

**Методичні вказівки
до виконання самостійної роботи з дисципліни
«Основи метрології та електричних вимірювань»
зі спеціальності «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**Методичні вказівки
до виконання самостійної роботи з дисципліни
«Основи метрології та електричних вимірювань»
зі спеціальності «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»**

Вінниця
ВНТУ
2026

Рекомендовано до видання Радою з якості освіти Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 12 від 28.05.2026 р.)

Рецензенти:

М. Й. Бурбело, доктор технічних наук, професор

М. М. Мошноріз, кандидат технічних наук, доцент

Методичні вказівки до виконання самостійної роботи з дисципліни «Основи метрології та електричних вимірювань» зі спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад. В. В. Кухарчук. Електрон. текст. дані. Вінниця : ВНТУ, 2026. 70 с.

У методичних вказівках наведено методики виконання індивідуальних розрахункових завдань в галузі оцінювання основних статичних метрологічних характеристик та випадкових похибок електромеханічних і електронних засобів вимірювання. Наведено алгоритми та приклади математичного і комп'ютерного моделювання метрологічних характеристик цифрових вимірювальних каналів електричних величин.

Призначені для студентів напрямку підготовки бакалаврів спеціальності G3 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка під час підготовки та самостійного виконання індивідуальних завдань до практичних занять з дисципліни «Основи метрології та електричних вимірювань».

ЗМІСТ

1 ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ	4
2 ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 1	
ОЦІНЮВАННЯ ОСНОВНИХ СТАТИЧНИХ МЕТРОЛОГІЧНИХ	
ХАРАКТЕРИСТИК АНАЛОГОВИХ ЗАСОБІВ	5
2.1 Методика виконання ІнРЗ № 1	5
2.2 Варіанти індивідуальних завдань до ІнРЗ №1	6
2.3 Приклад виконання ІнРЗ №1	9
3 ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 2	
НОРМУВАННЯ ПОХИБОК АНАЛОГОВИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ.	18
3.1 Систематизація похибок засобів вимірювань.....	18
3.2 Методики нормування похибок засобів вимірювання	21
3.3 Варіанти індивідуальних завдань до ІнРЗ № 2	22
3.4 Приклад виконання ІнРЗ №2	29
4 ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 3	
ОЦІНЮВАННЯ ВИПАДКОВИХ ПОХИБОК ПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ....	36
4.1 Методика оцінювання випадкових похибок прямих вимірювань.....	36
4.2 Варіанти індивідуальних завдань до ІнРЗ № 3	39
4.3 Приклад оцінювання випадкових похибок прямих вимірювань напруги	41
5 ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 4	
ОЦІНЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ОСНОВНИХ СТАТИЧНИХ	
МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ	
ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН	48
5.1 Вимірювальний канал часового інтервалу:	
структурна схема і принцип дії.....	48
5.2 Варіанти індивідуальних завдань до ІнРЗ № 4	54
5.3 Приклад оцінювання основних статичних метрологічних	
характеристик вимірювального каналу часового інтервалу	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	68
ДОДАТОК А	69

1 ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

Протягом навчального семестру студенти повинні самостійно виконати і захистити чотири індивідуальні розрахункові завдання (ІнРЗ):

1. Оцінювання основних статичних метрологічних характеристик аналогових засобів вимірювання.
2. Нормування похибок аналогових і цифрових засобів вимірювання.
3. Оцінювання випадкових похибок прямих вимірювань.
4. Оцінювання основних статичних метрологічних характеристик цифрових вимірювальних каналів електричних величин.

Кожне індивідуальне розрахункове завдання виконується студентом власноручно в зошиті для практичних занять і її основними складовими мають бути такі:

Графічна частина (умовне графічне зображення шкали з необхідними поясненнями), яка наводиться **в зошиті олівцем**. Для цифрових вимірювальних каналів наводиться структурна схема і часові діаграми роботи з розкриттям умовних позначень, але **без опису принципу дії**.

В розрахунковій частині ІнРЗ наводяться формули, числові значення і результати розрахунків з одиницями вимірювань. Ніяких пояснень до формул і числових значень **не наводити**.

Результати розрахунків для кожної роботи зводяться в таблицю, на підставі якої робляться висновки.

Після висновків наводиться список використаних літературних джерел.

Пояснення до схем, часових діаграм, умовних позначень, формул надаються студентом під час захисту кожного індивідуального завдання.

Оцінювання кожного індивідуального розрахункового завдання здійснюється за кредитно-модульною системою:

Кредитно-модульна система оцінювання лабораторних робіт

Номер роботи	Назва роботи	Оцінювання		
		A	B-C	D-E
Пр №1	«Оцінювання основних статичних метрологічних характеристик аналогових засобів вимірювання»	4.0	3.0	2.5
Пр №2	«Нормування похибок аналогових і цифрових засобів вимірювання»	4.0	3.0	2.5
Пр №3	«Оцінювання випадкових похибок прямих вимірювань»	4.0	3.0	2.5
Пр №4	«Оцінювання основних статичних метрологічних характеристик цифрових вимірювальних каналів електричних величин»	6...5	4.5	4.0...3.5

2 ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 1

ОЦІНЮВАННЯ ОСНОВНИХ СТАТИЧНИХ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНАЛОГОВИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ

2.1. Методика виконання ІнРЗ № 1

В даному завданні (табл.1) необхідно подати наступне:

2.1. Знати сутність фізичного ефекту, що покладено в основу побудови згідно до вашого варіанту електромеханічного засобу вимірювання;

2.2. Знати функцію перетворення для цього аналогового засобу вимірювання у трьох видах її подання:

2.2.1 аналітичному – рівняння перетворення;

2.2.2 графічному – статична характеристика;

2.2.3 табличному – градувальна характеристика.

2.3. В даному завданні необхідно також подати умовне графічне зображення шкали Вашого засобу вимірювання для параметрів з Вашого індивідуального завдання (нульова відмітка, верхня межа, кількість поділок n , числове значення поділки n_i , на якій зупинилась стрілка).

2.4. Послідовно розглядаючи основні статичні метрологічні характеристики необхідно навести відповідні формули, підставити в них числові значення з табл.1, отримати результат з одиницею вимірювання:

2.4.1 Визначити ціну поділки C ,

2.4.2 Оцінити похибку градування шкали Δ_{III} ,

2.4.3 Оцінити чутливість S ,

2.4.4 Визначити виміряне значення X_B ,

2.5 Оцінити абсолютну похибку Δ_{3B} (після отримання числового значення абсолютної похибки необхідно знати (усно) декілька шляхів визначення дійсного значення),

2.6 Оцінити поправку Δ_q ,

2.7 Оцінити відносної похибки δ_{3B} ,

2.8 Оцінити точність θ ,

2.9 Оцінити зведену похибку γ (після числового значення зведеної похибки необхідно знати (усно) декілька методів визначення нормуючого значення і обґрунтувати вибір X_H для шкали засобу вимірювання).

2.10 Результати розрахунків звести до табл.2.

2.11 На підставі числових значень, що наведені в табл.2, зробити висновки до індивідуальної розрахункової роботи практичної роботи №1.

2.2. Варіанти індивідуальних завдань до ІнРЗ №1

Варіанти індивідуальних завдань з вихідними даними для оцінювання основних статичних метрологічних характеристик аналогових засобів вимірювання наведено в табл.1.

Таблиця 1 – Вихідні дані для аналізу функції перетворення та розрахунку основних статичних метрологічних характеристик аналогових засобів вимірювання

№ вар.	Рівняння перетворення	U _{max} [В]	Магнітоелектричний вольтметр							
			U _{д,В}	n	n _i	Оцифровані відмітки шкали				
1	$\alpha = S_U \cdot U$ $U_B = C_U \cdot n_i$	2	0.97	20	10	1	2	3	4	5
2		5	4.11	25	20	5	6	7	8	9
3		10	5.86	25	15	10	15	20	25	30
4		20	11.79	50	30	10	12	14	16	18
5		30	24.91	30	25	20	25	30	35	40
6		40	34.12	40	34	30	35	40	45	50
7		50	39.87	100	80	10	15	20	25	30
8		60	36.17	30	18	20	30	40	50	60
9		70	39.87	35	20	30	40	50	60	70
10		80	56.09	40	28	40	50	60	70	80
11		90	80.12	45	40	50	55	60	65	70
12		100	62.42	40	25	50	60	70	80	90
№ вар.	Рівняння перетворення	I _{max} [А]	Магнітоелектричний амперметр							
			I _{д,А}	n	n _i	Оцифровані відмітки шкали				
13	$\alpha = S_I \cdot I$ $I_B = C_I \cdot n_i$	1.00	0.72	20	15	1	2	3	4	5
14		2.00	1.31	40	27	1	2	3	4	5
15		3.00	2.26	30	25	1	2	3	4	5
16		4.00	3.15	40	32	1	2	3	4	5
17		5.00	3.89	25	20	10	12	14	16	18
18		10.0	6.12	50	30	5	6	7	8	9
19		25.0	20.17	50	40	10	15	25	30	35
20		20.0	9.89	50	25	20	22	24	26	28
№ вар.	Рівняння перетворення	I _{max} [А]	Електродинамічний амперметр							
			I _{д,А}	n	n _i	Оцифровані відмітки шкали				
21	$\alpha = S_I \cdot I^2$, Лінеаризована $\alpha = S_I \cdot I$ $I_B = C_I \cdot n_i$	1.50	0.87	30	18	1	2	3	4	5
22		2.00	1.54	25	20	2	3	4	5	6
23		2.50	1.37	25	14	2	3	4	5	6
24		3.00	1.65	30	17	2	3	4	5	6
25		4.00	2.95	40	29	2	3	4	5	6
26		5.00	2.89	50	30	3	4	5	6	7
27		10.0	6.67	40	27	10	12	14	16	18
28		15.0	8.59	30	17	20	22	24	26	28
29		20.0	10.58	40	21	10	15	20	25	30
30		25.0	21.87	50	44	10	15	20	25	30
31		30.0	26.11	30	26	10	20	30	40	50
32		40.0	26.17	20	18	20	30	40	50	60
33		50.0	43.86	25	22	20	30	40	50	60

