МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до практичних робіт
з дисципліни
«Наукові основи визначення показників технічного рівня сучасних підйомних машин»

Розглянуто і схвалено
на засіданні кафедри підйомно-транспортних і металургійних машин
Протокол № 21 від 20 червня 2023 р.

КРАМАТОРСЬК-ТЕРНОПІЛЬ, 2023

УДК 621

Методичні вказівки до практичних робіт з дисципліни «Наукові основи визначення показників технічного рівня сучасних підйомних машин». /Укл. В.Д. Кассов. - Краматорськ: ДДМА, 2023. - 35 с.

Містять необхідні теоретичні положення, методику виконання індивідуальних завдань. Викладено створення дослідницьких систем для фізичного моделювання процесів у вузлах машин та обладнання.

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри підйомно-транспортних і металургійних машин
Протокол № 21 від 20 червня 2023 р.

Електронне навчальне видання

Укладач В.Д. Кассов, професор

1 ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1
«Основні моделі надійності»

Мета роботи: закріплення вміння застосування основних моделей надійності.

Постановка задачі: в промислових умовах були проведені випробування N невідновлювальних однакових об'єктів, результати випробувань зафіксовані в таблиці із зазначенням меж тимчасових інтервалів відмов, що сталися на даному інтервалі спостереження.

За результатами експерименту необхідно:

а) визначити закон розподілу випадкової величини τ – напрацювання на відмову;

б) розрахувати основні показники надійності для даного виду об'єктів.

Завдання

1. Для заданої вибірки чисел, що представляють собою напрацювання об'єктів визначити основні характеристики та підібрати закон розподілу (завдання за варіантами наведено в таблиці 1.1, номер варіанта встановлюється викладачем). В якості критерію для перевірки відповідності закону розподілу використовувати критерії статистичної збіжності.

2. Розрахувати наступні показники надійності та побудувати графіки:

а) щільність розподілу відмов;

б) функція розподілу відмов;

в) функція безвідмовної роботи;

г) інтенсивність відмов.

3. Оформити звіт про виконану роботу, який повинен містити:

- роздруківку вихідних даних;
- зведення статистик;
- результати тестів для підібраного закону розподілу;
- графіки;
- висновки по кожному пункту роботи.

Теоретичні відомості

Найбільш важливі показники надійності невідновлюваних об'єктів – показники безвідмовності, до яких відносяться:

- ймовірність безвідмовної роботи;
- щільність розподілу відмов;
- інтенсивність відмов;
- середнє напрацювання до відмови.

Показники надійності представляються в двох формах (визначеннях):

- статистична (вибіркові оцінки);
- імовірнісна.

Статистичні визначення (вибіркові оцінки) показників отримуються за результатами випробувань на надійність.

Припустимо, що в ході випробувань якогось числа однотипних об'єктів отримано кінцеве число потрібного нам параметра – напрацювання до відмови. Отримані числа є вибіркою якогось обсягу із загальної «генеральної сукупності», що має необмежений обсяг даних про напрацювання до відмови об'єкта.

Кількісні показники, визначені для «генеральної сукупності», є істинними (імовірнісними) показниками, оскільки об'єктивно характеризують випадкову величину – напрацювання до відмови.

Показники, визначені для вибірки і які дозволяють зробити якісь висновки про випадкову величину, є вибірковими (статистичними) оцінками. Вочевидь, що при досить великій кількості випробувань (великий вибірці) оцінки наближаються до імовірнісних показників.

Імовірнісна форма подання показників зручна при аналітичних розрахунках, а статистична – при експериментальному дослідженні надійності.

До показників безвідмовності невідновлюваних виробів відносяться:

- ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$;
- середнє напрацювання до відмови T_0;
- інтенсивність відмов $\lambda(t)$.

Імовірність безвідмовної роботи в інтервалі від 0 до t є ймовірність того, що виріб пропрацює безвідмовно протягом необхідного інтервалу часу (0, t_0), почавши працювати в момент t = 0; або ймовірність того, що випадковий час роботи виробу до відмови t виявиться більше необхідного часу роботи виробу ($t > t_0$).

Функцію P (t) часто називають функцією надійності, якої притаманні такі властивості: $P(0) = 1$; $P(\infty) = 0$; $P(t_2) < P(t_1)$, якщо $t_2 > t_1$. Вона є незростаючею функцією часу і в статистичному виражені записується так:

$$P(t) = \frac{N(t_0)}{N(0)} = 1 - \frac{n(t_0)}{N(0)},$$

де $N(t_0)$ – кількість справних виробів в момент часу t_0;

$N(0)$ – кількість справних виробів в момент часу t = 0;

$n(t_0)$ – кількість виробів, які відмовили до моменту часу t_0.

З імовірністю безвідмовної роботи тісно пов'язаний такий показник, як імовірність відмов, яка розраховується за формулою:

$$Q(t) = \frac{n(t_0)}{N(0)}.$$

При цьому:

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

Щільність розподілу часу безвідмовної роботи:

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}.$$

Середнє напрацювання до відмови T_0 – математичне очікування напрацювання об'єкта до першої відмови

$$T_0 = \frac{1}{N(0)} \sum_{i=1}^{N} t_i \text{ або } T = \int_0^{\infty} P(t)dt,$$

де t_i – напрацювання і-того об'єкта до відмови (випадковий час роботи виробу до відмови).

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ – умовна щільність ймовірності виникнення відмови невідновлюваного об'єкта, яка визначається для даного моменту часу за умови, що до цього моменту відмова не виникла

$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t} \text{ або } \lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)},$$

де $N(t)$ і $N(t + \Delta t)$ – число об'єктів, працездатних відповідно до моментів часу t і $t + \Delta t$.

Характерний вид наведених функцій показаний на рисунку 1.1.

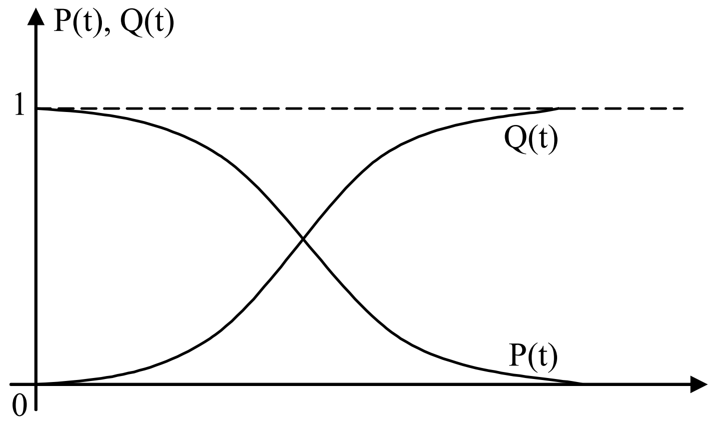


Рисунок 1.1 – Функції надійності

Залежність надійності від часу описується за допомогою математичної моделі надійності. Ті моделі, які можна описати за будь-якого закону називаються статистичними моделями розподілу надійності.

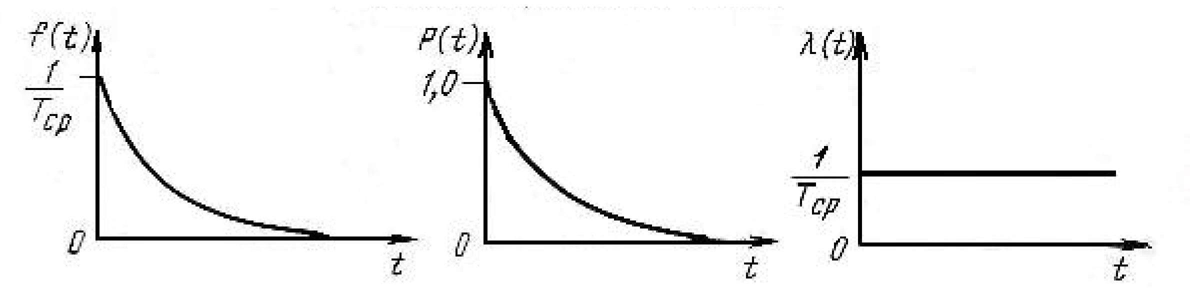
При встановленні закону враховують в основному два фактори: форму теоретичної кривої і природу відмов.

В теорії ймовірностей виділяють нормальний, експоненціальний, Вейбулла, гамма, Пуасона, логарифмічно нормальний, рівномірний, Вейбулла-Гнеденко і інші закони розподілу.

Експоненціальний закон характеризується щільністю розподілу напрацювання (часу) до відмови (рисунок 1.2):

$$f(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot t),$$

де λ - інтенсивність відмов (параметр закону розподілу)



а) *б)* *в)*

а – щільність розподілу напрацювання; б – імовірність безвідмовної роботи; в – інтенсивність відмов

Рисунок 1.2 – Функції надійності для експоненціального закону

Імовірність безвідмовної роботи (функція надійності) визначається за формулою:

$$P(t) = \exp(-\lambda t).$$

Для з'ясування фізичного параметра λ знаходять середній час безвідмовної роботи T_0, що дорівнює математичному очікуванню спостережуваних значень напрацювання до відмови:

$$T_0 = M(t) = \int_0^{\infty} P(t)dt = {}^1\!/_{\lambda}.$$

Для відмов внаслідок зношування цей закон не застосовується. Він характерний для раптових, аварійних відмов, пов'язаних з поломками і руйнуваннями об'єкта.

Нормальний закон (Гауса, Гауса-Лапласа) (Gaussian)

Щільність ймовірності f (t) випадкової величини t при нормальному законі описується рівнянням (рисунок 1.3):

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}\right]$$

або

$$f(x) = e^{\frac{-(x-m_x)^2 / 2\sigma^2}{\sigma\sqrt{2\pi}}}.$$

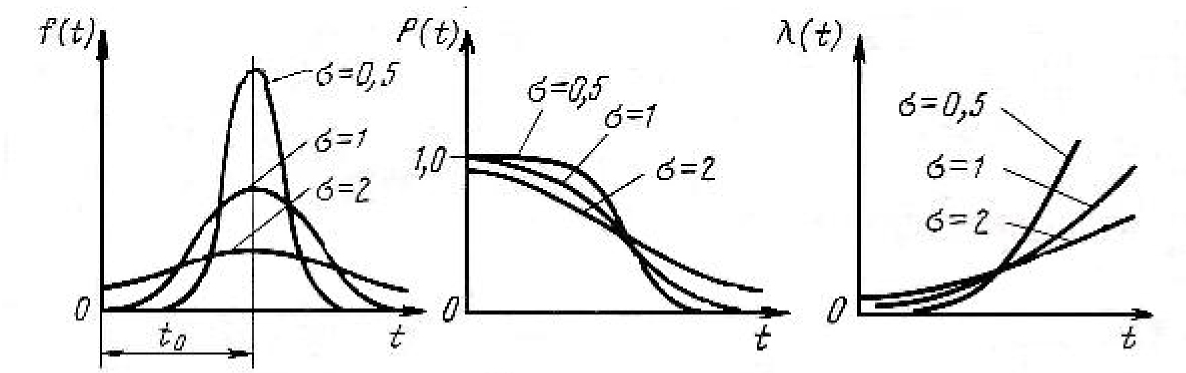
де mx - математичне очікування напрацювання до відмови;

σ - середньоквадратичне відхилення нормального розподілу;

x - випадкова величина (теж, що і t).

Параметр mx характеризує положення центра групування розподілу на осі абсцис, параметр σ - форму кривої щільності розподілу.

