

## 4. Лабораторна робота №4

**Тема:** дослідження надійності систем.

**Мета роботи:** навчитися визначати надійність систем із змішаним з'єднанням елементів, а також систем з постійно навантаженим резервом.

### 4.1 Хід роботи

Методика досліджень надійності систем.

Необхідно привести наявну змішану систему до приведеної системи з послідовно сполученими елементами. Після приведення (спрощення) система повинна мати вигляд послідовно з'єднаних елементів, наприклад приведених як на рисунку (Рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Приведена система

Ймовірність безвідмовної роботи такої послідовно з'єднаної системи:

$$P_{\text{сист.}} = \prod_{i=1}^N P_i = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5, \quad (4.1)$$

де:  $P_i$  – ймовірності безвідмовної роботи елементів системи.

Час напрацювання такої послідовно з'єднаної системи до відмови визначається як:

$$T_{\text{сист.}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{T_i}} = \frac{1}{\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3} + \frac{1}{T_4} + \frac{1}{T_5}}, \quad (4.2)$$

де:  $T_i$  – ймовірності напрацювання на час елементів системи.

Досліджуємо блок “А”:

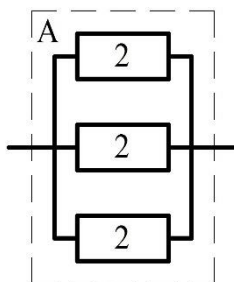


Рисунок 4.2 – Блок з сполученими елементами одного типа

Результати досліджень показують, що блок є підсистемою з паралельно сполученими елементами.

Ймовірність безвідмовної роботи такої підсистеми:

$$P_A = 1 - F_A, \quad (4.3)$$

де:  $F_A$  – ймовірність відмови системи.

$$F_A = \prod_{i=1}^N F_2 = (1 - P_2)^N. \quad (4.4)$$

Час безвідмовної роботи такої підсистеми:

$$T_A = \frac{T_N}{N} + \frac{T_{N-1}}{N-1} + \dots + \frac{T_i}{i}, \quad (4.5)$$

де:  $T_N$  – час безвідмовної роботи елемента підсистеми;

$N$  – кількість елементів підсистеми;

$T_{N-1}$  – час безвідмовної роботи елемента підсистеми з урахуванням вилучення одного з розрахунків;

$N-1$  – кількість елементів підсистеми з урахуванням вилучення одного з розрахунків.

Висновок №1: блок №1 має ймовірність безвідмовної роботи –  $P_A$ ; час безвідмовної роботи –  $T_A$ .

Досліджуємо блок “Б”:

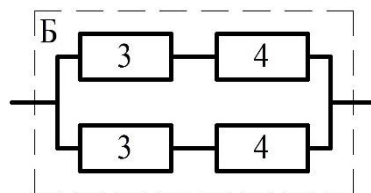


Рисунок 4.3 – Блок з сполученими елементами двох типів

Підсистема “Б” складається з двох паралельно сполучених ланцюгів елементів 3 і 4.

Спочатку необхідно досліджувати ймовірність безвідмовної роботи ланцюга елементів “3,4”:

$$P_{3,4} = \prod_{i=1}^N P_i = P_3 P_4, \quad (4.6)$$

де:  $P_i$  – імовірності безвідмовної роботи елементів ланцюга елементів.

Час напрацювання до відмови елементів ланцюга “3,4”:

$$T_{3,4} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{T_i}} = \frac{1}{\frac{1}{T_3} + \frac{1}{T_4}} \text{ год}, \quad (4.7)$$

де:  $T_i$  – імовірності напрацювання на час елементів ланцюга “3,4”.

Подальші дослідження дозволяють визначити ймовірність безвідмовної роботи підсистеми “Б”:

$$P_B = 1 - F_B, \quad (4.8)$$

де:  $F_B$  – ймовірність відмови системи “Б”.

$$F_B = (1 - P_{3,4})^2; \quad (4.9)$$

Напрацювання підсистеми “Б” до відмови:

$$T_B = \frac{T_{3,4}}{2} + T_{3,4}. \quad (4.10)$$

Висновок №2: надійність роботи підсистеми “Б” –  $P_B$ , час напрацювання до відмови –  $T_B$ .

Досліджуємо підсистему “В”:

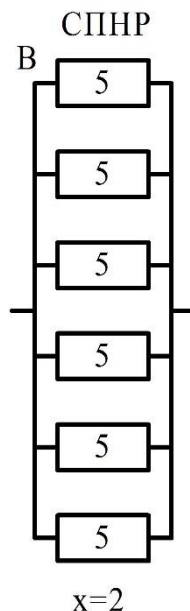


Рисунок 4.4 – Блок з постійно навантаженим резервом

Вона є системою, з постійно навантаженим резервом яка зберігає працездатність при мінімумі двох працюючих елементах, що вказується: «X=2».

Ймовірність роботи такої підсистеми визначимо на підставі біноміального закону:

$$P_B = \sum_{r=x}^n \frac{n!}{r!i!} P^r F^i, \quad (4.11)$$

де:  $n$ - число елементів що входять до системи;

$r$  - кількість працездатних елементів;

$i$  - кількість елементів, що відмовили.

Час безвідмовної роботи блоку “В”:

$$T_B = \frac{T_N}{N} + \frac{T_{N-1}}{N-1} + \dots + \frac{T_x}{x} \text{ ч.} \quad (4.12)$$

Висновок №3: ймовірність безвідмовної роботи підсистеми “В” –  $P_B$ ; час напрацювання підсистеми “В” до відмови –  $T_B$ .

Визначається надійність системи за допомогою формули формулою (4.1).

Визначається час напрацювання системи до відмови, скориставшись формулою (4.2).

## 4.2 Приклад

### 4.2.1 Вихідні дані прикладу

Система складається з 5 типів елементів представлених на рисунку (Рисунок 4.5):

$$P_1 = 0,98 \quad T_1 = 2500 \text{ год}$$

$$P_2 = 0,82 \quad T_2 = 1600 \text{ год}$$

$$P_3 = 0,91 \quad T_3 = 2700 \text{ год}$$

$$P_4 = 0,94 \quad T_4 = 2400 \text{ год}$$

$$P_5 = 0,7 \quad T_5 = 1800 \text{ год}$$

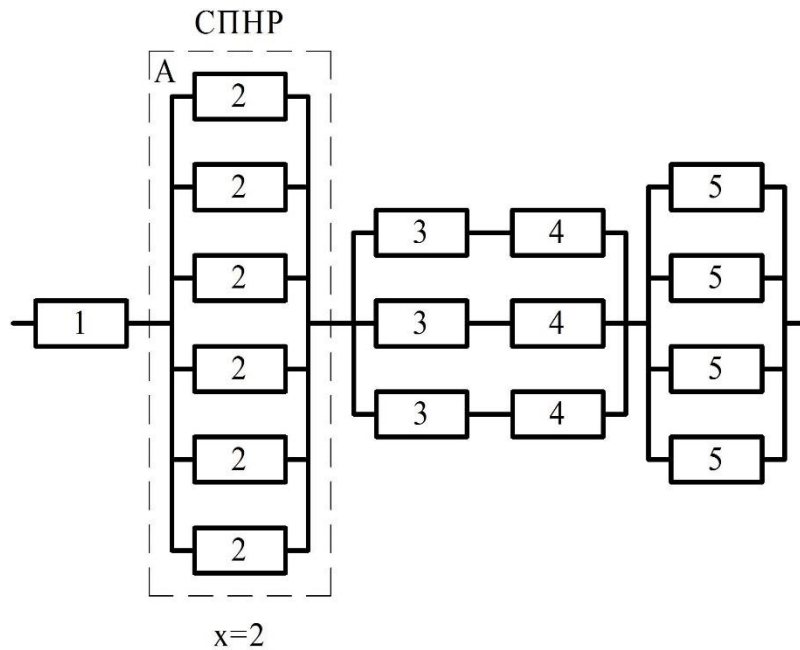


Рисунок 4.5 – Приклад системи складеної з п'яти типів елементів з'єднаних паралельно і послідовно

#### 4.2.2 Приклад виконання роботи

Необхідно привести задану систему до системи з послідовно з'єднаними елементами. Виконуємо послідовне спрощення системи приводячи її до простих елементів, розраховуючи імовірність та час безвідмовної роботи кожного з них.

Перетворимо паралельно з'єднані елементи типу «2», кількістю 6-ть, в підсистему «А». Параметри надійності такої підсистеми розраховуємо наступним чином, приведеним нижче.

Згідно формули (4.4):

$$F_2 = 1 - P_2 = 1 - 0,82 = 0,18.$$

Ймовірність безвідмовної роботи підсистеми «А»  $P_A$ , розраховуємо за формулою (4.11):

$$P_A = \frac{6!}{2! \cdot 4!} \cdot 0,82^4 \cdot 0,18^2 + \dots + \frac{6!}{6! \cdot 0!} \cdot 0,82^6 \cdot 0,18^0 = 0,3977.$$

Час безвідмовної роботи підсистеми «А»  $T_A$ , розраховуємо за формулою (4.12):

$$T_A = \frac{1600}{6} + \frac{1600}{5} + \frac{1600}{4} + \frac{1600}{3} + \frac{1600}{2} = 2320 \text{ год.}$$

Після наступного спрощення схема має вигляд представлений на рисунку (Рисунок 4.6).