Продовження таблиці 1

№ вар.	Рівняння перетворення	U _{max} [В]	Електродинамічний вольтметр							
			U _{д,В}	n	n _i	Оцифровані відмітки шкали				
34	$\alpha = S_I \cdot U^2$ Лінеаризована $\alpha = S_U \cdot U$ $U_B = C_U \cdot n_i$	10	7.13	20	14	20	22	24	26	28
35		20	10.89	20	11	10	20	30	40	50
36		30	17.11	30	17	10	20	30	40	50
37		40	32.86	40	33	10	20	30	40	50
38		50	37.87	25	19	20	30	40	50	60
39		75	36.23	25	12	100	110	120	130	140
40		100	63.82	50	32	100	110	120	130	140
41		200	125.3	100	63	50	60	70	80	90
42		250	209.78	100	84	10	12	14	16	18
43		300	255.7	60	51	100	120	140	160	180
44		400	352.5	100	88	100	120	140	160	180
45		500	400.5	250	200	50	60	70	80	90
№ вар.	Рівняння перетворення	P _{max} [Вт]	Електродинамічний ватметр							
			P _{д,Вт}	n	n _i	Оцифровані відмітки шкали				
46	$\alpha = S_P \cdot P$ $P_B = C_P \cdot n_i$	2.50	1.94	25	20	2	3	4	5	6
47		5.00	3.64	25	18	8	9	10	11	12
48		10.0	7.87	50	39	8	9	10	11	12
49		20.0	8.54	40	17	10	15	20	25	30
50		25.0	21.42	50	43	10	15	20	25	30
51		30.0	26.88	30	27	20	30	40	50	60
52		40.0	37.11	40	37	20	30	40	50	60
53		50.0	47.77	25	24	50	60	70	80	90
54		75.0	48.13	25	16	100	120	140	160	180
55		100.0	81.86	50	41	50	60	70	80	90
№ вар.	Рівняння перетворення	U _{max} [кВ]	Електростатичний вольтметр							
			U _{д,кВ}	n	n _i	Оцифровані відмітки шкали				
56	$\alpha = S_U \cdot U^2$ Лінеаризована $\alpha = S_U \cdot U$ $U_B = C_U \cdot n_i$	1.0	0.75	20	16	1	2	3	4	5
57		1.25	0.57	25	11	1	2	3	4	5
58		1.5	1.34	30	27	1	2	3	4	5
59		2.0	1.48	40	30	1	2	3	4	5
60		2.5	1.36	25	14	1	2	2	4	5
61		5.0	2.86	50	28	1	2	2	4	5
62		10.0	5.91	20	12	10	15	20	25	30
63		20.0	16.57	40	33	10	15	20	25	30
64		30.0	24.12	30	24	20	30	40	50	60
65		40.0	34.45	50	43	10	15	20	25	30
66		50.0	45.56	25	23	50	60	70	80	90
№ вар.	Рівняння перетворення	I _{max} [мА]	Електромагнітний амперметр							
			I _{д,мА}	n	n _i	Оцифровані відмітки шкали				
67	$\alpha = S_I \cdot I^2$ Лінеаризована $\alpha = S_I \cdot I$ $I_B = C_I \cdot n_i$	10	6.87	10	7	30	35	40	45	50
68		15	11.09	30	22	50	60	70	80	90
69		20	12.78	20	13	45	50	55	60	65
70		25	10.45	50	21	30	32	34	36	38
71		30	23.79	30	24	30	40	50	60	70
72		35	32.85	70	66	10	15	20	25	30
73		40	27	20	14	60	70	80	90	100
74		45	33.78	45	34	20	30	40	50	60
75		50	27.09	50	27	20	30	40	50	60
76		75	56.49	25	19	100	150	200	250	300

Продовження таблиці 1

№ вар.	Рівняння перетворення	I _{max} [A]	Феродинамічний амперметр							
			I _д , A	n	n _i	Оцифровані відмітки шкали				
77	$\alpha = S_I \cdot I^2$ Лінеаризована $\alpha = S_I \cdot I$ $I_B = C_I \cdot n_i$	10	7.08	20	14	10	20	25	30	35
78		15	13.57	30	27	10	20	25	30	35
79		20	8.89	40	18	10	20	25	30	35
80		25	17.08	50	34	10	20	25	30	35
81		30	25.6	60	51	10	20	25	30	35
82		40	31.07	40	31	25	30	35	40	45
83		50	41.78	25	21	40	50	60	70	80
84		60	47.86	30	24	60	70	80	90	100
85		70	66.21	70	66	25	30	35	40	45
86		80	49.86	40	25	60	70	80	90	100
87		90	80.11	45	40	70	75	80	85	90
88		100	43.37	50	22	80	85	90	95	100
№ вар.	Рівняння перетворення	U _{max} [B]	Феродинамічний вольтметр							
			U _д , B	n	n _i	Оцифровані відмітки шкали				
89	$\alpha = S_U \cdot U^2$ Лінеаризована $\alpha = S_U \cdot U$ $U_B = C_U \cdot n_i$	10.0	9.24	25	23	10	15	20	25	30
90		25.0	17.08	25	17	20	30	40	50	60
91		50.0	42.12	25	21	40	50	60	70	80
92		100	95	25	24	100	110	120	130	140
93		150	123	75	62	40	50	60	70	75
94		200	96	40	19	100	150	200	250	300
95		250	219	50	44	100	150	200	250	300
96		300	141	60	28	200	250	300	350	400
97		350	301	70	60	200	250	300	350	400
98		400	309	100	77	100	150	200	250	300
99		450	374	90	75	200	250	300	350	400
100		500	462	100	92	200	250	300	350	400
№ вар.	Рівняння перетворення	P _{max} [кВт]	Феродинамічний ватметр							
			P _д , кВт	n	n _i	Оцифровані відмітки шкали				
101	$\alpha = S_P \cdot P$ $P_B = C_P \cdot n_i$	5.0	4.43	50	44	1	2	3	4	5
102		10	6.45	20	13	20	25	30	35	40
103		15	10.52	30	21	10	15	20	25	30
104		20	15.4	40	31	10	20	30	40	50
105		25	18.14	50	36	15	20	25	30	35
106		30	19.19	60	38	10	20	25	30	35
107		35	33.13	70	66	15	20	25	30	35
108		40	33.66	50	42	20	25	30	35	40
109		45	43.58	90	87	40	50	60	70	80
110		50	37.91	25	19	50	60	70	80	90

Таблиця 2 – Результати розрахунків ІнРЗ №1

№ п.п	Найменування статичної характеристики	Аналітична залежність	
1	Рівняння перетворення		
2	Рівняння градування шкали		
3	Діапазон показів		
№ п.п	Найменування статичної характеристики	Числове значення	Одиниця вимірювання
4	Значення ціни поділки		
5	Значення чутливості		
6	Значення похибки градування шкали		
7	Вимірне значення		
8	Абсолютна похибка		
9	Поправка		
10	Відносна похибка		
11	Точність		
12	Зведена похибка		

2.3 Приклад виконання ІнРЗ №1

2.3.1 Зразок індивідуального завдання

Індивідуальне завдання має бути наступним листом після титульного листа.

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Факультет _____ ФЕЕМ _____ Кафедра _____ КЕМСК
 Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Максим ЛУНІН

(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема Оцінювання і аналіз основних метрологічних характеристик електромагнітного амперметра

2. Термін здачі студентом закінченого РГР на 4-му тижні

3. Вихідні дані до розрахункової роботи:

3.1. Номер варіанту завдання Варіант № 133

3.2. Вихідні дані для оцінювання випадкових похибок вимірювань:

Таблиця 3 – Варіант № 133

№ вар.	Рівняння перетворення	I_{max} [mA]	Електромагнітний амперметр							
			I_d, mA	n	n_i	Оцифровані відмітки шкали				
131	$\alpha = S_I \cdot I^2$									
132	Лінеариз. $\alpha = S_I \cdot I$									
133	$I_B = C_I \cdot n_i$	25	10.3	50	21	5	10	15	20	25
134										
135										

4. Дата видачі завдання до РГР «___» _____ 20__ р.

Викладач _____ (Підпис)
Завдання прийняв до виконання _____ (Підпис)

2.3.2 Приклад оцінювання основних статичних метрологічних характеристик електромагнітного амперметра

2.3.2.1 Сформулюйте (усно) сутність фізичного ефекту, що покладено в основу побудови електромагнітного амперметра.

2.3.2.2 Подайте (усно) *функцію перетворення електромагнітного амперметра у трьох видах: аналітичному, графічному і табличному*.

2.3.2.3 Наведіть умовне графічне позначення шкали електромагнітного амперметра для параметрів з Вашого індивідуального завдання (нульова відмітка, верхня межа, кількість поділок n , числове значення поділки n_i , на якій зупинилась стрілка).

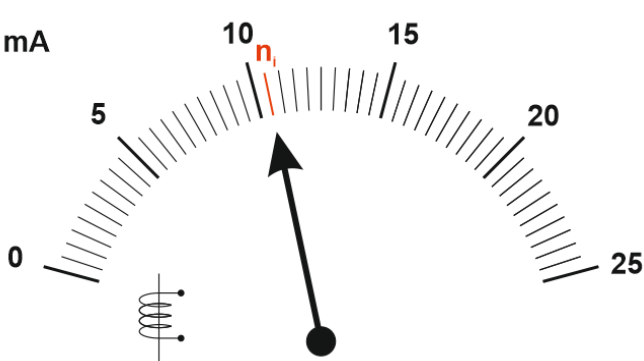
Умовне графічне позначення шкали амперметра	Параметри міліамперметра
	$I_{max} = 25 \text{ mA}$ $n = 50 \text{ под.}$ $n_i = 21 \text{ под.}$

Рисунок 1 – Умовне графічне позначення шкали електромагнітного амперметра

2.3.2.4 Знайдемо ціну поділки електромагнітного амперметра

Ціна поділки – це різниця значень вимірюваної величини, що відповідає двом сусіднім позначкам шкали і визначається як відношення верхньої межі $I_{\max}$ вимірювання до кількості поділок n :

$$C = \frac{I_{\max}}{n} = \frac{25 \text{ mA}}{50 \text{ под}} = 0.5 \left[\frac{\text{mA}}{\text{под}} \right]. \quad (1.1)$$

2.3.2.5 Оцінимо похибку градуювання шкали.

Похибка градуювання шкали дорівнює половині ціни поділки:

$$\Delta_{\text{ш}} = \frac{1}{2} C = \frac{1}{2} 0.5 = 0.25 \left[\frac{\text{mA}}{\text{под}} \right]. \quad (1.2)$$

2.3.2.6 Визначимо чутливість амперметра.

Чутливість – відношення зміни вихідної величини Δy засобу вимірювань до зміни вхідної величини Δx , що її викликає:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (1.3)$$

Три шляхи визначення чутливості:

I. Визначимо чутливість зі шкали приладу, як величину обернену до ціни поділки:

$$S = \frac{1}{C}. \quad (1.4)$$

На рис. 1 наведено амперметр, шкала якого має $n=50$ поділок, а його верхня межа вимірювання $I_{\max} = 25 \text{ mA}$. Підставивши значення ціни поділки отримаємо відповідне йому значення чутливості:

$$S_{\text{ш}} = \frac{1}{0.5} = 2 \left[\text{под} / \text{A} \right].$$

II. По рівнянню перетворення. Чутливість є похідна від вихідної y величини засобу вимірювання до його вхідної x величини:

$$S = \frac{d y}{d x}. \quad (1.5)$$

Лінеаризоване рівняння перетворення (табл.3) для електромагнітного амперметра має вигляд:

$$\alpha = S_{III} \cdot I. \quad (1.6)$$

Тоді рівняння його (вольтметра) чутливості буде таким:

$$S = \frac{d \alpha}{d I} = \frac{d}{d I} \cdot (S_{III} \cdot I) = S_{III}. \quad (1.7)$$

Якщо в отримане рівняння чутливості підставити числове значення S_{III} , то отримаємо:

$$S_{pn} = S_{III} = 2[nod / A].$$

III. По статичній характеристиці засобу вимірювання чутливість визначають:

$$S_{cx} = \frac{d y}{d x} = \frac{d \alpha}{d I} = \frac{a_2 - a_1}{I_2 - I_1}. \quad (1.8)$$

З рівняння перетворення:

$$\alpha = S_{III} \cdot I = 2[nod / A] \cdot I$$

отримаємо табличне подання функції перетворення (градувальна характеристика) і графічну залежність (статична характеристика).

