;16;11;6;4;3;1;1
11	500	500	86;72;59;49;40;34;27;23;19;16;13;10;9;8;6;5;4;3;3;2;2;1;1
12	200	1000	36;29;25;20;16;13;11;9;7;6;5;4;4;2;3;1;2;1;1;1
13	500	1000	37;34;29;25;20;19;15;14;14;15;14;16;14;17;16;14;16;14;14;15;17;21;24;28;38
14	2000	200	155;183;183;173;160;146;131;118;103;92;80;69;60;53;44;39;33;28;24;20;17;15;12;10;9;7;6;5;4;4
15	300	1000	25;20;16;12;10;8;8;8;7;7;7;7;7;6;7;6;6;6;7;6;6;6;6;7;8;10;12;15;20
16	200	5000	11;26;38;37;31;23;15;9;5;2;2;1
17	1000	1000	65;52;41;32;26;22;20;20;19;18;19;18;18;16;18;16;16;16;18;15;15;16;15;16;18;20;26;32;39;52
18	200	400	3;10;17;20;22;23;22;20;16;14;10;8;5;4;2;2;0;1;

Продовження таблиці 1.1

№	N0	$\Delta t$	$n(\Delta t)$
19	500	100	1;5;9;12;14;17;20;21;23;24;25;25;25;25;25;23;22;21;20;18; 16;15;14;12;10;10;8;7;6;5
20	1000	5000	14;66;111;132;133;120;103;82;65;49;36;27;18;14;9;7;4;3;2;2
21	300	100	26;23;22;20;18;17;15;14;12;12;10;10;9;8;7;7;6;5;5;4;4;3; 3;2;3;2;2;2
22	1000	500	74;69;58;50;40;39;30;25;29;30;28;32;28;35;33;29;33;28;28; 31;35;42;48;57;69
23	100	100	9;10;11;9;9;7;7;6;5;4;4;3;3;2;2;1;2;1;1
24	500	200	83;69;58;48;40;34;28;23;19;16;14;11;10;7;7;5;5;4;3;2;3;1;2; 1;1;1;1;0;1
25	100	300	1;3;5;7;8;9;9;8;8;7;6;5;3;4;2;2;1;1;1
26	1000	500	139;120;103;89;76;66;57;48;42;36;31;27;23;20;17;15;12; 11;10;8;7;6;5;4;4;3;3;3;2;1
27	400	200	2;7;12;16;20;22;25;26;27;27;26;25;24;21;20;17;15;13;11; 10;7;5;4;3;2;2;1;1
28	1000	500	3;20;41;58;72;79;82;80;76;71;64;56;49;43;36;31;25;22;17; 15;12;9;8;6;5;4;3;3;2;2
29	200	200	20;22;21;20;18;15;14;12;10;8;7;6;5;4;4;2;3;2;1;1
30	750	1000	66;53;42;33;26;22;21;21;19;18;19;18;18;17;18;17;17;17; 18;15;15;17;15;17;18;21;26;33;39;54
31	200	100	10;14;15;14;14;14;12;12;10;10;8;8;7;7;5;5;5;4;3;3;3;2;2;1
32	1000	200	147;126;108;91;78;67;56;48;42;35;29;26;22;18;16;13;12;9; 9;7;6;5;4;4;3;3;2;2;2;1
33	100	300	11;10;9;8;7;6;5;5;5;3;4;3;2;3;2;2;1;2;1;1
34	200	500	19;20;19;17;15;14;12;11;9;8;8;6;6;5;4;3;4;2;3;2;2;1
35	1000	1000	164;138;115;96;80;67;56;47;39;32;27;23;19;16;13;11;10; 7;7;5;5;3;4;2;2;2;2;1;1;1
36	200	200	27;24;21;18;15;13;12;9;9;7;6;5;5;4;3;3;3;2;2;2;1;1;1;1
37	400	1000	3;9;15;20;23;28;29;30;30;29;28;26;23;20;18;14;13;10;8;6; 5;3;3;2;1;1;1;1
38	1000	1000	5;16;23;29;34;37;38;41;40;41;40;40;38;38;35;34;33;31;29; 28;26;24;23;21;20;19;17;16;15;14
39	500	500	3;11;18;24;28;33;35;37;37;36;34;32;29;26;23;19;16;14;10; 9;7;5;4;3;2;1;1
40	2000	1000	15;46;74;100;119;136;146;150;151;147;138;128;115;102; 88;74;61;50;40;32;24;18;13;10;7;5;4;2;2;1
41	500	1000	110;86;67;53;40;32;25;19;15;11;10;7;5;4;4;2;2;2;1;1;1;0;1
42	200	200	1;4;7;8;11;13;13;14;14;14;14;13;11;11;9;8;7;6;5;4;3;2;2;1

Продовження таблиці 1.1

№	N0	Δt	n(Δt)
43	300	500	39;34;29;26;23;19;17;15;12;12;9;9;7;6;6;5;4;3;4;2;3;2;2;1
44	400	1000	5;14;20;23;25;26;25;25;23;22;21;19;17;15;14;13;11;10;9;8;7;6;6;4;4;4;3;3;2;2
45	200	400	32;28;23;19;16;14;11;9;8;6;6;4;4;3;3;2;2;2;1;1;1;1
46	200	100	18;16;15;14;12;11;11;9;8;8;7;7;5;6;4;5;4;3;4;3;2;3;2;2;2;2;1
47	1000	500	8;22;33;40;45;47;50;50;49;48;46;45;42;40;37;35;32;30;28;26;23;21;20;18;16;15;13;13;11;10
48	500	100	3;9;15;20;24;28;31;33;33;34;33;31;29;27;25;22;19;16;14;11;10;7;6;5;4;3;2;2;1;1
49	100	100	1;3;3;4;5;5;6;6;6;6;6;5;5;5;4;4;3;3;2;3;1;2;1;1;1;1
50	500	1000	129;96;71;53;39;29;21;16;12;9;6;5;3;3;2;1;1;1;1

Таблиця 1.2 – Результати розрахунків

№	t	n(Δt)	n(t)	N <sub>п</sub>	N <sub>к</sub>	N <sub>сп</sub>	P(t)	Q(t)	α(t)	λ(t)
1	0..Δ t									
2	Δ t..2·Δ t									
⋮										
m										

У таблиці 1.2:  $n(t)$  – загальна кількість зразків апаратури, що вийшла з ладу у даний момент часу;  $N_{п}$  – кількість зразків апаратури, що були справними на початку інтервалу часу ( $N_{п1} = N_0$ );  $N_{к}$  – кількість зразків апаратури, що є справними на кінець заданого інтервалу часу.

### 1.3 Контрольні запитання

- 1 За якими формулами визначаються кількісні характеристики надійності при довільному законі надійності?
- 2 За якими формулами визначаються кількісні характеристики надійності при експонентному законі надійності?
- 3 Критерії надійності невідновлюємих об'єктів.
- 4 Середній наробіток до першої відмови.
- 5 Закони розподілу часу безвідмовної роботи. Навести приклади (графічно)?
- 6 В яких випадках обмежено застосування критерію надійності – середній наробіток до першої відмови?

7 Чому критерій  $P(t)$  являється найбільш доцільним критерієм надійності?

8 Як визначається середній наробіток між відмовами на інтервалі  $\Delta t$ ?

9 Як визначається імовірність безвідмовної роботи?

**Зміст звіту:**

- Опис критеріїв надійності невідновлюємих об'єктів;
- Таблиця 1.2, розрахунки та графіки характеристик  $P(t)$ ,  $Q(t)$ ,  $a(t)$ ,  $\lambda(t)$ ;
- Висновки.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### КРИТЕРІЙ ТА КІЛЬКІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДІЙНОСТІ ВІДНОВЛЮЄМИХ ВИРОБІВ

**Мета роботи:** ознайомлення з основними характеристиками надійності відновлюємих виробів, визначити кількісні характеристики виробів.

#### 2.1 Загальні відомості

##### 2.1.1 Критерії надійності відновлюємих виробів

Розглянемо наступну модель випробувань.

Нехай на випробуванні знаходиться  $N$  виробів, і нехай вироби, які відмовили, негайно замінюються справними (новими або відремонтованими). Випробування вважаються закінченими, якщо число відмов досягає величини, достатньої для оцінки надійності з визначеною довірчою ймовірністю. Якщо не враховувати часу, необхідного на відновлення системи, то кількісними характеристиками надійності можуть бути параметр потоку відмов  $\omega(t)$  і наробіток на відмову  $t_{cp}$ .

*Параметром потоку відмов* називається відношення числа виробів, що відмовили за одиницю часу до числа випробовуваних виробів за умови: вироби, які вийшли зі строю замінюються справними (новими або відремонтованими). Відповідно до визначення:

$$\bar{\omega}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N \cdot \Delta t}, \quad (2.1)$$

де  $n(\Delta t)$  — число зразків, що відмовили, у інтервалі часу від  $t - \Delta t/2$  до  $t + \Delta t/2$ ;  $N$  — число випробовуваних зразків,  $\Delta t$  — інтервал часу.

Вираз (2.1) є статистичним визначенням параметра потоку відмов.

Параметр потоку відмов і частота відмов для ординарних потоків з обмеженою післядією пов'язані інтегральним рівнянням Вольтерра другого роду

$$\varpi(t) = a(t) + \int_0^t \varpi(\tau)a(t-\tau)d\tau. \quad (2.2)$$

За відомим  $a(t)$  можна знайти усі кількісні характеристики надійності невідновлюємих виробів. Тому (2.2) являється основним рівнянням, що зв'язує кількісні характеристики надійності невідновлюємих та відновлюємих виробів при миттєвому відновленні.

Параметр потоку відмов має наступні важливі властивості:

а) для будь-якого моменту часу незалежно від закону розподілу часу безвідмовної роботи параметр потоку відмов більше, ніж частота відмов, тобто  $\omega(t) > a(t)$ ;

ю) незалежно від виду функції  $a(t)$  параметр потоку відмов  $\omega(t)$  при  $t \rightarrow \infty$  наближається до  $1/T_{ср}$ . Ця важлива властивість параметра потоку відмов означає, що при тривалій експлуатації виробу, що ремонтується потік його відмов незалежно від закону розподілу часу безвідмовної роботи стає стаціонарним. Проте це зовсім не означає, що інтенсивність відмов є величина постійна;

в) якщо  $\lambda(t)$  — зростаюча функція часу, то  $\lambda(t) > \omega(t) > a(t)$ , якщо  $\lambda(t)$  — убутна функція, то  $\omega(t) > \lambda(t) > a(t)$ ;

г) при  $\lambda(t) \neq const$  параметр потоку відмов системи не дорівнює сумі параметрів потоків відмов елементів.

Ця властивість параметра потоку відмов дозволяє стверджувати, що при обчисленні кількісних характеристик надійності складної системи не можна складати наявні в даний час значення інтенсивностей відмов елементів, отримані за статистичними даними про відмови виробів в умовах експлуатації, тому що зазначені величини фактично є параметрами потоку відмов;

д) при  $\lambda(t) = \lambda = const$  параметр потоку відмов дорівнює інтенсивності відмов  $\omega(t) = \lambda(t) = \lambda$ .

Розглянувши властивості інтенсивності і параметра потоку відмов очевидно, що ці характеристики різні.

Зараз широко використовуються статистичні дані про відмови, отримані в умовах експлуатації апаратури. При цьому вони часто оброблюються таким чином, що характеристики надійності, які приводяться, є не інтенсивністю відмов, а параметром потоку відмов

$\omega(t)$ . Це додає помилок при розрахунках надійності. У ряді випадків вони можуть бути значними.

Для одержання інтенсивності відмов елементів із статистичних даних про відмови систем, що ремонтуються, необхідно скористатися формулою (1.4), для чого необхідно знати передісторію кожного елемента принципової схеми. Це може істотно ускладнити методику збору статистичних даних про відмови. Тому доцільно визначати  $\lambda(t)$  за параметром потоку відмов  $\omega(t)$ . Методика розрахунку зводиться до наступних обчислювальних операцій:

— за статистичними даними про відмови елементів, виробів, що ремонтуються, і за формулою (2.1) обчислюється параметр потоку відмов і будується гістограма  $\varpi_i(t)$ ;

— гістограма замінюється кривою, що апроксимується рівнянням;

— знаходиться перетворення Лапласа  $\varpi_i(s)$  функції  $\varpi_i(t)$ ;

— за відомою  $\varpi_i(s)$  на підставі (2.3) записується перетворення Лапласа  $a_i(s)$  частоти відмов;

— за відомою  $a_i(s)$  знаходиться зворотне перетворення частоти відмов  $a_i(t)$ ;

— знаходиться аналітичне вираження для інтенсивності відмов за формулою

$$\lambda_i(t) = \frac{a_i(t)}{1 - \int_0^t a_i(t) dt} \quad (2.3)$$

— будується графік  $\lambda_i(t)$ .

Якщо існує ділянка, де  $\lambda_i(t) = \lambda_i = const$ , то постійне значення інтенсивності відмов приймається для оцінки ймовірності безвідмовної роботи. При цьому вважається справедливим експоненціальний закон надійності.

Приведена методика не може бути застосована, якщо не вдасться знайти за  $a(s)$  зворотне перетворення частоти відмов  $a(t)$ . У цьому випадку приходиться застосовувати наближені методи

розв'язання інтегрального рівняння (2.2). Рішення найпростіше можна одержати за допомогою ЕОМ.

*Наробітком на відмову* називається середнє значення часу між сусідніми відмовами.

Ця характеристика визначається за статистичними даними про відмови за формулою

$$\bar{t}_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (2.4)$$

де  $t_i$  — час справної роботи виробу між  $(i-1)$ -ою та  $i$ -ою відмовами;  $n$  — число відмов за якийсь час  $t$ .