При збільшенні σ максимальна ордината кривої, відповідна mx, зменшується, а сама крива стає більш плоскою, розтягуючись уздовж осі абсцис.



а) *б)* *в)*

а – щільність розподілу напрацювання; б – імовірність безвідмовної роботи; в – інтенсивність відмов

Рисунок 1.3 – Функції надійності для нормального закону

Імовірність безвідмовної роботи (функція надійності)

$$P(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp\left[-\frac{(t - m_x)^2}{2\sigma^2} \right] dt.$$

Нормальним законом підпорядковуються похибки вимірювання і виготовлення деталей, напрацювання до відмови невідновлюваних виробів, поступові відмови, обумовлені процесами тертя, накопичення втомних пошкоджень і старінням.

Закон розподілу Вейбула (Weibull distribution)

Закон розподілу Вейбула має два параметри і задається щільністю розподілу напрацювання (часу) до відмови (рисунок 1.4):

$$f(t) = \frac{b}{a}\left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^{b} \right].$$

де a - параметр масштабу (задає масштаб кривої розподілу по осі абсцис);

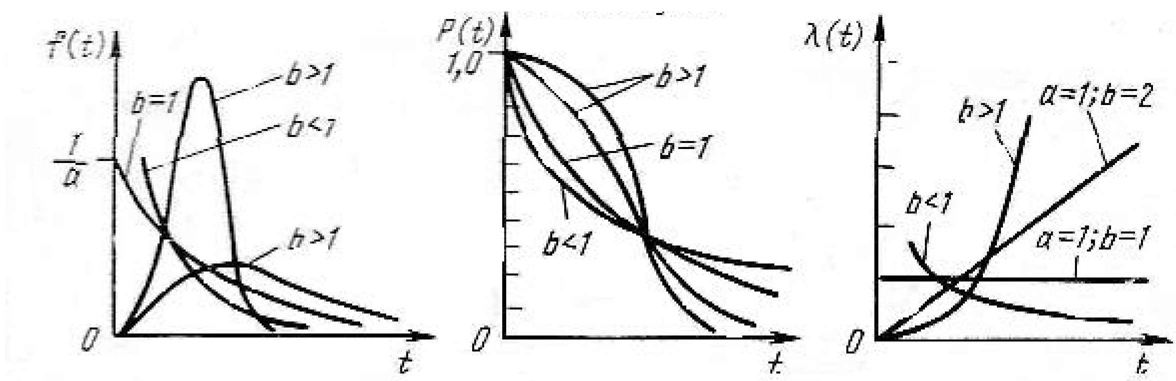
b - параметр форми (визначає гостроту і асиметрію кривої розподілу).

Функція надійності

$$P(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^{b} \right].$$

Інтенсивність відмов

$$\lambda(t) = \frac{b}{a}\left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}.$$



а) *б)* *в)*

а – щільність розподілу напрацювання; б – імовірність безвідмовної роботи; в – інтенсивність відмов

Рисунок 1.4 – Функції надійності для закону Вейбула

Величини a і b завжди позитивні.

Цей закон є універсальним, так як при певних параметрах перетворюється в нормальний, експоненціальний і ін.

При $b = 1$ розподіл Вейбула переходить в експоненціальний.

Використовується для опису напрацювання на відмову підшипників, елементів радіоелектронної апаратури, деталей і вузлів машин, для оцінки надійності машин у процесі їх припрацювання (a=1,4…1,7 – підшипники кочення).

Гамма-розподіл

Щільність розподілу напрацювання має вид (рисунок 1.5):

$$f(t) = \frac{\lambda_0^k \cdot t^{k-1}}{(k-1)!}\exp(-\lambda_0 \cdot t).$$

Функція надійності

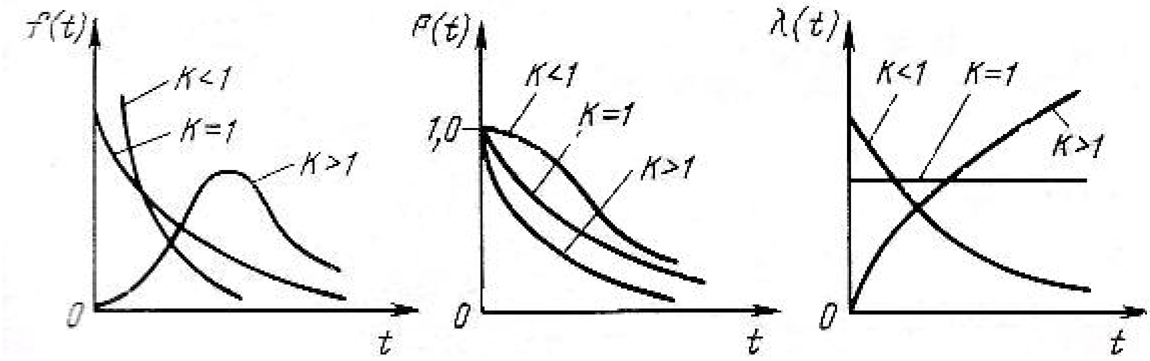
$$P(t) = \exp(-\lambda_0 \cdot t)\sum_{i=0}^{k-1}\frac{(\lambda_0 \cdot t)^i}{i!}.$$

Інтенсивність відмов

$$\lambda(t) = \frac{\lambda_0(\lambda_0 \cdot t)^{k-1}}{(k-1)!\sum\limits_{i=0}^{k-1}\frac{(\lambda_0 \cdot t)^i}{i!}}.$$

де k - параметр форми (число резервних елементів);

λ_0 – параметр масштабу.



а) *б)* *в)*

а – щільність розподілу напрацювання; б – імовірність безвідмовної роботи; в – інтенсивність відмов

Рисунок 1.5 – Функції надійності для гамма-закону

Закону гамма-розподілу підпорядковуються розподіл напрацювання до відмови резервованих об'єктів, розподіл напрацювання відновлюваних нерезервованих об'єктів при певному числі відмов.

Хід практичної роботи

1 Для впорядкування даних щодо відмов значення вибірки розташовують в порядку зростання. У такому вигляді отриманий ряд називається варіаційним. Різниця між екстремальними або крайніми значеннями ряду називається розмахом вибірки.

2 Весь інтервал значень, що складають варіаційний ряд, розбивають на деяке число інтервалів і розглядають не окремі значення вибірки, а групи значень, що потрапили в послідовно розташовані інтервали. Число інтервалів приймають в межах 8-12. Приблизно величину інтервалу можна визначити за формулою:

$$l = \frac{R}{1 + 3{,}2 \cdot \lg n},$$

де *R* – розмах вибірки;

n – число значень вибірки.

3 Підраховують число значень n_i вибірки, що потрапляють в кожен *i*-тий інтервал, і визначають частоти, відповідні кожному інтервалу $\omega_i = {}^{n_i}\!/_{n}$

Сума частот усіх інтервалів повинна дорівнювати одиниці.

4 Складають таблицю, в якій зазначають інтервали, розташовані в порядку зростання і записують відповідні їм частоти. Така таблиця називається статистичним рядом. Отриманий статистичний ряд зручно представляти графічно у вигляді гістограми, що складається з прямокутників, побудованих на інтервалах. Для цього по осі абсцис відкладають інтервали і на кожному з них, як на підставі, будують прямокутник, площа якого дорівнює частоті даного інтервалу. Висоту прямокутника отримують, розділивши його площу на довжину інтервалу.

Отримана висота являє собою статистичну щільність $\hat{f}(t)$ розподілу напрацювання до відмови.

Гістограма є графіком емпіричної (статистичної) щільності розподілу даних вибірки та її обриси при збільшенні числа спостережень будуть все більше наближатися до теоретичної кривої щільності розподілу.

5 Порівнюючи зовнішній вигляд гістограми з формою теоретичних кривих розподілу f (t) можна висловити гіпотезу про відповідність статистичного розподілу тому чи іншому теоретичному.

Варіанти завдання подані в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Вихідні дані для визначення закону розподілу напрацювання до відмови

№	№ варіанту									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
1	10	195	19	220	68	48	140	15	58	56
2	180	75	10	108	76	20	118	65	24	78
3	32	21	48	190	85	93	145	25	112	71
4	12	222	16	22	95	36	85	32	43	96
5	160	351	12	210	71	57	111	42	68	31
6	18	126	150	130	84	48	111	74	58	44
7	38	114	190	190	79	61	122	55	73	48
8	136	363	74	70	83	85	129	17	102	27
9	20	138	25	98	60	105	137	95	126	41
10	380	45	33	50	88	38	108	121	46	66
11	74	96	37	148	85	48	130	54	58	101
12	204	105	135	64	62	44	95	83	53	125
13	16	147	7	110	77	61	126	20	73	35
14	24	330	9	172	88	59	151	86	71	110
15	32	21	25	166	73	46	132	25	55	86
16	90	195	10	50	94	55	143	78	66	83
17	34	75	56	14	84	94	125	46	113	44
18	360	285	180	130	80	55	135	38	66	56
19	20	285	5	76	57	55	136	80	66	5
20	10	195	17	84	76	74	121	65	89	145
21	20	33	10	112	85	25	155	65	30	69
22	270	18	22	50	94	65	117	7	78	51
23	120	249	6	40	87	72	125	117	86	110
24	74	162	8	12	71	35	115	56	42	58
25	20	315	10	242	70	61	142	45	73	160
26	66	75	45	76	80	57	125	11	68	110
27	50	51	102	130	80	75	148	49	90	38
28	112	114	5	92	92	45	115	38	54	23
29	50	165	56	14	85	39	148	6	47	120
30	44	168	60	90	62	32	145	110	38	97
31	148	60	68	156	79	27	102	105	32	72
32	300	240	16	160	75	74	128	25	89	72
33	14	234	28	34	99	10	137	95	12	61
34	96	135	8	234	98	61	127	35	73	86
35	112	258	37	30	91	46	106	7	55	67
36	56		90		82	75	133		90	25
37	16		80		73	61	135		73	12
38					85	62	133		74	17
39					68	63	132		76	130
40						74			89	

Продовження таблиці 1.1

№	№ варіанту									
	11	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
1	96	210	105	149	146	73	140	63	51	130
2	40	88	119	116	206	60	146	87	15	150
3	186	122	121	135	198	68	116	95	48	118
4	72	118	99	135	190	74	116	74	30	138
5	114	130	95	145	150	70	138	94	36	180
6	96	110	125	107	140	64	148	97	24	136
7	122	114	94	121	256	80	148	86	48	140
8	170	144	135	145	224	69	138	95	168	140
9	210	122	95	155	198	61	136	78	204	150
10	76	96	73	110	250	74	166	55	18	146
11	96	70	103	161	176	85	160	79	168	128
12	88	126	118	156	158	59	182	117	450	122
13	122	170	101	161	210	68	180	89	15	140
14	118	188	103	145	238	91	168	95	99	160
15	92	148	80	121	176	56	126	76	144	116
16	110	148	112	142	250	58	130	105	21	138
17	188	64	85	152	218	70	134	96	270	138
18	110	148	56	85	190	80	118	89	30	148
19	110	54	83	139	112	70	150	64	306	168
20	148	92	94	128	160	65	140	84	135	166
21	50	92	79	172	148	65	170	75	111	130
22	130	186	68	114	136	75	128	96	240	182
23	144	110	109	157	270	58	160	85	66	126
24	70	72	105	125	232	80	130	118	75	160
25	122	40	85	105	170	67	112	106	24	130
26	114	122	88	133	190	70	128	94	57	136
27	150	150	125	133	166	84	140	85	222	120
28	90	90	70	97	250	90	128	108	30	128
29	78	96	88	128	236	69	140	106	405	128
30	64	150	99	130	198	83	122	110	570	170
31	54	96	99	116	170	54	120	104	30	148
32	148	78	95	104	136	65	160	78	111	112
33	20	122	136	94	188	64	130	105	180	108
34	122	114	85	142	242	75	136	106	75	160
35	92	20	125	140	272	63	138	68	84	116
36	150	50	68	137	206	69		94	27	134
37	122	124	116	154	210	64		83	540	130
38	124	122	128	139	202	65		87		140
39	126	116	74	154	170			95		
40	148	76	75		188					