З урахуванням того, що чутливість амперметра $S = [2 \text{ под/А}]$, а діапазон зміни його показів від 0 В до 25 мА, отримаємо графічне подання функції перетворення у вигляді статичної характеристики (рис. 2).

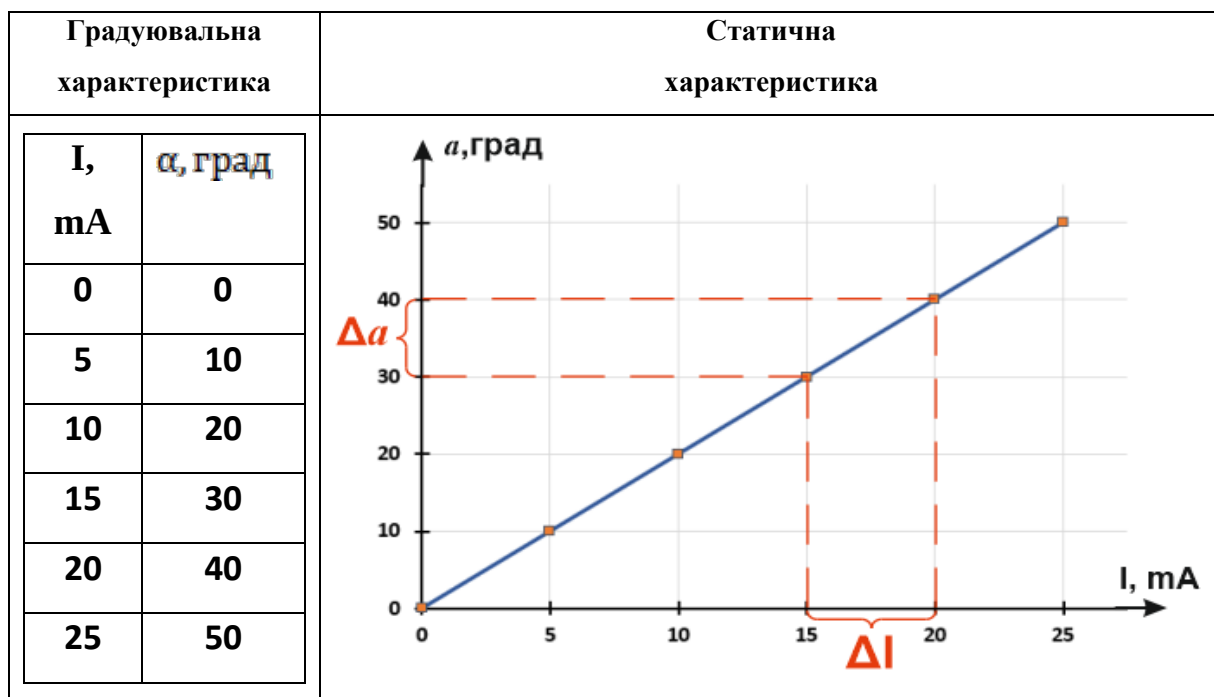


Рисунок 2 – Лінеаризована функція перетворення електромагнітного амперметра

Враховавши те, що статична характеристика лінійна (рис. 2) для визначення числового значення чутливості задамося на цій прямій будь-якою точкою із діапазону зміни вхідного сигналу (струму I). Оберемо, наприклад, точку 1 – $\{I_1=15 \text{ мА}, \alpha_1 = 30 \text{ град}\}$ і точку 2 – $\{I_2 = 20 \text{ мА}, \alpha_2 = 40 \text{ град}\}$.

Тоді зміни вихідної і вхідної фізичних величин подаємо так:

$$\Delta \alpha = \alpha_2 - \alpha_1 = 40 - 30 = 10 \text{ град};$$

$$\Delta I = I_2 - I_1 = 20 - 15 = 5 \text{ мА}.$$

В результаті чутливість, що встановлено по статичній характеристиці вольтметра, має таке числове значення:

$$S_{\text{СК}} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta I} = \frac{10 \text{ град}}{5 \text{ мА}} = 2 \text{ град/мА}.$$

Чутливості, значення яких визначено різними методами, співпадають:

$$S_{\text{Ш}} = S_{\text{РП}} = S_{\text{СК}} = 2 \text{ [град/мА]}.$$

2.3.2.7 Знайдемо вимірне значення.

Вимірне значення знаходять експериментально, як добуток ціни поділки на кількість поділок шкали засобу вимірювання, на яку відхилилась стрілка:

$$I_B = C \cdot n_i = 0.5 \cdot 21 = 10.5 \text{mA}. \quad (1.8)$$

2.3.2.8 Оцінимо абсолютну похибку вимірювання.

Абсолютною похибкою називають різницю між вимірним (результатом вимірювання) і дійсним значеннями:

$$\Delta_X = I_B - I_D = 10.5 - 10.3 = 0.2 \text{mA}. \quad (1.9)$$

2.3.2.9 Знайдемо поправку.

Поправка – значення величини, що алгебрично додається до результату вимірювання з метою вилучення систематичної похибки. Абсолютну похибку взятую з протилежним знаком називають поправкою:

$$\Delta_q = -\Delta_X = -(0.2 \text{mA}) = -0.2 \text{mA}. \quad (1.10)$$

2.3.2.10 Оцінимо відносну похибку вимірювання.

Відотною похибкою називають відношення абсолютної похибки вимірювання до дійсного значення вимірюваної величини:

$$\delta = \frac{\Delta_X}{X_D} \cdot 100\% = \frac{0.2}{10.3} \cdot 100\% = 1.94\%. \quad (1.11)$$

2.3.2.11 Оцінимо точність вимірювання.

Точністю вимірювання – називають величину обернену до відносної похибки, яка подана у відносних одиницях:

$$\Theta = \frac{1}{\delta} = \frac{X_D}{\Delta} = \frac{10.3}{0.2} = 51.5. \quad (1.12)$$

2.3.2.12 Оцінимо зведену похибку засобу вимірювання.

Зведеною похибкою засобу вимірювань – називають відношення абсолютної похибки засобу вимірювань до нормованого значення:

$$\gamma = \frac{\Delta_X}{X_H} \cdot 100\%. \quad (1.13)$$

Оскільки шкала даного електромагнітного амперметра відноситься до шкали з нульовою відміткою на початку шкали, то в якості нормованого значення X_H необхідно вибрати верхню межу вимірювань (рис.1).

$$X_H = X_{\max} = 25 \text{ mA}.$$

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_H} \cdot 100\% = \frac{0.2}{25} \cdot 100\% = 0.8\%.$$

Висновки до розрахункової роботи наведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Висновки до ІнРЗ № 1

№ п/п	Найменування статичної характеристики	Числове значення	Одиниця вимірювання
1	Діапазон показів	Від 0 до 25	мА
2	Значення ціни поділки	0.50	мА/под
3	Значення чутливості	2	под/мА
4	Значення похибки градуювання шкали	0.25	мА/под
5	Виміряне значення	10.5	мА
6	Дійсне значення	10.3	мА
7	Абсолютна похибка	0.2	мА
8	Поправка	-0.2	мА
9	Відносна похибка	1.94	%
10	Точність	51.5	
11	Зведена похибка	0.8	%

***Контрольні питання та практичні завдання
до індивідуального розрахункового завдання ІнРЗ №1***

1. Дайте поняття вимірювань. Яка основна операція виконується під час вимірювань?
2. Дайте поняття діапазону вимірювань. Принципова різниця між діапазоном вимірювання і діапазоном показів.
3. Верхня межа вимірювання вольтметра 100 В, а його шкала розподілена на 20 поділок. Визначити цілу поділки вольтметра і абсолютну похибку градуювання його шкали.

4. Дайте поняття чутливості. Наведіть три методи оцінювання чутливості.
5. Сутність методу визначення чутливості по ціні поділки. Верхня межа вимірювання амперметра 100 А, а його шкала розподілена на 20 поділок. Визначити цілу поділки вольтметра і його чутливість.
6. Зміна входної напруги на вході електромагнітного вольтметра $\Delta U = 0.15$ В привела до зміни його вихідної величини $\Delta \alpha = 0.30$ град. Оцінити чутливість в даній точці статичної характеристики $\alpha = f(U)$ вольтметра.
7. Функція перетворення магнітоелектричного амперметра подана таким рівнянням перетворення $\alpha = 0.5 \cdot I$. Визначити числове значення чутливості і подати результат з одиницею вимірювання.
8. Дайте поняття дійсного значення. Наведіть два експериментальних методів визначення дійсного значення.
9. Як оцінити дійсне значення багаторазових вимірювань випадкової величини? Наведіть приклад для $n=6$.
10. В чому сутність методу зразкових приладів для оцінювання дійсного значення? Наведіть схему проведення метрологічного експерименту.
11. Який засіб вимірювання називають зразковим? Клас точності повіряє мого ватметра $p=1.0$ %. Який клас точності повинен мати зразковий ватметр?
12. Амперметр має рівномірну шкалу проградуйовану на 50 поділок, верхня межа якої 100 А. В процесі вимірювання струму стрілка зупинилася на 40-й поділці шкали. Знайти виміряне значення струму.
13. Дайте поняття абсолютної похибки вимірювання. Наведіть основний недолік оцінювання абсолютної похибки.
14. Зі шкали магнітоелектричного вольтметра отримано виміряне значення напруги 52 В, а з відлікового пристрою цифрового (високоточного) вольтметра в цій же точці вимірювального кола отримано 52.1 В. Знайти абсолютну похибку вимірювання.
15. Як визначити поправку? В результаті вимірювального експерименту та опрацювання результатів оцінено абсолютну похибку вимірювання напруги – 0.15 В. Знайти поправку, яка скорегує виміряне значення до дійсного значення.
16. Дайте поняття відносної похибки: у відносних одиницях і у відсотках.
17. Дайте поняття точності вимірювань. Наведіть три критерії правильності оцінювання точності вимірювань.
18. Вольтметр має рівномірну шкалу з верхньою межею вимірювання 100 В, яка містить 50 поділок. Під час вимірювання стрілка вольтметра зупинилася на 40-вій поділці шкали. Дійсне значення виміряної напруги 80.2 В. Визначити, значення напруги, яку покаже

вольтметр. Оцінити абсолютну похибку, поправку, відносну похибку і точність вимірювань.

19. Дайте поняття зведеної похибки. Чому дану складову похибки відносять до похибок засобів вимірювань?
20. Наведіть декілька методів визначення нормуючого значення.
21. Як визначити нормуюче значення засобу вимірювання для шкали з нульовою відміткою на її початку?
22. Вольтметр має нульову відмітку на початку шкали з верхньою межею вимірювання 150 В. Визначити нормуюче значення.
23. Термометр має нульову відмітку по середині шкали з межами вимірювання від -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$. Визначити нормуюче значення.
24. Вольтметр має нульову відмітку на початку шкали з верхньою межею вимірювання 250 В розподілену на 50 поділок. Визначити зведену похибку градуювання шкали вольтметра.
25. Амперметр має нульову відмітку по середині шкали з межами вимірювання від -50 А до $+50\text{ А}$, розподілену на 50 поділок. Визначити зведену похибку градуювання шкали амперметра.

3 ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 2

НОРМУВАННЯ ПОХИБОК АНАЛОГОВИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ

3.1 Систематизація похибок засобів вимірювань

Похибки засобів вимірювань дозволяють кількісно оцінити інструментальну похибку вимірювань, тобто похибку, яка виникає через недосконалість конструкції засобу вимірювання, а також через кінцеві можливості технології його виготовлення.