З формули (2.4) очевидно, що в даному випадку наробіток на відмову визначається за даними випробування одного зразка виробу. Якщо на випробуванні знаходиться  $N$  зразків протягом часу  $t$ , то наробіток на відмову обчислюється за формулою

$$t_{cp} = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} t_{ij}}{\sum_{j=1}^N n_j}, \quad (2.5)$$

де  $t_{ij}$  — час справної роботи  $j$ -го зразка виробу між  $(i-1)$ -ою та  $i$ -ою відмовою;  $n_j$  — кількість відмов за час  $t$   $j$ -го зразка.

Параметр потоку відмов і наробіток на відмову характеризують надійність виробу, що підлягає ремонту, і не враховують часу, необхідного на його відновлення. Тому вони не характеризують готовності виробу до виконання своїх функцій у необхідний час. Для цієї мети вводяться такі критерії, як коефіцієнт готовності та коефіцієнт вимушеного простою.

*Коефіцієнтом готовності* називається відношення часу справної роботи до суми часів справної роботи та вимушених простоїв виробу, узятих за той самий календарний термін. Ця характеристика позначається  $K_g$ . Відповідно до даного визначення:

$$K_g = t_p / (t_p + t_{п}), \quad (2.6)$$

де  $t_p$  — сумарний час справної роботи виробу;  $t_{\Pi}$  — сумарний час вимушеного простою.

Часи  $t_p$  та  $t_{\Pi}$  обчислюються за формулами

$$t_p = \sum_{i=1}^n t_{p i}, \quad t_{\Pi} = \sum_{i=1}^n t_{\Pi i}, \quad (2.7)$$

де  $t_{p.i}$  — час роботи виробу між  $(i-1)$ -ою та  $i$ -ою відмовою;  $t_{\Pi.i}$  — час вимушеного простою після  $i$ -ої відмови;  $n$  — кількість відмов (ремонтів) виробу.

Вираз (2.7) є статистичним визначенням коефіцієнта готовності. Для переходу до ймовірного трактування, величини  $t_p$  і  $t_{\Pi}$  замінюються математичними очікуваннями часу між сусідніми відмовами і часу відновлення відповідно. Тоді

$$K_{\Gamma} = t_{cp}/(t_{cp} + t_B), \quad (2.8)$$

де  $t_{cp}$  — наробітка на відмову;  $t_B$  — середній час відновлення.

*Коефіцієнтом вимушеного простою* називається відношення часу вимушеного простою до суми часів справної роботи і вимушених простоїв виробу, узятих за той самий календарний термін. Відповідно до визначення

$$\bar{K}_{\Pi} = t_{\Pi}/(t_p + t_{\Pi}), \quad (2.9)$$

або, переходячи до середніх величин,

$$K_{\Pi} = t_B/(t_{cp} + t_B). \quad (2.10)$$

Коефіцієнт готовності та коефіцієнт вимушеного простою пов'язані між собою залежністю

$$K_{\Pi} = 1 - K_{\Gamma}. \quad (2.11)$$

При аналізі надійності відновлюємих систем коефіцієнт готовності обчислюють за формулою

$$K_{\Gamma} = T_{cp}/(T_{cp} + t_B). \quad (2.12)$$

Формула (2.13) вірна тільки в тому випадку, якщо потік відмов найпростіший, і тоді  $t_{cp} = T_{cp}$ .

Часто коефіцієнт готовності, обчислений за формулою (2.12), ототожнюють з ймовірністю того, що в будь-який момент часу відновлюєма система справна. Насправді зазначені характеристики нерівноцінні і можуть бути ототоженні при певних допущеннях.

Дійсно, ймовірність виникнення відмови ремонтуємої системи на початку експлуатації мала. З ростом часу  $t$  ця ймовірність зростає.

Це означає, що ймовірність застати систему в справному стані на початку експлуатації буде вище, ніж після закінчення деякого часу. Тим часом на підставі формули (2.13) коефіцієнт готовності не залежить від часу роботи.

Для з'ясування фізичного змісту коефіцієнта готовності  $K_G$  запишемо формулу для ймовірності застати систему в справному стані. При цьому розглянемо найбільш простий випадок, коли інтенсивність відмов і інтенсивність відновлення є постійними величинами.

Припускаючи, що при  $t=0$  система знаходиться в справному стані ( $P(0)=1$ ), ймовірність застати систему в справному стані визначається з виразів:

$$P_G(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}, \quad (2.13)$$

$$P_G(t) = K_G + (1 - K_G)e^{-t/K_G t_b},$$

де

$$\lambda = \frac{1}{T_{cp}}; \quad \mu = \frac{1}{t_b}; \quad K_G = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + t_b}.$$

Це вираження встановлює залежність між коефіцієнтом готовності системи та ймовірністю застати її в справному стані в будь-який момент часу  $t$ .

З (2.14) очевидно, що  $P_G(t) \rightarrow K_G$  при  $t \rightarrow \infty$ , тобто практично коефіцієнт готовності має сенс ймовірності застати вироб у справному стані при сталому процесі експлуатації.

У деяких випадках критеріями надійності відновлюємих систем можуть бути також критерії надійності невідновлюємих систем, наприклад ймовірність безвідмовної роботи, частота відмов, середній наробіток до першої відмови, інтенсивність відмов. Така необхідність виникає завжди, коли має сенс оцінити надійність відновлюємої системи до першої відмови, а також у випадку, коли застосовується резервування з відновленням резервних пристроїв, що відмовили, у процесі роботи системи, причому відмова всієї резервованої системи не припускається.

## 2.2 Порядок виконання лабораторної роботи

2.2.1 На випробування поставлено  $N_0$  невідновлюємих виробів. За час  $t$  вийшло зі строю  $n(t)$  одиниць виробів. За наступний інтервал часу  $\Delta t$  вийшло зі строю  $n(\Delta t)$  виробів. Необхідно обчислити ймовірність безвідмовної роботи за час  $t$  і  $t+\Delta t$ , частоту відмов і інтенсивність відмов на інтервалі  $\Delta t$ . Вихідні дані для розв'язання задачі наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Варіанти індивідуальних завдань до п. 2.2.1

№	$N_0$	$t$ , годин	$\Delta t$ , годин	$n(t)$	$n(\Delta t)$	№	$N_0$	$t$ , годин	$\Delta t$ , годин	$n(t)$	$n(\Delta t)$
1	400	3000	100	200	100	26	1000	0	1000	0	20
2	1000	3000	1000	80	50	27	1000	1000	1000	20	25
3	100	8000	100	50	10	28	1000	2000	1000	40	35
4	10	1000	100	3	2	29	1000	0	100	0	50
5	10	1000	100	3	1	30	45	75	5	44	1
6	45	0	10	0	19	31	1000	5000	1000	160	50
7	1000	4000	1000	130	30	32	1000	100	100	50	40
8	1000	200	100	90	32	33	45	10	10	19	13
9	45	60	10	44	1	34	45	5	5	1	5
10	1000	300	100	122	25	35	1000	2900	100	535	40
11	1000	2000	10	380	12	36	1000	1500	100	315	13
12	1000	25000	1000	980	20	37	1000	9000	1000	340	30
13	1000	12000	1000	450	50	38	1000	6000	1000	210	40
14	1000	23000	1000	925	25	39	1000	16000	1000	630	50
15	1000	2800	100	505	30	40	1000	400	100	147	20
16	1000	1000	100	245	15	41	1000	700	100	200	16
17	1000	2200	100	405	12	42	1000	1700	100	341	13
18	45	20	10	32	8	43	45	0	5	0	1
19	45	30	5	27	4	44	45	70	5	41	3
20	1000	7000	1000	250	40	45	1000	22000	1000	890	35
21	1000	13000	1000	500	40	46	45	30	10	40	3
22	1000	500	100	167	17	47	1000	1100	100	260	14
23	1000	600	100	184	16	48	45	50	10	43	1
24	45	10	5	6	8	49	45	35	5	31	3
25	1000	8000	1000	290	50	50	1000	14000	1000	540	50

2.2.2 Протягом деякого часу проводилося спостереження за роботою  $N_0$  екземплярів відновлюємих виробів. Кожний із зразків працював протягом  $t_i$  [годин] і мав  $n_i$  відмов. Потрібно визначити наробіток на відмову за даними спостереження за роботою всіх виробів. Вихідні дані для розв'язання задачі наведені у табл. 2.2.

**Таблиця 2.2** - Варіанти індивідуальних завдань до п. 2.2.2 та 2.2.3

№	$n_1$	$t_1$	$n_2$	$t_2$	$n_3$	$t_3$	$n_4$	$t_4$	$n_5$	$t_5$
1	1	300	3	600	2	400	4	500	2	150
2	3	90	6	270	4	140	5	230	3	180
3	12	960	15	1112	8	808	7	1490	10	1340
4	6	144	5	125	3	80	8	176	5	150
5	8	176	5	150	4	112	8	216	3	110
6	6	144	5	125	3	80	4	112	8	216
7	10	1020	18	2700	26	3120	32	4000	24	3480
8	32	4000	24	3480	16	2080	21	2940	12	1950
9	10	1020	26	3120	24	3480	18	2700	16	2080
10	18	2700	32	4000	24	3480	16	2080	10	1500
11	3	720	4	1040	2	500	6	1800	2	540
12	1	300	3	600	6	2300	7	2450	5	1200
13	5	1500	8	1920	3	180	4	680	3	1290
14	3	1650	2	1200	4	2300	2	2200	4	770
15	5	72	4	60	7	92	8	96	4	50
16	6	256	8	540	10	780	4	250	12	900
17	6	2000	4	1860	3	2160	2	1490	5	2200
18	12	960	15	1112	8	808	7	1490	11	1200
19	3	90	6	270	4	140	5	230	3	180
20	45	600	2	600	4	200	6	200	2	200
21	6	144	5	125	3	80	4	90	4	135
22	3	720	4	1040	2	500	6	1800	5	1320
23	3	1650	5	150	10	176	4	590	8	174
24	1	120	2	120	8	90	1	700	3	150
25	9	4800	3	5500	3	1200	6	3275	2	1500
26	1	20	4	30	3	16	2	36	2	40
27	5	15	8	25	12	60	6	40	9	20
28	2	37	1	480	2	60	4	25	3	70
29	3	72	5	40	4	36	2	120	4	60
30	14	18	8	40	27	20	6	30	13	15

2.2.3 Система складається з  $N$  приладів, які мають різну надійність. Відомо, що кожний із приладів, пропрацював поза системою  $t_i$  [годин] та мав  $n_i$  відмов. Для кожного із приладів справедливий експонентний закон надійності. Необхідно знайти наробітку на відмову всієї системи. Вихідні дані для розв'язання задачі наведені у табл. 2.2.

2.2.4 Відомо, що інтенсивність відмов  $\lambda = a \cdot 10^{-4} \text{ час}^{-1}$ , а середній час відновлення  $t_v \text{ час}$ . Потрібно обчислити коефіцієнт готовності виробу і функцію ймовірності застати систему в готовності (формула 2.13). Вихідні дані для розв'язання задачі наведені у табл. 2.3.

**Таблиця 2.3** - Варіанти індивідуальних завдань до п. 2.2.4

№	$\lambda$	$t_v$ , годин	№	$\lambda$	$t_v$ , годин	№	$\lambda$	$t_v$ , годин	№	$\lambda$	$t_v$ , годин
1	0.5	500	14	200	10	27	930	2	40	290	20
2	190	50	15	4	5000	28	515	7	41	9.5	500
3	15	60	16	12.9	150	29	8.67	110	42	130	10
4	310	15	17	3.75	5000	30	570	2	43	6.2	350
5	22	15	18	150	15	31	610	3	44	0.08	2500
6	1.7	150	19	1	200	32	20	100	45	7.25	200
7	110	30	20	675	8	33	725	2	46	8.1	225
8	1.5	750	21	100	20	34	5	500	47	1000	1
9	43	20	22	2.5	150	35	6.75	150	48	360	10
10	450	10	23	780	4	36	895	6	49	10	350
11	18	100	24	2.5	1000	37	0.1	2900	50	4.35	100
12	835	5	25	245	5	38	55	25			
13	33	155	26	165	10	39	70	15			

### 2.3 Контрольні запитання

- 1 Критерії надійності відновлюємих об'єктів.
- 2 Які властивості має параметр потоку відмов?
- 3 Що таке коефіцієнт готовності?
- 4 Яким чином визначити інтенсивність відмов відновлюємих об'єктів?
- 5 Фізичний зміст коефіцієнта готовності?
- 6 Як визначається коефіцієнт вимушеного простою?
- 7 Необхідність розрахунку  $P(t)$ ,  $a(t)$ ,  $T_{ср}$ ,  $\lambda(t)$  для відновлюємих об'єктів?

**Зміст звіту:**

- Опис критеріїв надійності відновлюємих об'єктів.
- Розрахунки у вигляді таблиць, графік характеристики

$K_r=f(t)$ .

- Висновки.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

### РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК НАДІЙНОСТІ НЕВІДНОВЛЮЄМИХ РЕЗЕРВОВАНИХ ВИРОБІВ

**Мета роботи:** ознайомитися із засобами резервування невідновлюваних об'єктів; розрахувати ймовірність безвідмовної роботи структурної схеми при заданих ймовірностях елементів системи.

#### 3.1 Загальні відомості

Резервованим з'єднанням виробів називається таке з'єднання, при якому відмова настає тільки після відмови основного виробу і всіх резервних виробів.

На практиці застосовуються засоби резервування, які приведені на рис.3.1.