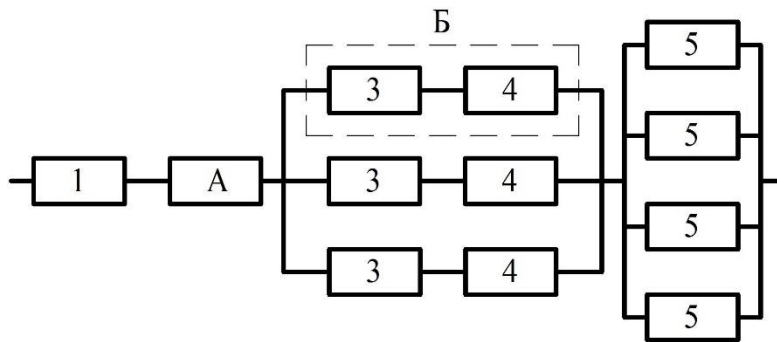


Рисунок 4.6 – Приклад спрощеної схеми з підсистемою «А» замість 5-ти елементів типу «2» та представлення підсистеми «Б» замість 2-ох елементів типів «3» та «4»

Підсистема «Б» складається з 2-х послідовно з'єднаних елементів. Параметри надійності такої підсистеми розраховують наступним чином, приведеним нижче.

Ймовірність безвідмовної роботи підсистеми «Б»  $P_B$ , розраховуємо за формулою (4.6):

$$P_B = 0,91 \cdot 0,94 = 0,8554.$$

Час безвідмовної роботи підсистеми «Б»  $T_B$ , розраховуємо за формулою (4.7):

$$T_B = \frac{1}{\frac{1}{2700} + \frac{1}{2400}} = 1270 \text{ год.}$$

Після наступного спрощення схема має вигляд представлений на рисунку (Рисунок 4.7).

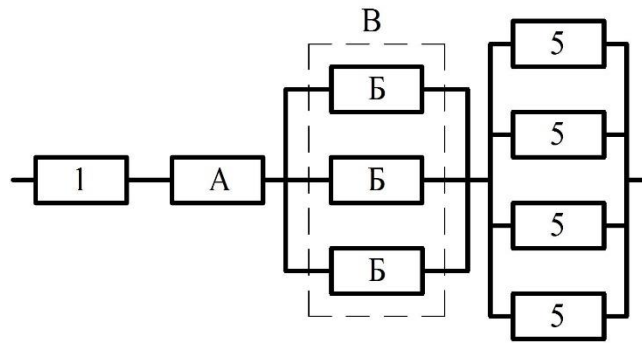


Рисунок 4.7 – Приклад спрощеної схеми з підсистемою «В» замість 3-ох представлених підсистем «Б»

Імовірність безвідмовної роботи підсистеми «В»  $P_B$ , розраховуємо за формулою (4.3):

$$P_B = 1 - (1 - 0,8554)^3 = 0,996.$$

Час безвідмовної роботи підсистеми «В»  $T_B$ , розраховуємо за формулою (4.5):

$$T_B = \frac{1270}{3} + \frac{1270}{2} + \frac{1270}{1} = 2328 \text{ год.}$$

Після наступного спрощення схема має вигляд представлений на рисунку (Рисунок 4.8).

Ймовірність безвідмовної роботи підсистеми «Г»  $P_G$ , розраховуємо за формулою (4.3):

$$P_G = 1 - (1 - 0,7)^4 = 0,9919.$$

Час безвідмовної роботи підсистеми «Г»  $T_G$ , розраховуємо за формулою (4.5):

$$T_G = \frac{1800}{4} + \frac{1800}{3} + \frac{1800}{2} + \frac{1800}{1} = 3750.$$

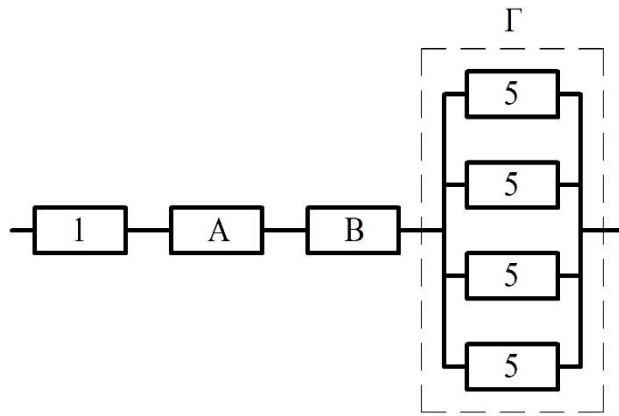


Рисунок 4.8 – Приклад спрощеної схеми з підсистемою «Г» замість 4-ох елементів типів «5»

Після спрощення схема має вигляд представлений на рисунку (Рисунок 4.9).

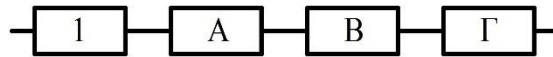


Рисунок 4.9 – Приклад спрощеної схеми з підсистемами «А», «В», «Г» та елементу типу «1» приведених до системи з послідовним зв'язком

Ймовірність безвідмовної роботи системи  $P_{\text{сист}}$ , розраховуємо за формулою (4.1):

$$P_{\text{сист}} = 0,98 \cdot 0,3977 \cdot 0,996 \cdot 0,9919 = 0,385.$$

Час безвідмовної роботи системи  $T_{\text{сист}}$ , приведений на рисунку (Рисунок 4.10), розраховуємо за формулою (4.2):

$$T_{\text{сист}} = \frac{1}{\frac{1}{2500} + \frac{1}{2320} + \frac{1}{2328} + \frac{1}{3750}} = 654 \text{ год.}$$

### 4.2.3 Приклад висновків

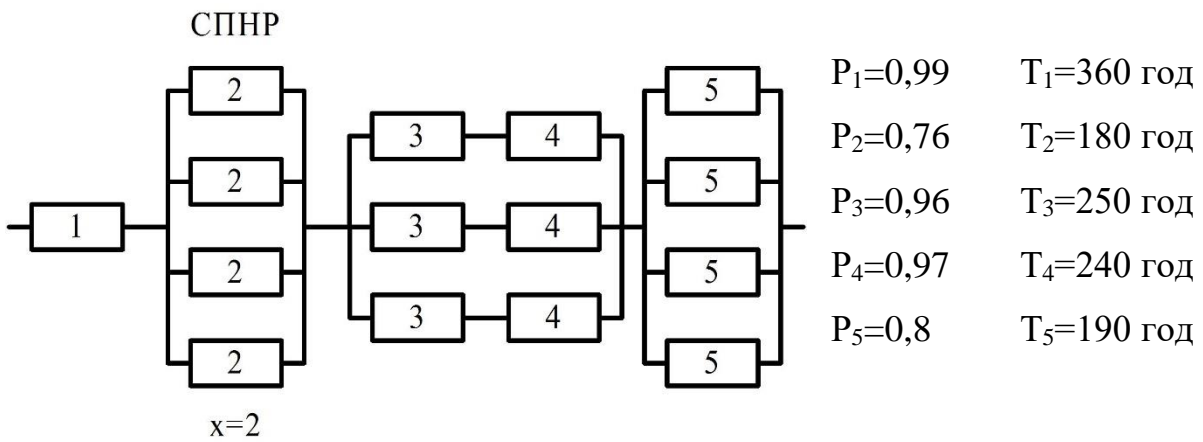
Результати дослідження системи показують, що вона має ймовірність безвідмовної роботи  $P_{\text{сист}} = 0,385$ ; при середньому часі напрацювання системи до відмови  $T_{\text{сист}} = 654$  год.