Похибки (рис. 3) засобів вимірювальної техніки поділяються на: абсолютні, відносні та зведені; систематичні та випадкові; адитивні, мультиплікативні і нелінійні; основні і додаткові; статичні і динамічні.

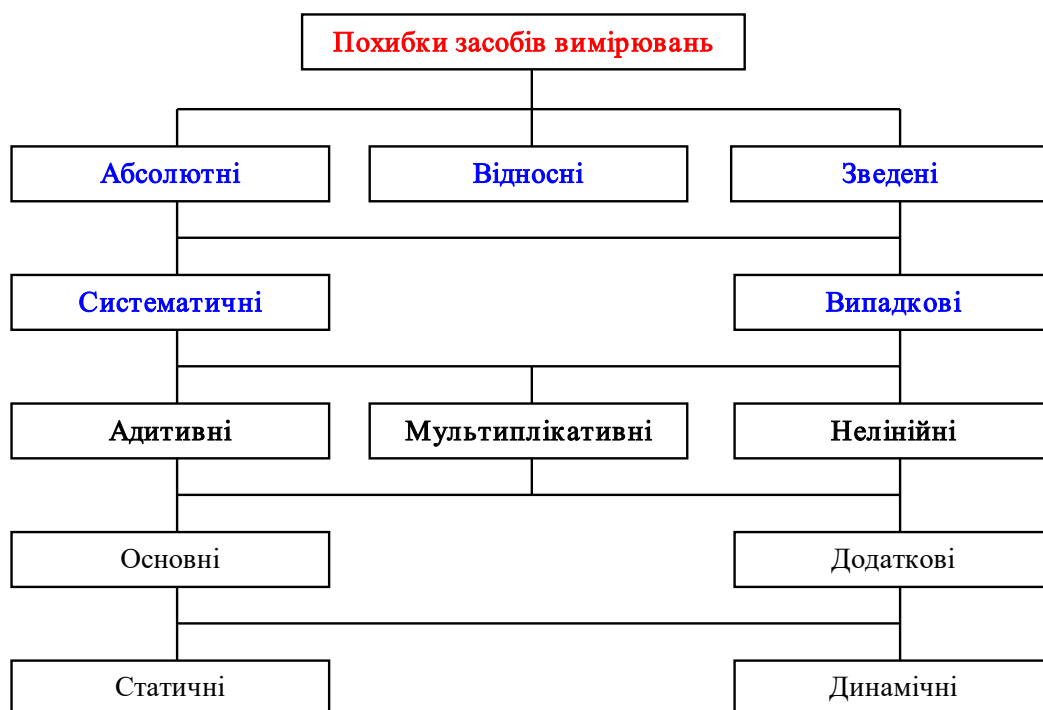


Рисунок 3 – Систематизація похибок засобів вимірювання

За способом вираження похибки засобів вимірювальної техніки поділяють на абсолютні, відносні та зведені.

Абсолютною похибкою засобу вимірювань називають різницю між показом засобу вимірювань та істинним значенням вимірюваної величини за відсутності методичних похибок і похибок від взаємодії засобу вимірювань з об'єктом вимірювання:

$$\Delta_{ЗВ} = X_B - X_i \quad (2.1)$$

Умови відсутності методичних похибок вимірювання і похибок від взаємодії засобу вимірювань з об'єктом вимірювання створюються під час

півірки, коли значення вхідної величини знаходять за допомогою зразкового засобу вимірювання.

Відносною похибкою засобу вимірювань називають відношення абсолютної похибки засобу вимірювань до істинного значення вимірюваної величини:

$$\delta_{3B}[\%] = \frac{\Delta_{3B}}{X_i} \cdot 100\% . \quad (2.2)$$

Зведеною похибкою засобу вимірювань називають відношення абсолютної похибки засобу вимірювань до нормованого значення:

$$\gamma[\%] = \frac{\Delta_{3B}}{X_H} \cdot 100\% , \quad (2.3)$$

де X_H – нормоване значення.

Залежно від типу шкали засобу вимірювань виділяють декілька методів визначення нормованого значення.

1. Якщо засіб вимірювань має рівномірну шкалу, то як нормоване значення X_H необхідно вибирати верхню межу вимірювань при знаходженні нульової відмітки на початку шкали (рис. 4).

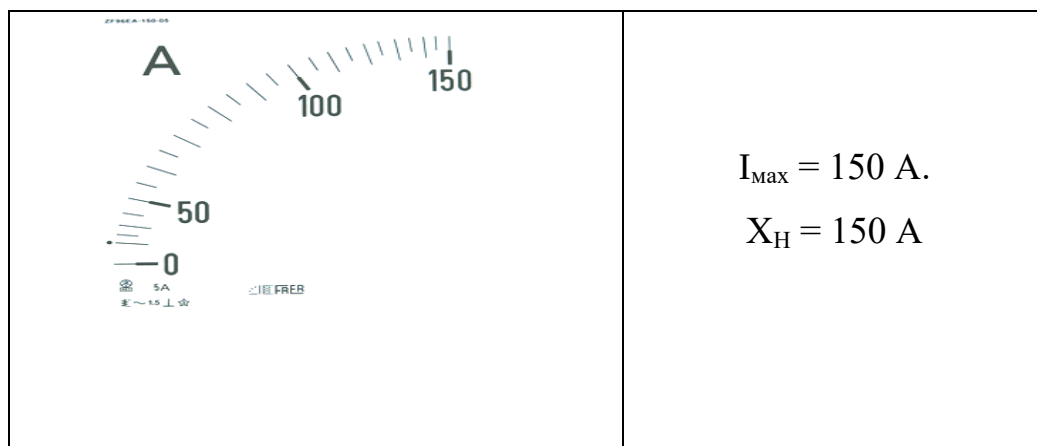


Рисунок 4 – До питання визначення нормованого значення

2. Нормоване значення X_H дорівнює сумі модулів меж вимірювань, якщо нульова відмітка шкали знаходиться всередині діапазону вимірювань (рис. 5).

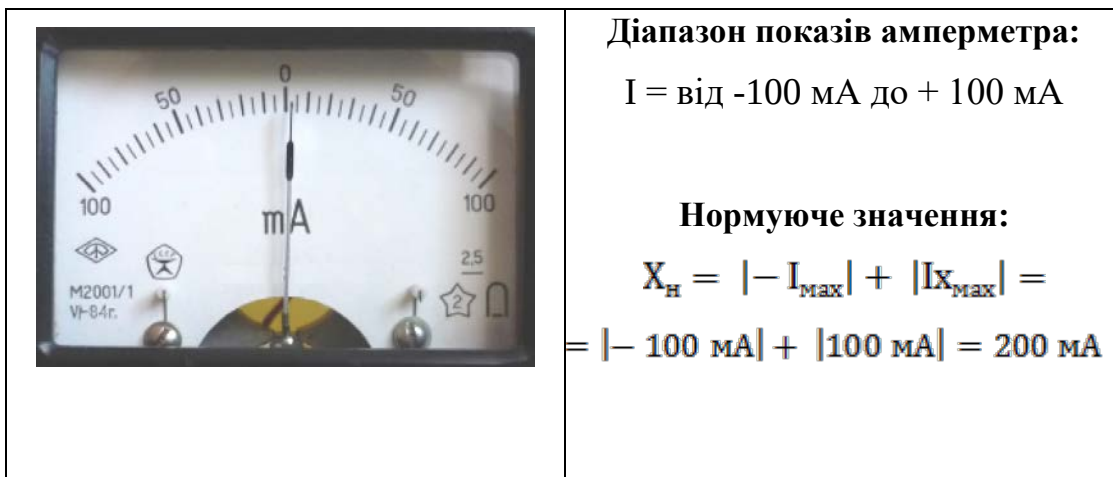


Рисунок 5 – До питання визначення нормованого значення

3. Для багатомежевих засобів вимірювань значення X_H дорівнює різниці меж вимірювань.

4. Якщо засіб вимірювань має істотно нерівномірну шкалу, то за нормоване значення X_H беруть довжину шкали або її частини, яка відповідає діапазону вимірювань.

Похибки засобів вимірювань містять ряд систематичних і випадкових складових, статичні та динамічні похибки, які визначаються аналогічно визначенням похибок вимірювань.

Залежно від того, в яких умовах експлуатується засіб вимірювань, розрізняють основну (для нормальних умов) і додаткову (якщо одна або більше впливних величин виходять за межі нормальних умов) похибки.

Основна похибка – похибка засобу вимірювальної техніки за нормальних умов його використання.

Нормальне – це значення впливної величини, для якого (у межах якого) нормується основна похибка засобів вимірювальної техніки.

Умовами застосування засобів вимірювальної техніки називають такі, за яких значення впливних величин знаходяться у межах робочої зони.

Робоча зона значень впливних величин – це зона, що встановлюється для засобів вимірювань, в межах якої за необхідності нормуються додаткові похибки цих засобів.

Додаткова похибка – похибка засобу вимірювальної техніки, яка додатково виникає під час використання засобу вимірювань в умовах відхилення хоча б однієї з впливних величин від нормального значення або її виходу за границі нормальної зони значень.

3.2 Методики нормування похибок засобів вимірювання

Щоб наперед оцінити похибку, яку внесе даний засіб в кінцевий результат, користуються нормованими значеннями похибки.

Під нормованим значенням розуміють похибки, які є граничними для даного типу засобів вимірювань.

Стандартами регламентуються способи нормування і форми вираження допустимих границь похибок.

Границею допустимої похибки засобу вимірювань називають найбільше значення без урахування знака похибки засобу вимірювань, за яким цей засіб ще може бути визнаний придатним до застосування.

Границі допустимих абсолютної, відносної і зведеної похибок засобів вимірювань можуть виражатись одним числом:

$$\Delta_n = \pm a, \quad \delta_n = \pm p, \quad \gamma_n = \pm q, \quad (2.4)$$

де a – додатне число, незалежне від x ; q , p – абстрактні додатні числа, вибрані з метрологічного ряду

$$[1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0] \cdot 10^n,$$

де n може набувати значень $1; 0; -1; -2; \dots$.

Для нормування абсолютної похибки проводять вимірювальний експеримент в декількох оцифрованих відмітках діапазону вимірювання. При цьому для кожної оцифрованої відмітки необхідно мати виміряне і дійсне значення. Далі визначається абсолютна похибка для кожної оцифрованої відмітки шкали. За нормувальне значення абсолютної похибки беруть її максимальне значення:

$$a = |\Delta_{\max}|. \quad (2.5)$$

Для нормування відносної похибки суть вимірювального експерименту не змінюється. Маючи значення абсолютних похибок, оцінюють значення відносних похибок в тих самих оцифрованих відмітках діапазону вимірювання. Тоді знаходять максимальне значення відносної похибки $\delta_{\max}$. За нормоване значення відносної похибки q беруть число, більше за значення максимальної відносної похибки, із значень метрологічного ряду. Таким чином забезпечується граничне (гарантоване) значення похибки.

Процедура виконання вимірювального експерименту для нормування зведеної похибки аналогічна попереднім. Після знаходження модуля максимального значення абсолютної похибки $|\Delta_{\max}|$ максимальну зведену похибку знаходять так:

$$\gamma_{\max} = \frac{\Delta_{\max}}{X_n} \cdot 100\%. \quad (2.6)$$

За нормоване значення зведеної похибки p беруть число, більше за

значення максимальної зведеної похибки, із значень метрологічного ряду.