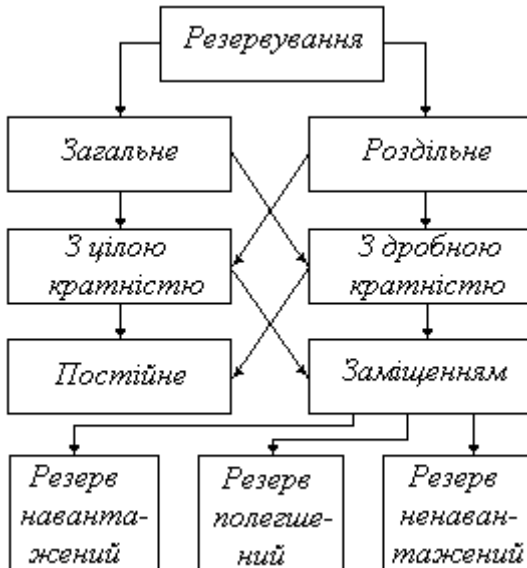
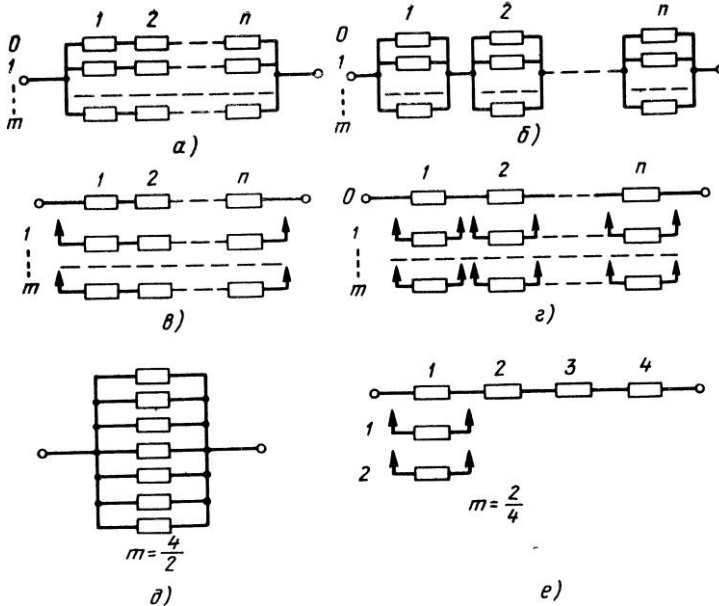


Рисунок 3.1- Засоби резервування

Схемні позначення різноманітних засобів резервування приведені на рис.3.2. Загальним резервуванням називається метод підвищення надійності, при якому резервується виріб у цілому (рис. 3.2,а). Роздільним резервуванням називається метод підвищення надійності, при якому резервуються окремі частини виробу (рис. 3.2,б).



а - загальне постійне з цілою кратністю, б - роздільне постійне з цілою кратністю, в - загальне заміщенням із цілою кратністю, г - роздільне заміщенням із цілою кратністю, д - загальне постійне з дробною кратністю е - роздільне заміщенням із дробною кратністю

**Рисунок 3.2** - Схемні позначення різних засобів резервування

Основним параметром резервування є його *кратність*. Під кратністю резервування  $m$  розуміється відношення числа резервних виробів до числа виробів, що резервуються (основних).

Розрізняють резервування з цілою і дробною кратністю. Схемні позначення обох видів резервування при постійному вмиканні резерву однакові. Задля вказання їх відмінності на схемі вказується кратність резервування  $m$ .

При резервуванні з цілою кратністю величина  $m$  є ціле число, при резервуванні з дробовою кратністю величина  $m$  є дробове число, що не скорочується. Наприклад,  $m = 4/2$  означає наявність резервування з дробовою кратністю, при якому число резервних елементів дорівнює чотирьом, число основних - двом, а загальне число елементів дорівнює шести. Скорочувати дріб не можна, тому що якщо  $m = 4/2 = 2$ , то це означає, що має місце резервування з цілою кратністю, при якому число резервних елементів дорівнює двом, а загальне число елементів дорівнює трьох.

Резервування за засобом вмикання розділяється на постійне і резервування заміщенням. Постійне резервування - резервування, при якому резервні вироби підключені до основного протягом усього часу роботи і знаходяться в однаковому з ними режимі. Резервування заміщенням - резервування, при якому резервні вироби заміщують основні після їхньої відмови.

При вмиканні резерву за засобом заміщення резервні елементи до моменту вмикання в роботу можуть знаходитися в трьох станах:

- навантаженому резерві;
- полегшеному резерві;
- ненавантаженому резерві.

Приведемо основні розрахункові формули для указаних вище видів резервування.

1. *Загальне резервування з постійно включеним резервом і з цілою кратністю* (рис. 3.2, а):

$$P_c(t) = 1 - \left[ 1 - \prod_{i=1}^n p_i(t) \right]^{m+1}. \quad (3.1)$$

де  $p_i(t)$  - можливість безвідмовної роботи  $i$ -го елемента протягом часу  $t$ ;  $n$  - число елементів основного або будь-якого резервного ланцюга;  $m$  - число резервних ланцюгів (кратність резервування).

При експоненціальному законі надійності, коли  $p_i(t) = e^{-\lambda_i t}$

$$P_c(t) = 1 - \left[ 1 - e^{-\lambda_0 t} \right]^{m+1}, \quad (3.2)$$

$$T_{cp\ c} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1} = T_{cp\ 0} \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1},$$

де  $\lambda_0 = \sum_{i=0}^n \lambda_i$  - інтенсивність відмов нерезервованої системи або іншої із  $m$  резервних систем;  $T_{cp\ 0}$  - середній час безвідмовної роботи нерезервованої системи або іншої із  $m$  резервних систем. При резервуванні нерівнонадійних виробів

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^m q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - p_i(t)], \quad (3.3)$$

де  $q_i(t)$ ,  $p_i(t)$  - ймовірність відмов і ймовірність безвідмовної роботи протягом часу  $t$   $i$ -го виробу відповідно.

2. Роздільне резервування з постійно включеним резервом і з цілою кратністю (рис. 3.2, б):

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - [1 - p_i(t)]^{m_i+1} \right\}, \quad (3.4)$$

де  $p_i(t)$  - ймовірність безвідмовної роботи  $i$ -го елемента;  $m_i$  - кратність резервування  $i$ -го елемента;  $n$  - число елементів основної системи.

При експоненціальному законі надійності, коли  $p_i(t) = e^{-\lambda_i t}$ ,

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - [1 - e^{-\lambda_i t}]^{m_i+1} \right\}. \quad (3.5)$$

При рівнонадійних елементах і однаковій кратності їх резервування

$$P_c(t) = \left\{ 1 - [1 - e^{-\lambda t}]^{m+1} \right\}^n, \quad (3.6)$$

$$T_{cp\ c} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \frac{(n-1)!}{\lambda(m+1)} \sum_{i=0}^m \frac{1}{v_i(v_i+1)\dots(v_i+n-1)}, \quad (3.7)$$

де  $v_i = (i+1)/(m+1)$

3. Загальне резервування заміщенням із цілою кратністю (рис. 3.2, в):

$$P_{m+1}(t) = P_m(t) + \int_0^t P(t-\tau) a_m(\tau) d\tau, \quad (3.8)$$

де  $P_{m+1}(t)$ ,  $P_m(t)$  — ймовірності безвідмовної роботи резервованої системи кратності  $m+1$  і  $m$  відповідно;  $P(t-\tau)$  — ймовірність безвідмовної роботи основної системи протягом часу  $t-\tau$ ;  $a_m(\tau)$  — частота відмов резервованої системи в момент часу  $\tau$ .

Рекурентна формула (3.8) дозволяє одержати розрахункові співвідношення для пристроїв будь-якої кратності резервування. Для одержання таких формул необхідно виконати інтегрування в правій частині, підставивши замість  $P(t-\tau)$  і  $a_m(\tau)$  їхні значення відповідно до вибраного закону розподілу і стану резерву.

При експоненціальному законі надійності і ненавантаженому стані резерву

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}, \quad (3.9)$$

$$T_{cp\ c} = T_{cp\ 0}(m+1), \quad (3.10)$$

де  $\lambda_0$ ,  $T_{cp\ 0}$  — інтенсивність відмов і середнього наробітку до першої відмови основного (нерезервованого) пристрою.

При експоненціальному законі і недовантаженому стані резерву

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 t} \left[ 1 + \sum_{i=1}^m \frac{a_i}{t!} (1 - e^{-\lambda_1 t})^i \right], \quad (3.11)$$

$$T_{cp\ c} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^m \frac{1}{1+ik}, \quad (3.12)$$

де  $a_i = \prod_{j=0}^{i-1} \left( j + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right)$ ;  $k = \frac{\lambda_0}{\lambda_1}$ ;  $\lambda_1$  — інтенсивність відмов резервного пристрою до заміщення.

При навантаженому стані резерву формули для  $P_c(t)$  і  $T_{cp\ c}$  збігаються з (3.2).

4. *Роздільне резервування заміщенням із цілою кратністю* (рис. 3.2, з):

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t), \quad (3.13)$$

де  $p_i(t)$  — ймовірність безвідмовної роботи системи через відмови елементів  $i$ -го типу, резервованих по засобу заміщення. Обчислюється  $P_i(t)$  за формулами загального резервування заміщенням [формули (3.8), (3.9), (3.11)].

5. Загальне резервування з дробовою кратністю і постійно ввімкненим резервом (рис. 3.2, д):

$$P_c(t) = \sum_{i=0}^{l-h} C_l^i \cdot p^{l-i}(t) \cdot \sum_{j=0}^i (-1)^j \cdot C_i^j \cdot p_0^j(t), \quad (3.14)$$

$$T_{cp\ c} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^{l-h} \frac{1}{h+i}, \quad (3.15)$$

де  $p_0(t)$  - ймовірність безвідмовної роботи основного або будь-якого резервного елемента;  $l$  - загальне число основних і резервних систем;  $h$  - число систем, необхідних для нормальної роботи резервованої системи.

У даному випадку кратність резервування

$$m = (l - h) / h.$$

### 3.2 Порядок виконання лабораторної роботи

3.2.1 Дана система, схема розрахунку надійності якої показана на рис.3.3. Необхідно знайти ймовірність безвідмовної роботи системи при відомих ймовірностях безвідмовної роботи її елементів. Значення ймовірностей вказані у табл. 3.1.

Згідно рис. 3.3 система складається з двох (I та II) нерівнонадійних пристроїв.

Пристрій I складається з чотирьох вузлів:

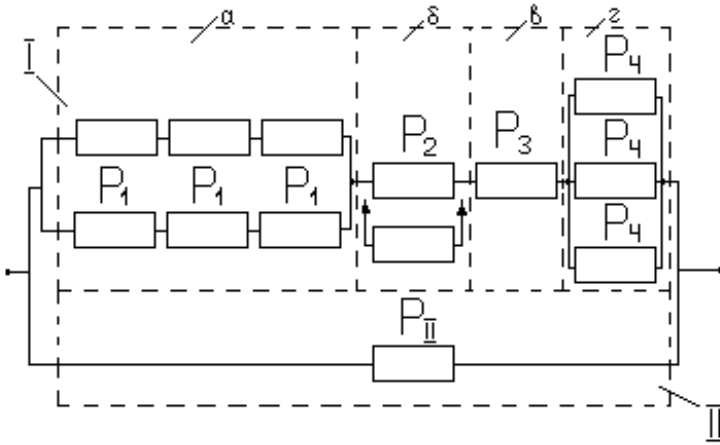
$a$  – дубльованого вузла з постійно ввімкненим резервом, причому кожна частина вузла складається з трьох послідовно з'єднаних (у понятті надійності) елементів розрахунку;

$b$  – дубльованого вузла за способом заміщення;

$v$  – вузла з одним нерезервованим елементом;

$z$  – резервованого вузла з кратністю  $m = 1/2$ .

Пристрій II представляє собою нерезервований пристрій, надійність якого відома.



**Рисунок 3.3** – схема розрахунку надійності.

Для того щоб розрахувати ймовірність безвідмовної роботи пристрою I, необхідно розрахувати ймовірності безвідмовної роботи кожного вузла пристрою у відповідності із засобом резервування.