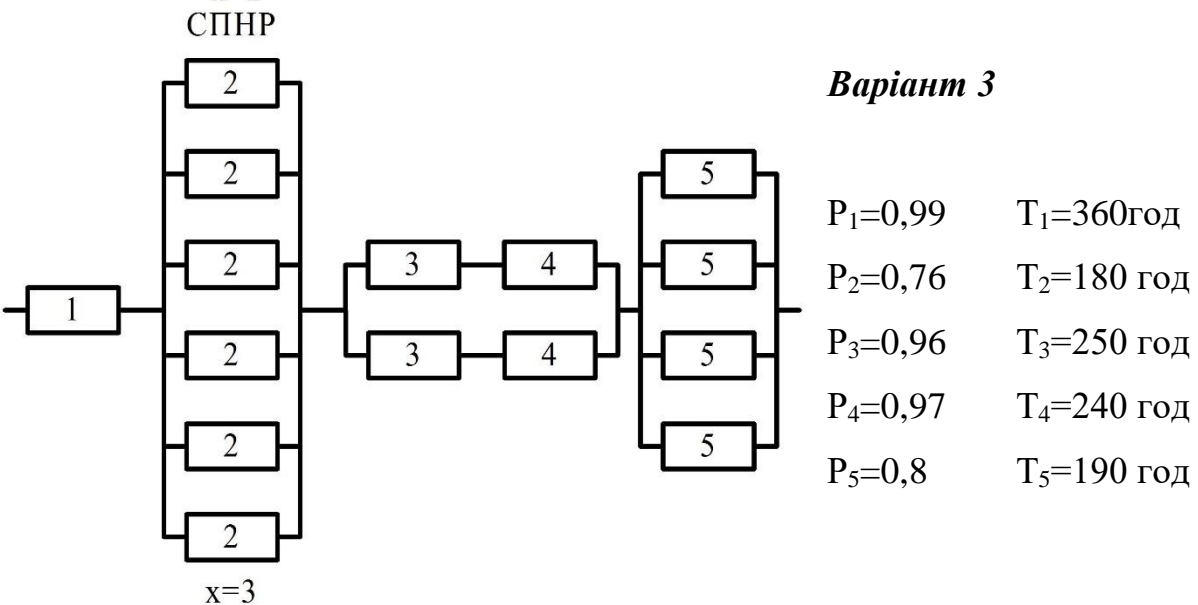
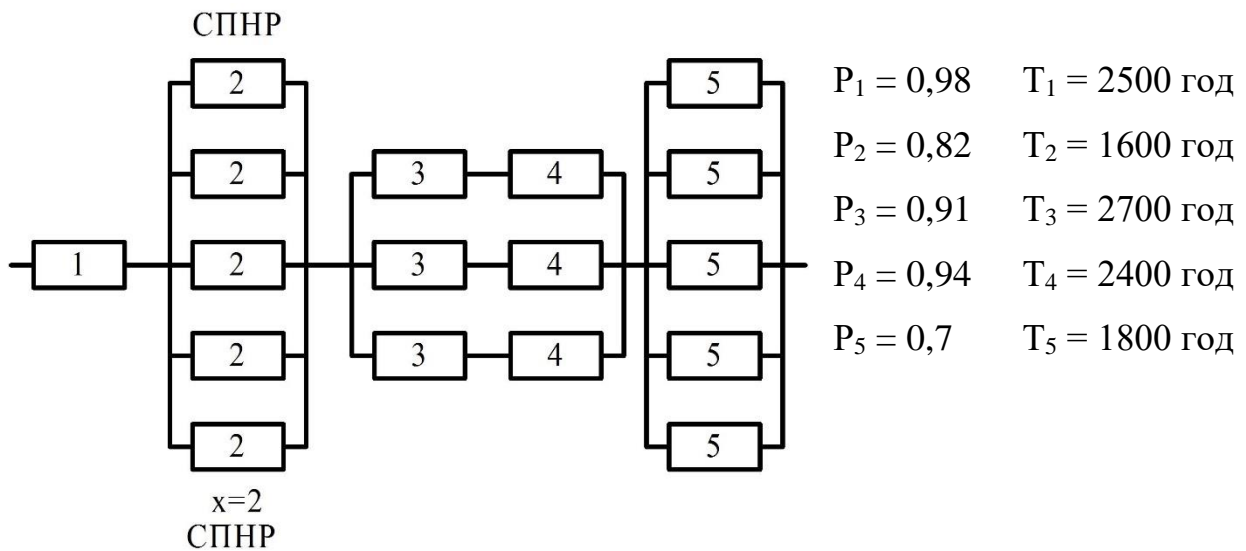
### 4.3 Вихідні дані

Система складається з 5-ти типів елементів.