Границі допустимих абсолютної і відносної похибок можуть також виражатися у вигляді лінійної функції:

$$\Delta_{3B} = \pm(a + b \cdot x), \quad (2.7)$$

де a , b – додатні числа, незалежні від x .

Перший доданок поданої функції позначається Δ_a (рис. 6, а) і характеризує адитивну похибку (похибку нуля, незалежну від x), а другий доданок позначається Δ_m (рис. 6, б) і характеризує мультиплікативну похибку, залежну від x .

Адитивна похибка – складова абсолютної похибки засобу вимірювальної техніки, яка не залежить від вимірюваної величини.

Адитивну похибку називають ще похибкою нуля.

Мультиплікативна похибка – складова похибки засобу вимірювальної техніки, яка пропорційна вимірюваній величині.

Цю складову похибки називають ще похибкою чутливості.

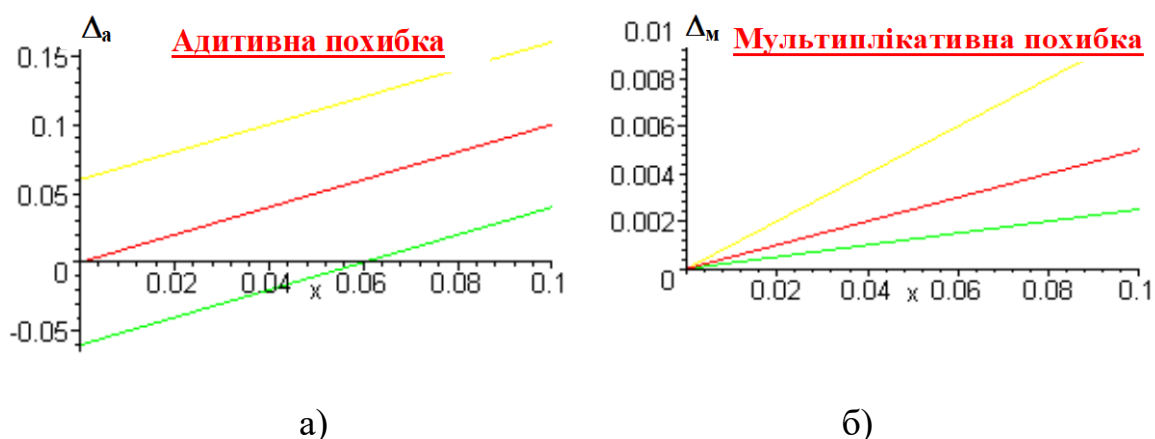


Рисунок 6 – Нормування похибок засобів вимірювання у вигляді лінійної функції

3.3 Варіанти індивідуальних завдань до ІнРЗ № 2

Варіанти індивідуальних завдань з вихідними даними для оцінювання основних статичних метрологічних характеристик аналогових засобів вимірювання наведено в табл. 5.

Таблиця 5 – Варіанти індивідуальних завдань для оцінювання систематичних похибок

№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань напруги:				
1	U_B, B	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
	U_D, B	1.12	1.85	3.15	3.84	5.12
2	U_B, B	10.00	20.00	30.00	40.00	50.00
	U_D, B	10.09	20.12	29.87	40.15	49.82
3	U_B, B	100.00	150.00	200.00	250.00	300.00
	U_D, B	101.02	149.15	199.06	251.09	299.05
4	U_B, B	250.00	300.00	350.00	400.00	450.00
	U_D, B	249.25	300.11	349.15	401.07	449.01
5	U_B, B	-200.00	-100.00	0.15	+100.00	+200.00
	U_D, B	-200.97	-199.08	0.76	+101.03	+199.14
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань струму:				
6	I_B, mA	10.00	20.00	30.00	40.00	50.00
	I_D, mA	09.87	20.13	30.15	38.97	50.11
7	I_B, mA	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
	I_D, mA	0.87	2.14	2.85	4.16	4.82
8	I_B, A	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
	I_D, A	1.12	1.37	2.16	2.43	3.15
9	I_B, A	-20.00	-10.00	0.18	+10.00	+20.00
	I_D, A	-20.17	-10.09	0.09	+10.13	+19.82
10	I_B, A	10.00	20.00	30.00	40.00	50.00
	I_D, A	09.89	20.14	28.87	40.13	49.90
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань потужності:				
11	P_B, Bm	1.00	5.00	10.00	15.00	20.00
	P_D, Bm	1.15	4.82	9.94	15.06	19.89
12	P_B, Bm	50.0	250.0	500.0	750.0	1000.0
	P_D, Bm	48.97	257.1	499.2	746.5	1004.6
13	P_B, kBm	10.0	50.0	100.0	150.0	200.0
	P_D, kBm	10.7	51.2	98.4	152.0	200.9

Продовження таблиці 5

14	P_B, MBm	100.0	200.0	300.0	400.0	500.0
	P_D, MBm	98.9	202.3	300.5	398.2	499.0
15	$P_B, \text{ГВт}$	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00
	$P_D, \text{ГВт}$	5.16	9.97	15.09	20.17	24.93
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань електричної енергії:				
16	$W_B, \text{кВт}\cdot\text{год}$	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
	$W_D, \text{кВт}\cdot\text{год}$	10.3	19.9	29.8	40.4	49.6
17	$W_B, \text{кВт}\cdot\text{год}$	50.0	100.0	150.0	200.0	250.0
	$W_D, \text{кВт}\cdot\text{год}$	50.5	100.4	149.6	200.8	249.3
18	$W_B, \text{кВт}\cdot\text{год}$	100.0	200.0	300.0	400.0	500.0
	$W_D, \text{кВт}\cdot\text{год}$	98.9	201.8	302.4	403.2	505.0
19	$W_A, \text{кВт}\cdot\text{год}$	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0
	$W_D, \text{кВт}\cdot\text{год}$	5.1	10.0	15.3	19.7	24.8
20	$W_B, \text{МВт}\cdot\text{год}$	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
	$W_D, \text{МВт}\cdot\text{год}$	0.98	1.95	2.94	3.91	4.88
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань активного опору:				
21	$R_B, \text{Ом}$	1.00	2.50	5.00	7.50	10.00
	$R_D, \text{Ом}$	0.99	2.53	4.97	7.54	10.10
22	$R_B, \text{Ом}$	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
	$R_D, \text{Ом}$	9.8	20.0	30.2	40.3	50.5
23	$R_B, \text{кОм}$	50.0	100.0	150.0	200.0	250.0
	$R_D, \text{кОм}$	50.2	100.1	149.8	199.7	149.5
24	$R_B, \text{кОм}$	100.0	250.0	500.0	750.0	1000.0
	$R_D, \text{кОм}$	100.0	250.3	500.7	751.1	1002.1
25	$R_B, \text{МОм}$	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00
	$R_D, \text{МОм}$	2.11	4.05	6.20	7.94	9.85
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань ємності:				
26	$C_B, \text{пФ}$	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
	$C_D, \text{пФ}$	0.95	1.964	3.02	4.10	4.98
27	$C_B, \text{пФ}$	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00
	$C_D, \text{пФ}$	9.95	15.02	20.10	25.03	29.97

Продовження таблиці 5

28	$C_B, мФ$	5.00	15.00	25.00	35.00	45.00
	$C_D, мФ$	4.94	15.21	24.89	35.21	44.85
29	$C_B, мФ$	100.0	150.0	200.0	250.0	300.0
	$C_D, мФ$	100.5	150.8	201.3	251.9	302.4
30	$C_B, мФ$	50.0	200.0	350.0	500.0	650
	$C_D, мФ$	49.8	199.4	349.0	498.6	648.1
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань коефіцієнту потужності:				
31	$\varphi_B, град$	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
	$\varphi_D, град$	10.5	20.7	28.9	38.7	52.0
32	$\varphi_B, град$	15.0	25.0	35.0	45.0	55.0
	$\varphi_D, град$	15.0	24.8	34.6	44.1	53.7
33	$\varphi_B, рад$	0.07	15.0	30.0	45.0	60.0
	$\varphi_D, рад$	0.10	14.6	30.4	45.9	59.0
34	$\varphi_B, рад$	70.0	75.0	80.0	85.0	90.0
	$\varphi_D, рад$	70.1	74.8	79.7	85.4	90.5
35	$\varphi_B, град$	60.0	65.0	70.0	75.0	80.0
	$\varphi_D, град$	60.1	65.3	70.0	74.8	80.1
№ варіанту	Умовне Позначення	Результати вимірювань індуктивності:				
36	$L_B, мкГн$	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
	$L_D, мкГн$	10.0	19.8	29.7	39.5	49.2
37	$L_B, мкГн$	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0
	$L_D, мкГн$	61.2	70.9	80.7	90.4	100.2
38	$L_B, мГн$	100.0	150.0	200.0	250.0	300.0
	$L_D, мГн$	100.3	148.8	202.3	251.1	299.4
39	$L_B, мГн$	400.0	500.0	600.0	700.0	800.0
	$L_D, мГн$	400.9	498.2	603.1	702.4	797.5
40	$L_B, Гн$	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
	$L_D, Гн$	0.95	1.97	3.02	4.08	5.10
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань віброзміщення:				
41	$X_B, мкм$	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00
	$X_D, мкм$	4.95	10.21	15.30	19.91	24.89

Продовження таблиці 5

42	$X_B, \text{мкм}$	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0
	$X_D, \text{мкм}$	30.2	35.7	40.8	44.8	51.0
43	$X_B, \text{мкм}$	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0
	$X_D, \text{мкм}$	59.2	69.9	80.4	90.9	101.2
44	$X_B, \text{мкм}$	110.0	115.0	120.0	125.0	130.0
	$X_D, \text{мкм}$	110.0	115.2	119.9	125.3	130.2
45	$X_B, \text{мм}$	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
	$X_D, \text{мм}$	1.02	1.53	1.99	2.48	3.02
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань рівня рідини:				
46	$H_B, \text{мкм}$	150.0	200.0	250.0	300.0	350.0
	$H_D, \text{мкм}$	149.8	199.4	148.9	298.5	347.7
47	$H_B, \text{мм}$	10.0	25.0	40.0	55.0	70.0
	$H_D, \text{мм}$	10.3	24.9	40.0	55.2	69.7
48	$H_B, \text{см}$	20.0	40.0	60.0	80.0	100.0
	$H_D, \text{см}$	20.4	40.6	60.1	79.5	99.4
49	$H_B, \text{дм}$	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
	$H_D, \text{дм}$	9.9	15.3	19.8	25.3	30.4
50	$H_B, \text{м}$	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
	$H_D, \text{м}$	0.51	0.63	0.69	0.82	0.94
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань температури:				
51	$T_B, ^\circ\text{C}$	-50.0	-25.0	-0.15	+25.0	+50.0
	$T_D, ^\circ\text{C}$	-50.6	-25.4	+0.17	+25.1	+49.9
52	$T_B, ^\circ\text{C}$	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
	$T_D, ^\circ\text{C}$	9.8	19.8	29.9	40.0	50.1
53	$T_B, ^\circ\text{C}$	0.2	25.0	50.0	75.0	100.0
	$T_D, ^\circ\text{C}$	0.3	25.6	50.7	76.0	101.5
54	$T_B, ^\circ\text{C}$	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0
	$T_D, ^\circ\text{C}$	35.1	39.7	45.2	50.4	55.1
55	$T_B, ^\circ\text{C}$	100.0	200.0	300.0	400.0	500.0
	$T_D, ^\circ\text{C}$	98.2	201.3	299.7	401.0	502.3
№ Варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань частоти:				
56	$f_B, \text{Гц}$	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
	$f_D, \text{Гц}$	10.2	20.3	2.99	40.6	49.8
57	$f_B, \text{кГц}$	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00
	$f_D, \text{кГц}$	5.02	10.03	15.04	19.97	25.04

