

## Лабораторна робота №5

### Тема роботи: Оцінка експлуатаційної завантаженості елементів конструкцій металургійного устаткування

**Мета роботи:** ознайомитися з методами схематизації випадкових процесів, набути практичних навичок обробки осцилограм, побудови функції розподілу амплітуд напружень та отримання вихідної інформації про експлуатаційної завантаженості, яка використовується для розрахунку на втомну довговічність; ознайомитися з послідовністю обліку нерегламентованих факторів.

#### 5.1 Теоретичні положення

Характер зміни напружень в деталях машин в процесі експлуатації можна розділити на регулярний і нерегулярний. Регулярним навантаженням, відповідно ГОСТ 23207-78, називають навантаження, що характеризуються періодичним законом зміни напружень в часі з одним максимумом і одним мінімумом протягом одного періоду при сталості параметрів циклу напружень протягом всього часу експлуатації.

Всі інші типи навантажень називають нерегулярними. До них відносяться бігармонічні, полігармонічні, блочні (рис. 1, а) і випадкові (рис. 1, б) навантаження [3–5].

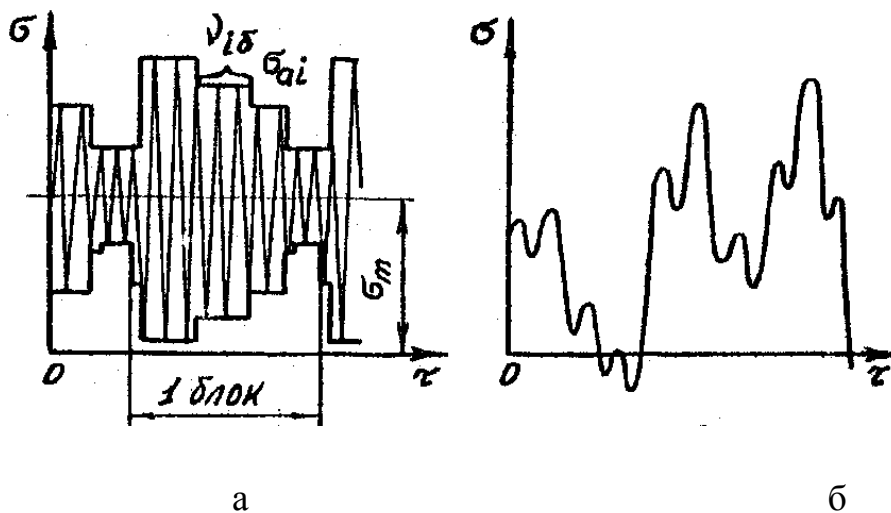


Рисунок 1 - Деякі типи зміни напружень в часі

Блочне навантаження характеризується багаторазовим повторенням однакових блоків, кожен з яких складається з ряду ступенів нагрівання:

$i = 1, 2, \dots, r$ . Ступінь навантаження характеризується амплітудою  $\sigma_{ai}$  і числом її повторення в одному блоці  $v_{i\delta}$ , так що загальне число циклів в одному блоці складає

$$v_{\delta} = v_{1\delta} + v_{2\delta} + \dots + v_{r\delta} = \sum_{i=1}^r v_{i\delta}. \quad (1)$$

Блочне навантаження може бути при постійному середньому напруженні циклу  $\sigma_m$  (див. рис. 1, а) або мати різні величини для окремих ступенів  $\sigma_{mi}$ . Блок навантаження при  $\sigma_m = \text{const}$ , таким чином, задається таблицею, що містить  $r$  пар чисел  $(\sigma_{ai}, v_{i\delta})$   $i = 1, 2, \dots, r$ , де  $r$  - число ступенів в блоці.

При наявності середньої напруги  $\sigma_m$  або  $\sigma_{mi}$  обчислюють наведені до симетричного циклу еквівалентні амплітуди

$$\begin{aligned} \sigma_{ai} &= \sigma_{aie} + \psi_{\sigma D} \sigma_m \quad \text{при } \sigma_m = \text{const}, \\ \sigma_{ai} &= \sigma_{aie} + \psi_{\sigma D} \sigma_{mi} \quad \text{при } \sigma_m \neq \text{const}, \end{aligned} \quad (2)$$