#### Варіант 1

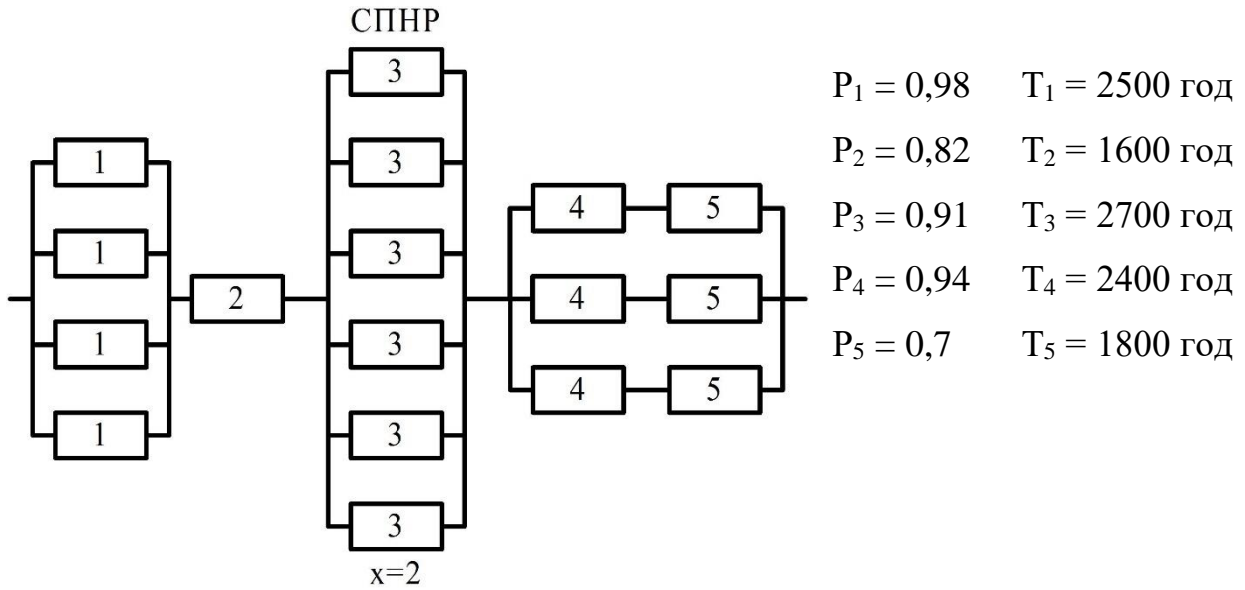


#### Варіант 2

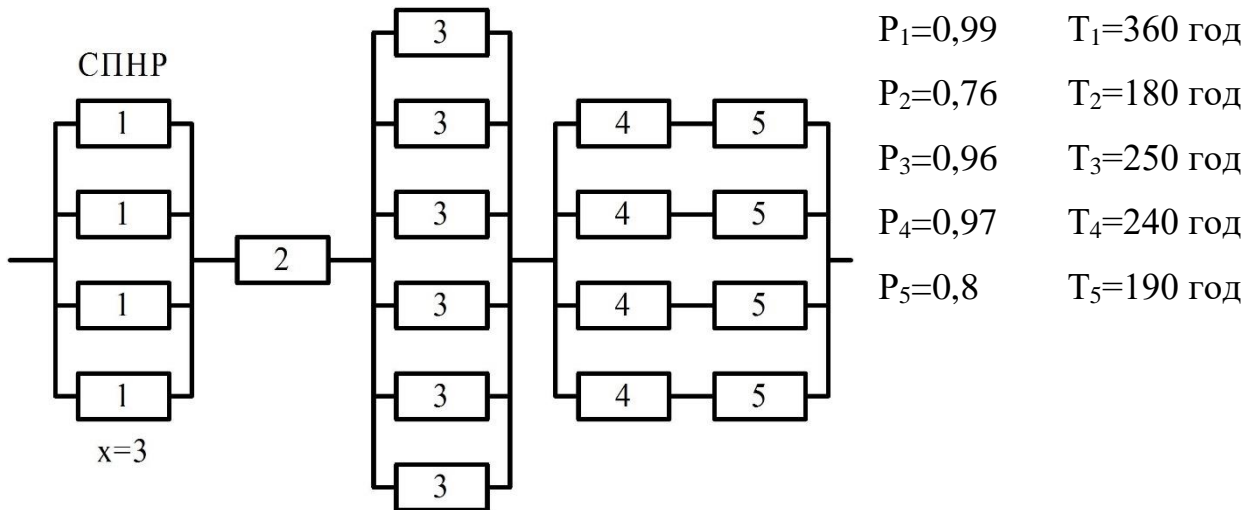


#### Варіант 3

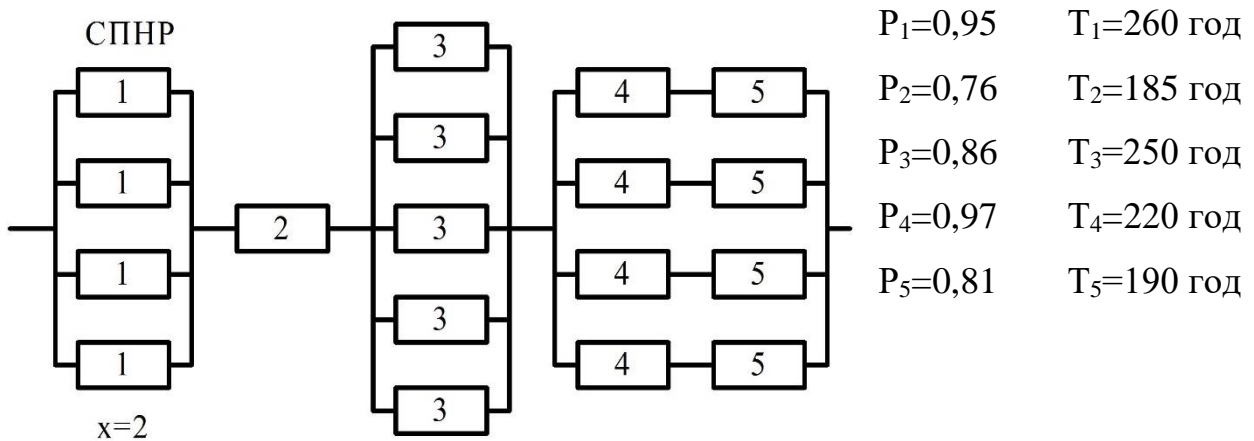
**Варіант 4**



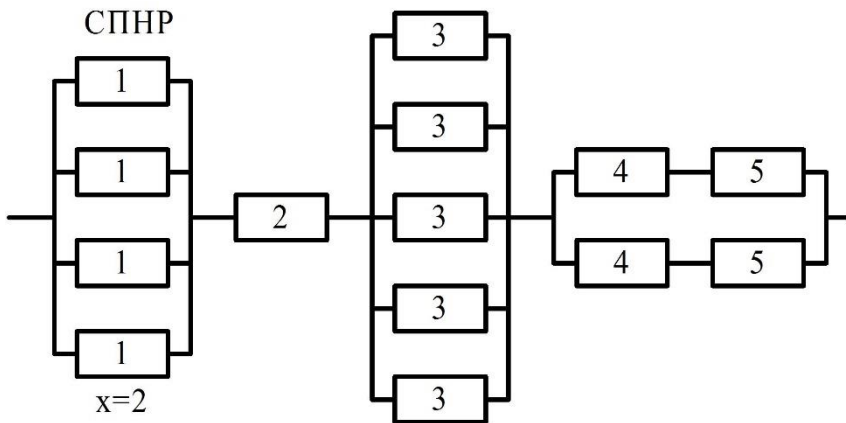
**Варіант 5**



**Варіант 6**

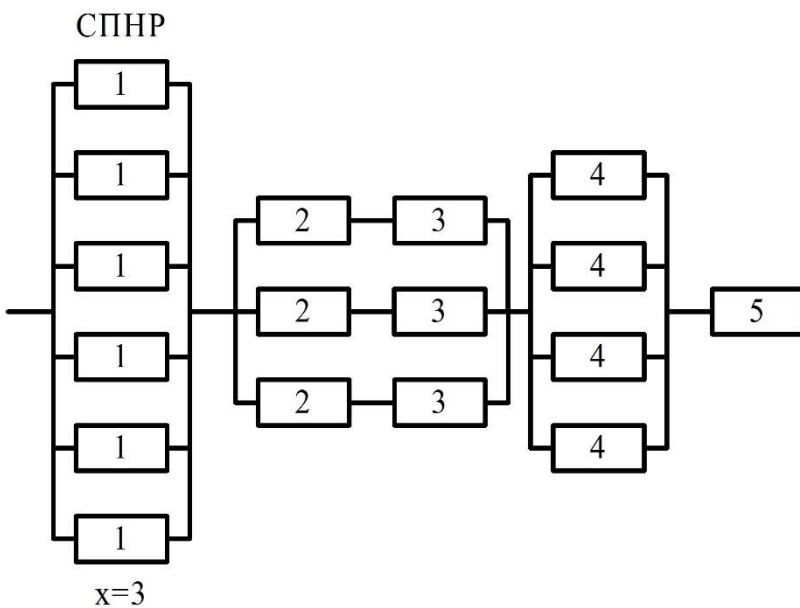


**Вариант 7**



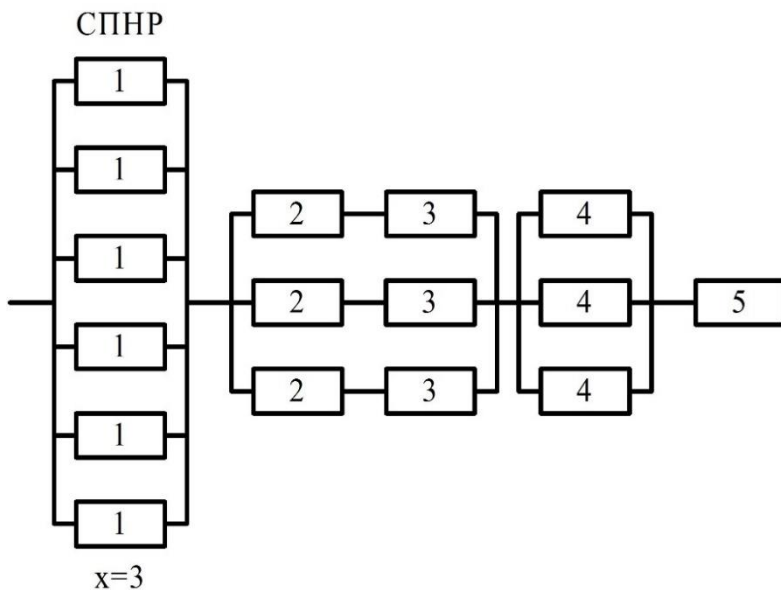
$P_1 = 0,91$	$T_1 = 2500$ год
$P_2 = 0,89$	$T_2 = 2600$ год
$P_3 = 0,91$	$T_3 = 1700$ год
$P_4 = 0,84$	$T_4 = 2100$ год
$P_5 = 0,75$	$T_5 = 1850$ год

**Вариант 8**



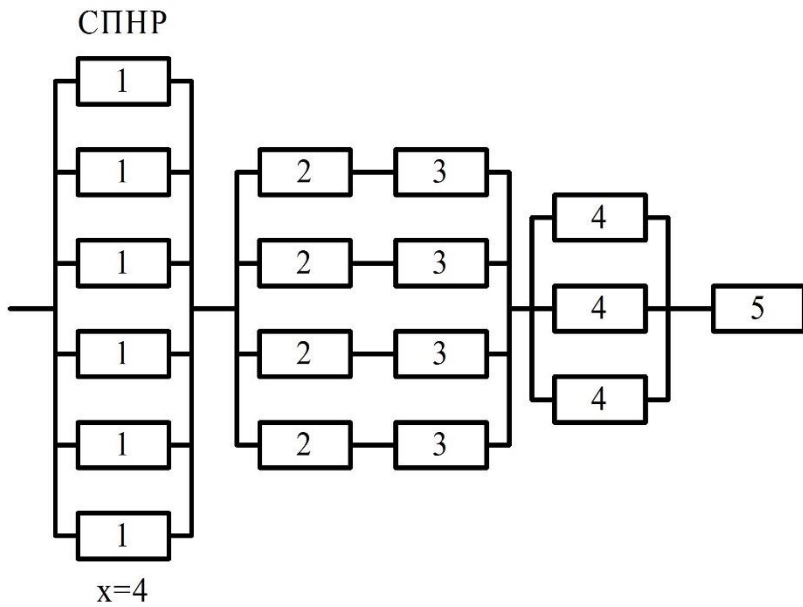
$P_1=0,95$	$T_1=350$ год
$P_2=0,66$	$T_2=170$ год
$P_3=0,91$	$T_3=250$ год
$P_4=0,97$	$T_4=140$ год
$P_5=0,81$	$T_5=180$ год

**Вариант 9**



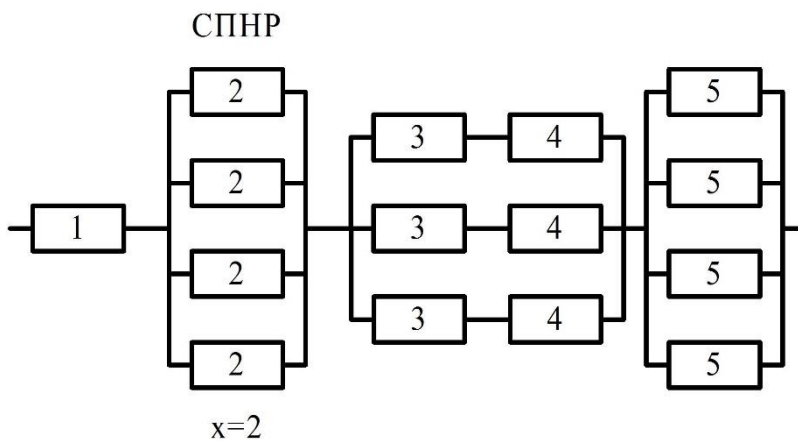
$P_1 = 0,97$	$T_1 = 2400$ год
$P_2 = 0,92$	$T_2 = 1800$ год
$P_3 = 0,81$	$T_3 = 2600$ год
$P_4 = 0,92$	$T_4 = 2800$ год
$P_5 = 0,6$	$T_5 = 1200$ год

**Варіант 10**



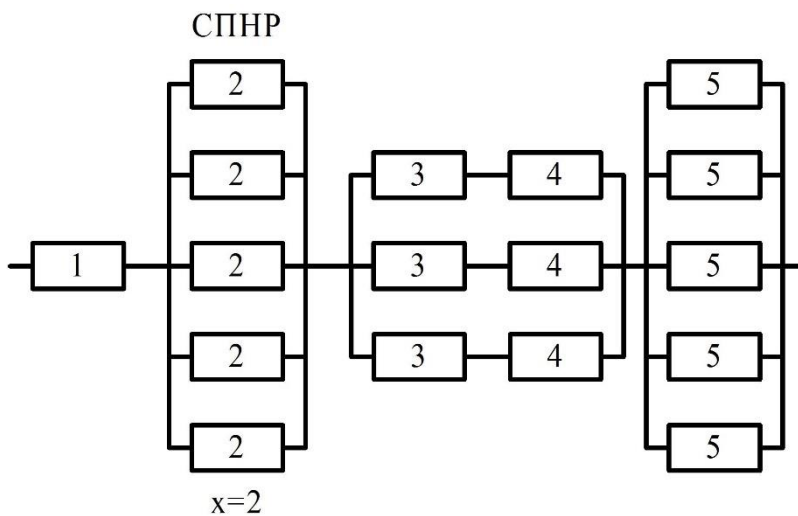
$P_1=0,91$	$T_1=350$ год
$P_2=0,66$	$T_2=140$ год
$P_3=0,86$	$T_3=350$ год
$P_4=0,87$	$T_4=340$ год
$P_5=0,89$	$T_5=290$ год