Продовження таблиці 1.1

№	№ варіанту									
	21	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**
1	6	117	11	132	41	29	84	9	35	34
2	108	45	6	65	46	12	71	39	14	47
3	19	13	29	114	51	56	87	15	67	43
4	7	133	10	13	57	22	51	19	26	58
5	96	211	7	126	43	34	67	25	41	19
6	11	76	90	78	50	29	67	44	35	26
7	23	68	114	114	47	37	73	33	44	29
8	82	218	44	42	50	51	77	10	61	16
9	12	83	15	59	36	63	82	57	76	25
10	228	27	20	30	53	23	65	73	28	40
11	44	58	22	89	51	29	78	32	35	61
12	122	63	81	38	37	26	57	50	32	75
13	10	88	4	66	46	37	76	12	44	21
14	14	198	5	103	53	35	91	52	43	66
15	19	13	15	100	44	28	79	15	33	52
16	54	117	6	30	56	33	86	47	40	50
17	20	45	34	8	50	56	75	28	68	26
18	216	171	108	78	48	33	81	23	40	34
19	12	171	3	46	34	33	82	48	40	3
20	6	117	10	50	46	44	73	39	53	87
21	12	20	6	67	51	15	93	39	18	41
22	162	11	13	30	56	39	70	4	47	31
23	72	149	4	24	52	43	75	70	52	66
24	44	97	5	7	43	21	69	34	25	35
25	12	189	6	145	42	37	85	27	44	96
26	40	45	27	46	48	34	75	7	41	66
27	30	31	61	78	48	45	89	29	54	23
28	67	68	3	55	55	27	69	23	32	14
29	30	99	34	8	51	23	89	4	28	72
30	26	101	36	54	37	19	87	66	23	58
31	89	36	41	94	47	16	61	63	19	43
32	180	144	10	96	45	44	77	15	53	43
33	8	140	17	20	59	6	82	57	7	37
34	58	81	5	140	59	37	76	21	44	52
35	67	155	22	18	55	28	64	4	33	40
36	34		54		49	45	80		54	15
37	10		48		44	37	81		44	7
38					51	37	80		44	10
39					41	38	79		46	78
40						44			53	

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2

«Обчислення показників надійності системи без відновлення за надійнісною схемою»

Мета роботи: закріплення вміння визначення ймовірності безвідмовної роботи для системи без відновлення елементів у процесі функціонування.

Теоретичні відомості

Розрізняють три основних види з'єднань елементів в систему: послідовне (основне), паралельне (резервоване) і змішане.

Поділ системи на елементи і вплив відмов елементів на надійність всієї системи відображають структурними схемами надійності. Основною структурною схемою є умовне графічне зображення послідовних і паралельних з'єднань елементів.

Послідовним з'єднанням називається таке з'єднання елементів, при якому відмова хоча б одного елемента призводить до відмови всієї системи (наприклад, елементи приводу) – рисунок 2.1.

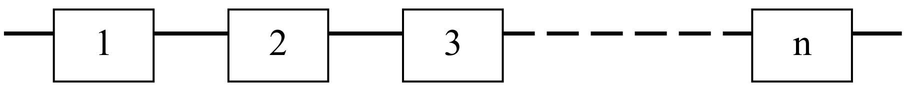


Рисунок 2.1 – Послідовне з'єднання елементів

Паралельним з'єднанням називають таке з'єднання елементів в системі, при якому відмова системи настає тільки тоді, коли відмовлять всі резервні елементи (наприклад, багатодвигунний привід конвертора, візків та ін.) – рисунок 2.2.

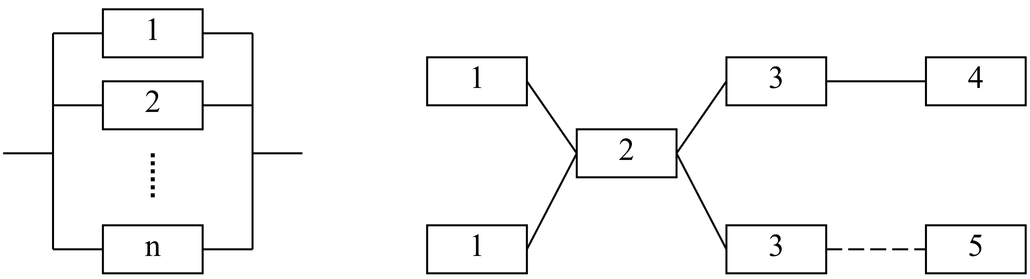


Рисунок 2.2 – Паралельне з'єднання елементів

У деяких випадках система складається з декількох підсистем з основним і резервованим з'єднанням елементів. Такі системи називають системами з комбінованим (змішаним) з'єднанням елементів.

При розрахунку надійності систем з основним з'єднанням елементів вважають, що відмови елементів незалежні. Якщо система складається з n послідовно з'єднаних елементів і відмова будь-якого елемента є випадковою незалежною подією, тоді на основі теореми множення імовірностей, імовірність безвідмовної роботи (надійності) системи протягом часу t дорівнює добутку імовірностей безвідмовної роботи всіх її елементів.

Якщо надійність елементів $p_1, p_2, p_3 \ldots\ldots p_n$, то загальна надійність системи

$$p_c = p_1 p_2 \ldots\ldots p_n = \prod_{i=1}^{n} p_i \;.$$

Так як надійність кожного елемента менше одиниці, то загальна надійність системи менше надійності самого ненадійного елемента. Імовірність безвідмовної роботи $p_c(t)$ системи при збільшенні числа n послідовно з'єднаних рівнонадійних елементів знижується.

При паралельному з'єднанні елементи системи працюють так, що при відмові одного паралельний (резервний) продовжує роботу. Імовірність безвідмовної роботи такої системи обчислюють за ймовірністю відмови системи за час t.

Імовірність відмови системи за час t дорівнює

$$q_c(t) = q_1(t) q_2(t) \ldots\ldots q_n(t) = \prod_{i=1}^{n} q_i(t),$$

а імовірність безвідмовної роботи

$$p_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} q_i(t).$$

При паралельному з'єднанні елементів надійність системи вище надійності складових її резервних елементів, тому таке поєднання є одним із способів підвищення надійності систем.

При розрахунках надійності систем з комбінованим з'єднанням елементів переходять до спрощених блок-схемами, об'єднуючи послідовно і паралельно з'єднані елементи в окремі підсистеми і в підсумку переходячи до системи з послідовним з'єднанням підсистем.

Завдання

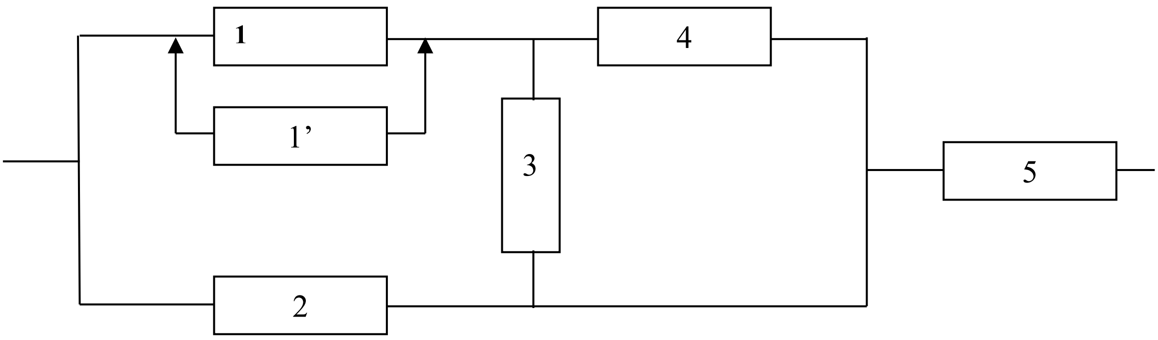
Для системи без відновлення елементів у процесі функціонування визначте ймовірність безвідмовної роботи *p(t)* за час *t* год, та середнє напрацювання на відмову *T*, коли відомо імовірності безвідмовної роботи елементів за цей час. Припустіть, що напрацювання на відмову мають експоненціальний розподіл.

Для системи без відновлення елементів у процесі функціонування визначте ймовірність безвідмовної роботи *P(t)* за час t=10 тис. год., та середній наробіток до відмови *T*, коли відомі ймовірності безвідмовної роботи елементів за цей час:

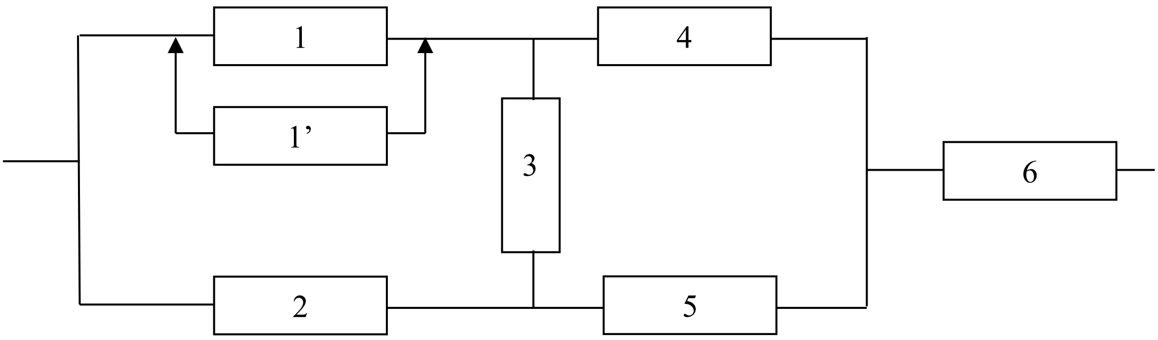
$P_1 = 0{,}5$; $P_2 = 0{,}6$; $P_3 = 0{,}7$; $P_4 = 0{,}8$; $P_5 = 0{,}85$;
$P_6 = 0{,}55$; $P_7 = 0{,}9$; $P_8 = 0{,}9$; $P_9 = 0{,}96$; $P_{10} = 0{,}97$.

Застосуйте задані з варіанту схеми системи.
Зробіть висновки.
Варіанти надійнісних схем мають вигляд :

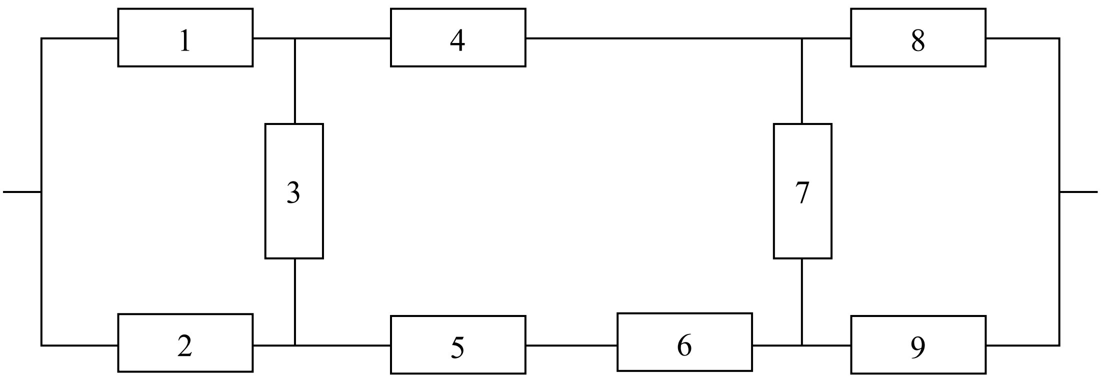
1.