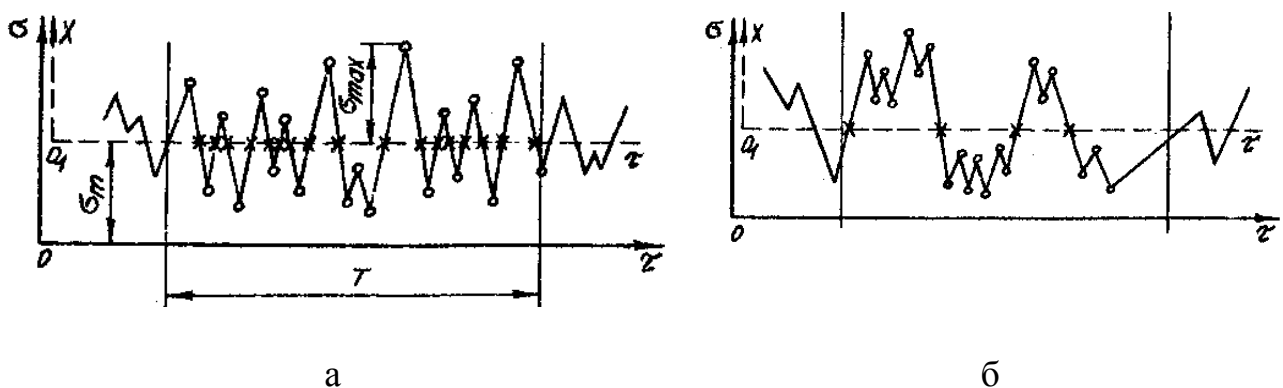
призводять до такого ж втомленого пошкодження, як і при асиметричних циклах. Тут  $\psi_{\sigma D}$  - коефіцієнт впливу асиметрії циклу на граничну амплітуду напружень деталі.

Найбільшого поширення на практиці має випадкове навантаження, при якому процес зміни напружень в часі є випадковим і характеризується наступними параметрами: середнім значенням, функцією розподілу випадкових ординат і т.д.

Розглянемо два типи процесів (рис. 2). На відрізку часу  $T$  кружками відзначені екстремуми процесу (мінімуми і максимуми), хрестиками - точки перетину процесом  $\sigma$  середнього рівня  $\sigma_m$ .

Розглянемо інший випадковий процес в координатах  $x - \tau$ .

$$x = \sigma - \sigma_m. \quad (3)$$



а - вузькосмуговий; б - широкосмуговий

Рисунок 2 - Два типи випадкових процесів зміни напружень

У цьому випадку нова ось абсцис  $O_1\tau$  відстоїть від старої на відстані  $\sigma_m$ , а середнє значення процесу  $x(\tau)$  дорівнює нулю, що спрощує подальший розгляд. Для процесу  $x(\tau)$  хрестики є точками перерізу процесом нульового рівня.

Розглянемо параметр  $\chi$ , який дорівнює відношенню середнього числа «нулів»  $n_0$  (тобто числа точок перетину графіка процесу  $x(\tau)$  своєї осі абсцис  $O_1\tau$  до середнього числа екстремумів процесу  $n_e$  на деякому відрізку часу  $T$ :

$$\chi = n_0 / n_e . \quad (4)$$

На рис. 2:  $n_0 = 17, n_e = 20, \chi = 17 / 20 = 0,85$  (для процесу а);  $n_0 = 4, n_e = 20, \chi = 4 / 20 = 0,2$  (для процесу б). В цьому і полягає принципова різниця між процесами а і б (див. рис. 2).

Коефіцієнт  $\chi$  називають коефіцієнтом складності структури процесу або коефіцієнтом нерегулярності. Якщо  $\chi = 1$  (див. рис. 2, а), то процес умовно називають вузькосмуговим, маючи на увазі, що частоти такого процесу зосереджені всередині вузької смуги біля однієї з певних частот. Якщо  $\chi \ll 1$ , то процес умовно називають широкосмуговим, маючи на увазі наявність в процесі різних частот (хоча в разі  $\chi \ll 1$  і при сумі декількох вузькосмугових процесів таку суму можна також умовно назвати широкосмуговим процесом).

Для накопичення втомних пошкоджень найбільш важливі значення амплітуд напруг і кількість циклів їх повторення. У разі вузько смугового процесу виділити амплітуди напружень дуже легко, а саме: амплітуди обчислюють за формулою

$$\sigma_{ai} = \sigma_{\max i} - \sigma_m . \quad (5)$$

Зареєструвавши все максимуми процесу  $\sigma_{\max i}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) на відрізання часу  $T$  і вирахувавши з них  $\sigma_m$ , отримуємо за формулою (5) випадкову послідовність амплітуд напружень  $\sigma_{ai}$ , що є вихідною інформацією для обчислення розрахункових показників навантаженості. Цей метод називається методом «максимумів» і є одним з методів так званої схематизації випадкового процесу, який дозволяє замінити реальний процес деякої послідовністю амплітуд напружень, еквівалентної йому з пошкодженої дії.