**Варіант 11**



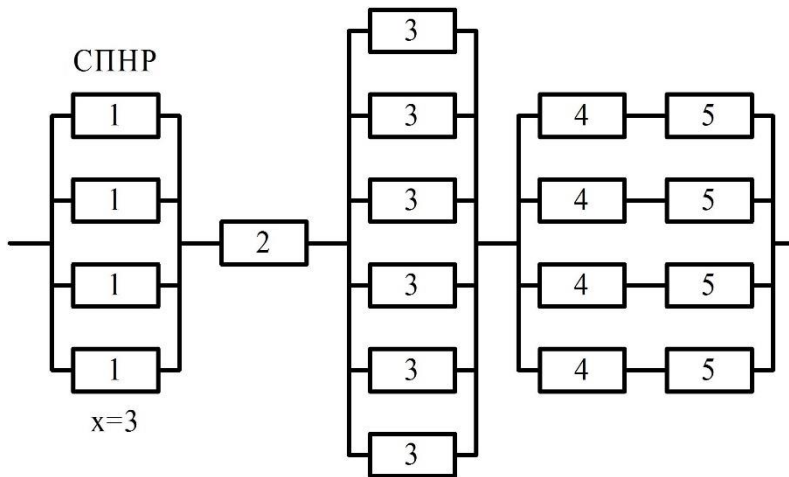
$P_1=0,89$	$T_1=310$ год
$P_2=0,56$	$T_2=110$ год
$P_3=0,76$	$T_3=220$ год
$P_4=0,77$	$T_4=220$ год
$P_5=0,8$	$T_5=130$ год

**Варіант 12**



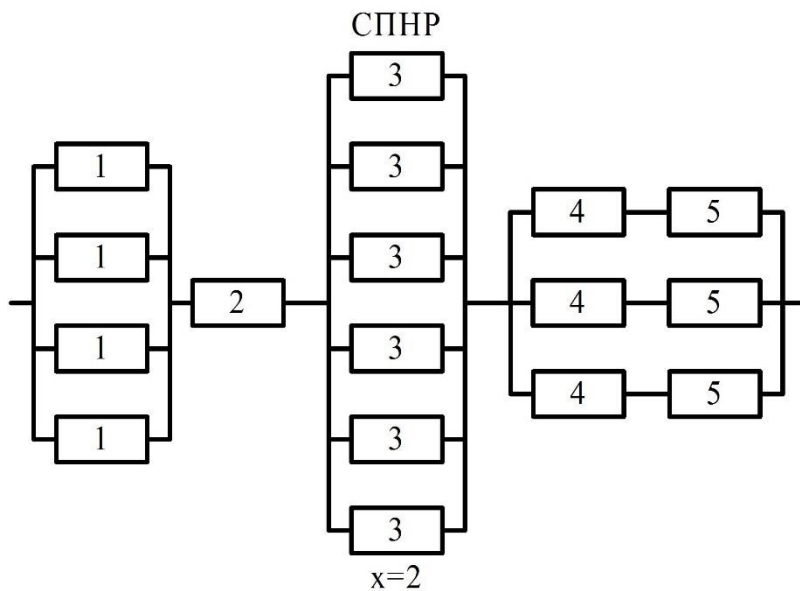
$P_1 = 0,88$	$T_1 = 2100$ год
$P_2 = 0,72$	$T_2 = 1200$ год
$P_3 = 0,61$	$T_3 = 2300$ год
$P_4 = 0,64$	$T_4 = 2400$ год
$P_5 = 0,7$	$T_5 = 1500$ год

**Вариант 13**

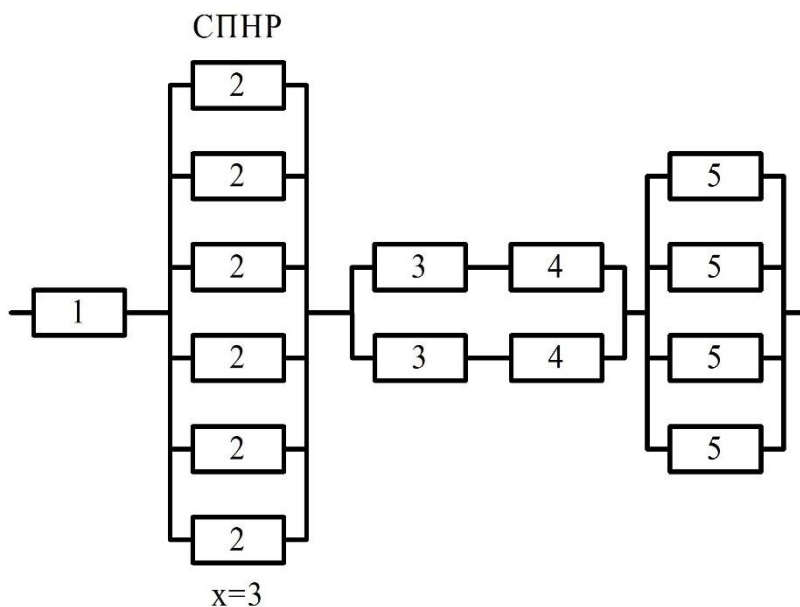


$P_1=0,99$	$T_1=360$ год
$P_2=0,76$	$T_2=180$ год
$P_3=0,96$	$T_3=250$ год
$P_4=0,97$	$T_4=240$ год
$P_5=0,8$	$T_5=190$ год

**Вариант 14**



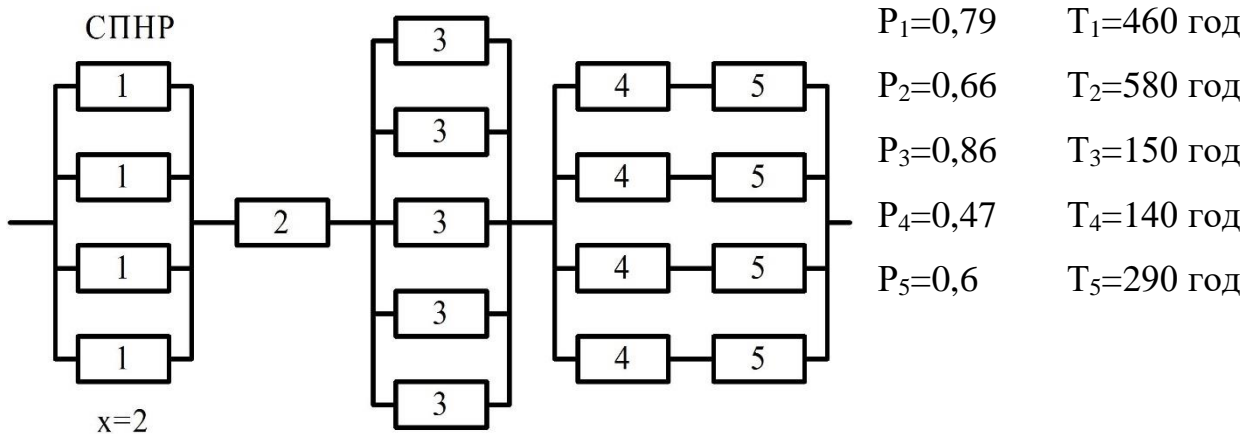
$P_1 = 0,91$	$T_1 = 3500$ год
$P_2 = 0,84$	$T_2 = 2600$ год
$P_3 = 0,95$	$T_3 = 3700$ год
$P_4 = 0,94$	$T_4 = 3400$ год
$P_5 = 0,75$	$T_5 = 2800$ год



**Вариант 15**

$P_1=0,93$	$T_1=310$ год
$P_2=0,66$	$T_2=190$ год
$P_3=0,56$	$T_3=220$ год
$P_4=0,95$	$T_4=280$ год
$P_5=0,85$	$T_5=130$ год

## Варіант 16



### 4.4 Питання контролю

#### 4.4.1 Питання вхідного контролю:

- Що таке система елементів та де її використовують?
- Що таке система з постійно навантаженим резервом?
- Чим відрізняються система з паралельно сполученими елементами від системи з послідовно сполученими елементами?
- Чим відрізняються система з паралельно сполученими елементами від системи з постійно навантаженим резервом?
- Чим відрізняються система з послідовно сполученими елементами від системи з постійно навантаженим резервом?

#### 4.4.2 Питання вихідного контролю:

- Як розраховується ймовірність безвідмовної роботи та час безвідмовної роботи загальної системи?
- Як розраховується ймовірність безвідмовної роботи та час безвідмовної роботи системи з паралельно сполученими елементами?
- Як розраховується ймовірність безвідмовної роботи та час безвідмовної роботи системи з постійно навантаженим резервом?
- Як розраховується ймовірність безвідмовної роботи та час безвідмовної роботи системи з послідовно сполученими елементами?
- Як розраховується ймовірність відмов роботи системи?

## 5. Лабораторна робота № 5

**Тема:** ідентифікація циклів за умовами навантаження.

**Мета роботи:** навчитися будувати графіки навантаження і визначати всі параметри циклу окремої складової.

### 5.1 Хід роботи

Розраховуються амплітудні, середні напруги циклу, визначається коефіцієнт асиметрії циклу і будуються графіки зміни напруги для випадків:

$$X.) \sigma_m - \sigma_{min} - \sigma_m - \sigma_{max} - \sigma_m,$$

$$Y.) \sigma_{max} - \sigma_m - \sigma_{min} - \sigma_m - \sigma_{max},$$

$$Z.) \sigma_{min} - \sigma_m - \sigma_{max} - \sigma_m - \sigma_{min};$$

$$V.) \sigma_m - \sigma_{max} - \sigma_m - \sigma_{min} - \sigma_m.$$

Визначається коефіцієнт асиметрії циклу. Відомо, що коефіцієнт асиметрії циклу, це відношення мінімальної напруги  $\sigma_{min}$  циклу до максимального  $\sigma_{max}$ :

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}. \quad (5.1)$$

Аналіз цього значення  $R$  показує, яким являється цикл:

- якщо  $-1 < R < 0$ , то цикл – асиметричний, знакозмінний;
- якщо  $R = 0$ , то цикл – цикл віднульовий (пульсуючий);
- якщо  $R = 1$ , то в циклі статична напруга, що не змінюється у часі та не залежить від кута повороту;
- якщо  $0 > R > -1$  – цикл асиметричний знакопостійний;
- якщо  $R = -1$ , то цикл – цикл симетричний.