Продовження таблиці 5

58	$f_B, \text{МГц}$	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
	$f_D, \text{МГц}$	1.02	2.06	2.97	4.05	5.06
59	$f_B, \text{кГц}$	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
	$f_D, \text{кГц}$	10.1	20.3	30.5	40.2	49.8
60	$f_B, \text{Гц}$	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0
	$f_D, \text{Гц}$	59.8	70.2	79.8	89.9	100.6
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань частоти обертання:				
61	$n_B, \text{об/хв}$	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
	$n_D, \text{об/хв}$	0.48	0.78	1.04	1.23	1.47
62	$n_B, \text{об/хв}$	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
	$n_D, \text{об/хв}$	10.3	19.5	30.2	40.4	49.8
63	$n_B, \text{об/хв}$	50.0	100.0	150.0	200.0	250.0
	$n_D, \text{об/хв}$	49.7	100.2	150.3	200.4	251.2
64	$n_B, \text{об/хв}$	650.0	700.0	750.0	800.0	850.0
	$n_D, \text{об/хв}$	654.5	702.1	751.6	801.1	850.6
65	$n_B, \text{об/хв}$	1000.0	1500.0	2000.0	2500.0	3000.0
	$n_D, \text{об/хв}$	1010.4	1487.4	2014.8	2486.3	3012.4
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань кутового положення:				
66	$\alpha_B, \text{град}$	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
	$\alpha_D, \text{град}$	9.64	19.68	30.52	39.82	50.23
67	$\alpha_B, \text{рад}$	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80
	$\alpha_D, \text{рад}$	1.02	1.19	1.43	1.64	1.71
68	$\alpha_B, \text{град}$	120.0	180.0	240.0	300.0	360.0
	$\alpha_D, \text{град}$	122.3	181.2	139.4	300.9	361.2
69	$\alpha_B, \text{рад}$	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
	$\alpha_D, \text{рад}$	1.97	2.96	3.94	5.03	6.07
70	$\alpha_B, \text{град}$	10.0	30.0	50.0	70.0	90.0
	$\alpha_D, \text{град}$	10.5	29.7	50.6	70.09	89.1
№ варіанту	Умовне Позначення	Результати вимірювань аксіальних зміщень:				
71	$l_B, \text{мкм}$	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00
	$l_D, \text{мкм}$	9.97	11.05	12.04	12.95	13.92
72	$l_B, \text{мкм}$	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00
	$l_D, \text{мкм}$	15.03	16.11	16.87	17.95	18.93
73	$l_B, \text{мкм}$	10.00	20.00	30.00	40.00	50.00
	$l_D, \text{мкм}$	9.97	20.08	29.81	40.12	50.09
	$l_B, \text{мм}$	60.00	70.00	80.00	90.00	100.00

74	$l_D, мм$	59.21	69.49	79.69	89.81	100.12
75	$l_B, мм$	150.0	200.0	250.0	300.0	350.0
	$l_D, мм$	151.3	202.4	249.7	298.1	350.2
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань обертового моменту:				
76	$M_B, Н·м$	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00
	$M_D, Н·м$	2.03	4.07	6.11	7.91	9.79
77	$M_B, Н·м$	5.00	15.00	25.00	35.00	45.00
	$M_D, Н·м$	4.79	14.86	24.87	35.15	45.21
78	$M_B, Н·м$	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00
	$M_D, Н·м$	4.97	6.06	7.11	7.79	9.15
79	$M_B, кг·м$	0.50	0.60	0.65	0.70	0.75
	$M_D, кг·м$	0.52	0.63	0.69	0.79	0.87
80	$M_B, кг·м$	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
	$M_D, кг·м$	0.97	1.46	2.05	2.56	2.89
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань ковзання асинхронної машини:				
81	S_B	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
	S_D	0.78	0.82	0.94	0.98	1.03
82	S_B	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
	S_D	0.53	0.64	0.75	0.77	0.81
83	S_B	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
	S_D	0.08	0.17	0.11	0.23	0.34
84	S_B	0.18	0.36	0.54	0.72	0.90
	S_D	0.15	0.38	0.58	0.75	0.94
85	S_B	0.15	0.25	0.40	0.55	0.70
	S_D	0.16	0.27	0.37	0.51	0.67
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань магнітної індукції:				
86	$B_B, тл$	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030
	$B_D, тл$	0.008	0.013	0.023	0.021	0.310
87	$B_B, тл$	0.050	0.060	0.070	0.080	0.090
	$B_D, тл$	0.052	0.063	0.068	0.084	0.095
88	$B_B, тл$	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500
	$B_D, тл$	0.097	0.196	0.303	0.404	0.491
89	$B_B, тл$	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
	$B_D, тл$	0.62	0.73	0.76	0.95	1.04
90	$B_B, тл$	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00
	$B_D, тл$	2.03	3.95	5.96	8.06	10.05

Результати розрахунків зведіть до табл. 6

Таблиця 6 – Висновки

Максимальне значення абсолютної похибки	Клас точності для абсолютної похибки	Максимальне значення поправки	Максимальне значення відносної похибки	Клас точності для відносної похибки	Максимальне значення зведеної похибки	Клас точності для зведеної похибки
Одиниця вимірювання	Одиниця вимірювання	Одиниця вимірювання	Відсотки	Відсотки	Відсотки	Відсотки

3.4 Приклад виконання ІнРЗ №2

В результаті вимірювань фізичної величин в заданих точках діапазону (згідно до Вашого варіанту табл. 7) отримано вимірювальним перетворювачем виміряні значення X_B (згідно до Вашого варіанту табл. 7), а відповідні виміряним дійсні значення X_D (згідно до Вашого варіанту табл. 7), що отримано зразковим вимірювальним перетворювачем.

3.4.1 Зразок індивідуального завдання

Індивідуальне завдання має бути наступним листом після титульного листа.

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Факультет _____ ФЕЕМ _____ Кафедра _____ КЕМСК

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Максим ЛУНІН

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема Нормування похибок магнітоелектричного вольтметра

2. Термін здачі студентом закінченого РГР на 8-му тижні

3. Вихідні дані до розрахункової роботи:

3.1. *Номер варіанту завдання* Варіант № 130

3.2. *Вихідні дані для нормування похибок засобів вимірювань:*

Таблиця 7 – Варіант № 130

№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань напруги магнітоелектричним вольтметром				
130	Виміряне U_B, B	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
	Дійсне U_D, B	9.88	20.18	29.78	40.25	49.74

4. Дата видачі завдання до РГР «___» _____ 20__ р.

Викладач _____ (Підпис)

Завдання прийняв до виконання _____ (Підпис)

Алгоритм виконання завдання:

1. Наведіть схему метрологічного експерименту. Усно поясніть послідовність дій, спрямованих на отримання виміряного і дійсного значень в кожній оцифрованій відмітці шкали вольтметра (табл. 7)
2. Оцініть для кожного із 5-ти вимірювань абсолютну похибку та подайте клас точності вимірювального перетворювача для абсолютної похибки.
3. Побудуйте криву залежності абсолютної похибки від виміряних значень.
4. Оцініть для кожного із 5-ти вимірювань відносну похибку та подайте клас точності вимірювального перетворювача для відносної похибки.
5. Побудуйте криву залежності відносної похибки від виміряних значень.
6. Оцініть для кожного із 5-ти вимірювань зведену похибку і подайте клас точності вимірювального перетворювача для зведеної похибки.
7. Оцініть для кожного із 5-ти вимірювань точність вимірювань.

Наведемо схему (рис. 7) для виконання метрологічної повірки магнітоелектричного вольтметра з діапазоном показів від 0 В до 50 В.

Дійсне значення напруги U_d отримаємо на індикаторах цифрового вольтметра, а за виміряне U_v значення напруги приймемо покази магнітоелектричного вольтметра. Паралельно до входів повіряемого (магнітоелектричного) і зразкового (цифрового) вольтметрів під'єднуємо вихід регульованого джерела напруги, діапазон зміни якої має бути в межах 0 В до 50 В. За зразковий необхідно вибрати цифровий вольтметр, клас точності якого в 3...5 разів вищий за клас точності повіряемого вольтметра.

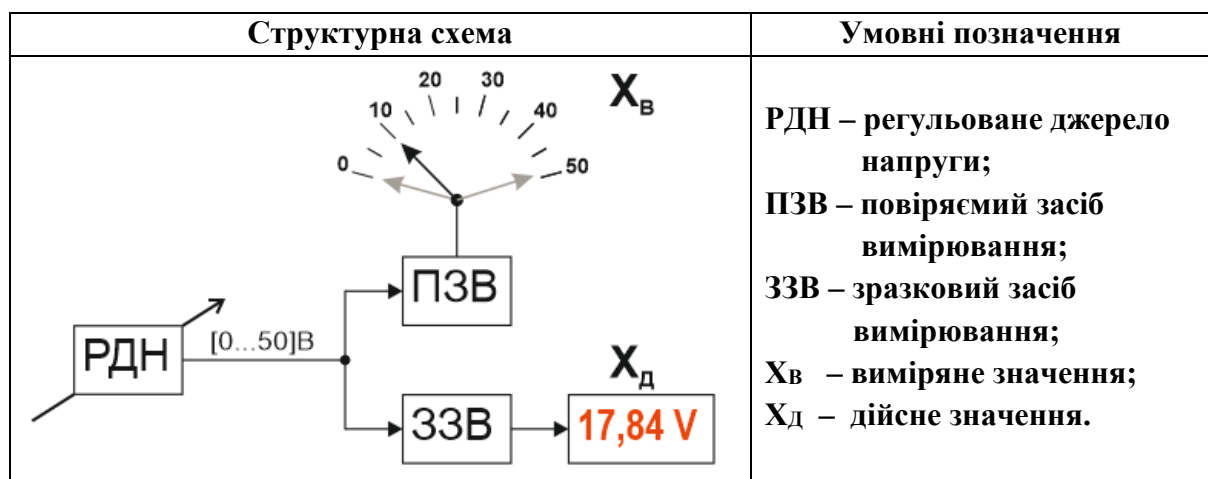


Рисунок 7 – Структурна схема метрологічного експерименту

Нормування абсолютної похибки:

Оцінимо абсолютні похибки в кожній оцифрованій відмітці шкали:

$$\begin{aligned}\Delta_{10} &= U_{В\ 10} - U_{Д\ 10} = 10.00 - 9.88 = 0.12\text{ В}; \\ \Delta_{20} &= U_{В\ 20} - U_{Д\ 20} = 20.00 - 20.18 = -0.18\text{ В}; \\ \Delta_{30} &= U_{В\ 30} - U_{Д\ 30} = 30.00 - 29.78 = 0.22\text{ В}; \\ \Delta_{40} &= U_{В\ 40} - U_{Д\ 40} = 40.00 - 40.25 = -0.25\text{ В}; \\ \text{де } \Delta_{50} &= U_{В\ 50} - U_{Д\ 50} = 50.00 - 49.74 = 0.26\text{ В}.\end{aligned}$$

Залежність абсолютної похибки від оцифрованих відміток шкали (ОВШ) наведена на рис.8.