У разі процесу більш складної структури (див. рис. 2, б) виділення амплітуд напружень стає менш очевидним, в зв'язку з чим з'явилося велике число методів схематизації, які призводять до різноманітних результатів.

В даний час прийнято вважати, що найбільш прийнятні дані для оцінки довговічності дають метод повних циклів і метод «дощу», що призводять практично до однакових результатів.

Розглянемо метод повних циклів на прикладі випадкового процесу

(рис. 3). Осцилограма розглядається на відрізку часу  $\tau_6$ , відповідному одному блоку навантаження, під яким розуміють представницьку сукупність послідовних значень змінних напружень, відповідних певного напрацювання деталі  $l_6$  в експлуатації. Величина  $l_6$  може вимірюватися в годинах роботи, обсязі випуску продукції, в кількості технологічних циклів і т.д. На практиці відбирають блок досить великим для отримання статистично представницьких результатів.

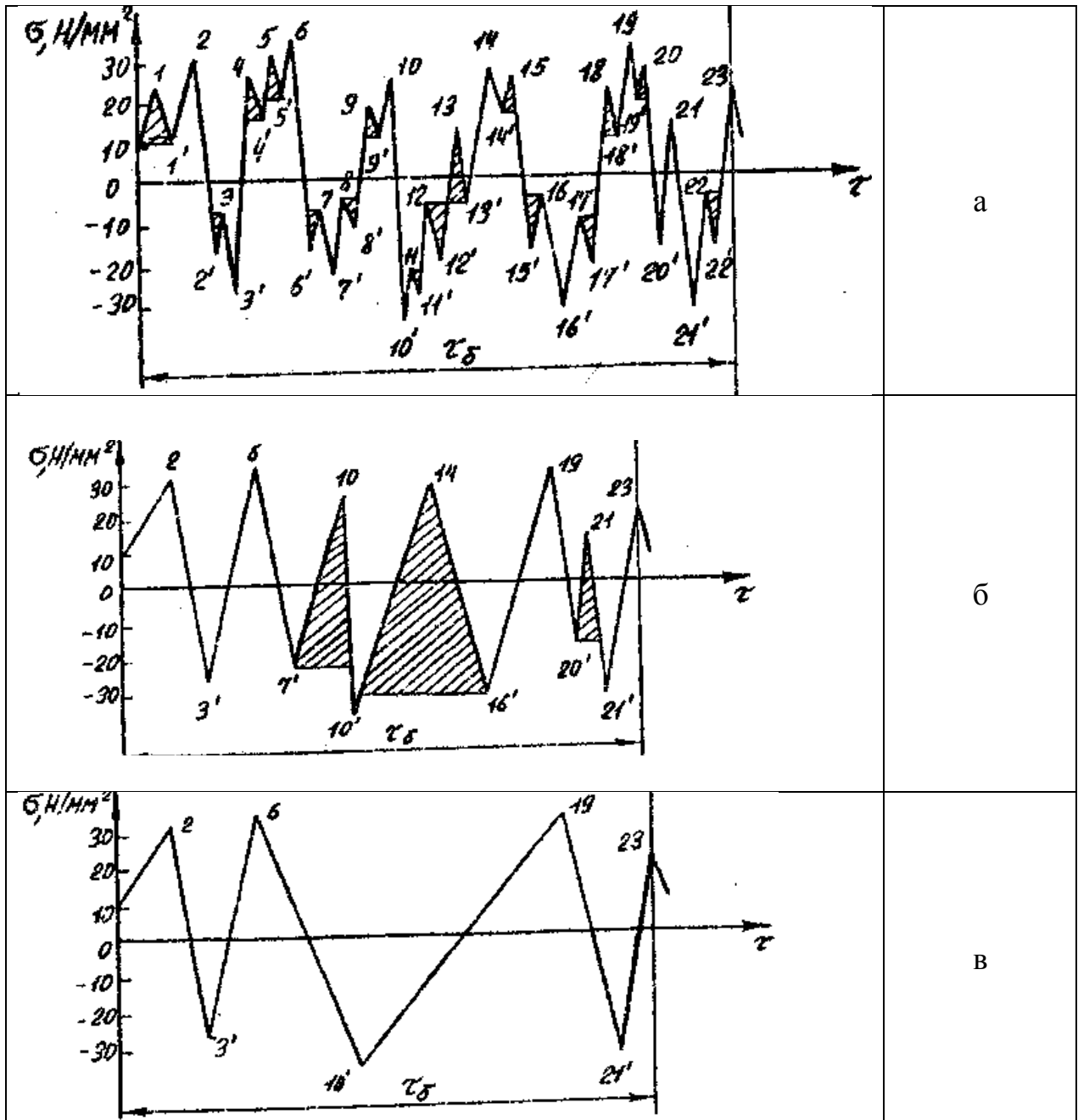


Рисунок 3 - Обробка осцилограми за методом повних циклів

Загальне напрацювання деталі за термін служби до появи втомної тріщини  $L$  визначається:

$$L = \lambda l_0, \quad (6)$$

де  $\lambda$  - число блоків навантаження до появи тріщини.

Число циклів в блоці навантаження  $l_0$  і сумарне число циклів до появи тріщини  $N_{\text{сум}}$  пов'язані співвідношенням

$$N_{\text{сум}} = \lambda v_0. \quad (7)$$

Сенс методу повних циклів зводиться до наступного. З цього методу спочатку з процесу виділяють цикли з розмахами малої величини, показаними штрихуванням на рис. 3, а. Ці розмахи записані в табл. 1 (до розмаху 22-22' включно). Далі записані розмахи вимикають з процесу, в результаті чого виходить процес, показаний на рис. 3, б. Заштриховані на цьому малюнку розмахи записують в табл. 1, після чого їх також виключають, переходячи до процесу на рис. 3, в. У цьому процесі реєструють розмахи 2-3', 6-10', 19-21', які також записують в табл. 1.