Знаходимо середнє значення циклу:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}. \quad (5.2)$$

Визначаємо амплітудну напругу циклу:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}. \quad (5.3)$$

Будуємо графік зміни напруги для умови «х», «у», «z» чи «v», де період циклу по умові дорівнює  $360^\circ$ ,  $180^\circ$  чи інший, тому як складові періоду слід прийняти кут  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$  чи інший відповідно.

По умові «х» та при періоді циклу  $360^\circ$ : в початковий період часу  $\varphi = 0$  напруга рівна  $\sigma_m$ . У наступний період часу  $\varphi = 90^\circ$  напруга рівна  $\sigma_{\min}$ . При куті повороту  $\varphi = 180^\circ$ , напруга знову рівна  $\sigma_m$ . Куту повороту  $\varphi = 270^\circ$  – напруга  $\sigma_{\max}$ . При повороті на  $\varphi = 360^\circ$ , напруга повертається у вихідну точку  $\sigma_m$ . З'єднавши отримані крапки, отримаємо графік зміни напруги за один період.

По умові «у» та при періоді циклу  $360^\circ$ : у початковий період часу  $\varphi = 0$ , напруга рівна  $\sigma_{\max}$ . У наступний період часу  $\varphi = 90^\circ$  напруга рівна  $\sigma_m$ . При куті повороту  $\varphi = 180^\circ$  напруга рівна  $\sigma_{\min}$ . Куту повороту  $\varphi = 270^\circ$  – напруга  $\sigma_m$ . При повороті на  $\varphi = 360^\circ$ , напруга повертається у вихідну точку  $\sigma_{\max}$ . З'єднавши отримані крапки, отримаємо графік зміни напруги за один період.

По умові «z» та при періоді циклу  $180^\circ$ : у початковий період часу  $\varphi = 0$ , напруга рівна  $\sigma_{\min}$ . При куті повороту  $\varphi = 45^\circ$  напругу приймає середнє значення  $\sigma_m$ . У наступний період часу  $\varphi = 90^\circ$  напруга рівна  $\sigma_{\max}$ . При куті повороту  $\varphi = 135^\circ$  напруга знову рівна  $\sigma_m$ . Куту повороту  $\varphi = 180^\circ$  напруга рівна  $\sigma_{\min}$ . З'єднавши отримані крапки, отримаємо графік зміни напруги за один період. Кут повороту  $360^\circ$  відповідає двом періодам змін напруги.

Подібно попереднім умовам, таким як «х», «у» та «z» будується графік зміни напруги «v».



## 5.2 Приклад

### 5.2.1 Вихідні дані прикладу

Вихідні дані прикладу приведені в кожному конкретному фрагменті.

### 5.2.2 Приклад виконання Фрагмент № 1

Максимальна напруга циклу  $\sigma_{max} = 140$  МПа, мінімальна напруга циклу  $\sigma_{min} = -60$  МПа, період циклу  $\varphi = 360^\circ$ .

Розрахувати амплітудні, середні напруги циклу, визначити коефіцієнт асиметрії циклу і побудувати графіки зміни напруги для випадків:

а)  $\sigma_m - \sigma_{min} - \sigma_m - \sigma_{max} - \sigma_m$ ;

б)  $\sigma_{max} - \sigma_m - \sigma_{min} - \sigma_m - \sigma_{max}$ .

Середнє значення напруги циклу  $\sigma_m$ , розраховуємо за формулою (5.2):

$$\sigma_m = \frac{140 + (-60)}{2} = 40 \text{ МПа.}$$

Амплітудне значення напруги циклу  $\sigma_a$ , розраховуємо за формулою (5.3):

$$\sigma_a = \frac{140 - (-60)}{2} = 100 \text{ МПа.}$$

Коефіцієнт асиметрії циклу  $R$ , розраховуємо за формулою (5.1):

$$R = \frac{-60}{140} = -0,43.$$

Аналіз цього значення показує, що цикл асиметричний, знаковмінний.

Побудуємо графік зміни напруги для умови «а»: період циклу по умові дорівнює  $360^\circ$ , тому як складові періоду слід прийняти кут  $\varphi = 90^\circ$ .

По умові «а» в початковий період часу  $\varphi = 0^\circ$  напруга рівна  $\sigma_m$ . У наступний період часу  $\varphi = 90^\circ$  напруга рівна  $\sigma_{min}$ . При куті повороту  $\varphi = 180^\circ$ , напруга знову рівна  $\sigma_m$ . Куту повороту  $\varphi = 270^\circ$  – напруга  $\sigma_{max}$ . При повороті на  $\varphi = 360^\circ$ , напруга повертається у вихідну точку  $\sigma_m$ . З'єднавши отримані крапки, отримаємо графік зміни напруги за один період (Рисунок 5.1).

По умові «б»: у початковий період часу  $\varphi = 0^\circ$ , напруга рівна  $\sigma_{max}$ . У наступний період часу  $\varphi = 90^\circ$  напруга рівна  $\sigma_m$ . При куті повороту  $\varphi = 180^\circ$  напруга рівна  $\sigma_{min}$ . Куту повороту  $\varphi = 270^\circ$  відповідає напруга  $\sigma_m$ . При

повороті на  $\varphi = 360^\circ$ , напруга повертається у вихідну точку  $\sigma_{max}$ . З'єднавши отримані крапки, отримаємо графік зміни напруги за один період (Рисунок 5.1).

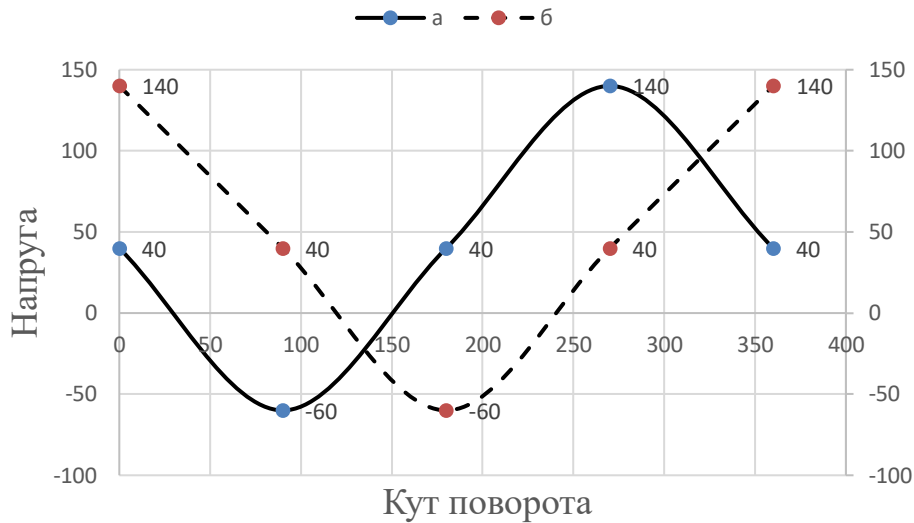


Рисунок 5.1 – Приклад графіка зміни напруги

### 5.2.3 Приклад виконання Фрагмент №2

Кут повороту  $\varphi = 180^\circ$ ,  $\sigma_m = \sigma_a = 140$  МПа. Напруги змінюються:  $\sigma_{min} = \sigma_m = \sigma_{max} = \sigma_m = \sigma_{min}$ .

Ідентифікуємо цикл напруги, визначити максимальну і мінімальну напругу циклу, а також коефіцієнт асиметрії.

Максимальну напругу циклу  $\sigma_{max}$ , розраховуємо за формулою (5.4):

$$\sigma_{max} = 140 + 140 = 280 \text{ МПа.}$$

Мінімальну напругу циклу  $\sigma_{min}$ , розраховуємо за формулою (5.5):

$$\sigma_{min} = 140 - 140 = 0 \text{ МПа.}$$

Коефіцієнт асиметрії циклу  $R$ , розраховуємо за формулою (5.1):

$$R = \frac{0}{280} = 0.$$

Аналіз значення і коефіцієнта асиметрії циклу показує, що цикл віднульовий (пульсуючий).

Побудуємо графік змін напруги за половину повного звороту валу ( $\varphi = 180^\circ$ ). За одиницю виміру кута повороту приймаємо  $\varphi = 45^\circ$ .

У початковий період часу  $\varphi = 0^\circ$ , напруга рівна  $\sigma_{min}$ . У наступний період часу  $\varphi = 45^\circ$  напруга рівна  $\sigma_m$ . При куті повороту  $\varphi = 90^\circ$  напруга рівна  $\sigma_{max}$ . Куту повороту  $\varphi = 135^\circ$  відповідає напруга  $\sigma_m$ . При повороті на  $\varphi = 180^\circ$ , напруга повертається у вихідну точку  $\sigma_{min}$ . З'єднавши отримані крапки, отримаємо графік зміни напруги за 1 період (Рисунок 5.2). Кут повороту  $360^\circ$  відповідає двом періодам змін напруги.