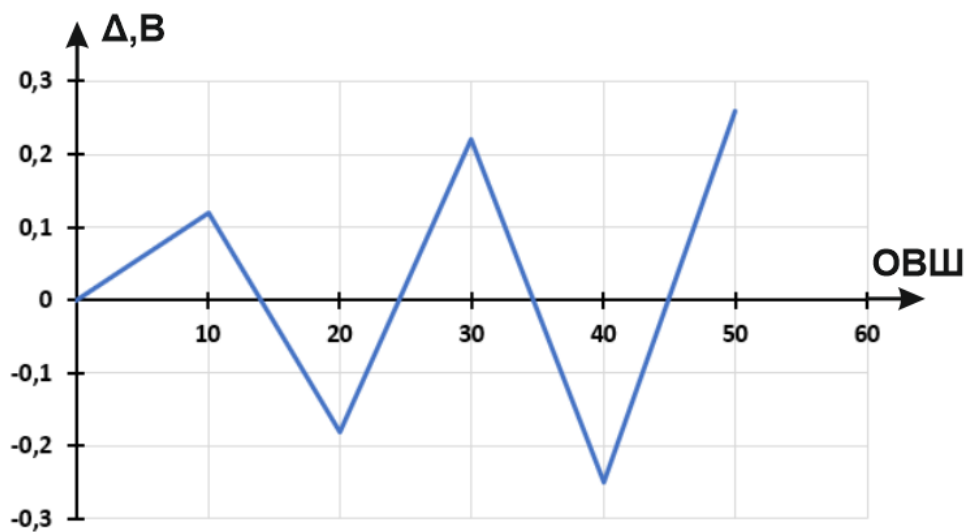


Рисунок 8 – Графічна залежність абсолютної похибки від ОВШ

Визначимо максимальне значення із всіх розрахованих вище числових значень абсолютної похибки:

$$\Delta_{max} = |\Delta_{50}| = +0.26\text{ В}$$

і приймемо його за нормоване значення абсолютної похибки:

$$a = \pm 0.26\text{ В}.$$

Суттєвим недоліком нормування абсолютної похибки є те, що встановлений таким способом клас точності забезпечує тільки одну умову нормування похибки – максимальне значення. Гарантії такий підхід не дає.

Нормування відносної похибки:

Оцінимо відносні похибки в кожній оцифрованій відмітці шкали:

$$\begin{aligned}\delta_{10} &= \left[\frac{\Delta_{10}}{U_{Д\ 10}} \right] \cdot 100\% = \left[\frac{0.12\text{ В}}{9.88\text{ В}} \right] \cdot 100\% = 1.21\%; \\ \delta_{20} &= \left[\frac{\Delta_{20}}{U_{Д\ 20}} \right] \cdot 100\% = \left[\frac{-0.18\text{ В}}{20.18\text{ В}} \right] \cdot 100\% = 0.89\%; \\ \delta_{30} &= \left[\frac{\Delta_{30}}{U_{Д\ 30}} \right] \cdot 100\% = \left[\frac{0.22\text{ В}}{29.78\text{ В}} \right] \cdot 100\% = 0.74\%; \\ \delta_{40} &= \left[\frac{\Delta_{40}}{U_{Д\ 40}} \right] \cdot 100\% = \left[\frac{-0.25\text{ В}}{40.25\text{ В}} \right] \cdot 100\% = 0.62\%; \\ \delta_{50} &= \left[\frac{\Delta_{50}}{U_{Д\ 50}} \right] \cdot 100\% = \left[\frac{0.26\text{ В}}{49.74\text{ В}} \right] \cdot 100\% = 0.52\%;\end{aligned}$$

Залежність відносної похибки від оцифрованих відміток шкали (ОВШ) наведена на рис. 9.

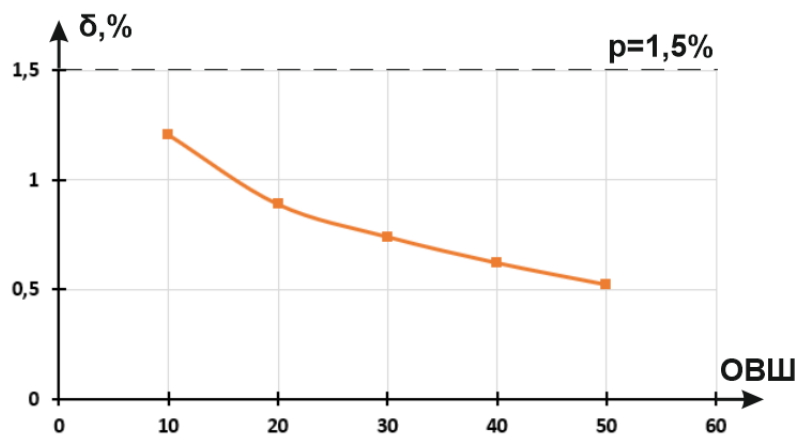


Рисунок 9 – Графічна залежність відносної похибки від ОВШ

Визначимо максимальне значення відносної похибки:

$$\delta_{\max} = 1.21\%.$$

Подамо максимальне значення:

$$\delta_{\max} = 1.21 \cdot 10^0 \%.$$

згідно до форми, що регламентована метрологічним рядом
[1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0] • 10ⁿ,
де **n** може набувати значень 1; 0; -1; -2;

Оскільки максимальне значення знаходиться між числами 1.0 і 1.5 в метрологічному ряді, то для забезпечення гарантії за нормоване значення відносної похибки вибираємо більше із цих двох значень:

$$p = \pm 1.5 \cdot 10^0 \% = \pm 1.5\%.$$

Нормування зведеної похибки:

Максимальним значенням абсолютної похибки для цього прикладу є

$$\Delta_{max} = +0.26 \text{ В}.$$

Оскільки нульова відмітка шкали повіряемого вольтметра знаходиться на початку, то за нормоване значення обираємо верхню межу вимірювання:

$$X_H = U_{max} = 50 \text{ В}.$$

Тоді максимальне значення зведеної похибки становить:

$$\gamma_{max} = \left| \frac{\Delta_{max}}{X_H} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{0.26 \text{ В}}{50 \text{ В}} \right| \cdot 100\% = 0.52 \%.$$

Подамо максимальне значення:

$$\gamma_{max} = \pm 5.2 \cdot 10^{-1} \% = \pm 0.52\%$$

згідно до форми, що регламентована метрологічним рядом

$$[1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0] \cdot 10^n,$$

де n може набувати значень 1; 0; -1; -2;

Оскільки максимальне значення зведеної похибки знаходиться між числами 5.0 і 6.0 в метрологічному ряді, то для забезпечення гарантії за нормоване значення зведеної похибки вибираємо більше із цих двох значень:

$$q = \pm 6 \cdot 10^{-1} \% = \pm 0.6\%.$$

Результати перевірки магнітоелектричного вольтметра методом зразкових приладів зведемо до табл. 8.

Таблиця 8 – Висновки

Максимальне значення абсолютної похибки	Клас точності для абсолютної похибки	Максимальне значення поправки	Максимальне значення відносної похибки	Клас точності для відносної похибки	Максимальне значення зведеної похибки	Клас точності для зведеної похибки
Одиниця вимірювання	Одиниця вимірювання	Одиниця вимірювання	Відсотки	Відсотки	Відсотки	Відсотки
+ 0.26 В	± 0.26 В	- 0.26 В	1.21 %	± 1.5 %	0.52 %	± 0.60 %

**Контрольні питання та практичні завдання
до індивідуального розрахункового завдання ІнРЗ № 2**

1. Наведіть класифікацію систематичних похибок за двома найбільш характерними ознаками.
2. Наведіть приклади постійних, прогресивних і періодичних похибок.
3. Яку систематичну похибку відносять до методично?
4. Наведіть приклади інструментальних похибок.
5. Назвіть джерело виникнення похибки встановлення.
6. Які дві складові характеризують суб'єктивну похибку?
7. Які Ви знаєте методи вилучення систематичних похибок? Розкрийте суть методу дворазових спостережень.
8. Розкрийте суть методу поправок. Наведіть приклад побудови кривої поправок.
9. Дайте поняття нормованого значення похибки засобів вимірювання. Які дві умови необхідно виконати під час встановлення класу точності?
10. Наведіть два підходи до нормування похибок засобів вимірювання.
11. Які похибки відносять до похибок засобів вимірювань – до інструментальних похибок?
12. Нормування абсолютної похибки у вигляді числа. Результат вимірювання струму амперметром 5.71 А, а значення отримане в цій самій відмітці цифровим амперметром 5.79 А. Встановити клас точності амперметра, якщо про нормовано абсолютну похибку.
13. Поясніть на конкретних прикладах суттєвий недолік нормування абсолютної похибки.
14. Наведіть метрологічний ряд класів точності. Згідно до цього ряду подайте такі максимальні значення відносної (0.097%) і зведеної (0.63%).
15. Нормування відносної похибки у вигляді числа. Максимальне значення абсолютної похибки вольтметра дорівнює 0.37 В, а дійсне значення становить 32.5 В. Користуючись метрологічним рядом встановіть клас точності вольтметра, якщо про нормовано відносну похибку.
16. Нормування зведеної похибки. Максимальне значення абсолютної похибки амперметра з верхньою межею вимірювання 25 А не перевищує 0.16 А. Користуючись метрологічним рядом встановіть клас точності амперметра, якщо про нормовано зведену похибку.
17. Клас точності цифрового частотоміра з верхньою межею вимірювання 400 Гц 0.05% (пронормовано зведену похибку). Визначити максимальну абсолютну похибку частотоміра.
18. Як нормують похибки засобів вимірювань у вигляді лінійної функції. Наведіть вид цієї функції?