Таблиця 1 - Цикли з розмахами

Позначення	Розмах, Н/мм <sup>2</sup>	Позначення	Розмах, Н/мм <sup>2</sup>	Позначення	Розмах, Н/мм <sup>2</sup>
1-1'	13	12-12'	14	7'-10	50
2'-3	9	13-13'	15	14-16'	58
4-4'	10	14'-15	8	20'-21	29
5-5'	10	15'-16	9	2-3'	57
6'-7	8	17-17'	11	6-10'	67
8-8'	7	18-18'	12	19-21	64
9-9'	6	19'-20	8		
11-11'	5	22-22'	12		

Для побудови функції розподілу амплітуд напружень  $\sigma_a$  розмахи в табл. 1 ділимо навпіл, утворюючи варіаційний ряд амплітуд (табл. 2). Для цієї мети обчислюють величини  $[(i-0,55) / n] 100\%$ , які являються емпіричною оцінкою ймовірності появи події  $\sigma_a \leq \sigma_{ai}$ , і точки з абсцисами  $\sigma_{ai}$  і координатами  $[(i-0,55) / n] 100\%$  наносять на нормальний вірогідний папір. Така побудова дана на рис. 4, з якого видно, що функція розподілу амплітуд не відповідає нормальному закону (як і будь-якого іншого - експоненціального, Вейбулла, Пірсона та ін.) і носить досить складний характер. Тому доцільно здійснювати ступеневу апроксимацію емпіричної функції розподілу і вести розрахунок втомної довговічності за ступеневою апроксимуючою функцією розподілу. У табл. 3 і на рис. 4 пояснюється ступінчаста апроксимація функції розподілу амплітуд, отриманої за методом повних циклів.

У першому рядку табл. 3 записані величини  $\sigma_{ai}^*$  що є правими кінцями інтервалів по осі абсцис, на які розбитий діапазон зміни амплітуд, самі інтервали записані в 3-му рядку, а їх середини – в 4-ій.

У 2-му рядку записані величини ймовірностей  $P_i$ , відповідні правим кінцям інтервалів  $\sigma_{ai}^*$  і взяті безпосередньо з рис. 4.