**Таблиця 3.1** – Вихідні дані для розрахунку структурної схеми

№ варіанта	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_{II}$
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
1	0.9	0.9	0.97	0.9	0.9
2	0.92	0.85	0.96	0.9	0.9
3	0.91	0.87	0.95	0.85	0.9
4	0.85	0.9	0.94	0.88	0.9
5	0.88	0.8	0.93	0.88	0.85
6	0.9	0.82	0.97	0.91	0.85
7	0.93	0.85	0.93	0.85	0.85
8	0.86	0.89	0.91	0.92	0.85
9	0.85	0.83	0.94	0.89	0.925
10	0.87	0.85	0.9	0.79	0.925
11	0.83	0.92	0.95	0.82	0.925
12	0.85	0.88	0.97	0.9	0.925
13	0.86	0.83	0.91	0.85	0.875
14	0.84	0.84	0.93	0.92	0.875
15	0.89	0.8	0.9	0.93	0.875
16	0.82	0.87	0.95	0.92	0.875
17	0.91	0.81	0.96	0.88	0.825

Продовження табл.3.1

1	2	3	4	5	6
18	0.87	0.9	0.92	0.82	0.825
19	0.93	0.78	0.9	0.94	0.825
20	0.8	0.85	0.89	0.9	0.825
21	0.79	0.8	0.97	0.93	0.91
22	0.91	0.88	0.95	0.9	0.91
23	0.92	0.87	0.96	0.85	0.91
24	0.87	0.89	0.93	0.88	0.91
25	0.89	0.82	0.94	0.88	0.87
26	0.92	0.87	0.94	0.91	0.87
27	0.94	0.88	0.95	0.85	0.87
28	0.88	0.89	0.97	0.92	0.87
29	0.92	0.83	0.92	0.89	0.92
30	0.89	0.85	0.91	0.79	0.92
31	0.85	0.92	0.92	0.82	0.92
32	0.91	0.86	0.93	0.88	0.92
33	0.87	0.88	0.95	0.85	0.86
34	0.88	0.84	0.94	0.92	0.86
35	0.92	0.86	0.89	0.93	0.86
36	0.84	0.87	0.93	0.92	0.86
37	0.94	0.81	0.9	0.88	0.83
38	0.93	0.9	0.91	0.82	0.83
39	0.95	0.78	0.93	0.94	0.83
40	0.88	0.84	0.97	0.91	0.83
41	0.89	0.82	0.9	0.94	0.92
42	0.81	0.93	0.96	0.93	0.92
43	0.82	0.92	0.97	0.88	0.92
44	0.78	0.94	0.96	0.89	0.92
45	0.79	0.92	0.95	0.87	0.86
46	0.82	0.91	0.97	0.92	0.86
47	0.84	0.93	0.95	0.89	0.86
48	0.78	0.89	0.97	0.96	0.86
49	0.82	0.93	0.94	0.91	0.81
50	0.79	0.95	0.96	0.93	0.81

Надійність всієї системи розраховується згідно формули (3.3).

У вузлі *a* число елементів основної та резервної ланок  $n = 3$ , кратність резервування  $m = 1$ . Тоді за формулою (3.1) розрахуємо ймовірність безвідмовної роботи вузла *a*.

У вузлі *b* кратність загального резервування заміщенням  $m = 1$ , тоді згідно формули (3.9) маємо

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!} = e^{-\lambda_0 t} (1 + \lambda_0 t),$$

де  $\lambda_0 t = 1 - p_2$ , (при експоненціальному законі надійності та ненавантаженому стані резерву).

У вузлі *z* застосовано резервування із дробовою кратністю, коли загальне число основних та резервних систем  $l = 3$ ; число систем, необхідних для нормальної роботи  $h = 2$ . Тоді згідно формули (3.14)

$$P_c(t) = \sum_{i=0}^{l-h} C_l^i \cdot p^{l-i}(t) \cdot \sum_{j=0}^i (-1)^j \cdot C_i^j \cdot p_0^j(t) = 3 \cdot p_4^2 - 2 \cdot p_4^3.$$

Ймовірність безвідмовної роботи резервованої системи можна розрахувати за формулою (3.3), бо два пристрої I та II нерівнонадійні.

Зробити висновки по надійності вузлів *a*, *b* та *z* пристрою I, та можливі шляхи їх покращення.

3.2.2 Ймовірність безвідмовної роботи перетворювача постійного струму у змінний за час  $t$  має величину  $P(t)$ , які вказані у табл. 3.2. Для збільшення надійності системи електропостачання на об'єкті є такий же перетворювач, який вмикається у роботу при відмові першого. Необхідно розрахувати ймовірність безвідмовної роботи і середній наробіток до першої відмови системи, що складається із двох перетворювачів, а також побудувати залежності частоти та інтенсивності відмов системи від часу (задаючись масштабом часу, який удвічі буде перевищувати середній наробіток до першої відмови резервованої системи).

**Таблиця 3.2** – Вихідні дані часу та ймовірності безвідмовної роботи перетворювача

№ варіанта	t, год	P(t)	№ варіанта	t, год	P(t)	№ варіанта	t, год	P(t)
1	1000	0.95	18	800	0.75	35	3500	0.8
2	800	0.9	19	2000	0.7	36	4000	0.85
3	2000	0.95	20	3000	0.95	37	1500	0.83
4	3000	0.75	21	1000	0.7	38	2500	0.95
5	1000	0.9	22	800	0.7	39	3500	0.85
6	800	0.85	23	2000	0.75	40	4000	0.8
7	2000	0.9	24	3000	0.9	41	1500	0.75
8	3000	0.7	25	1500	0.95	42	2500	0.75
9	1000	0.85	26	2500	0.9	43	3500	0.73
10	800	0.8	27	3500	0.95	44	4000	0.95
11	2000	0.8	28	4000	0.75	45	1500	0.76
12	3000	0.85	29	1500	0.91	46	2500	0.78
13	1000	0.8	30	2500	0.85	47	3500	0.75
14	800	0.95	31	3500	0.9	48	4000	0.92
15	2000	0.85	32	4000	0.72	49	2500	0.82
16	3000	0.8	33	1500	0.85	50	3500	0.87
17	1000	0.75	34	2500	0.8			

Згідно умови задачі видно, що має місце резервування заміщенням кратністю  $m = 1$ . Тоді за формулою (3.9) необхідно порахувати ймовірність безвідмовної роботи системи, яка складається з двох перетворювачів, урахувавши, що

$$e^{-\lambda_0 t} = P(t),$$

де  $\lambda_0 \cdot t = 1 - P(t)$ .

Середній наробіток до першої відмови резервованої системи розраховується за формулою (3.10), де  $T_{CPO}$  – середній наробіток до першої відмови нерезервованого перетворювача і визначається як

$$T_{CPO} = \frac{1}{\lambda_0}, \text{ год}$$

Для побудови графіків  $a_c(t)$  та  $\lambda_c(t)$ , при розрахованій ймовірності безвідмовної роботи  $P(t)$ , необхідно знайти для них аналітичні вирази

$$a_c(t) = -P_c'(t); \quad \lambda_c(t) = \frac{a_c(t)}{P_c(t)}.$$

Задаючись значеннями часу  $(t)$  в межах від 0 до  $2 \cdot T_{\text{СР о}}$ , побудувати графіки залежності  $a_c, \lambda_c = f(t)$ .

### 3.3 Контрольні запитання

1. Що таке резервоване з'єднання виробів?
2. Вказати основні засоби резервування.
3. Що являється основним параметром резервування? Резервування з дробовою кратністю (привести приклади).
4. Постійне резервування та резервування заміщенням.
5. Основні критерії надійності, які необхідно визначити при різних засобах резервування.

#### Зміст звіту:

- Схема розрахунку надійності, її розрахунок;
- Розрахунок надійності системи з двох перетворювачів, графіки залежності  $a_c, \lambda_c = f(t)$ ;
- Висновки.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

### РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ВИТКОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ВСИПНИХ ОБМОТОК АСИНХРОНИХ ДВИГУНІВ

**Мета роботи:** розрахувати надійність виткової ізоляції всипної обмотки в залежності від числа вмикань двигуна.

#### 4.1 Порядок розрахунку надійності виткової ізоляції всипних обмоток

Середнє значення пробивної напруги ушкодженої ізоляції одиничного проводу та пари провідників при збіганні дефектів  $U_1$ ,  $U_2$ , кВ:

для емальпроводів

$$U_1 = 0.165 \cdot d_{iz} + 0.445; \quad U_2 = 1.8 \cdot U_1;$$

для проводів з волокнистою ізоляцією

$$U_1 = 0.148 \cdot d_{iz} + 0.339; \quad U_2 = 2 \cdot U_1.$$

Середньоквадратичне відхилення пробивних напруг дефектної ізоляції одиничного проводу та пари провідників (при збіганні дефектів):

для емальпроводів

$$\sigma_1 = 0.179 \cdot d_{iz} + 0.143; \quad \sigma_2 = 1.41 \cdot \sigma_1;$$

для проводів з волокнистою ізоляцією

$$\sigma_1 = 0.088 \cdot d_{iz} + 0.069; \quad \sigma_2 = 1.41 \cdot \sigma_1.$$

Дефектність ізоляції одиничного зразка проводу довжиною  $l_{зраз}$  після укладення обмотки  $q_1$ :

$$q_1 = \frac{n_{u1+3\sigma_1}}{\sum_n n_i},$$

де  $n_{u1+3\sigma_1}$  - число зразків проводу, пробитих напругою  $U_1 + 3 \cdot \sigma_1$ ,

$\sum_n n_i$  - сумарне число зразків, що підлягає випробуванню.

Площа ізоляції проводу, що випробується на дефектність  $S_{випр}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_{випр} = 2 \cdot r_{випр} \cdot l_{зраз}.$$

Якщо  $\pi \cdot d_{iz} \leq 2 \cdot r_{випр}$ , розраховують за наступною формулою:

$$S_{випр} = \pi \cdot d_{iz} \cdot l_{зраз}.$$

Радіус елементарної частки в межах якої пробивна напруга двошарової дефектної не виходить за межі  $U_2 + 3 \cdot \sigma_2$ , мм:

$$\delta = \frac{U_2 + 3 \cdot \sigma_2}{2 \cdot E_B}.$$

Число елементарних ділянок, які містяться на ділянці ізоляції, площею  $S_{випр}$ :

$$n_{випр} = \frac{S_{випр}}{\pi \cdot \delta^2}.$$

Середнє число ушкоджень ( $\alpha$ ) на випробувальній площині ізоляції зразка проводу довжиною  $l_{зраз}$ :

$$e^{-\alpha} = 1 - q_1.$$

Вірогідність ушкоджень елементарної ділянки ізоляції проводу:

$$P = \frac{\alpha}{n_{випр}}.$$

Теоретично максимально можливий діаметр дротів, які можна укласти в паз, при збереженні числа провідників, що дорівнює розрахунковому  $d_{iz \max}$ , мм:

$$d_{iz \max} = 1.075 \cdot d_{iz} \cdot \sqrt{\frac{1}{k_3}}.$$

Середня відстань між неізолюваними провідниками в пазу, мм:

$$X_{np} = d_{iz \max} - d_r.$$

Число дротів, що знаходяться у зовнішньому шарі секції (по периметру секції):

$$S_{зовн} = \frac{\Pi}{d_{iz \max}}.$$

Число дротів, що знаходяться у внутрішніх шарах секції:

$$S_{вн} = S - S_{зовн}.$$

Число елементарних ділянок пар провідників в обмотці двигуна  $N$ :

$$N = [n_{випр} \cdot K \cdot (S_{зовн} + 1.5 \cdot S_{вн} - 1.5) \cdot l_W \cdot Z] / l_{зраз}.$$

Середній діаметр ізолюваного проводу після просочення  $d_n$ , мм:

$$d_n = \frac{\sum d_{ni} \cdot n_i}{\sum n_i},$$

де  $d_{ni}$  – визначається за даними таблиці 4.1.

**Таблиця 4.1** – Результати вимірів діаметра ізолюваного проводу (стовпчики 2,3,4) та випробувань на пробій (стовпчики 5,6,7,8)

№	Можливі діаметри проводів $d_n$ , мм	Діаметри проводів для випробувань $d_{ni}$ , мм	Кількість випробувань $n_i$	Діапазон випробувальних напруг $U_{0n}$ , кВ	Випробувальна напруга $U_{0ni}$ , кВ	Максимальна напруга $U_{nimax}$ , кВ	Кількість випробувань $n_i$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.2-1.21	1.2	0	0-0.4	0	0	10
2	1.21-1.22	1.21	2	0.4-0.8	0.4	0.565	14
3	1.22-1.23	1.22	4	0.8-1.2	0.8	1.131	15
4	1.23-1.24	1.23	15	1.2-1.6	1.2	1.697	25
5	1.24-1.25	1.24	6	1.6-2	1.6	2.262	12
6	1.25-1.26	1.25	3	2-2.4	2	2.828	11
7	1.26-1.27	1.26	11	2.4-2.8	2.4	3.394	7
8	1.27-1.28	1.27	3	2.8-3.2	2.8	3.959	4
9	1.28-1.29	1.28	7	3.2-3.6	3.2	4.525	2
10	1.29-1.3	1.29	5	-	-	-	-
11	1.3-1.31	1.30	13	-	-	-	-
12	1.31-1.32	1.31	8	-	-	-	-
13	1.32-1.33	1.32	7	-	-	-	-
14	1.33-1.34	1.33	2	-	-	-	-
15	1.34-1.35	1.34	6	-	-	-	-
16	1.35-1.36	1.35	8	-	-	-	-

Середня пробивна напруга просочуючого складу в місці ушкодження ізоляції проводу  $U_n$ , кВ:

$$U_n = \frac{\sum U_{nimax} \cdot n_i}{\sum n_i},$$

де  $U_n$  – визначається за даними таблиці 4.1.

Середня електрична тривкість просочуючого составу в місці пошкодження ізоляції проводу  $E_n$ , кВ/мм:

$$E_n = 2 \cdot U_n / (d_n - d_r).$$

Середня частка об'єму просочуючого составу між провідниками в місці пошкодження ізоляції:

$$V_n = (d_{iz} - d_r) / X_{np}$$

Середня електрична міцність проміжку між двома ушкодженими провідниками після просочення  $E_{np}$ , кВ/мм:

$$E_{np} = E_n \cdot V_n.$$

Параметр показникового закону розподілу пробивної напруги між двома ушкодженими провідниками  $\lambda$ , 1/кВ:

$$\lambda = 1 / (E_{np} \cdot X_{np}).$$

Число вмикань двигуна за розрахунковий період часу  $v$ :

$$v = f_{\text{вмик}} \cdot t_{\text{розр}}.$$

Амплітудне значення фазної напруги з урахуванням комутаційних перенапруг за  $v$  вмикань двигуна  $U_{\phi, \text{нпв}}$ , кВ:

$$U_{\phi, \text{нпв}} = (ln v + 0.7) / 2.25.$$

Амплітудне значення напруги, яка приходиться на одну секцію фази, з урахуванням комутаційних перенапруг за  $v$  вмикань двигуна  $U_{cv}$ , кВ:

$$U_{cv} = U_{\phi, \text{нпв}} / n_c.$$

Ймовірність пробою елементарної ділянки ізоляції двох провідників, які мали пошкодження до просочення за час  $t_{\text{розр}} - q(U_{cv})$ :

$$q(U_{cv}) = p^2 \cdot \lambda \cdot \int_0^{U_{cv}} F \left( \frac{U - U_2}{\sigma_2} \right) e^{-\lambda U} \cdot \left( 1 - \frac{U}{U_{cv}} \right) dU.$$

Значення  $F \left( \frac{U - U_2}{\sigma_2} \right)$  визначаються за таблицею додатка Б.