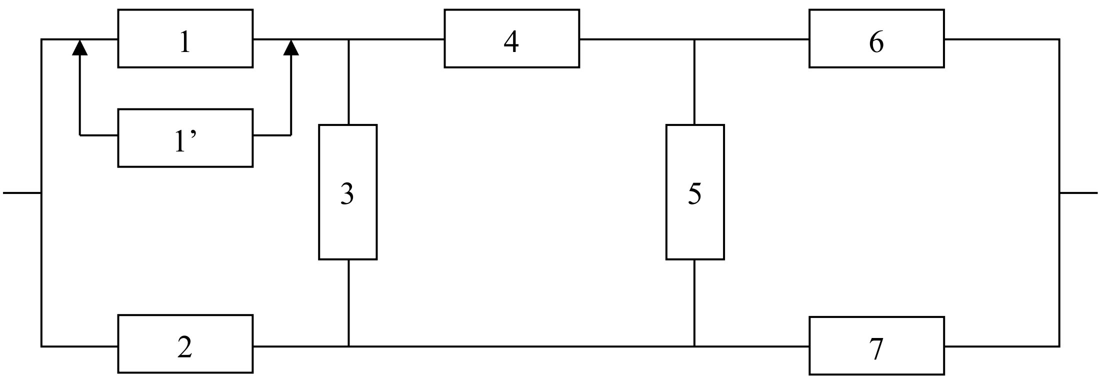
2.



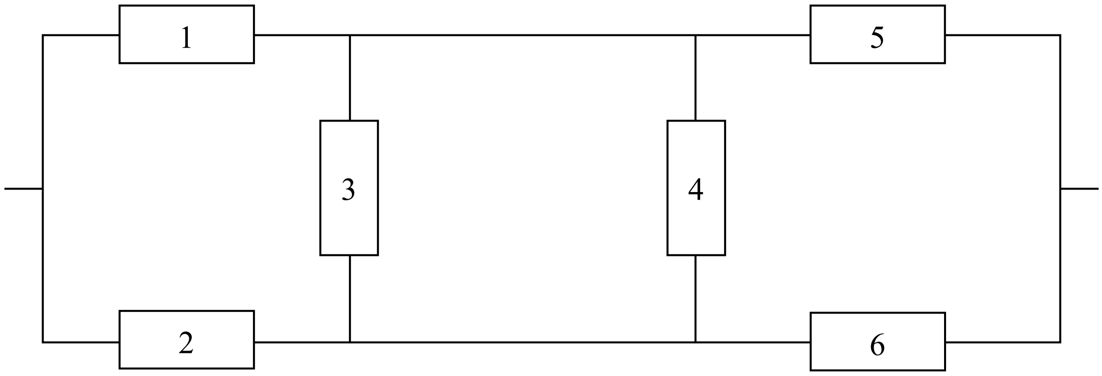
3.



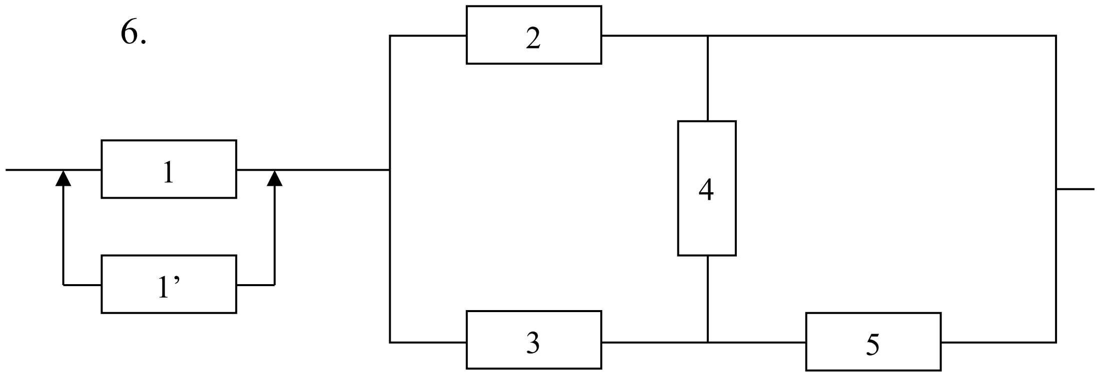
4.



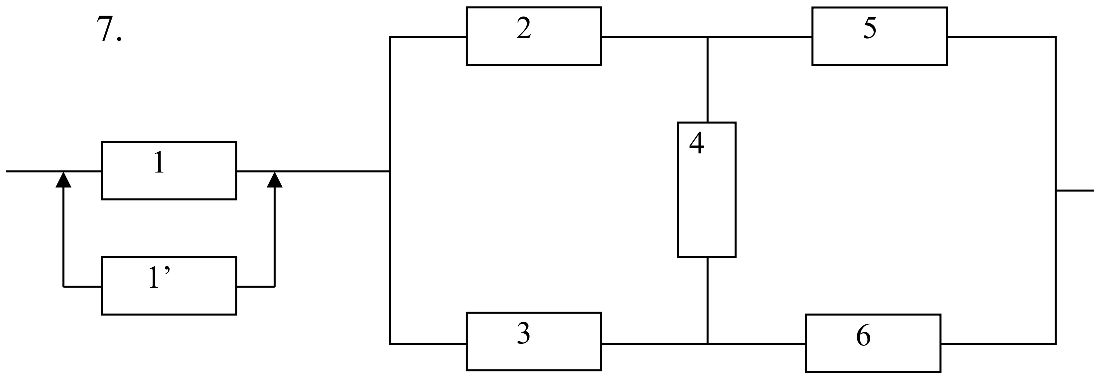
5.



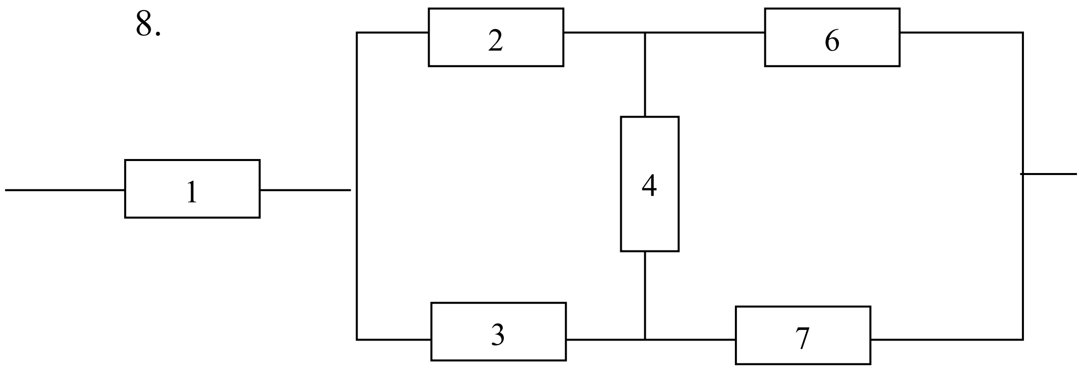
6.



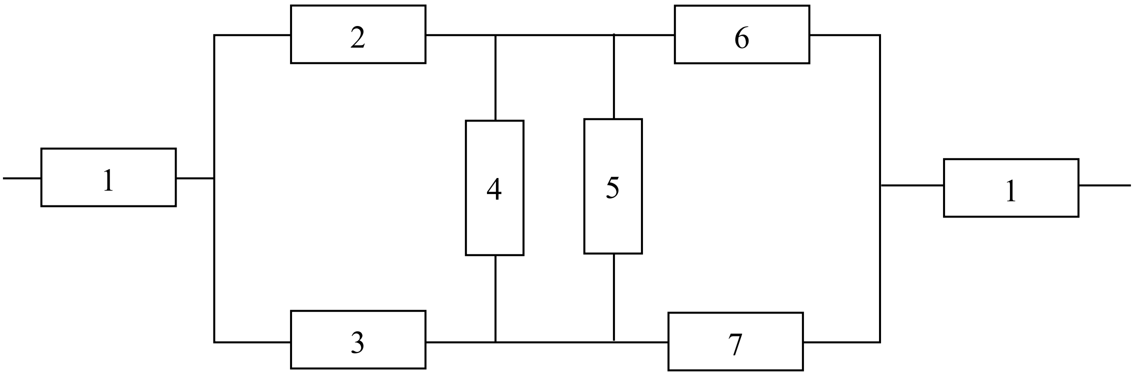
7.



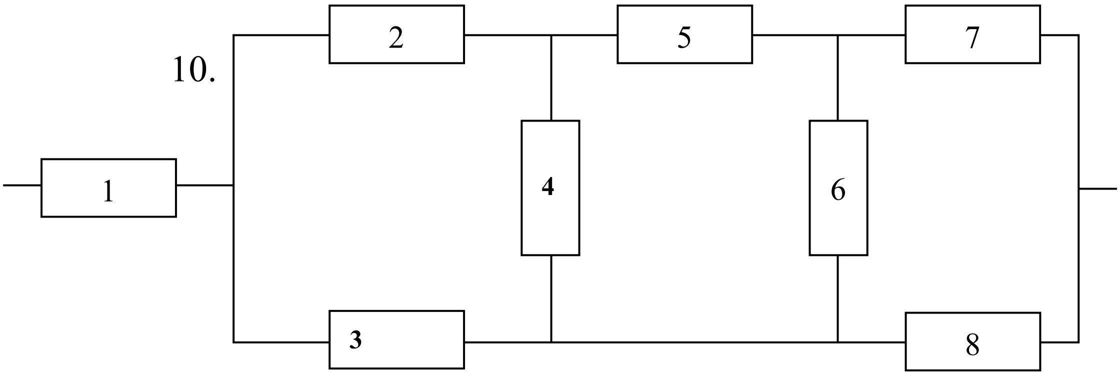
8.



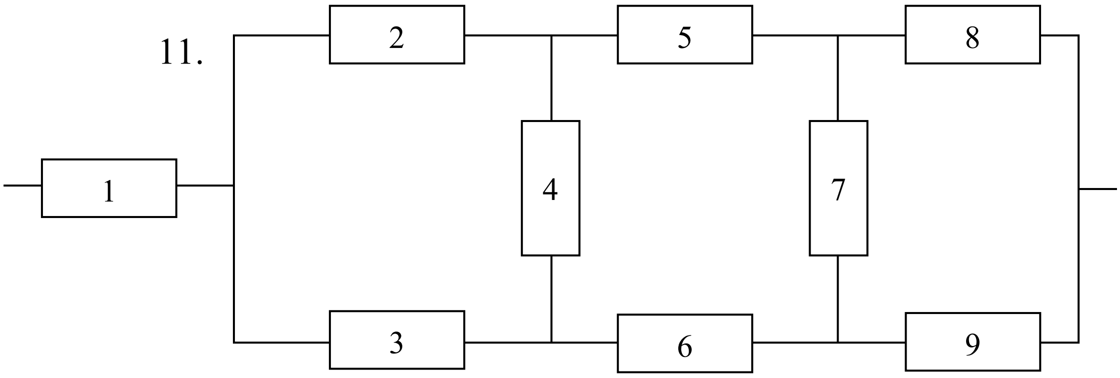
9.