Таблиця 2 - Варіаційний ряд амплітуд

$i$	$\sigma_{ai},$ $H/мм^2$	$\frac{i-0,5}{n} \cdot 100\%$	$i$	$\sigma_{ai},$ $H/мм^2$	$\frac{i-0,5}{n} \cdot 100\%$	$i$	$\sigma_{ai},$ $H/мм^2$	$\frac{i-0,5}{n} \cdot 100\%$
1	2,5	2,3	9	5,0	38,6	17	14,5	75,0
2	3,0	6,8	10	5,0	43,2	18	25,0	79,5
3	3,5	11,4	11	5,5	47,7	19	28,5	84,1
4	4,0	15,9	12	6,0	52,3	20	29,0	88,5
5	4,0	20,4	13	6,0	56,9	21	32,0	93,1
6	4,0	25,0	14	6,5	61,3	22	33,5	97,8
7	4,5	2,6	15	7,0	65,9			
8	4,5	34,1	16	7,5	70,5			

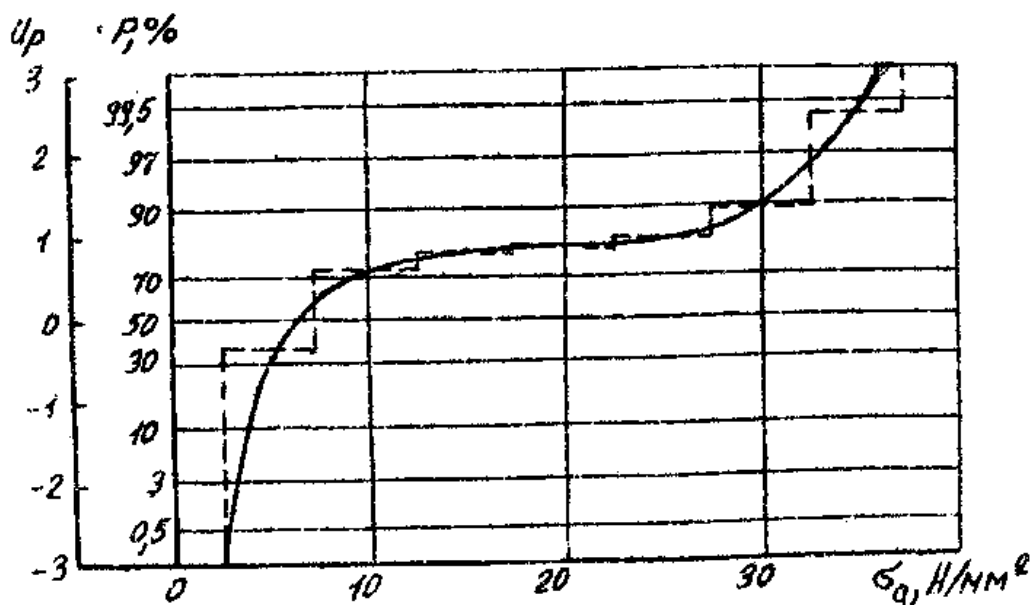


Рисунок 4 - Функція розподілу амплітуд напружень процесу, представленою на рис. 3

Таблиця 3 - Результати схематизації випадкового навантаження

№ з/п	Параметри блока навантаження	Номер інтервалу $i$								Сумарне значення
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	$\sigma_{ai}^*$ , Н/мм <sup>2</sup>	0	5	10	15	20	25	30	35	-
2	$\Delta P_i$ , %	0	40	72	78	80	81	88	88.2	-
3	Інтервал $\sigma_{ai}$ , Н/мм <sup>2</sup>	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	-
4	Середина інтервала $\sigma_{ai}$ , Н/мм <sup>2</sup>	2.5	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	-
5	$\Delta P_i$ , %	40	32	6	2	1	7	11,2	0,8	$\sum \Delta P_i = 100\%$
6	$t_i = \Delta P_i / 100$	0,40	0,32	0,06	0,02	0,01	0,07	0,11	0,008	$\sum t_i = 1$
7	$v_{i\bar{\sigma}}$	8,80	7,04	1,32	0,44	0,22	1,54	2,42	0,176	$v_{\bar{\sigma}} = \sum v_{i\bar{\sigma}} = 22$
8	$\sigma_{ai} / \sigma_{amax}$	0,067	0,200	0,333	0,467	0,600	0,733	0,867	1	-

У 5-му рядку дані різниці  $\Delta P_i = P_i - P_{(i-1)}$  значень  $P_i$  на правому і лівому кінцях кожного  $i$ -го інтервалу, а в 6-му рядку - величини  $t_i = \Delta P_i / 100$ , що представляють собою ті ж різниці в частках одиниці і характеризують ту частку від загальної кількості циклів в блоці  $v_{\bar{\sigma}}$ , яка доводиться на  $i$ -й інтервал, тобто величину  $v_{i\bar{\sigma}}$ .