Варіанти індивідуальних завдань наведені у додатку А. Розрахунок надійності виткової ізоляції всипних обмоток необхідно проводити для емальпроводів. Результати розрахунків заносять у табл. 4.2.

Інтеграл  $\int_0^{U_{cv}} F\left(\frac{U-U_2}{\sigma_2}\right) e^{-\lambda U} \cdot \left(1 - \frac{U}{U_{cv}}\right) dU$  - визначається

чисельним методом за формулою Сімпсона;  $U$  – поточне значення напруги.

**Таблиця 4.2** – Результати розрахунків

№	$\Delta U_{cv}$	$F(U-U_2/\sigma_2)$	$e^{-\lambda U}$	$1-U/U_{cv}$	$f_i$
0	0				
1	$0.1 \cdot U_{cv}$				
2	$0.2 \cdot U_{cv}$				
⋮	⋮				
10	$U_{cv}$				

Формула Сімпсона:

$$\int_0^{U_{cv}} F\left(\frac{U-U_2}{\sigma_2}\right) e^{-\lambda U} \cdot \left(1 - \frac{U}{U_{cv}}\right) dU = \frac{\Delta U_{cv}}{3} \cdot \left[ 4 \cdot (f_1 + f_3 + \dots + f_9) + 2 \cdot (f_2 + f_4 + \dots + f_{10}) + f_0 \right]$$

Оцінка надійності виткової ізоляції всипної обмотки в залежності від числа вмикань двигуна:

$$R_{bv} = [1 - q(U_{cv})]^N.$$

### 4.3 Контрольні запитання

- 1 Типи обмоток асинхронних двигунів.
- 2 Математична модель надійності обертових електричних машин.
- 3 Обчислення інтегралів чисельним методом (формула Сімпсона).
- 4 Основні критерії надійності виткової ізоляції, які необхідно визначити для оцінки електричної міцності ізоляції обертових машин.

#### Зміст звіту:

- Розрахунок надійності виткової ізоляції всипної обмотки;
- Таблиця 4.2;
- Висновки.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

### КОНТРОЛЬ НАДІЙНОСТІ

**Мета роботи:** ознайомитися з методами контролю надійності партій виробів; розрахувати надійність партії виробів одним з методів статистичного контролю надійності.

#### 5.1 Загальні відомості

##### 5.1.1 Контроль надійності

Контроль надійності має своєю метою перевірити гіпотезу про те, що надійність не нижче встановленого рівня. При цьому кінцевим результатом, як правило, є одне із двох рішень: прийняти партію, ураховуючи надійність виробів задовільною, або забракувати контрольовану партію виробів як ненадійну.

Тому що контроль надійності виробляється на основі випробувань вибірки, то при прийнятті рішень можливі два види помилок:

- а) *помилка першого роду* — коли добра партія бракується;
- б) *помилка другого роду* — коли погана партія приймається.

Імовірність помилки першого роду називається *ризиком постачальника* й позначається буквою  $\alpha$ . Імовірність помилки другого роду називається *ризиком замовника* й позначається буквою  $\beta$ .

Існують три основних статистичних методи контролю надійності:

- метод однократної вибірки (одиничний контроль),
- метод дворазової вибірки (подвійний контроль),
- послідовний метод.

Кожний із цих методів має свої переваги та недоліки, і може бути оптимальним у тому або іншому конкретному випадку.

*Контроль за методом однократної вибірки* легше планується та здійснюється. Однак це найменш економічний метод, тому що він вимагає щодо великого обсягу контролю, особливо для партій з високою або низькою надійністю.

*Контроль за методом дворазової вибірки* більше економічний, ніж одиничний. Його головна перевага проявляється лише при

контролі більших партій з дуже низкою або дуже високою надійністю. При проміжному рівні надійності немає виграшу у необхідному обсязі вибірки. Розрахунки, пов'язані зі здійсненням подвійного контролю, більш складні, ніж при одиничному контролі. Крім того, збільшується час, необхідний для контролю. Тому метод дворазової вибірки застосовується для цілей контролю надійності вкрай рідко.

Самим економічним методом контролю надійності є *послідовний метод*. Середній обсяг вибірки звичайно становить 50-65% обсягу при одиничному контролі для партій з високою надійністю. Технічне здійснення послідовного контролю не пов'язане з якими-небудь труднощами. Єдиний недолік цього методу полягає у більшому часі контролю, ніж при попередніх методах. Однак цей недолік можна звести до мінімуму раціональною організацією випробувань.

У зв'язку з тим, що у практиці контролю надійності користуються головним чином одиничним та послідовним методами, розглянемо лише ці два методи.

Сукупність умов випробувань контрольованих виробів та правил прийняття рішень називається *планом контролю*. Під сукупністю умов випробувань розуміються умови бракування й приймання, задані значень  $\alpha$  та  $\beta$ , установлений обсяг випробувань та ін. Правила прийняття рішень визначаються методами контролю, тому що число сполучень різних умов випробувань і правил прийняття рішень може бути значним, та й кількість різних планів досить велике.

По цільовому призначенню плани статистичного контролю надійності можна розділити на дві групи:

- плани контролю ймовірності відмови (ймовірності безвідмовної роботи) або числа дефектних виробів у партії;
- плани контролю рівня параметрів законів розподілу відмов.

### 5.1.2 Контроль надійності за методом однократної вибірки

Метод однократної вибірки полягає в тому, що з контрольованої партії обсягу  $N$  виробів береться одна випадкова вибірка, обсягу  $n$  екземплярів. Виходячи з  $N$ ,  $n$  та  $\alpha$  і  $\beta$  установлюються оцінні нормативи  $A_0$  та  $A_1$ ; якщо вибіркоче значення контрольованого параметра менше або дорівнює  $A_0$ , то партія визнається надійною; якщо більше або дорівнює  $A_1$ , то партія бракується.

Якщо контролюється число дефектних виробів (ймовірність відмови) у партії обсягу  $N$  виробів і при наявності в ній  $D_0$  дефектних виробів ( $q_0 = D_0/N$ ), надійність партії вважається високою, а при наявності  $D_1$  дефектних виробів ( $q_1 = D_1/N$ ) — низкою, то при заданих  $\alpha$  та  $\beta$  оцінні нормативи  $A_0$  й  $A_1$  установлюються із співвідношень:

$$\alpha' = 1 - \sum_{d=0}^{A_0} \frac{C_{D_0}^d C_{N-D_0}^{n-d}}{C_N^n}, \quad (5.1)$$

$$\beta' = \sum_{d=0}^{A_1-1} \frac{C_{D_1}^d C_{N-D_1}^{n-d}}{C_N^n}, \quad (5.2)$$

де  $d$  — число дефектних виробів у вибірці;  $\alpha'$  — ризик постачальника, близький до заданого  $\alpha$ ;  $\beta'$  — ризик замовника, близький до заданого  $\beta$ .

У загальному випадку  $\alpha' \neq \alpha$  та  $\beta' \neq \beta$  через дискретність гіпергеометричного розподілу, використовуваного у формулах (5.1) та (5.2).

Практичне використання формул (5.1) і (5.2) при  $n > 100$  досить важко. При  $q_0 < 0.1$  та  $q_1 < 0.1$  найбільше наближення до (5.1) і (5.2) дають формули:

$$\alpha' = 1 - \sum_{d=0}^{A_0} C_{D_0}^d f^d (1-f)^{D_0-d}, \quad (5.3)$$

$$\beta' = \sum_{d=0}^{A_1-1} C_{D_1}^d f^d (1-f)^{D_1-d}, \quad (5.4)$$

де  $f = n/N$ .

Співвідношення (5.3) і (5.4) доцільно використати для партій обсягом  $N \leq 500$ .

Коли обсяг партії  $N > 500$ , а також при випробуваннях відновлюваних виробів або коли  $n \leq 0.1N$  можна користуватися біноміальним законом розподілу, відповідно до якого:

$$\alpha' = 1 - \sum_{d=0}^{A_0} C_n^d q_0^d (1-q_0)^{n-d}, \quad (5.5)$$

$$\beta' = \sum_{d=0}^{A_1-1} C_n^d q_1^d (1-q_1)^{n-d}, \quad (5.6)$$

Якщо дотримуються умови  $n \leq 0.1N$ ;  $q_0 < 0.1$ ,  $q_1 < 0.1$  то, користуючись розподілом Пуассона, одержимо:

$$\alpha' = \sum_{d=A_0+1}^{\infty} \frac{a_0^d}{d!} e^{-a_0}, \quad (5.7)$$

$$\beta' = 1 - \sum_{d=A_1}^{\infty} \frac{a_1^d}{d!} e^{-a_1}, \quad (5.8)$$

де  $a_0 = q_0 n$ ;  $a_1 = q_1 n$

Помилка, що виникає при заміні біноміального закону розподілу розподілом Пуассона, маємо порядок  $q^2 n$ . Формули (5.7) і (5.8) доцільно використати для контролю надійності багатосерійних ( $n \geq 50$ ) високонадійних пристроїв. При контролі більших партій ( $50 \leq n \leq 0.1N$ ) з порівняно невисокою надійністю ( $n_0(q_0) \geq 4$ ) можна користуватися наближеними формулами:

$$\alpha' = 0.5 - \Phi_0 \left[ \frac{A_0 - nq_0 + 0.5}{\sqrt{nq_0(1-q_0)}} \right], \quad (5.9)$$

$$\beta' = 0.5 - \Phi_0 \left[ \frac{nq_1 + 0.5 - A_1}{\sqrt{nq_1(1-q_1)}} \right], \quad (5.10)$$

Контроль надійності по наробітку зводиться до порівняння середнього наробітку до відмови зі значеннями довірчих границь, певних з ймовірностями  $\alpha_1 = 1 - \alpha$  та  $\alpha_2 = 1 - \alpha$ .

### 5.1.3 Послідовний метод контролю надійності

Послідовний метод контролю не передбачає попереднього визначення обсягу вибірки. Інформація про надійність випробовуваних пристроїв накопичується при послідовно зростаючому обсязі випробувань ( $m$ ). На кожному етапі випробувань відношення правдоподібності  $l_m$  рівняється із заздалегідь певними оцінними нормативами

$$A = (1 - \beta) / \alpha \quad (5.11)$$

$$B = \beta / (1 - \alpha) \quad (5.12)$$

При цьому можуть бути прийняті три рішення:

якщо  $l_m \leq B$  — партія приймається;

якщо  $l_m \geq A$  — партія бракується;

якщо  $B < l_m < A$  — випробування тривають.

При послідовному методі контролю можливі два способи контролю - контроль числа дефектних виробів і контроль по наробітку.

#### 5.1.4 Контроль числа дефектних виробів

У тому випадку, коли необхідно зробити контроль числа дефектних виробів у малосерійної партії, що складає з  $N$  екземплярів,  $l_m$  можна підрахувати по формулі

$$l_m = \frac{C_{D_1}^{d_m} C_{N-D_1}^{m-d_m}}{C_{D_0}^{d_m} C_{N-D_0}^{m-d_m}}, \quad (5.13)$$

де  $d_m$  — число дефектних виробів у вибірці обсягом у  $m$  екземплярів;  $D_0$  — число дефектних виробів у партії доброї надійності,  $D_1$  — число дефектних виробів у партії поганої надійності.

Формула (5.13) практично може бути використана тільки для дуже малих партій ( $N \leq 150$ ). Але й при цих умовах розрахунки  $l_m$  громіздкі, що ускладнює контроль.

Більше зручної й досить точної є формула

$$l_m = \frac{c}{c_m} \left(1 - \frac{m}{N}\right)^r, \quad (5.14)$$

де  $c = C_{D_1}^{D_0}$ ;  $c = C_{D_1-d_m}^{D_0-d_m}$ ;  $r = D_1 - D_0$ .

Для полегшення процедури контролю можна заздалегідь підрахувати для певних значень  $d_m=0, 1, 2, 3, \dots$  приймальні ( $m_{np}$ ) і бракувальні ( $m_{bp}$ ) обсяги випробувань:

$$m_{np} \geq N \left[1 - (c_m B/c)^{1/r}\right], \quad (5.15)$$

$$m_{bp} \geq N \left[1 - (c_m A/c)^{1/r}\right], \quad (5.16)$$

Розрахований у такий спосіб план контролю може бути представлений у табличній або графічній формі. На рис. 5.1 показаний графік контролю, де область  $\Pi$ , що лежить нижче лінії 1, — область приймання, область  $B$ , що лежить вище лінії 2, — область бракування, область  $\Pi\text{I}$ , укладена між лініями 1, 2 й осями координат, — область продовження випробувань.