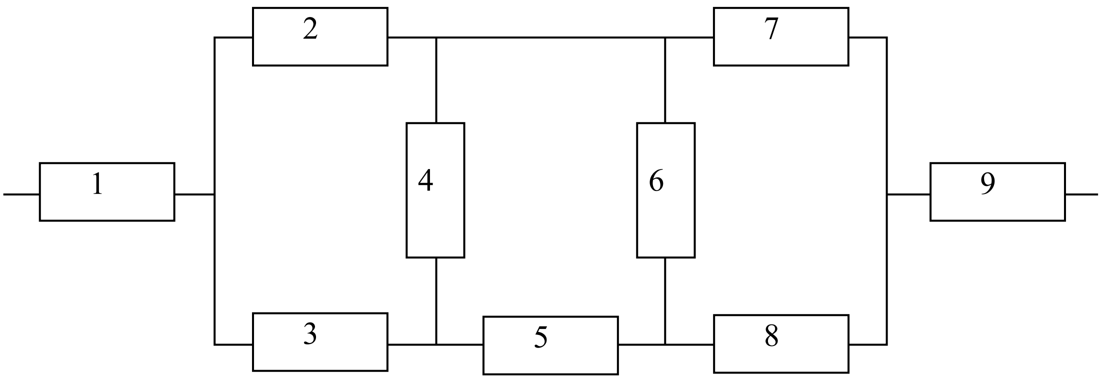
10.



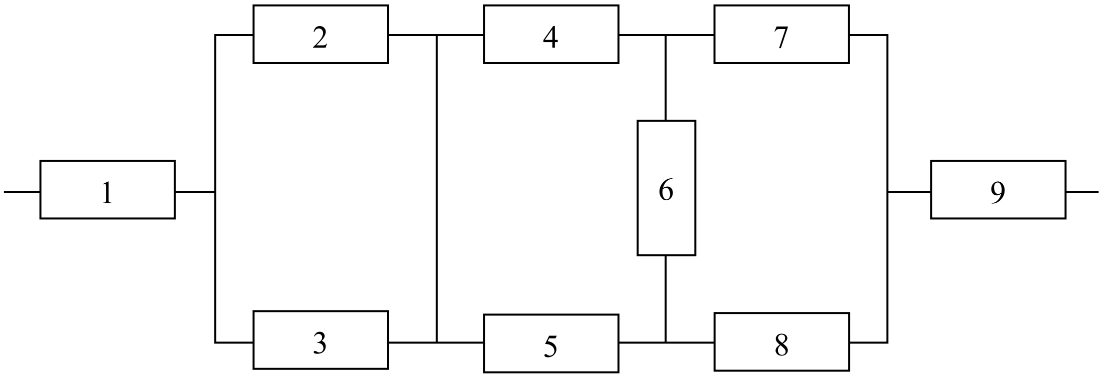
11.



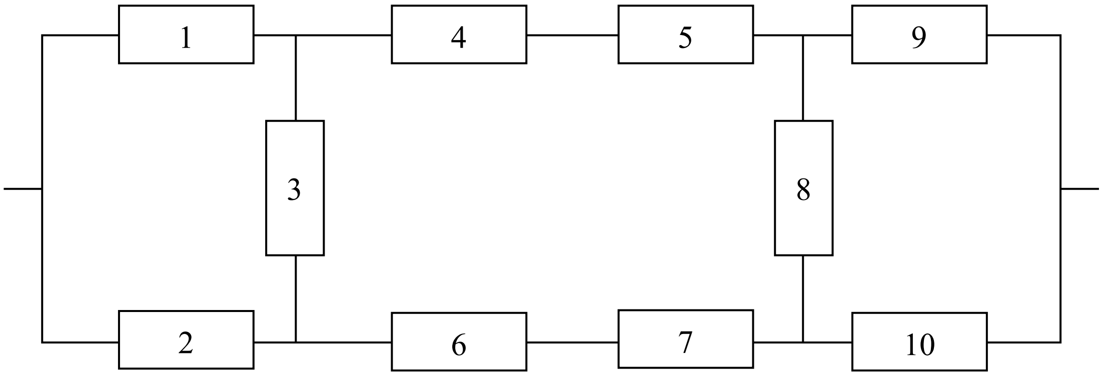
12.



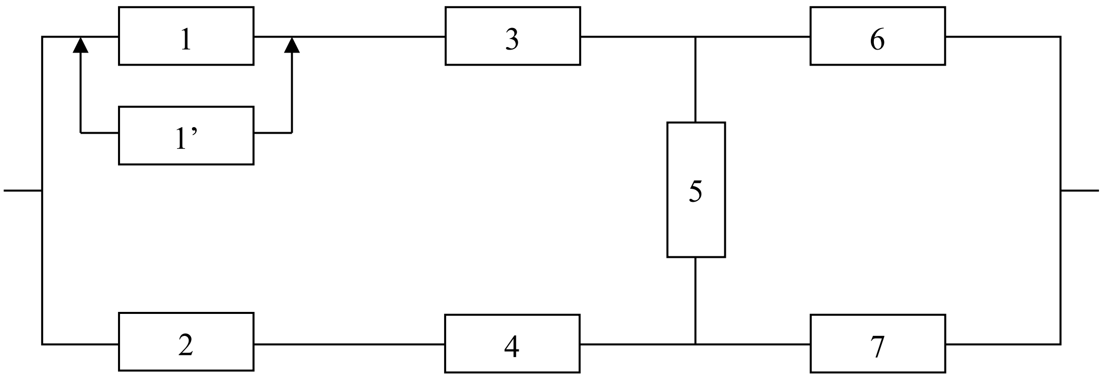
13.



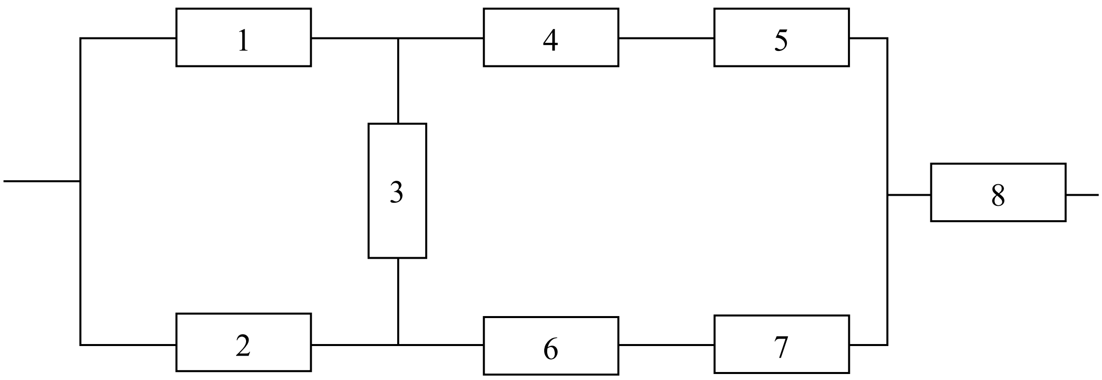
14.



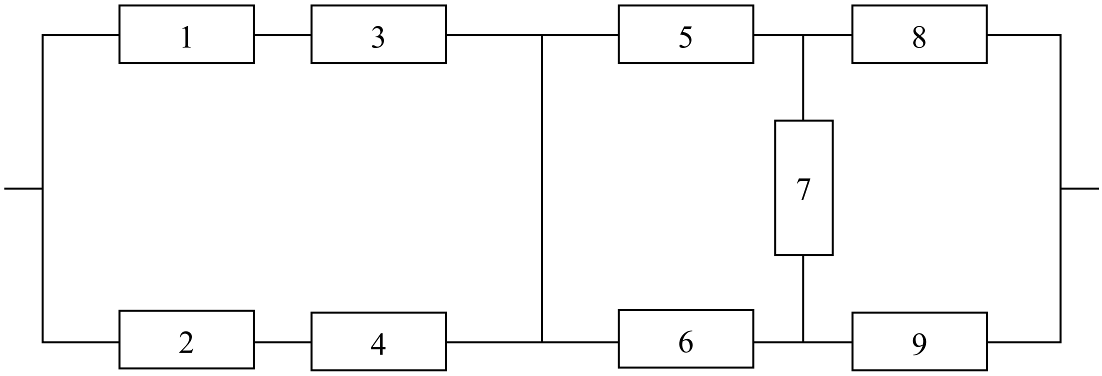
15.



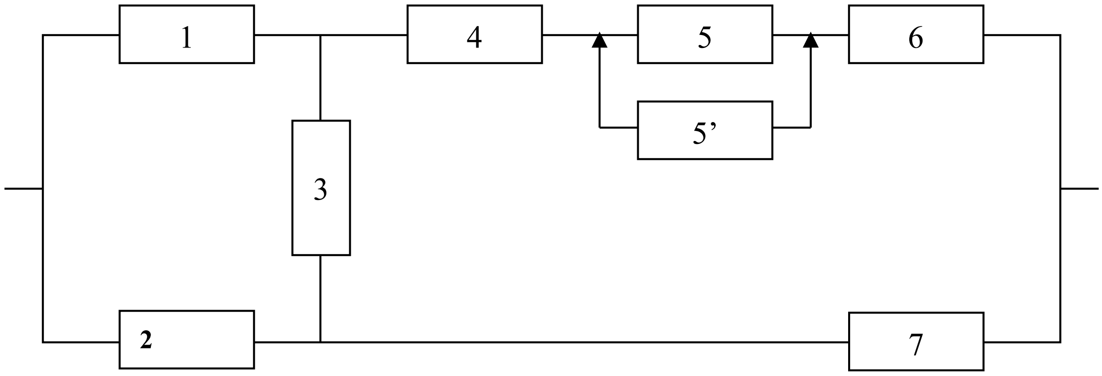
16.



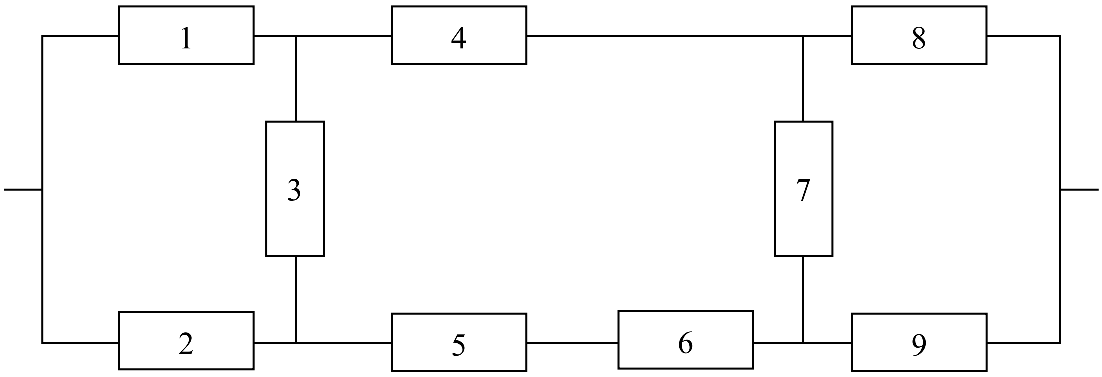
17.