Таким чином,

$$v_{i\bar{\sigma}} = t_i v_{\bar{\sigma}} = (\Delta P_i / 100) v_{\bar{\sigma}}. \quad (8)$$

Ці величини записані в 7-му рядку. У 8-му рядку записані амплітуди напружень  $\sigma_{ai}$ , які віднесені до максимальної амплітуди  $\sigma_{amax} = 37,5$  Н/мм<sup>2</sup>.

Таким чином, випадковий процес зміни напружень (див. рис. 3) зведений до блокового навантаження, заданому в табл. 3 і еквівалентному йому по шкідливій дії.

Дані табл. 3 є вихідною інформацією про експлуатаційне навантаження, яка використовується для розрахунку на втомну довговічність.

Зазвичай машини працюють поперемінно в різних умовах експлуатації або при різних режимах, що викликають різні рівні змінної навантаженості.

Так, наприклад, рівень змінних напружень в лінії приводу прокатного стану в суттєвому ступені залежить від матеріалу, який прокатується, стану поверхні матеріалу, швидкості прокатки та ін. Ці фактори є регламентованими. Для кожного режиму на основі тензометрії отримують за описаною вище методикою свою ступінчасту функцію розподілу амплітуд напружень, і далі на їх основі - так званий змішаний блок навантаження, в якому врахована робота при всіх  $r$  режимах з частками роботи за часом  $P_j$ , де  $j$  - порядковий номер режиму навантаження.

Крім регламентованих факторів існує багато інших факторів, що оказують невеликий вплив на рівень навантажень, які недоцільно вводити в число регламентованих. Тем не менш дія цих факторів необхідно враховувати, так як вони викликають розсіювання параметрів блоку навантаження. До таких нерегламентованих факторів стосовно, наприклад, до прокатних станів можна віднести варіації точності виготовлення конструкції, стану матеріалу, який прокатується та ін.

Облік впливу нерегламентованих факторів повинен вироблятися шляхом ряду повторних вимірів напруг в експлуатації при кожному режимі навантаження.

При цьому внаслідок незначного впливу кожного з нерегламентованих факторів можна вважати, що вид емпіричної функції розподілу в відносних величинах  $\sigma_{ai}/\sigma_{amax} - t_i$  не змінюється, а змінюються тільки величини  $\sigma_{amax}$  і  $v_{\sigma}$  змішаного блоку. Так як факторів багато, то можна очікувати відповідно до теореми теорії ймовірності, що випадкова величина  $\sigma_{amax}$  буде мати нормальний розподіл. Практика підтверджує це припущення. Величина  $v_{\sigma}$  зазвичай розподілена по логарифмічно нормальному закону, тобто за нормальним законом розподілена величина  $\lg v_{\sigma}$ .

Таким чином, ступінчаста апроксимація функції розподілу амплітуд напружень змішаного блоку, а також величини  $\bar{\sigma}_{max}$ ,  $v_{\sigma}$ ,  $\overline{\lg v_{\sigma}}$ ,  $v_{\lg v_{\sigma}}$  є інформацією про навантаженість, необхідної для розрахунку втомної довговічності ймовірносними методами.

### **Лабораторне обладнання**

Персональні ЕОМ, осцилограми навантаження.

### **Порядок виконання роботи**

- 1 Для ділянки осцилограми, запропонованої викладачем, визначити коефіцієнт складності структури процесу  $\chi$ , зробити висновок про тип розглянутого процесу.
- 2 Провести схематизацію випадкового процесу за методом повних циклів, побудувати функцію розподілу амплітуд напружень. Розрахунки виконати з використанням ЕОМ. Результати занести в таблиці, аналогічні табл. 1-2 відповідно.
- 3 Провести ступінчасту апроксимацію емпіричної функції розподілу амплітуд, результати занести в таблицю, за формою, яка відповідає табл. 3.



## **Зміст звіту**

- 1 Найменування і мета роботи.
- 2 Короткі теоретичні відомості.
- 3 Копія ділянки осцилограми випадкового процесу.
- 4 Необхідні розрахунки, табличне і графічне представлення отриманих результатів.

## **Контрольні питання**

- 1 Який тип навантаження називають регулярним? Наведіть приклад.
- 2 Які типи навантаження називають нерегулярними?
- 3 Дайте визначення блочному навантаженню.
- 4 Як визначаються наведені до симетричного циклу еквівалентні амплітуди?
- 5 Що розуміють під коефіцієнтом складності структури процесу?
- 6 У чому полягає метод повних циклів?
- 7 Наведіть порядок побудови функції розподілу амплітуд напружень.
- 8 Обґрунтуйте доцільність здійснення ступеневої апроксимації емпіричної функції розподілу.