Графіки контролю можна будувати по трьох характеристичних точках:

$$\begin{aligned}
 \text{а) } d_m = 0, & \quad m_0 = N(1 - B^{1/r}); \\
 \text{б) } d_m = D_0, & \quad m = N(1 - (A/c)^{1/r}); \\
 \text{в) } d_m = (D_0 + D_1)/2, & \quad m = N.
 \end{aligned} \tag{5.17}$$

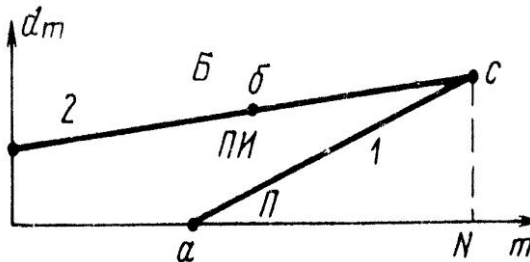


Рисунок 5.1 - Графік контролю

Для контролю надійності більших партій виробів ( $N \geq 1000$ ), а також відновлюваних виробів доцільно користуватися біноміальними планами, одержуваними зі співвідношення

$$l_m = \left( \frac{q_1}{q_0} \right)^{d_m} \left( \frac{1 - q_1}{1 - q_0} \right)^{m - d_m}, \tag{5.18}$$

де  $q_0$  — імовірність відмови в кожному одиночному випробуванні для партії з гарною надійністю;  $q_1$  — те ж для партії з поганою надійністю.

З (5.18) впливають формули для приймальних ( $d_{np}$ ) та бракувальних ( $d_{б,р}$ ) чисел дефектних виробів із числа  $m$  випробувань:

$$d_{np} \leq h_1 + ms, \quad d_{б,р} \leq h_2 + ms, \tag{5.19}$$

де

$$\begin{aligned}
 h_1 &= (\lg B) / \left( \lg \frac{q_1}{q_0} + \lg \frac{1 - q_0}{1 - q_1} \right), \\
 h_2 &= (\lg A) / \left( \lg \frac{q_1}{q_0} + \lg \frac{1 - q_0}{1 - q_1} \right),
 \end{aligned} \tag{5.20}$$

$$s = \left( \lg \frac{1-q_0}{1-q_1} \right) / \left( \lg \frac{q_1}{q_0} + \lg \frac{1-q_0}{1-q_1} \right).$$

Приймальні й бракувальні числа для ряду значень  $m$  можуть бути підраховані заздалегідь і представлені у вигляді таблиць плану. Для практичних цілей зручніше представляти план контролю у вигляді графіка (рис. 5.2). З (5.19) треба, що приймальні ( $d_{\text{пр}}$ ) і бракувальні ( $d_{\text{бр}}$ ) числа лінійно залежать від обсягу випробувань, причому  $h_1$  й  $h_2$  визначають відрізки на осі ординат, а  $s$  — тангенс кута нахилу прямих до осі абсцис. Якщо величина ризику постачальника  $\alpha$  і ризику замовника  $\beta$  рівні, то  $h_1=h_2$ . При побудові графіка плану корисно визначити мінімальне число випробувань, при якому можна прийняти партію, коли число відмов  $d=0$ . З (5.19) одержуємо

$$m_0 = -h_1 / s. \quad (5.21)$$

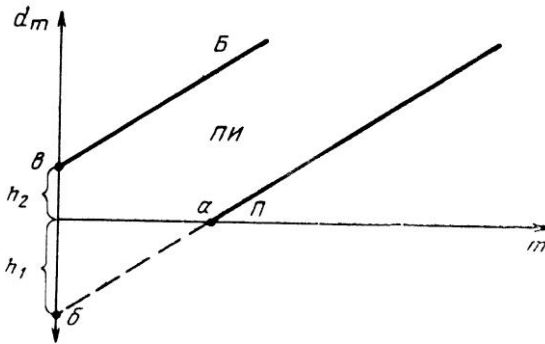


Рисунок 5.1 - План контролю

Обчисливши  $m_0$ , можна побудувати графік плану по трьох характеристичних крапках:

$$\begin{aligned} \text{а)} \quad & d_m = 0, & m_0 &= -h_1/s; \\ \text{б)} \quad & d_m = h_1, & m &= 0; \\ \text{в)} \quad & d_m = h_2, & m &= 0. \end{aligned} \quad (5.22)$$

Якщо контролюється надійність великої партії виробів ( $N \geq 1000$ ) або виробів, відновлюваних у процесі контролю, за умови  $q_1 \leq 0.1$ , т.б. виходячи з розподілу Пуассона, маємо

$$l_m = \left( \frac{q_1}{q_0} \right)^{d_m} e^{-\left( \frac{q_1 - q_0}{m} \right)}. \quad (5.23)$$

Тоді вихідні величини для побудови графіка контролю визначаються співвідношеннями

$$h_1 = \frac{\lg B}{\lg \frac{q_1}{q_0}}; \quad h_2 = \frac{\lg A}{\lg \frac{q_1}{q_0}};$$

$$s = \frac{0.4343(q_1 - q_0)}{\lg \frac{q_1}{q_0}}. \quad (5.24)$$

Усі інші положення послідовного контролю залишаються такими ж, як й у біноміальному плані.

### 5.1.5 Контроль по наробітку

Послідовний контроль надійності по наробітку у випадку експонентного розподілу часу безвідмовної роботи виробів здійснюється відповідно до правил:

- партія приймається, якщо

$$t_{\Sigma} \geq h_1 + d_m s; \quad (5.25)$$

- партія бракується, якщо

$$t_{\Sigma} \geq h_2 + d_m s; \quad (5.26)$$

- випробування тривають, якщо

$$h_1 + d_m s < t_{\Sigma} < h_2 + d_m s, \quad (5.27)$$

де  $t_{\Sigma}$  — сумарний наробіток всіх випробовуваних виробів;

$$h_1 = -2.303(\lg B) / (\lambda_1 - \lambda_0);$$

$$h_2 = -2.303(\lg A) / (\lambda_1 - \lambda_0); \quad (5.28)$$

$$s = -2.303 \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \right) / (\lambda_1 - \lambda_0).$$

де  $\lambda_0$  — інтенсивність відмов надійної партії;

$\lambda_1$  — інтенсивність відмов ненадійної партії.

Слід зазначити, що три неуцічених послідовних випробування невідновлюваних пристроїв на кожному етапі випробувань

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{d_m} t_i, \quad (5.29)$$

де  $t_i$  — наробіток до відмови  $i$ -го екземпляра.

При одночасному випробуванні  $N$  невідновлюваних екземплярів на кожному етапі випробувань, відзначених часом  $t^*$ ,

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{d_m} t_i + (N - d_m)t^*. \quad (5.30)$$

Якщо на випробуванні перебуває  $N$  відновлюваних пристроїв, заміна яких здійснюється практично миттєво, то на кожному етапі

$$t_{\Sigma} = Nt^*. \quad (5.31)$$

Очевидно, що при випробуваннях в (5.30) і (5.31) можна взяти постійним  $t^*$ , а  $N$  послідовно збільшувати, що зручно в прийнятному послідовному контролі.

Графік послідовного контролю наробітку зображений на рис.

5.3. Характеристичними точками графіка є

$$\begin{aligned} \text{а)} \quad & d_m = -h_2/s, \quad t_{\Sigma} = 0; \\ \text{б)} \quad & d_m = 0, \quad t_{\Sigma} = h_2; \\ \text{в)} \quad & d_m = 0, \quad t_{\Sigma} = h_1. \end{aligned} \quad (5.32)$$

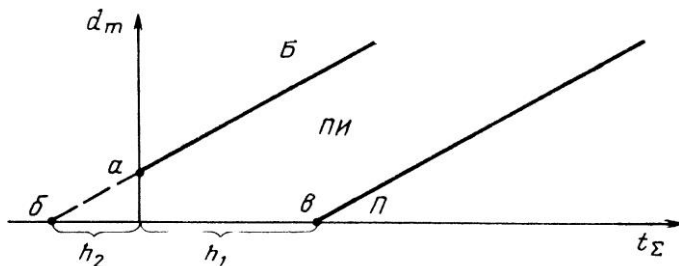


Рисунок 5.3 - Графік послідовного контролю

Контроль наробітку пристроїв з нормальним розподілом часу безвідмовної роботи при відомому середньому квадратичному відхиленні здійснюється за допомогою наступних умов:

- партія приймається, якщо

$$t_{\Sigma} \geq h_1 + sm; \quad (5.33)$$

- партія бракується, якщо

$$t_{\Sigma} \geq h_2 + sm; \quad (5.34)$$

- випробування тривають, якщо

$$h_1 + sm < t_{\Sigma} < h_2 + sm, \quad (5.35)$$

де

$$\begin{aligned} h_1 &= -2.303 \frac{\sigma^2 \lg B}{T_0 - T}; \\ h_2 &= -2.303 \frac{\sigma^2 \lg A}{T_0 - T}; \\ s &= (T_0 + T_1) / 2. \end{aligned} \quad (5.36)$$

де  $T_0$  — середній наробіток до відмови в партії з гарною надійністю;

$T_1$  — середній наробіток до відмови партії з поганою надійністю.

Характеристичні крапки графіка плану:

$$\begin{aligned} \text{а)} \quad m &= -h_2/s, & t_{\Sigma} &= 0; \\ \text{б)} \quad m &= 0, & t_{\Sigma} &= h_2; \\ \text{в)} \quad m &= 0, & t_{\Sigma} &= h_1. \end{aligned} \quad (5.37)$$

Графік контролю відповідає рис. 5.4.

Слід зазначити, що іноді точна побудова графіка плану тільки по характеристичних крапках важка. У такому випадку варто скористатися додатково однієї або двома точками, що лежать на продовженні лінії, або збільшити масштаб графіка.

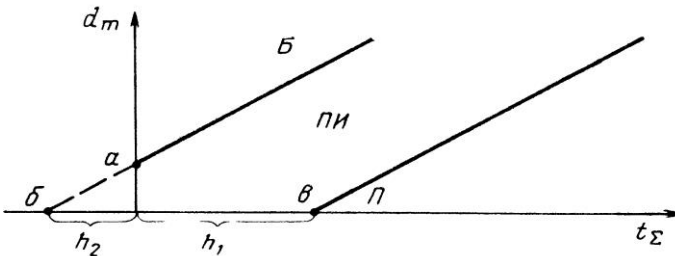


Рисунок 5.1 - Графік контролю

## 5.2 Порядок розрахунку надійності партії виробів

Партія виробів, надійність якої необхідно проконтролювати, складається з  $N$  екземплярів. Партія рахується доброю, якщо вона має не більше  $X_1$  % дефектних виробів, та поганою – при змісті  $X_2$  %

дефектних виробів. Ризик постачальника  $\alpha$  та ризик замовника  $\beta$ . Визначити приймальне ( $A_0$ ) і бракувальне ( $A_1$ ) числа дефектних виробів у вибірці обсягом  $n$  екземплярів.

У залежності від  $N$  та відносного обсягу виборки  $n/N$ , контроль можна здійснювати виходячи з відомих законів розподілу.

Розрахувати число дефектних виробів при  $X_1$  % дефектних виробів ( $D_0$ ) та при  $X_2$  % дефектних виробів ( $D_1$ ).

Для визначення приймального числа дефектних виробів можна скористатися формулою (5.70). Підсумовування ймовірностей якогось закону розподілу робити доти, поки накопичена ймовірність не наблизиться до 1 -  $\alpha$ , тобто.

$$R(d \leq A_0) = 1 - \alpha,$$

де  $d = 0, 1, 2, \dots, i$ .

Після підсумовування необхідно прийняти приймальне число  $A_0$ , таким чином, щоб фактичний ризик постачальника був близький до раніше прийнятого  $\alpha' \approx \alpha$ .

Аналогічно можна розрахувати бракувальне ( $A_1$ ) число дефектних виробів за формулою (5.71), поки не буде виконуватися умова

$$\beta' = R(d < A_1) = \beta.$$

Після розрахунку  $A_0$  та  $A_1$ , необхідно зробити висновок про одиничний контроль виробів.

**Таблиця 5.1** – Вихідні дані

№ вар.	N	n	$X_1, \%$	$X_2, \%$	$\alpha$	$\beta$
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
1	50	20	10	20	0.1	0.1
2	200	40	5	10	0.2	0.1
3	40	10	10	15	0.12	0.12
4	200	50	15	20	0.2	0.2
5	300	30	10	15	0.1	0.1
6	100	10	5	15	0.08	0.1
7	150	30	10	20	0.15	0.2
8	240	40	15	20	0.1	0.1
9	270	30	10	15	0.12	0.15
10	400	50	5	10	0.1	0.15
11	400	40	15	20	0.2	0.2
12	500	50	10	20	0.08	0.15

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4	5	6	7
13	500	100	5	10	0.15	0.15
14	600	30	10	25	0.2	0.2
15	600	60	15	20	0.15	0.2
16	1000	100	10	20	0.2	0.2
17	1000	50	5	20	0.1	0.2
18	800	50	10	25	0.09	0.15
19	1000	100	10	25	0.1	0.15
20	900	30	5	10	0.1	0.15
21	640	80	5	20	0.1	0.1
22	720	120	10	25	0.2	0.2
23	870	30	15	25	0.09	0.1
24	600	50	10	20	0.1	0.2
25	800	40	5	10	0.15	0.2
26	1000	50	10	15	0.08	0.15
27	50	30	15	25	0.1	0.1
28	200	60	10	30	0.2	0.1
29	40	15	15	25	0.12	0.12
30	200	80	10	20	0.1	0.15
31	300	60	5	10	0.15	0.2
32	100	25	10	25	0.1	0.12
33	150	40	5	10	0.1	0.2
34	240	50	10	20	0.1	0.15
35	270	60	5	10	0.2	0.2
36	400	90	15	20	0.15	0.15
37	400	70	5	20	0.2	0.2
38	500	40	10	15	0.1	0.2
39	500	120	15	25	0.15	0.2
40	600	50	5	15	0.1	0.2
41	600	80	15	20	0.15	0.15
42	1000	200	20	25	0.1	0.2
43	1000	70	10	15	0.12	0.2
44	800	100	5	10	0.15	0.2
45	1000	150	15	20	0.2	0.2
46	900	90	10	20	0.1	0.15
47	1000	200	10	15	0.12	0.2
48	800	80	15	25	0.1	0.2
49	1000	250	5	20	0.12	0.2
50	900	30	15	20	0.2	0.2

### 5.3 Контрольні запитання

1. Що таке контроль надійності?
2. Види похибок.
3. Статистичні методи контролю надійності, їх переваги та недоліки.
4. Плани контролю.