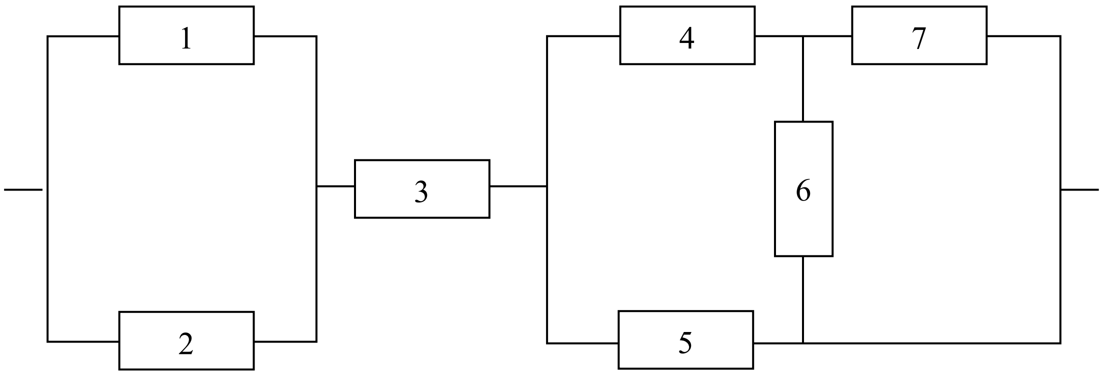
18.



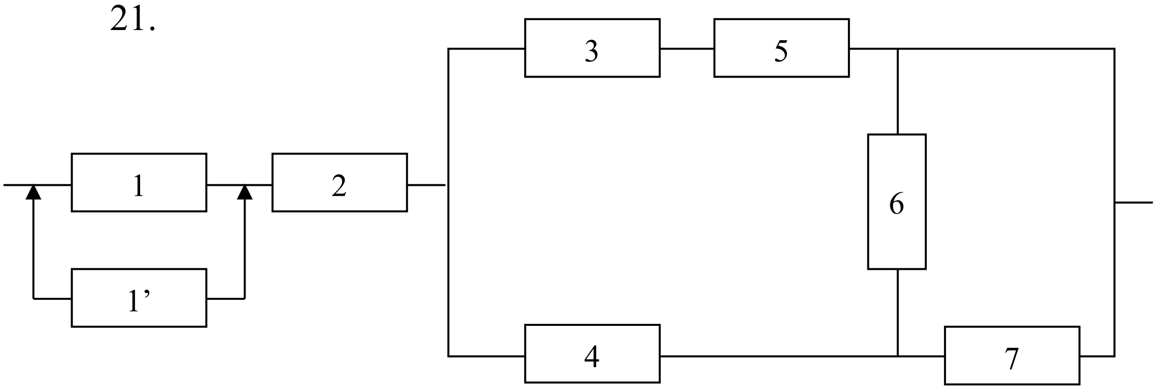
19



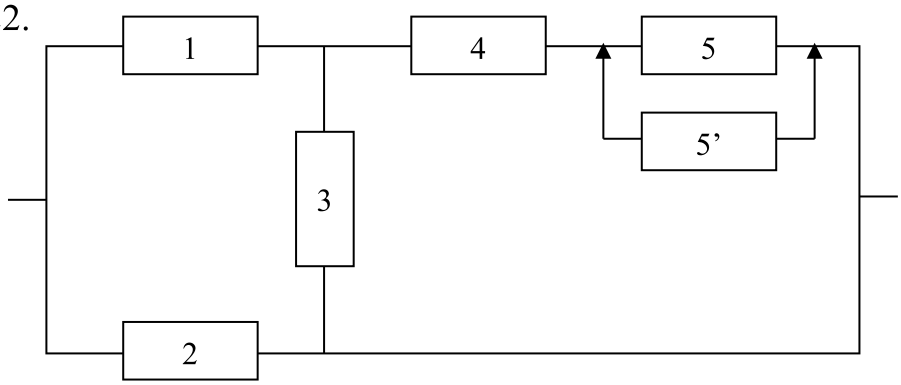
20.



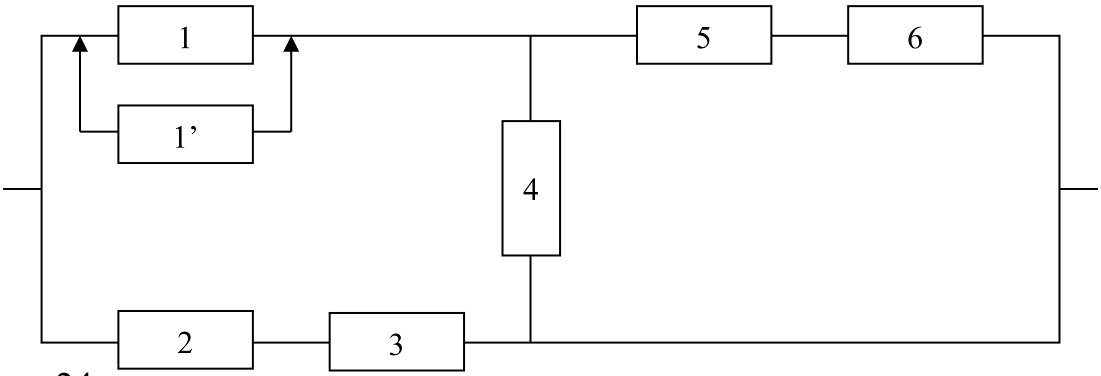
21.



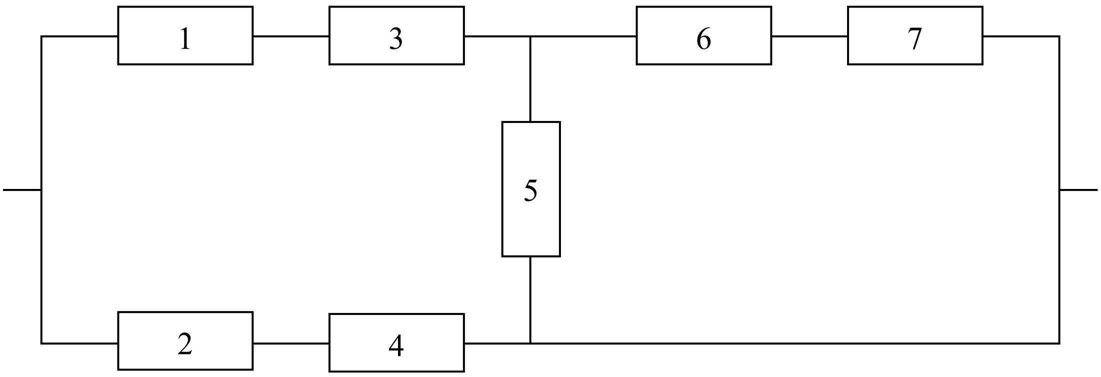
22.



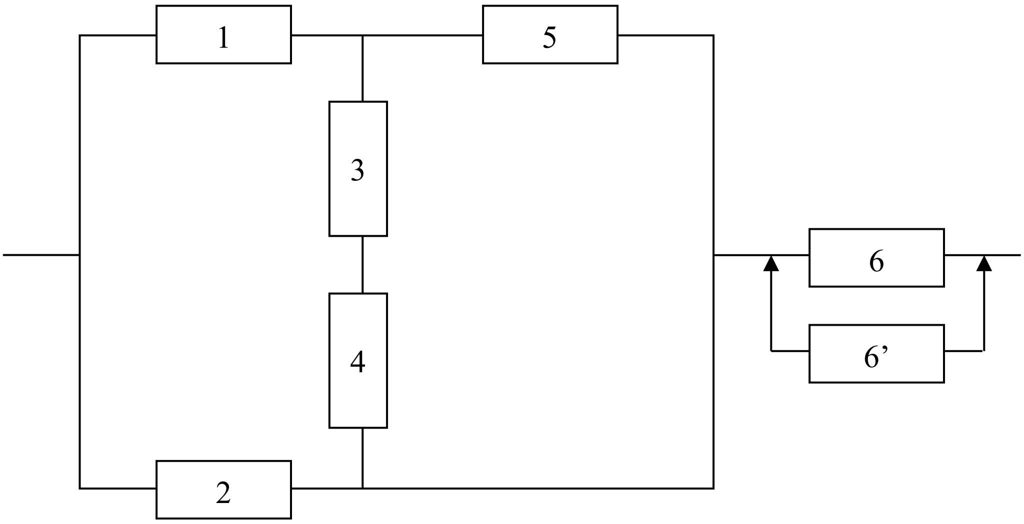
23.



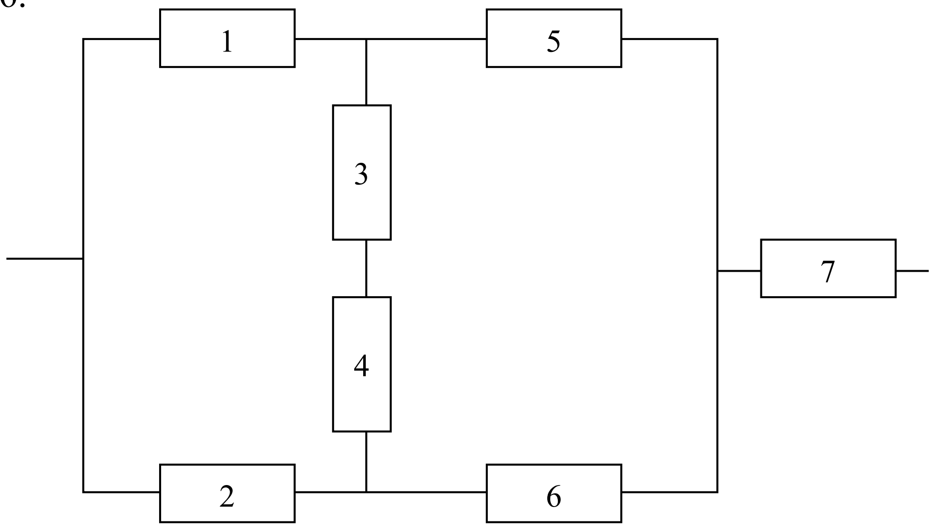
24.



25.



26.



ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3
«Дослідження безвідмовності технічного об'єкту»

Завдання

Для дослідження безвідмовності електронного пристрою проводились спостереження технічного стану 20 однотипних зразків цього виробу в процесі їх використання. В результаті отримано дані про те, яка кількість досліджених зразків залишилось в працездатному стані на момент часу t_i $(i = 0, 2, ..., 10)$. Дані надані в таблиці 1.

Вони потребують:

1) обчислити значення оцінки ймовірності безвідмовної роботи пристрою на момент часу t_i;

2) обчислити значення оцінки ймовірності його відмови на моменти часу t_i;

3) відмітити на графіку значення $p^*(t_i)$;

4) інтерполювати (згладити) отримані точки $p^*(t_i)$ за допомогою кривої, яка відповідає аналітичній залежності $p(t) = e^{-\lambda t}$ (для інтерполяції значень $p^*(t_i)$ слід використовувати відповідне програмне забезпечення);

5) обчислити інтенсивність відмови і середнє напрацювання до відмови дослідженого пристрою, вважаючи, що ймовірність його безвідмовної роботи відповідає експоненціальному розподілу.

Теоретичні відомості

Показники безвідмовності

Ймовірність безвідмовної роботи - ймовірність того, що в межах заданого наробітку відмова об'єкта не виникне. Якщо визначити через ξ - наробіток до відмови, то ймовірність безвідмовної роботи $P(t) = P(\xi \geq t)$ (її ще називають функцією надійності).

Середній наробіток до відмови - математичне сподівання наробітку об’єкта до першої відмови, тобто $T = M\xi$.