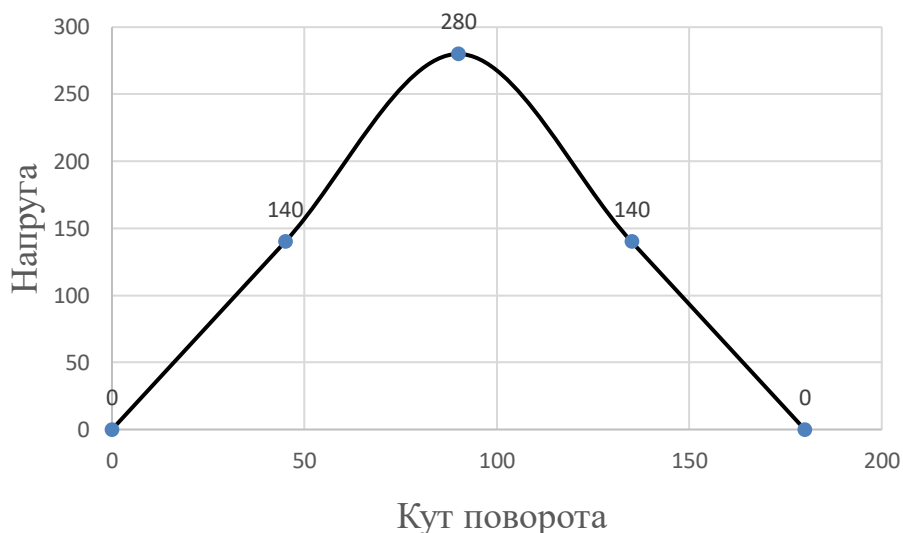


Рисунок 5.2 – Приклад графіка зміни напруги

### 5.2.4 Приклад виконання Фрагмент №3

Дослідити цикл зміни напруги, якщо відомо: амплітудне значення напруги  $\sigma_a = 0$  МПа; середнє значення напруги  $\sigma_m = 350$  МПа. За результатами дослідів побудувати графік зміни значень напруги при куті повороту  $\varphi = 45^\circ$ .

Максимальну напругу циклу  $\sigma_{max}$ , розрахував за формулою (5.4):

$$\sigma_{max} = 350 + 0 = 350 \text{ МПа.}$$

Мінімальну напругу циклу  $\sigma_{min}$ , МПа, розрахував за формулою (5.5):

$$\sigma_{min} = 350 - 0 = 350 \text{ МПа.}$$

Коефіцієнт асиметрії циклу  $R$ , розрахував за формулою (5.1):

$$R = \frac{350}{350} = 1.$$

Такому коефіцієнту асиметрії відповідає статична напруга, що не змінюється у часі та не залежить від кута повороту. Будуємо графік (Рисунок 5.3).

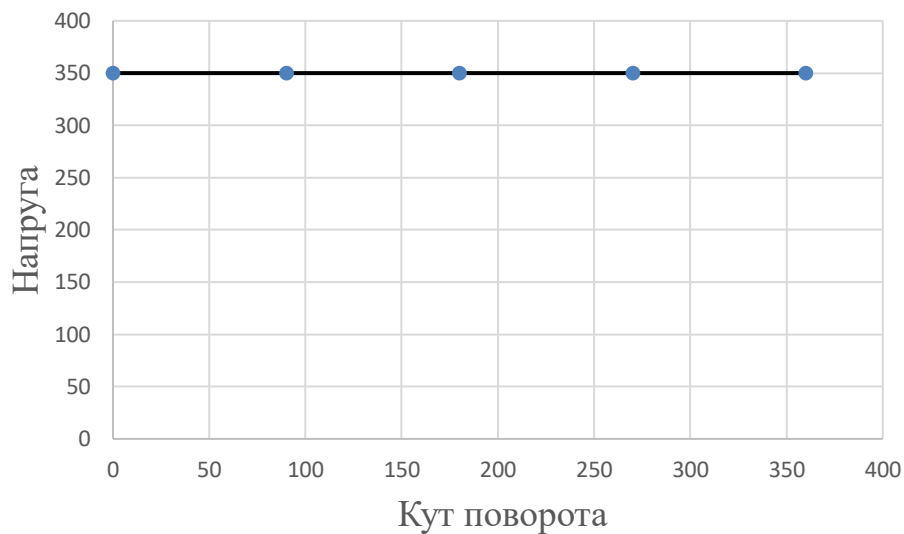


Рисунок 5.3 – Приклад графіка зміни напруги

### 5.2.5 Приклад виконання Фрагмент №4

Дослідити цикл зміни напруги, якщо відомо: амплітудне значення напруги  $\sigma_a = 40$  МПа; середнє значення напруги  $\sigma_m = 120$  МПа. Напруги змінюються:  $\sigma_{min} - \sigma_m - \sigma_{max} - \sigma_m - \sigma_{min}$ . За кут повороту  $\varphi = 360^\circ$ , побудувати графік зміни.

Максимальну напругу циклу  $\sigma_{max}$ , МПа, розраховуємо за формулою (5.4),

$$\sigma_{max} = 120 + 40 = 160 \text{ МПа.}$$

Мінімальну напругу циклу  $\sigma_{min}$ , розраховуємо за формулою (5.5):

$$\sigma_{min} = 120 - 40 = 80 \text{ МПа.}$$

Коефіцієнт асиметрії циклу  $R$ , розраховуємо за формулою (5.1):

$$R = \frac{80}{160} = 0,5.$$

Значення коефіцієнта вказує на асиметричний знакопостійний цикл. Будуємо графік (Рисунок 5.4).

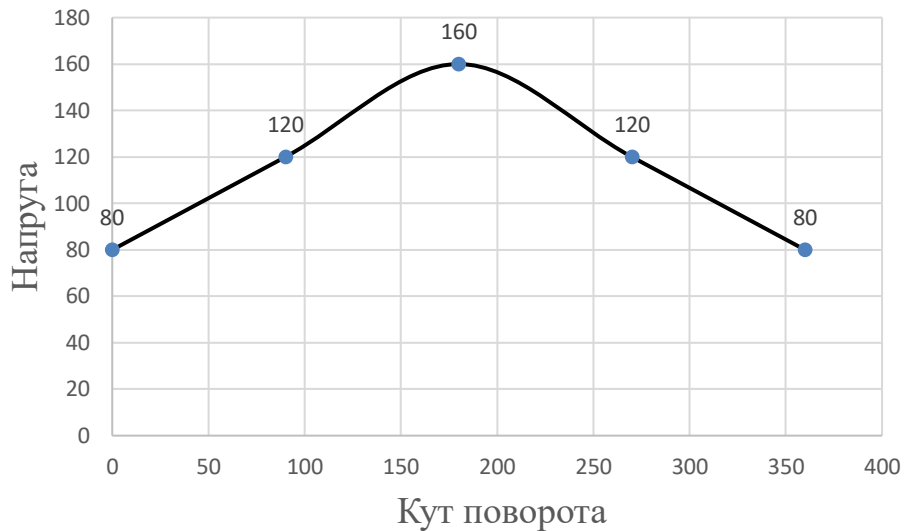


Рисунок 5.4 – Приклад графіка зміни напруги

### 5.2.6 Приклад виконання Фрагмент №5

Проаналізувати циклічну напругу, побудуємо графік його зміни за кут  $\varphi = 360^\circ$ , відомо що: амплітудне значення напруги  $\sigma_a = 180$  МПа; коефіцієнт асиметрії циклу  $R = -1$ .

Значення  $R$  говорить про те, що досліджуваний цикл напруги симетричний.

Для такого циклу середнє значення напруги  $\sigma_m = 0$  МПа, максимальна напруга циклу  $\sigma_{max} = \sigma_a = 180$  МПа, мінімальна напруга циклу  $\sigma_{min} = -\sigma_{max} = -180$  МПа.

Побудуємо графік змін (Рисунок 5.4) у якого:

а)  $\sigma_{min} - \sigma_m - \sigma_{max} - \sigma_m - \sigma_{min}$ ;

б)  $\sigma_m - \sigma_{max} - \sigma_m - \sigma_{min} - \sigma_m$ .

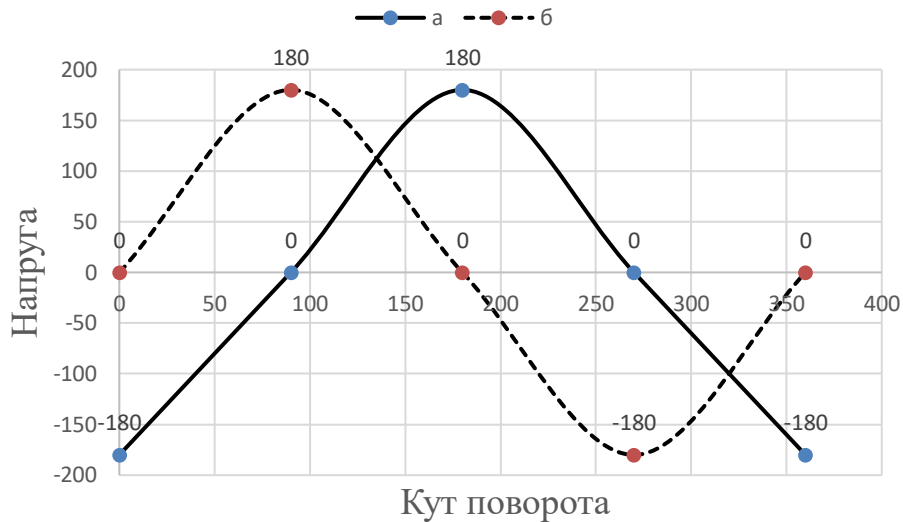


Рисунок 5.5 – Приклад графіка зміни напруги

### 5.2.7 Приклад висновків

В процесі роботи ознайомились з різними графіками зміни напруги в умовах стаціонарного навантаження, та набули навички в ідентифікації циклів навантаження.