#### **Зміст звіту:**

- Розрахунок надійності партії виробів, побудова плану контролю;
- Висновки.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

### РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ

**Мета роботи:** ознайомитися з методикою розрахунку надійності синхронних генераторів; розрахувати надійність ізоляції обмотки ротора синхронного генератора.

#### 6.1 Порядок розрахунку надійності ізоляції обмотки ротора синхронного генератора

Для розрахунку надійності синхронних генераторів доцільно поділити на його наступні вузли:

- обмотка статора;
- обмотка ротора;
- контактено-щітковий вузол;
- підшипниковий вузол;
- блок регулювання напруги.

Розрахунок ведеться наступним чином. Розглядається вірогідність безвідмовної роботи кожного вузла, а потім відповідно до теореми множення вірогідностей визначається вірогідність безвідмовної роботи синхронного генератора в цілому.

Вірогідність безвідмовної роботи обмотки ротора визначається наступним чином. Перший етап розрахунку – розрахунок вірогідності безвідмовної роботи міжвиткової роботи котушки ротора. Другий етап – розрахунок вірогідності безвідмовної роботи корпусної ізоляції котушки ротора. Вихідні дані для розрахунку: напруга, прикладена до обмотки ротора,  $U_p$ , кВ; число котушок в обмотці ротора  $m_p$ ; число витків в котушці ротора  $w_p$ ; час безвідмовної роботи  $t$ .

Вірогідність безвідмовної роботи обмотки ротора

$$p_p(t) = p_{\varepsilon p}(t) \cdot p_{cp}(t), \quad (6.1)$$

де  $p_{\varepsilon p}(t)$  – вірогідність безвідмовної роботи міжвиткової ізоляції обмотки ротора;

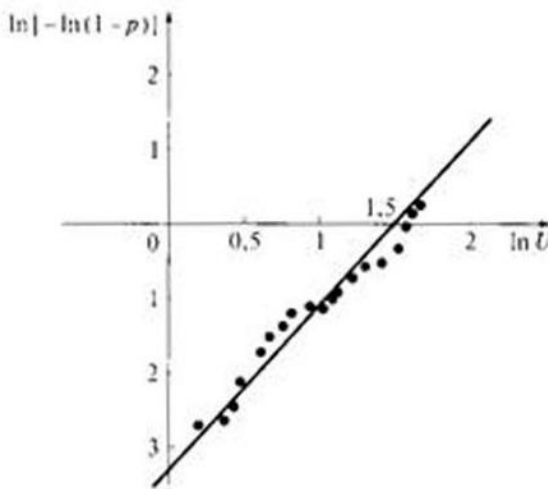
$p_{cp}(t)$  – вірогідність безвідмовної роботи корпусної ізоляції обмотки ротора.

Для виконання першого етапу розрахунку експериментально визначають число сусідніх провідників  $n_l$ , різниця порядкових номерів яких дорівнює  $l$ , та розраховують напругу, прикладену до витків  $U_{nl}$ .

$$U_{nl} = \frac{U_p \cdot k_p}{m_p \cdot w_p} \cdot l, \quad (6.2)$$

де  $k_p$  – кратність комутаційних перенапруг ротора при перехідних процесах;  $l$  – різниця порядкових номерів провідників.

Проводять випробування на пробій міжвиткової ізоляції ротора генератора, що працював протягом  $t$  годин, та складають табл. 6.1 статистик пробивних напруг для міжвиткової ізоляції, де  $n_l$  – Число витків, що пробито напругою  $U_l$ ,  $\Sigma n_l$  – загальна кількість витків, що були піддані випробуванню,  $Q$  – ймовірність відмови. За даними табл. 6.1 будують графік залежності  $\ln[-\ln(1-Q)] = f(\ln U)$ , за яким визначають параметри розподілу Вейбула  $\alpha$  та  $U_0$ .



**Рисунок 6.1** – Графік залежності  $\ln(-\ln(1-p)) = f(\ln U)$  для виткової ізоляції

Параметри розподілу Вейбула визначаються з графіку наступним чином. Параметр  $\alpha$  – тангенс кута нахилу прямої  $\ln U$  до вісі, а  $\ln U_0$  дорівнює ординаті, що відсікається отриманою прямою на вісі ординат, та відповідно:

$$U_0 = \exp(\ln U_0). \quad (6.3)$$

Вірогідність безвідмовної роботи міжвиткової ізоляції ротора генератора за час  $t$ :

$$p_{\varepsilon p}(t) = \left[ e \left( -\frac{n_l \cdot U_{n_l}^\alpha}{U_0} \right) \right]^{m_p}. \quad (6.4)$$

Для виконання другого етапу експериментально визначають число сусідніх провідників  $n_j$ , порядкові номери яких дорівнюють  $j$  визначають напругу між  $j$ -тим провідником та корпусом:

$$U_{c_j} = \frac{U_p \cdot k_p}{m_p \cdot w_p} \cdot j. \quad (6.5)$$

Вірогідність безвідмовної роботи витків, що безпосередньо не прилягають до корпусу дорівнює одиниці.

**Таблиця 6.1** – Статистики пробивних напруг

№	$U_i$ , кВ	$n_i$	$\Sigma n_i$	Q	$\ln(1-Q)$	$\ln U$	$\ln[-\ln(1-Q)]$
1	2	3	4	5	6	7	8
1							
2							
⋮							
n							

За результатами випробувань на пробій корпусної ізоляції ротора генератора, що пропрацював  $t$  годин, складають табл. 6.1 статистик пробивних напруг для корпусної ізоляції. За даними табл. 6.1 будують графік залежності  $\ln[-\ln(1-Q)] = f(\ln U)$ , за яким визначають параметри розподілу Вейбула  $\alpha_k$  та  $U_{0k}$ .

Вірогідність безвідмовної роботи корпусної ізоляції ротора генератора за час  $t$ :

$$p_{c_j}(t) = \left[ e \left( -\frac{U_{c_j}^\alpha}{U_0} \right) \right]^{m_p}. \quad (6.6)$$

## 6.2 Порядок виконання лабораторної роботи

Розрахувати вірогідність безвідмовної роботи обмотки ротора синхронного генератора, якщо напруга, що прикладена до обмотки ротора  $U_p$ ; число котушок в обмотці ротора  $m_p$ ; число витків в котушці ротора  $w_p$ ; кратність комутаційних перенапруг в роторі при перехідних процесах  $k_p$ ; час експлуатації  $t = 3000$  годин.

**Таблиця 6.2** – Варіанти індивідуальних завдань

№	$U_p$ , кВ	$m_p$	$\omega_p$	$k_p$	№	$U_p$ , кВ	$m_p$	$\omega_p$	$k_p$
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
1	0.019	4	89	3.0	16	0.019	5	28	1.6
2	0.019	5	44	2.9	17	0.019	3	76	2.0
3	0.020	3	78	1.4	18	0.018	3	58	1.4
4	0.018	5	67	2.2	19	0.019	7	20	2.0
5	0.019	3	92	1.8	20	0.018	5	56	1.8
6	0.018	5	44	1.2	21	0.019	3	64	2.5
7	0.018	3	44	1.5	22	0.018	3	32	2.2
8	0.018	5	42	2.0	23	0.019	4	92	2.8
9	0.018	5	60	1.6	24	0.019	5	55	2.7
10	0.019	7	64	1.4	25	0.018	3	56	1.5
11	0.020	7	56	1.5	26	0.018	5	84	2.8
12	0.020	3	32	1.3	27	0.019	5	40	2.2
13	0.020	3	28	2.0	28	0.019	3	68	3.0
14	0.018	5	68	2.0	29	0.019	5	32	2.9
15	0.019	3	72	1.6	30	0.018	5	78	2.0

**Таблиця 6.3** – Статистики пробивних напруг за варіантами

№ варіанту	$U_1$ , кВ	
	$n_1$	
1.	$U_1$	1.2; 1.4; 1.5; 1.6; 1.8; 1.9; 2; 2.2; 2.5; 2.9; 3; 3.4; 3.6; 4; 4.5; 4.8; 4.9; 5.
	$n_1$	18; 3; 3; 11; 12; 9; 12; 9; 3; 9; 6; 15; 15; 3; 21; 33; 90; 30.
2.	$U_1$	2.2; 2.3; 2.5; 2.8; 3.1; 3.6; 3.9; 4.2; 4.6; 5.3; 5.5; 6; 6.7; 6.9; 7.4; 8; 9.5; 9.7; 10.
	$n_1$	13; 16; 10; 7; 9; 10; 8; 2; 5; 9; 10; 14; 11; 18; 10; 22; 13; 10; 9.9.
3.	$U_1$	1; 1.3; 1.5; 1.6; 2; 4; 7; 9; 10.6; 12; 13.4; 14.1; 15.3; 17.2; 19.
	$n_1$	7; 4; 12; 7; 5; 2; 9; 11; 14; 11; 9; 5; 3; 2; 6.

## Продовження таблиці 6.3

4.	U <sub>1</sub>	0.8; 1.2; 1.4; 1.8; 2.2; 2.7; 3.3; 3.8; 4.1; 4.5; 4.9; 5.4; 6; 6.2; 6.5.
	n <sub>1</sub>	14; 6; 2; 9; 6; 9; 12; 15; 7; 6; 8; 12; 10; 6; 6.
5.	U <sub>1</sub>	2; 2.5; 2.8; 3.1; 3.3; 3.6; 3.8; 4.1; 4.4; 4.7; 5.3; 5.6; 5.9; 6.6; 7.5.
	n <sub>1</sub>	6; 12; 8; 9; 9; 5; 9; 3; 5; 7; 11; 4; 3; 3; 1.
6.	U <sub>1</sub>	2.8; 3.1; 3.5; 3.8; 4.2; 4.5; 4.8; 5.2; 5.5; 6.1; 6.4; 6.8; 7; 7.1; 7.3.
	n <sub>1</sub>	18; 9; 6; 4; 5; 8; 9; 4; 11; 6; 11; 4; 5; 5; 4.
7.	U <sub>1</sub>	4; 4.2; 4.4; 4.7; 4.9; 5.3; 5.7; 5.9; 6.2; 6.6; 6.8; 7; 7.1; 7.2.
	n <sub>1</sub>	16; 8; 5; 4; 5; 8; 6; 4; 8; 6; 9; 7; 6; 3; 6.
8.	U <sub>1</sub>	4.5; 4.9; 5.3; 5.7; 5.9; 6.2; 6.4; 6.6; 6.8; 7.3; 7.5; 7.7; 8.2; 8.7; 9.3.
	n <sub>1</sub>	19; 4; 5; 4; 7; 9; 6; 11; 8; 4; 8; 7; 6; 3; 3.
9.	U <sub>1</sub>	0.8; 1.2; 1.6; 2; 2.6; 3.3; 3.8; 4.1; 4.5; 4.9; 5.4; 6; 6.2; 6.5; 6.9.
	n <sub>1</sub>	19; 11; 4; 9; 6; 9; 12; 15; 7; 4; 8; 9; 10; 6; 2.
10.	U <sub>1</sub>	1.8; 2.5; 2.8; 3.2; 3.3; 3.6; 3.8; 4.1; 4.4; 5; 5.3; 5.5; 6; 6.6; 7.8.
	n <sub>1</sub>	7; 9; 8; 9; 11; 5; 9; 3; 5; 7; 11; 9; 3; 6; 3.
11.	U <sub>1</sub>	1.5; 2.5; 3.2; 3.5; 3.8; 4.1; 4.5; 5; 5.4; 5.8; 6.1; 6.6; 7.2; 7.5; 7.8.
	n <sub>1</sub>	21; 14; 6; 10; 5; 8; 9; 8; 11; 7; 12; 4; 3; 8; 4.
12.	U <sub>1</sub>	1; 1.2; 1.5; 1.7; 1.9; 2.2; 2.5; 2.6; 2.7; 2.9; 3; 3.1; 3.3; 3.4; 3.6.
	n <sub>1</sub>	15; 5; 9; 4; 3; 10; 6; 8; 7; 4; 5; 9; 6; 2; 1.
13.	U <sub>1</sub>	1.2; 1.4; 1.6; 1.8; 1.9; 2; 2.3; 2.6; 2.9; 3.1; 3.2; 3.5; 3.7; 3.8; 4.
	n <sub>1</sub>	12; 6; 3; 5; 8; 12; 12; 6; 3; 9; 47; 26; 33; 21; 64.
14.	U <sub>1</sub>	3.8; 4.1; 4.4; 4.6; 4.9; 5.3; 5.7; 5.9; 6.2; 6.6; 6.8; 7.3; 7.5; 7.7.
	n <sub>1</sub>	20; 3; 5; 4; 7; 10; 6; 4; 8; 4; 8; 7; 6; 3; 1.
15.	U <sub>1</sub>	2; 2.3; 2.6; 2.9; 3.1; 3.2; 3.5; 3.7; 3.8; 4; 4.6; 4.9; 5.5; 6; 6.8.
	n <sub>1</sub>	21; 8; 4; 5; 8; 14; 12; 6; 3; 11; 14; 13; 15; 26; 29.
16.	U <sub>1</sub>	2.1; 2.3; 2.9; 3.2; 3.3; 3.6; 3.8; 4.1; 4.4; 5; 5.5; 5.7; 6; 6.4; 6.7.
	n <sub>1</sub>	17; 9; 8; 9; 5; 5; 6; 3; 5; 7; 11; 4; 3; 6; 2.
17.	U <sub>1</sub>	2.4; 3; 3.5; 3.7; 4; 4.5; 4.8; 5; 5.5; 6.1; 6.4; 6.9; 7; 7.2; 7.8.
	n <sub>1</sub>	19; 2; 5; 4; 5; 8; 6; 4; 8; 6; 11; 7; 4; 3; 2.
18.	U <sub>1</sub>	4.5; 5.3; 5.7; 6; 6.2; 6.4; 6.6; 6.9; 7; 7.2; 7.5; 7.7; 8.3; 8.7; 9.
	n <sub>1</sub>	11; 7; 5; 4; 6; 12; 6; 2; 8; 4; 5; 7; 6; 2; 4.
19.	U <sub>1</sub>	1.1; 1.3; 1.5; 1.7; 1.8; 2; 2.1; 2.5; 2.8; 2.9; 3.3; 3.6; 3.8; 4.4; 5.0.
	n <sub>1</sub>	24; 8; 4; 5; 8; 14; 12; 19; 9; 41; 14; 65; 38; 26; 31.
20.	U <sub>1</sub>	0.7; 1.3; 1.6; 2.1; 2.6; 3.3; 3.5; 3.9; 4.1; 4.5; 4.9; 5.4; 6.1; 6.5; 7.1.
	n <sub>1</sub>	17; 13; 4; 9; 5; 9; 15; 15; 7; 4; 8; 5; 4; 6; 2.
21.	U <sub>1</sub>	3.1; 3.5; 3.9; 4.2; 4.4; 4.8; 5.2; 5.5; 6; 6.7; 7.2; 7.9; 8.8; 9.9.
	n <sub>1</sub>	36; 12; 22; 5; 8; 7; 12; 4; 9; 41; 14; 52; 38; 26; 19.
22.	U <sub>1</sub>	1.2; 1.8; 2.2; 2.8; 3.1; 3.5; 3.8; 4.2; 4.5; 4.8; 5.2; 5.5; 6.1; 6.4; 6.8.
	n <sub>1</sub>	18; 3; 3; 11; 12; 9; 12; 9; 3; 9; 6; 15; 15; 3; 21.