Ймовірність відмови (за час t) - ймовірність того, що наробіток до відмови буде меншим часу t, тобто $Q(t) = 1 - P(t) = P(\xi<t)$ (її ще називають функцією ненадійності).

Щільність розподілу часу безвідмовної роботи:

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}.$$

Інтенсивність відмов - умовна щільність ймовірності виникнення відмови об'єкта, за умови, що відмова не виникла до часу, що розглядається.

Очевидно: $$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)},$$

$$\lambda(t)\Delta t = \frac{f(t)\Delta t}{P(t)} \approx P(t \leq \xi \leq t + \Delta t / \xi \geq t).$$

З того, що $\lambda(t)dt = -\dfrac{dP(t)}{P(t)}$, маємо $P(t) = Ce^{-\int_0^t \lambda(u)du}$.

Так, зазвичай вважають $P(0)=1$, то $C=1$ і $P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(u)du}$.

Середній наробіток до відмови можна знайти за ймовірністю безвідмовної роботи за формулою:

$$T = \int_0^\infty P(t)dt.$$

Хід роботи

1. Візьміть з таблиці 3.1 вихідні дані для дослідження і розрахунку відповідного варіанту.
2. Оформіть результати обчислень у вигляді таблиці 3.2.
3. Побудуйте в одній координатній площині за допомогою програмного засобу графічні залежності $p^*(t_i)$ та $p(t)$.
4. Обчисліть значення інтенсивності відмов технічного об’єкту.
5. Знайдіть результат середнього часу до відмови дослідженого пристрою.
6. Порівняйте значення оцінки $p^*(t_i)$ з відповідними значеннями $p(t)$ і оформити у звіті висновки про адекватність застосування експоненціальної моделі для дослідження безвідмовності пристрою.

Таблиця 3.1 - Вихідні дані для дослідження

Номер значення часу i	Значення часу t_i, мес	Значення $N(t_i)$ - кількість працездатних об'єктів у момент часу t_i, шт.														
		№ варіанта														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
1	10	11	14	15	16	16	17	17	18	18	18	18	18	19	19	19
2	20	6	9	11	12	14	15	15	16	16	16	17	17	17	17	17
3	30	3	6	8	10	12	12	13	14	15	15	15	16	16	16	16
4	40	2	4	6	7	10	11	11	13	13	13	14	14	15	15	16
5	50	1	3	5	6	8	9	10	11	12	12	13	14	14	14	14
6	60	1	2	3	4	7	8	9	10	10	11	12	12	13	13	14
7	70	0	1	2	4	6	6	8	9	10	10	11	12	12	12	13
8	80	0	1	2	3	5	6	7	8	9	9	10	10	11	11	12
9	90	0	1	1	2	4	5	6	7	8	8	9	10	10	11	11
10	100	0	0	1	2	3	4	5	6	7	7	8	9	10	10	10

Продовження таблиці 3.1

Номер значення часу i	Значення часу t_i, мес	Значення $N(t_i)$ - кількість працездатних об'єктів у момент часу t_i, шт.														
		№ варіанта														
		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
1	10	11	14	15	16	16	17	17	18	18	18	18	18	19	19	19
2	20	5	8	11	12	14	15	15	16	16	16	17	17	17	17	17
3	30	3	6	8	10	12	12	13	14	15	15	15	16	16	16	16
4	40	2	4	6	7	10	11	11	13	13	13	14	14	15	15	16
5	50	1	3	5	6	8	9	10	11	12	12	13	14	14	14	14
6	60	1	2	3	4	7	8	9	10	10	11	12	12	13	13	14
7	70	0	1	2	4	6	6	8	9	10	10	11	12	12	12	13
8	80	0	1	2	3	5	6	7	8	9	9	10	10	11	11	12
9	90	0	1	1	2	4	5	6	7	8	8	9	10	10	11	11
10	100	0	0	1	2	3	4	5	6	7	7	8	9	10	10	10

Таблиця 3.2 - Результати дослідження

t_i, міс	$N(t_i)$, шт.	$p^*(t_i)$	$q^*(t_i)$	t, міс	$p(t)$
0				0	
10				10	
20				20	
30				30	
40				40	
50				50	
60				60	
70				70	
80				80	
90				90	
100				100	

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4
«Дослідження ремонтопридатності технічного об'єкту»

Завдання

Для дослідження ремонтопридатності електронного пристрою проводились спостереження за відновленням ремонтопридатності 20 однотипних зразків цього виробу. В результаті отримані дані протягом якого часу T_k був відновлений кожний пристрій ($k = 0, 2, ..., 10$ – порядковий номер пристрою). Ці дані надані в табл.1. Дефіс (-) у таблиці 1 відповідає ситуації, при якій за час спостереження об’єкт не був відновлений.

Потрібно:

1) скласти схему алгоритму визначення величин $N_в(t_i)$ – кількості відновлених об’єктів на момент часу t_i $(i = 0, 2, ..., 10)$;

2) на основі складеного алгоритму програмно реалізувати отримання величин $N_в(t_i)$;

3) обчислити величини $\nu^*(t_i)$– значення оцінки ймовірності відновлення пристрою в моменти часу t_i;

4) обчислити величини $u^*(t) = 1 - \nu^*(t_j)$ - значення оцінки ймовірності не відновлення цього пристрою в моменти часу t_i;

5) відмітити на графіку значення $u^*(t)$;

6) інтерполювати (сгладити) отримані точки пристрою в моменти часу пристрою в моменти часу $u^*(t)$ за допомогою кривої, відповідно аналітичної залежності $u(t) = e^{-\mu t}$ (для інтерполяції значень $p^*(t_i)$ слід використовувати відповідне програмне забезпечення);

7) визначити інтенсивність відновлення і середній час відновлення дослідженого пристрою, якщо ймовірні характеристики його ремонтопридатності підпорядковуються експоненціальному розподіленню.

Теоретичні відомості

Надійність визначають як властивість об'єкта зберігати у часі у встановлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати необхідні функції у заданих режимах і умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання і транспортування.

Надійність є комплексною властивістю, що містить властивості безвідмовності, ремонтопридатності, довговічності і збереження

Безвідмовність – властивість об'єкта безперервно зберігати працездатний стан протягом деякого часу або напрацювання.

Ремонтопридатність – властивість об'єкта, що полягає у пристосовуваності до підтримання і відновлення працездатного стану шляхом технічного обслуговування і ремонту.

Довговічність – властивість об'єкта зберігати працездатний стан до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту.

Збережуваність – властивість об'єкта зберігати в заданих межах значення параметрів, які характеризують здатність об'єкта виконувати необхідні функції протягом і після зберігання або транспортування.

Розрізняють різні події, які відбуваються з об'єктом (системою) у процесі функціонування.

Показники ремонтопридатності

Імовірність відновлення – імовірність того, що тривалість відновлення працездатного стану об'єкта не перевищить задане значення. Якщо визначити θ — тривалість відновлення, то ймовірність відновлення (за термін t):

$$G(t)=P(\theta<t)\ .$$

Середня тривалість відновлення – математичне сподівання тривалості відновлення працездатного стану об'єкта після відмови:

$$\mathrm{T_B} = M\theta = \int_0^{\infty}[1-G(\mathrm{t})]dt.$$

Імовірність невідновлення (за заданий термін):

$$\overline{G}(\mathrm{t}) = 1 - G(\mathrm{t}) = P(\theta \ge t).$$

Щільність імовірності часу відновлення:

$$g(t) = \frac{dG(t)}{dt}.$$

Інтенсивність відновлення – умовна щільність імовірності відновлення працездатності об'єкта, визначена для моменту часу за умови, що до цього моменту відновлення не було завершено:

$$\mu(t) = \frac{g(t)}{1-G(t)}.$$

Аналогічно ймовірності безвідмовної роботи можна показати, що

$$\overline{G}(t) = e^{-\int_0^t \mu(u)du}.$$

Хід роботи

1. Візьміть з таблиці 1 вихідні дані для дослідження і розрахунку відповідного варіанту.
2. З'ясуйте схему алгоритму обчислення значень $N_в(t_i)$.
3. Оформіть результати обчислень у вигляді таблиці 2.
4. Побудуйте в одній координатній площині графічні залежності $u^*(t_i)$ та $u(t)$.
5. Обчисліть значення інтенсивності відновлення технічного об'єкту.

6. Знайдіть результат середнього часу відновлення дослідженого пристрою.

7. Порівняти значення оцінки $u^*(t_i)$ з відповідними значеннями $u(t)$ і оформити у звіті висновки про адекватність використання експоненціальної моделі для дослідження ремонтопридатності пристрою.

Таблиця 4.1 - Вихідні дані для дослідження

Номер об'єкту k	№ варіанта														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Значення T_k - час до відновлення об'єкту номер k, год														
1	50	-	80	10	60	10	-	10	10	40	20	10	10	20	10
2	-	60	10	100	50	10	-	50	-	50	10	30	30	10	20
3	30	-	90	-	7	30	100	30	90	10	80	10	40	20	20
4	90	10	-	80	-	80	30	-	10	90	90	40	10	30	70
5	10	-	20	-	10	-	-	-	10	-	10	20	10	40	10
6	-	20	-	10	-	20	80	40	80	10	70	60	20	10	10
7	-	50	-	40	-	20	10	50	30	100	-	20	60	50	20
8	20	-	30	-	40	90	20	10	-	-	20	10	50	60	10
9	-	20	-	60	-	-	40	-	20	30	10	10	20	20	30
10	70	-	40	-	20	40	-	60	70	50	100	80	30	30	30
11	80	100	-	80	-	-	10	20	-	-	30	40	60	10	10
12	50	-	20	-	10	100	20	70	10	30	-	90	20	40	20
13	20	-	50	20	-	-	-	30	20	60	10	40	-	30	50
14	-	30	-	-	30	60	90	20	-	10	60	20	70	70	10
15	-	-	60	60	30	-	-	80	40	70	-	60	40	10	40
16	-	40	-	-	100	60	40	-	-	20	30	-	10	20	10
17	-	-	70	-	-	-	50	100	50	20	50	20	90	10	30
18	-	-	-	40	80	-	30	-	30	-	50	-	30	100	10
19	-	70	-	-	90	50	-	90	60	30	40	50	20	10	20
20	100	0	-	30	-	40	60	-	40	70	40	30	10	20	10

Продовження таблиці 4.1

Номер об'єкту k	№ варіанта														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	Значення T_k - час до відновлення об'єкту номер k, год														
1	20	10	10	20	10	10	-	10	10	40	20	10	10	20	10
2	10	30	30	10	20	10	-	50	-	50	10	30	30	10	20
3	80	10	40	20	20	30	100	30	90	10	80	10	40	20	20
4	90	40	10	30	70	80	30	-	10	90	90	40	10	30	70
5	10	20	10	40	10	-	-	-	10	-	10	20	10	40	10
6	70	60	20	10	10	20	80	40	80	10	70	60	20	10	10
7	-	20	60	50	20	20	10	50	30	100	-	20	60	50	20
8	20	10	50	60	10	90	20	10	-	-	20	10	50	60	10
9	10	10	20	20	30	-	40	-	20	30	10	10	20	20	30
10	100	80	30	30	30	40	-	60	70	50	100	80	30	30	30
11	30	40	60	10	10	-	10	20	-	-	30	40	60	10	10
12	-	90	20	40	20	100	20	70	10	30	-	90	20	40	20
13	10	40	-	30	50	-	-	30	20	60	10	40	-	30	50
14	60	20	70	70	10	60	90	20	-	10	60	20	70	70	10
15	-	60	40	10	40	-	-	80	40	70	-	60	40	10	40
16	30	-	10	20	10	60	40	-	-	20	30	-	10	20	10
17	50	20	90	10	30	-	50	100	50	20	50	20	90	10	30
18	50	-	30	100	10	-	30	-	30	-	50	-	30	100	10
19	40	50	20	10	20	50	-	90	60	30	40	50	20	10	20
20	40	30	10	20	10	40	60	-	40	70	40	30	10	20	10

Таблиця 4.2 - Результати дослідження

t_i, міс	$N(t_i)$, шт.	$p^*(t_i)$	$q^*(t_i)$	t, міс.	$p(t)$
0				0	
10				10	
20				20	
30				30	
40				40	
50				50	
60				60	
70				70	
80				80	
90				90	
100				100	

Практична робота № 5

«Розрахунок середнього часу життя резервованої системи»

Мета роботи: закріплення вміння визначення середнього часу життя системи за відомими значеннями інтенсивності її відмов.