## 5.3 Вихідні дані

Вихідні дані приведені в кожному конкретному фрагменті.

### 5.3.1 Фрагмент № 1:

Побудувати графік змін у якого:

а)  $\sigma_m - \sigma_{min} - \sigma_m - \sigma_{max} - \sigma_m$ ;

б)  $\sigma_{max} - \sigma_m - \sigma_{min} - \sigma_m - \sigma_{max}$ .

#### Варіант 1

$\sigma_{max} = 125$  МПа;

$\sigma_{min} = -80$  МПа;

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

#### Варіант 3

$\sigma_{max} = 80$  МПа;

$\sigma_{min} = -160$  МПа;

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

#### Варіант 2

$\sigma_{max} = 140$  МПа;

$\sigma_{min} = -60$  МПа;

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

#### Варіант 4

$\sigma_{max} = 180$  МПа;

$\sigma_{min} = -120$  МПа;

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 5**

$\sigma_{max} = 210 \text{ МПа};$

$\sigma_{min} = -20 \text{ МПа};$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 7**

$\sigma_{max} = 145 \text{ МПа};$

$\sigma_{min} = -65 \text{ МПа};$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 9**

$\sigma_{max} = 170 \text{ МПа};$

$\sigma_{min} = -110 \text{ МПа};$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 11**

$\sigma_{max} = 175 \text{ МПа};$

$\sigma_{min} = -100 \text{ МПа};$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 13**

$\sigma_{max} = 90 \text{ МПа};$

$\sigma_{min} = -130 \text{ МПа};$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 15**

$\sigma_{max} = 250 \text{ МПа};$

$\sigma_{min} = -20 \text{ МПа};$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**5.3.2 Фрагмент № 2:**

Побудувати графік змін у якого напруги змінюються:  $\sigma_{min} - \sigma_m - \sigma_{max} -$

$\sigma_m - \sigma_{min}$ .

**Варіант 1**

$\sigma_m = \sigma_a = 100 \text{ МПа};$

**Варіант 6**

$\sigma_{max} = 135 \text{ МПа};$

$\sigma_{min} = -90 \text{ МПа};$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 8**

$\sigma_{max} = 70 \text{ МПа};$

$\sigma_{min} = -150 \text{ МПа};$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 10**

$\sigma_{max} = 220 \text{ МПа};$

$\sigma_{min} = -10 \text{ МПа};$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 12**

$\sigma_{max} = 245 \text{ МПа};$

$\sigma_{min} = -165 \text{ МПа};$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 14**

$\sigma_{max} = 175 \text{ МПа};$

$\sigma_{min} = -105 \text{ МПа};$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 16**

$\sigma_{max} = 195 \text{ МПа};$

$\sigma_{min} = -95 \text{ МПа};$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 2**

$\sigma_m = \sigma_a = 140 \text{ МПа};$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 3**

$$\sigma_m = \sigma_a = 160 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 5**

$$\sigma_m = \sigma_a = 90 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 7**

$$\sigma_m = \sigma_a = 95 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 9**

$$\sigma_m = \sigma_a = 110 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 11**

$$\sigma_m = \sigma_a = 75 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 13**

$$\sigma_m = \sigma_a = 200 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 15**

$$\sigma_m = \sigma_a = 1000 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**5.3.3 Фрагмент № 3:**

Побудувати графік.

**Варіант 1**

$$\sigma_a = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_m = 300 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 4**

$$\sigma_m = \sigma_a = 120 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 6**

$$\sigma_m = \sigma_a = 80 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 8**

$$\sigma_m = \sigma_a = 75 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 10**

$$\sigma_m = \sigma_a = 150 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 12**

$$\sigma_m = \sigma_a = 105 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 14**

$$\sigma_m = \sigma_a = 115 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 16**

$$\sigma_m = \sigma_a = 125 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 2**

$$\sigma_a = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_m = 350 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .



**Варіант 3**

$$\sigma_a = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_m = 400 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 5**

$$\sigma_a = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_m = 410 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 7**

$$\sigma_a = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_m = 330 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 9**

$$\sigma_a = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_m = 410 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 11**

$$\sigma_a = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_m = 480 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 13**

$$\sigma_a = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_m = 200 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 15**

$$\sigma_a = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_m = 520 \text{ МПа};$$

**Варіант 4**

$$\sigma_a = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_m = 320 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 6**

$$\sigma_a = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_m = 320 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 8**

$$\sigma_a = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_m = 390 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 10**

$$\sigma_a = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_m = 305 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 12**

$$\sigma_a = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_m = 440 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 14**

$$\sigma_a = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_m = 250 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 16**

$$\sigma_a = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_m = 500 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

#### 5.3.4 Фрагмент № 4:

Побудувати графік змін у якого напруги змінюються:  $\sigma_{min} - \sigma_m - \sigma_{max} -$

$\sigma_m - \sigma_{min}$ .

##### **Варіант 1**

$\sigma_m = 120$  МПа;

$\sigma_a = 40$  МПа;

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

##### **Варіант 3**

$\sigma_m = 150$  МПа;

$\sigma_a = 40$  МПа;

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

##### **Варіант 5**

$\sigma_m = 200$  МПа;

$\sigma_a = 30$  МПа;

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

##### **Варіант 7**

$\sigma_m = 210$  МПа;

$\sigma_a = 30$  МПа;

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

##### **Варіант 9**

$\sigma_m = 100$  МПа;

$\sigma_a = 10$  МПа;

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

##### **Варіант 11**

$\sigma_m = 170$  МПа;

$\sigma_a = 100$  МПа;

##### **Варіант 2**

$\sigma_m = 120$  МПа;

$\sigma_a = 40$  МПа;

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

##### **Варіант 4**

$\sigma_m = 120$  МПа;

$\sigma_a = 60$  МПа;

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

##### **Варіант 6**

$\sigma_m = 200$  МПа;

$\sigma_a = 30$  МПа;

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

##### **Варіант 8**

$\sigma_m = 210$  МПа;

$\sigma_a = 30$  МПа;

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

##### **Варіант 10**

$\sigma_m = 100$  МПа;

$\sigma_a = 10$  МПа;

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

##### **Варіант 12**

$\sigma_m = 170$  МПа;

$\sigma_a = 100$  МПа;

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 13**

$$\sigma_m = 155 \text{ МПа};$$

$$\sigma_a = 55 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 15**

$$\sigma_m = 135 \text{ МПа};$$

$$\sigma_a = 35 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**5.3.5 Фрагмент № 5:**

Побудувати графік змін у якого:

а)  $\sigma_{min} - \sigma_m - \sigma_{max} - \sigma_m - \sigma_{min}$ ;

б)  $\sigma_m - \sigma_{max} - \sigma_m - \sigma_{min} - \sigma_m$ .

**Варіант 1**

$$\sigma_a = 180 \text{ МПа};$$

$$R = -1;$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 3**

$$\sigma_a = 280 \text{ МПа};$$

$$R = -1;$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 5**

$$\sigma_a = 120 \text{ МПа};$$

$$R = -1;$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 7**

$$\sigma_a = 220 \text{ МПа};$$

$$R = -1;$$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 14**

$$\sigma_m = 155 \text{ МПа};$$

$$\sigma_a = 55 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 16**

$$\sigma_m = 135 \text{ МПа};$$

$$\sigma_a = 35 \text{ МПа};$$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 2**

$$\sigma_a = 170 \text{ МПа};$$

$$R = -1;$$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 4**

$$\sigma_a = 280 \text{ МПа};$$

$$R = -1;$$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 6**

$$\sigma_a = 120 \text{ МПа};$$

$$R = -1;$$

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 8**

$$\sigma_a = 220 \text{ МПа};$$

$$R = -1;$$

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 9**

$\sigma_a = 100$  МПа;

$R = -1$ ;

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 11**

$\sigma_a = 200$  МПа;

$R = -1$ ;

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 13**

$\sigma_a = 155$  МПа;

$R = -1$ .

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

**Варіант 15**

$\sigma_a = 135$  МПа;

$R = -1$ ;

період циклу:  $\varphi = 360^\circ$ .

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 10**

$\sigma_a = 100$  МПа;

$R = -1$ ;

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 12**

$\sigma_a = 200$  МПа;

$R = -1$ ;

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 14**

$\sigma_a = 155$  МПа;

$R = -1$ .

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

**Варіант 16**

$\sigma_a = 135$  МПа;

$R = -1$ ;

період циклу:  $\varphi = 180^\circ$ .

## 5.4 Питання контролю

### 5.4.1 Питання вхідного контролю:

- Що таке циклічне навантаження?
- Розкрийте фізичний сенс позитивного та негативного напруження?
- Що таке амплітудна напруга циклу?
- Що таке середня напруга циклу?
- Що таке максимальна та мінімальна напруга циклу?

### 5.4.2 Питання вихідного контролю:

- Що таке жорстке навантаження?
- Що таке м'яке навантаження?
- Як обчислити амплітудну та середню напруги циклу?

- d. Як маючи максимальну та мінімальну напруги циклу обчислити коефіцієнт асиметрії циклу?
- e. Чим відрізняються асиметричний знакопостійний цикл навантаження від пульсуючого?