## Продовження таблиці 6.3

23.	$U_1$	1; 1.3; 1.5; 1.6; 1.8; 1.9; 2; 2.2; 2.5; 2.9; 3; 3.4; 3.6; 4; 4.5; 4.8; 4.9; 5.2.
	$n_1$	19; 4; 3; 11; 12; 9; 12; 9; 3; 9; 6; 15; 12; 5; 20; 40; 85; 28.
24.	$U_1$	1.5; 2.3; 2.9; 3.2; 3.5; 3.8; 4.1; 4.6; 5; 5.5; 5.7; 6; 6.4; 7.1; 8.2.
	$n_1$	15; 12; 8; 9; 5; 2; 6; 8; 5; 7; 11; 4; 3; 4; 1.
25.	$U_1$	1; 1.3; 1.6; 2.2; 2.6; 3.3; 3.9; 4.2; 4.5; 4.9; 5.4; 6.1; 6.6; 7; 7.7.
	$n_1$	11; 14; 8; 5; 5; 9; 15; 15; 7; 4; 3; 9; 4; 6; 5.
26.	$U_1$	4; 4.3; 4.7; 5.4; 5.8; 6.2; 6.4; 6.6; 6.9; 7.2; 7.5; 7.7; 8.3; 8.7; 8.8.
	$n_1$	11; 7; 9; 4; 3; 10; 6; 2; 7; 4; 5; 9; 6; 2; 2.
27.	$U_1$	1; 1.3; 1.5; 1.7; 1.8; 2; 2.1; 2.5; 2.8; 2.9; 3.3; 3.6; 3.8; 4.1; 4.6.
	$n_1$	21; 8; 4; 5; 8; 14; 12; 19; 9; 11; 14; 13; 15; 26; 29.
28.	$U_1$	1.2; 1.4; 1.6; 1.8; 1.9; 2; 2.3; 2.6; 2.9; 3.1; 3.2; 3.5; 3.7; 3.8; 4.
	$n_1$	6; 6; 4; 5; 8; 14; 12; 6; 3; 11; 28; 26; 30; 21; 62.
29.	$U_1$	1.1; 2.5; 3.2; 3.5; 3.8; 4.1; 4.5; 5.2; 5.4; 5.7; 6; 6.4; 7; 7.7; 8.
	$n_1$	14; 5; 6; 10; 5; 3; 6; 8; 5; 7; 12; 4; 3; 4; 5.
30.	$U_1$	0.9; 1.3; 1.8; 2.1; 2.6; 3; 3.5; 3.7; 4.1; 4.5; 5; 5.4; 6; 6.5; 7.1.
	$n_1$	14; 13; 4; 9; 5; 9; 4; 15; 7; 4; 8; 5; 4; 6; 2.

## 6.3 Контрольні запитання

1. Для яких вузлів синхронного генератора може бути розрахована надійність?
2. Як знайти вірогідність безвідмовної роботи синхронного генератора, якщо відомі вірогідності безвідмовної роботи кожного його вузла?
3. Фактори, що визначають термін служби ізоляції обмотки?
4. Причини відмов електричних машин?

## Зміст звіту:

- Розрахунок надійності ізоляції обмотки ротора синхронного генератора;
- Графік залежності  $\ln[-\ln(1-Q)] = f(\ln U)$ ;
- Висновки.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Васілевський О. М. Нормування показників надійності технічних засобів: навчальний посібник / О. М. Васілевський, В. О. Поджаренко. — Вінниця: ВНТУ, 2010. — 129 с.
2. Кустов В.Ф. Основи теорії надійності та функційної безпеки систем залізничної автоматики: Навчальний посібник. — Харків: УкрДАЗТ, 2008. - 218 с.
3. Парасюк В. І. Основи надійності технічних систем : навч. посібник долабораторн. практикуму / В. І. Парасюк, А. В. Кондратьєв. — Х.: Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2010. — 72 с.
4. Семенов А. А., Мелкумян В. Г. Основи теорії надійності: Навчальний посібник. — К.: КМУЦА, 1998. — 84 с. ISBN 966-598-010-6
5. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення. — К.: Держстандарт України, 1994. — 36 с.
6. ДСТУ 2861-94 Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення.
7. ДСТУ 2862-94 Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги.

### Додаток А

**Таблиця А.1-** Варіанти для розрахунку ізоляції всипних обмоток асинхронних двигунів

№ пп	t <sub>розр</sub> , ГОД	f <sub>вмик</sub>	d <sub>г</sub> , ММ	d <sub>із</sub> , ММ	q <sub>i</sub>	Провід марки ПЕТВ									
						S	K <sub>з</sub>	Z	l <sub>w</sub>	n <sub>c</sub>	K	П	I <sub>зраз</sub>	r <sub>вп</sub>	E <sub>B</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	5000	30	1.2	1.28	0.147	36	0.7	36	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
2	5000	30	1.2	1.28	0.147	36	0.85	36	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
3	5000	30	1.2	1.28	0.147	36	0.8	36	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
4	5000	30	1.2	1.28	0.147	36	0.85	48	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
5	5000	30	1.2	1.28	0.138	36	0.7	24	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
6	5000	25	1.2	1.28	0.138	36	0.7	48	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
7	5000	25	1.2	1.28	0.138	36	0.75	48	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
8	5000	25	1.2	1.28	0.138	36	0.75	24	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
9	5000	25	1.2	1.28	0.156	36	0.8	24	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
10	5000	25	1.2	1.28	0.156	36	0.85	24	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
11	5000	35	1.2	1.28	0.156	36	0.8	48	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
12	5000	35	1.2	1.28	0.156	36	0.85	48	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
13	5000	35	1.2	1.28	0.135	36	0.7	32	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
14	5000	35	1.2	1.28	0.135	36	0.75	32	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
15	5000	35	1.2	1.28	0.135	36	0.75	36	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
16	5000	35	1.2	1.28	0.135	36	0.85	32	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
17	10000	65	1.2	1.28	0.147	36	0.7	36	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
18	10000	65	1.2	1.28	0.147	36	0.85	36	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
19	10000	65	1.2	1.28	0.147	36	0.8	36	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
20	10000	65	1.2	1.28	0.147	36	0.85	48	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99

Продовження таблиці А.1

№ ПП	t <sub>розр</sub> , ГОД	f <sub>вмик</sub>	d <sub>r</sub> , ММ	d <sub>із</sub> , ММ	q <sub>i</sub>	Провід марки ПЕТВ									
						S	K <sub>з</sub>	Z	l <sub>w</sub>	n <sub>c</sub>	K	П	l <sub>зраз</sub>	r <sub>вп</sub>	E <sub>B</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	5000	30	1.2	1.28	0.147	36	0.7	36	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
2	5000	30	1.2	1.28	0.147	36	0.85	36	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
3	5000	30	1.2	1.28	0.147	36	0.8	36	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
4	5000	30	1.2	1.28	0.147	36	0.85	48	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
5	5000	30	1.2	1.28	0.138	36	0.7	24	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
6	5000	25	1.2	1.28	0.138	36	0.7	48	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
7	5000	25	1.2	1.28	0.138	36	0.75	48	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
8	5000	25	1.2	1.28	0.138	36	0.75	24	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
9	5000	25	1.2	1.28	0.156	36	0.8	24	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
10	5000	25	1.2	1.28	0.156	36	0.85	24	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
11	5000	35	1.2	1.28	0.156	36	0.8	48	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
12	5000	35	1.2	1.28	0.156	36	0.85	48	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
13	5000	35	1.2	1.28	0.135	36	0.7	32	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
14	5000	35	1.2	1.28	0.135	36	0.75	32	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
15	5000	35	1.2	1.28	0.135	36	0.75	36	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
16	5000	35	1.2	1.28	0.135	36	0.85	32	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
17	10000	65	1.2	1.28	0.147	36	0.7	36	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
18	10000	65	1.2	1.28	0.147	36	0.85	36	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
19	10000	65	1.2	1.28	0.147	36	0.8	36	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99
20	10000	65	1.2	1.28	0.147	36	0.85	48	530	6	1	42.12	60	1.527	1.99

Додаток Б

**Таблиця Б.1– Значення інтегралу вірогідності**

$F(u-u_2)/\sigma_2$	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0.00
-2.0	0.0183	0.0188	0.0192	0.0197	0.0202	0.0207	0.0212	0.0217	0.0222	0.0228
-1.9	0.0233	0.0239	0.0244	0.0250	0.0256	0.0262	0.0268	0.0274	0.0281	0.0287
-1.8	0.0294	0.0301	0.0307	0.0314	0.0322	0.0329	0.0336	0.0344	0.0351	0.0359
-1.7	0.0367	0.0375	0.0384	0.0392	0.0401	0.0409	0.0418	0.0427	0.0436	0.0446
-1.6	0.0455	0.0465	0.0475	0.0485	0.0495	0.0505	0.0516	0.0526	0.0537	0.0548
-1.5	0.0559	0.0571	0.0520	0.0594	0.0606	0.0618	0.0630	0.0643	0.0655	0.0668
-1.4	0.0681	0.0694	0.0708	0.0721	0.0735	0.0749	0.0764	0.0778	0.0793	0.0808
-1.3	0.0823	0.0838	0.0853	0.0869	0.0885	0.0901	0.0918	0.0934	0.0951	0.0968
-1.2	0.0985	0.1003	0.1020	0.1038	0.1057	0.1075	0.1093	0.1112	0.1131	0.1151
-1.1	0.1170	0.1190	0.1210	0.1230	0.1251	0.1271	0.1292	0.1314	0.1335	0.1357
-1.0	0.1379	0.1401	0.1422	0.1446	0.1469	0.1492	0.1515	0.1539	0.1562	0.1587
-0.9	0.1611	0.1635	0.1660	0.1685	0.1711	0.1736	0.1762	0.1788	0.1814	0.1841
-0.8	0.1867	0.1894	0.1920	0.1949	0.1977	0.2005	0.2030	0.2061	0.2090	0.2119
-0.7	0.2148	0.2177	0.2207	0.2236	0.2266	0.2297	0.2327	0.2358	0.2389	0.2420
-0.6	0.2451	0.2483	0.2514	0.2546	0.2578	0.2611	0.2643	0.3676	0.2709	0.2743
-0.5	0.2776	0.2810	0.2843	0.2877	0.2912	0.2946	0.2981	0.3015	0.3050	0.3085
-0.4	0.3121	0.3156	0.3192	0.3228	0.3264	0.3300	0.3336	0.3372	0.3409	0.3446
-0.3	0.3483	0.3520	0.3557	0.3594	0.3632	0.3669	0.3707	0.3745	0.3783	0.3821
-0.2	0.3859	0.3897	0.3936	0.3974	0.4013	0.4052	0.4090	0.4129	0.4168	0.4207
-0.1	0.4247	0.4286	0.4225	0.4364	0.4404	0.4443	0.4483	0.4522	0.4562	0.4602
0.0	0.4641	0.4681	0.4721	0.4761	0.4801	0.4840	0.4880	0.4920	0.4960	0.5090

**Приклад використання (-1.71) = 0.0436**