Теоретичні відомості

У цій лабораторній роботі розглядається найпростіша модель резервування. Є основний прилад і один або два резервних прилади. При виході з ладу основного приладу він замінюється резервним і так до тих пір, поки всі прилади не вийдуть з ладу. Цей момент означає, що система втратила працездатність. Один з основних питань теорії резервування - надійність систем. Надійність можна оцінити, наприклад, математичним очікуванням часу життя системи (періоду працездатності), ймовірністю працездатності системи в даний момент часу.

Позначимо:

λ_1 - інтенсивність відмов основного приладу, а також резервного після моменту заміни їм основного приладу.

λ_2 - інтенсивність відмов першого резервного приладу;

λ_3 - інтенсивність відмов другого резервного приладу.

Резервний прилад може перебувати:

- в навантаженому стані -$\lambda_k = \lambda_1$;
- в полегшеному резерві - $0 < \lambda_k < \lambda_1$;
- в ненавантаженому стані - $\lambda_k = 0$.

Позначимо через $p_k(t)$ ймовірність того, що в момент часу t в системі є k приладів (функціонуючий прилад плюс резервні прилади).

Роздільна система має ланцюговий характер:

$$\begin{cases} p_3'(t) + (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)p_3(t) = 0, \\ p_2'(t) + (\lambda_1 + \lambda_2)p_2(t) = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)p_3(t), \\ p_1'(t) + \lambda_1 p_1(t) = (\lambda_1 + \lambda_2)p_2(t), \\ p_0(t) = 1 - p_3(t) - p_2(t) - p_1(t). \end{cases} \qquad \left| \begin{array}{l} p_3(0) = 1, \\ p_k(0) = 0, \\ (k < 3). \end{array} \right.$$

(5.1)

Якщо резервний прилад всього один, то система стає простіше:

$$\begin{cases} p_2'(t) + (\lambda_1 + \lambda_2)p_2(t) = 0, \\ p_1'(t) + \lambda_1 p_1(t) = (\lambda_1 + \lambda_2)p_2(t), \\ p_0(t) = 1 - p_2(t) - p_1(t). \end{cases} \qquad \left| \begin{array}{l} p_2(0) = 1, \\ p_k(0) = 0, \\ (k < 2). \end{array} \right.$$

Вирішивши систему рівнянь, можна знайти основні параметри:

$1 - p_0(t)$ – ймовірність робочого стану в момент часу t,

$\int_0^{\infty} t p_0'(t)dt$ – математичне очікування часу життя.

Хід практичної роботи

Надана система, що складається з трьох пристроїв - одного основного і двох резервних. Вказані інтенсивності відмов в одиницю часу кожного з пристроїв: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$. Вважається, що резервні пристрої знаходяться в навантаженому режимі. На першому етапі в роботі системи беруть участь 3 пристрої, тому інтенсивність відмов в системі дорівнює $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$. Після виходу з ладу будь-якого з цих пристроїв наступає другий етап життя системи - одне з решти пристроїв стає основним з інтенсивністю відмов λ_1 , а друге - першим резервним з інтенсивністю відмов λ_2. Тому на другому етапі інтенсивність відмов в системі дорівнює $\lambda_1 + \lambda_2$. На третьому етапі в системі залишається єдиний пристрій, включається в роботу в якості основного, отже інтенсивність відмов в системі дорівнює λ_1.

Виберіть значення з таблиці 5.1, для яких виконайте наступні завдання:

Таблиця 5.1 – Варіанти завдань

Варіант	λ_1	λ_2	λ_3
1	4	2	1
2	2	2	0
3	1	1	0
4	2	0	0
5	6	2	2
6	5	3	2
7	2	1	1
8	3	2	1
9	3	1	0
10	0.5	0	0
11	1	0.5	0
12	0.2	0.1	0
13	0.2	0.2	0.1
14	0.1	0.1	0
15	0.1	0.05	0.05

Варіант	λ_1	λ_2	λ_3
16	0.4	0.2	0.2
17	0.3	0.3	0.3
18	2	1	0
19	2	1	0.5
20	0.5	0.5	0
21	1	1	1
22	0.1	0.1	0.1
23	0.05	0	0
24	0.2	0.1	0.1
25	1	0.2	0
26	0.6	0.3	0.1
27	0.4	0.2	0.1
28	0.3	0.1	0
29	0.1	0	0
30	0.3	0.2	0.1

1. Складіть систему диференціальних рівнянь, що описує вірогідність станів системи: $p_k(t)$ – ймовірність того, що в момент часу **t** в системі працездатні **k** пристроїв.

2. Знайдіть аналітичне рішення задачі Коші, побудуйте графіки функцій $p_k(t)$ на інтервалі $[0;b]$, де $b=\frac{2}{\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3}+\frac{2}{\lambda_1+\lambda_2}+\frac{2}{\lambda_1}$. Ймовірності обчислюйте з точністю до сотих.

3. Знайдіть формули для функцій:

$n(t)$ - математичне очікування числа працездатних пристроїв в системі в момент часу t;

$m(t)$ - математичне очікування числа відмов пристроїв в системі в момент часу t.

4. Побудуйте графіки функцій $n(t)$, $m(t)$ на интервалі $[0;b]$. Значення n, m обчислюйте з точністю до десятих.

3. Обчисліть середній час життя системи.

Приклад оформлення практичної роботи

Резервується відповідальний вузол (пристрій) деякого агрегату, системи. Частота відмов основного пристрою - 2 (в од. часу). Є два резервних пристрої: один в полегшеному резерві, з частотою відмов 1 (в од. часу), а друге резервне - в ненавантаженому стані. Після відмови будь-якого з пристроїв одне з двох, що залишилися буде функціонувати як основне, а інше буде в полегшеному резерві. Пристрій, що залишився потім на самоті, функціонує як основний. При виході з ладу і цього пристрою вважається, що даний агрегат припинив своє існування (працездатність). Обчислити середній час функціонування агрегату (до виходу з ладу).

В даному випадку маємо**:** $\lambda_1=2$, $\lambda_2=1$, $\lambda_3=0$. Запишемо з цими параметрами систему рівнянь (5.1)**:**

$$\begin{cases} p_3'(t)+3p_3(t)=0, \\ p_2'(t)+3p_2(t)=3p_3(t), \\ p_1'(t)+2p_1(t)=3p_2(t), \\ p_0(t)=1-p_3(t)-p_2(t)-p_1(t). \end{cases} \qquad \begin{aligned} &p_3(0)=1, \\ &p_k(0)=0, \\ &(k<3). \end{aligned}$$

1) З урахуванням початкової умови $p_3(t)=e^{-3t}$.

2) Друге рівняння $p_2'(t)+3p_2(t)=3e^{-3t}$ має резонансну праву частину і частотне рішення**:** $p_2(t)=3te^{-3t}$.

3) Вирішивши третє рівняння системи $p_1'(t)+2p_1(t)=9te^{-3t}$, отримаємо **:**

$$p_1(t)=9\left(e^{-2t}-(t+1)e^{-3t}\right).$$

4) Знаходимо ймовірність втрати працездатності агрегату**:**

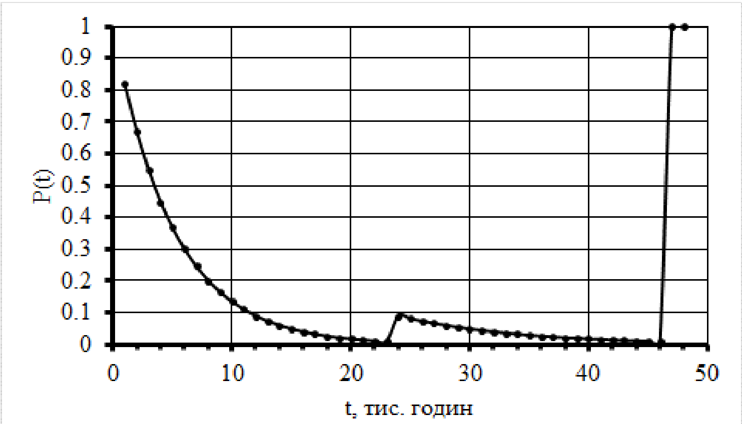
$$p_0(t)=1-p_1(t)-p_2(t)-p_3(t)=1-9e^{-2t}+(6t+8)e^{-3t}.$$

<u>*Примітка.*</u> $p_0(t)$ *має бути монотонно зростаючою функцією. Перевіримо отримане рішення на монотонне зростання:*

$$p_0'(t) = 18e^{-2t} - 18(t+1)e^{-3t} = 18e^{-3t}\left(e^t - t - 1\right) > 0.$$

5) Обчислимо математичне очікування часу виходу з ладу останнього пристрою (середній час життя досліджуваного об'єкта):

$$M[\tau] = \int_0^\infty t p_0'(t)dt = 18\int_0^\infty \left(te^{-2t} - \left(t^2 + t\right)e^{-3t}\right)dt = 18\left(\frac{1}{4} - \left(\frac{2}{27} + \frac{1}{9}\right)\right) = \frac{7}{6}.$$



Висновок. порівняємо $M[\tau] = \frac{7}{6}$ з роботою вузла без резервування:

$$M[\tau] = \int_0^\infty te^{-2t}dt = \frac{1}{2}.$$

Резервування збільшило середній час життя в 2,33 рази.

Індивідуальні завдання

Самостійно розглянути теоретичні питання з наступних тем:

1. Довговічність і строк служби обладнання і машин
2. Надійність і жорсткість конструкції
3. Маса і металомісткість конструкції, способи їх зниження
4. Економічні основи створення обладнання
5. Конструктивна уніфікація і універсалізація машин
6. Метод комплексної оцінки технічного рівня машин
7. Визначення напрямків удосконалення обладнання

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1 Залужний А. М. Надійність та діагностика технічних систем:навч. посібник .-Житомир:ЖІТІ,2002 .-356 с.

2 Канарчук В. Є., Полянський С. К., Дмитрієв М. М. Надійність машин:підручник .-К.:Либідь,2003 .-424 с.

3 Локазюк В. М., Савченко Ю. Г. Надійність, контроль, діагностика і модернізація ПК:посібник/за ред. В. М. Локазюка .-К:Академія,2004 .-376 с.

4. Ухов О. В., Кнюх О. Б. Монтаж, експлуатація та ремонт підйомно-транспортних машин. – 171с.

5 Седуш В. Я. Надійність, ремонт і монтаж металургійних машин: підручник .-4-те вид., перероб. та доп.-Донецьк:Юго-Восток,2008 .-379 с.-978-966-374-255-7

6 ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення. - К.: Держстандарт України, 1994. - 36 с.