19. Яку складову похибки називають адитивною? Експериментальна функція перетворення засобу вимірювання має такий вигляд: $y = -0.43 + 0.94 \cdot x$. Яке числове значення адитивної похибки? Поясніть на даному прикладі методику вилучення (зменшення) адитивної похибки.
20. Яку складову похибки називають мультиплікативною? Експериментальна функція перетворення засобу вимірювання має такий вигляд: $y = +0.17 + 0.92 \cdot x$. Яке числове значення мультиплікативної похибки? Який для цього прикладу має бути коригувальний коефіцієнт?
21. Мілівольтметр має рівномірну шкалу з нульовою відміткою в її середині, розподілену на 50 поділок. Нижня межа вимірювання мілівольтметра $U_H = -250[\text{mV}]$, а верхня $U_B = +250[\text{mV}]$. Навести графічне зображення цієї шкали та визначити ціну поділки. Знайти абсолютну і зведену похибки градуювання шкали мілівольтметра. Визначити чутливість.
22. Вольтметр має рівномірну шкалу, розподілену на 100 поділок з нульовою відміткою на початку шкали. Верхня межа вимірювання вольтметра $U_B = +100[\text{V}]$. Навести графічне зображення цієї шкали та визначити ціну поділки. Знайти абсолютну і зведену похибки градуювання шкали мілівольтметра. Визначити чутливість.
23. Під час перевірки вольтметра магнітоелектричної системи з верхньою межею вимірювання $500[\text{V}]$ в оцифрованих відмітках шкали $\{100; 200; 300; 400; 500[\text{V}]\}$ отримано відповідні покази цифрового вольтметра: 93; 194; 305; 404; 497 [V]. До якого класу точності відноситься вольтметр, якщо прономовано абсолютну похибку?
24. Проведено перевірку амперметра з верхньою межею вимірювання $50[\text{A}]$ у таких оцифрованих відмітках шкали: 10, 20, 30, 40, 50 [A]. Отримано відповідні покази зразкового приладу: 10.05; 20.04; 29.97; 40.02; 50.01 [A]. До якого класу точності можна віднести амперметр за результатами перевірки, якщо для нормування класу точності використано зведену похибку?
25. Проведено перевірку амперметра з верхньою межею вимірювання $100[\text{A}]$ у таких оцифрованих відмітках шкали: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 [A]. Отримано відповідні покази зразкового приладу: 9.91; 20.08; 29.93; 40.06; 50.95; 60.03; 70.01; 80.05; 90.025; 100.01 [A]. До якого класу точності можна віднести амперметр за результатами перевірки, якщо для нормування класу точності використано відносну похибку?

4 ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 3

ОЦІНЮВАННЯ ВИПАДКОВИХ ПОХИБОК ПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ

4.1 Методика оцінювання випадкових похибок прямих вимірювань

Випадкові похибки проявляються при багаторазових вимірюваннях однієї фізичної величини в однакових умовах одним оператором і за допомогою одного і того самого засобу вимірювання. Такі вимірювання прийнято називати рівноточними.

При статистичній обробці результатів багаторазових вимірювань необхідно виконати таку послідовність дій:

1. Провести багаторазові вимірювання і отримати масив $X_1, X_2, \dots, X_n$ вимірної інформації (рис. 10).

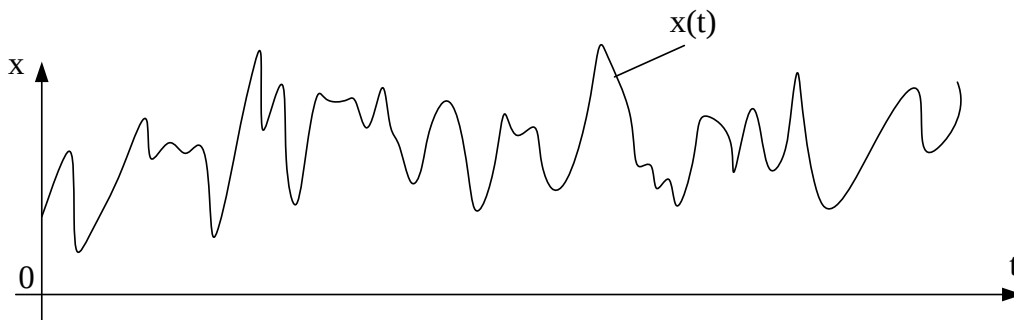


Рисунок 10 – Реалізація випадкового процесу

2. Ввести поправку в результати вимірювань, вилучивши відомі систематичні похибки.

3. Знайти математичне очікування поправлених результатів спостережень і прийняти його за дійсне значення (рис. 11).

Для нормального закону розподілу, а якщо поступитися ефективністю оцінки, то й для всіх симетричних розподілів, за оцінку математичного очікування ряду рівноточних спостережень приймають середнє арифметичне:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i. \quad (3.1)$$

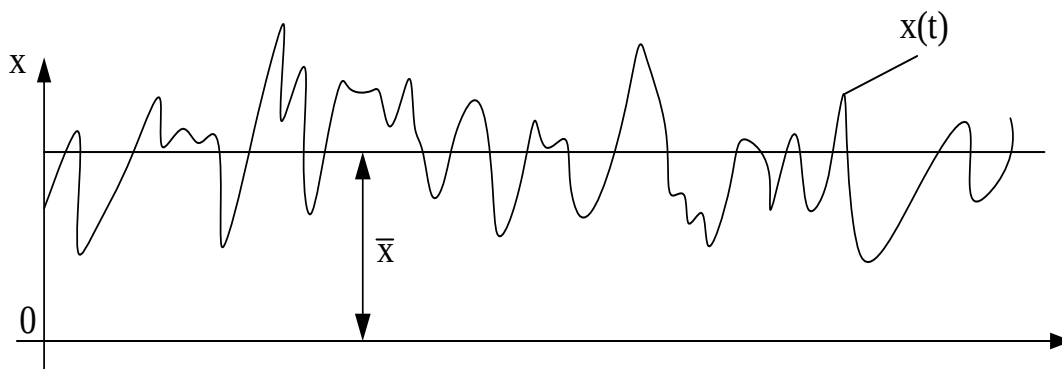


Рисунок 11

4. Визначити випадкове відхилення. Різниця:

$$\vartheta_i = X_i - \bar{x}. \quad (3.2)$$

є випадковим відхиленням (випадковою абсолютною похибкою) при i -му спостереженні. Вона може бути позитивною і негативною.

Середнє арифметичне незалежно від закону розподілу має такі властивості:

$$\sum_{i=1}^n \vartheta_i \rightarrow 0 \quad \text{і} \quad \sum_{i=1}^n \vartheta_i^2 \rightarrow \min, \quad (3.3)$$

які використовуються для перевірки правильності обчислення $\bar{x}$.

5. Обчислити експериментальне середнє квадратичне відхилення (СКВ) результатів вимірювання за формулою Бесселя:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \vartheta_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (3.4)$$

де X_i – результат i -го вимірювання;

$\bar{x}$ – середнє арифметичне n результатів.

Підкреслимо, що для серії n вимірювань однієї й тієї ж величини параметр S характеризує розсіювання результатів багаторазових n вимірювань однієї і тієї ж величини.

Оскільки ми обчислюємо середнє арифметичне, необхідне для одержання оцінки σ , то природно взяти його за результат вимірювання. В даному випадку середнє арифметичне також залежить від числа вимірювань і є також випадковою величиною, яка має деякі дисперсії відносно істинно-

го значення.

6. Визначити середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного за формулою (3.5):

$$\bar{\sigma}[\bar{x}] = \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (3.5)$$

Отже, якщо в якості результату багаторазових вимірювань взяти середнє арифметичне $\bar{x}$, то випадкова похибка (S) зменшується в $\sqrt{n}$ раз порівняно з випадком (рис. 12).

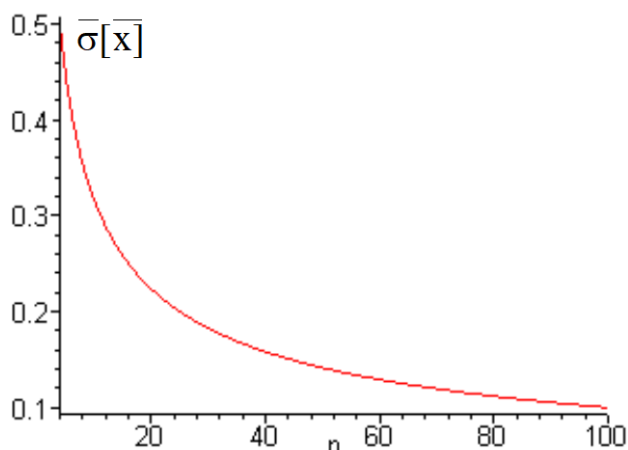


Рисунок 12

Тому багаторазові вимірювання з наступним усередненням результатів і прийняттям цього середнього за результат вимірювання є досить ефективним методом зменшення випадкової похибки.

7. Визначити довірчі границі похибки вимірювання, що являють собою верхню й нижню межі, які накривають із заданою ймовірністю похибку вимірювання. Якщо число вимірювань $n \leq 20 \dots 30$, то довірчий інтервал випадкової похибки при заданих імовірності P і середньому квадратичному відхиленні $\bar{\sigma}[\bar{x}]$ визначається за формулою Ст'юдента:

$$\Delta_d = \pm k_t \cdot \bar{\sigma}[\bar{x}], \quad (3.6)$$

де k_t – коефіцієнт розподілу Ст'юдента, який залежить від заданої ймовірності P і числа вимірювань n .

Якщо число вимірювань $n \geq 500 \dots 1000$, які розподілені за нормальним законом, то довірчий інтервал випадкової похибки визначається за правилом трьох «сигм - σ »:

$$\Delta_d = \pm 3 \cdot \bar{\sigma}[\bar{x}]. \quad (3.7)$$

Розглянемо тепер, яку саме довірчу ймовірність необхідно задавати. Як правило, для звичайних вимірювань приймають $P = 0.95$. Якщо вимірювання повторити неможливо, то $P = 0.99$, а в особливо відповідальних випадках, коли вимірювання, що виконуються, пов'язані із створенням нових еталонів або їхні результати можуть суттєво вплинути на здоров'я

людини, $P = 0.997$.

8. Представити результат вимірювання $\bar{x} \pm \Delta_d$; P .

4.2 Варіанти індивідуальних завдань до ІнРЗ № 3

Варіанти індивідуальних завдань наведені в табл. 9

Таблиця 9 – Варіанти завдань для оцінювання випадкових похибок прямих вимірювань

№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань напруги:				
1	U, В	5.1	5.3	5.2	5.4	5.0
2	U, В	12.1	12.3	12.2	12.4	12.0
3	U, В	24.0	24.2	24.1	24.3	23.9
4	U, В	36.0	36.2	36.1	36.3	35.9
5	U, В	47.0	48.0	49.0	50.0	46.0
6	U, В	110.0	112.0	111.0	109.0	113.0
7	U, В	120.0	124.0	122.0	118.0	126.0
8	U, В	180.0	200.0	190.0	170.0	210.0
9	U, В	200.0	190.0	210.0	185.0	195.0
10	U, В	220.0	225.0	215.0	213.0	227.0
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань струму:				
11	I, А	1.01	0.99	1.02	0.98	1.00
12	I, А	1.03	1.00	1.20	0.97	0.80
13	I, А	1.2	1.4	1.3	1.5	1.1
14	I, А	1.4	1.6	1.5	1.3	1.7
15	I, А	1.5	1.7	1.8	1.4	1.6
16	I, А	1.6	1.8	1.7	1.9	1.5
17	I, А	1.7	1.9	1.8	2.0	1.6
18	I, А	1.8	2.0	1.9	1.7	2.1
19	I, А	1.9	2.1	1.5	1.6	1.4
20	I, А	2.0	1.8	1.9	2.1	1.7
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань потужності:				
21	P, Вт	10	11	9	8	12
22	P, Вт	50	52	48	51	49
23	P, Вт	100	102	98	97	103
24	P, Вт	200	204	196	202	198
25	P, Вт	250	253	247	255	245
26	P, Вт	300	294	306	287	313
27	P, Вт	350	352	348	346	354
28	P, Вт	400	409	391	403	397
29	P, Вт	450	437	463	441	459
30	P, Вт	500	491	509	488	512
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань частоти:				
31	f, Гц	50	48	52	49	51
32	f, Гц	100	103	97	102	98

Продовження таблиці 9

33	f, Гц	250	252	248	254	246
34	f, Гц	300	295	305	286	314
35	f, Гц	500	492	508	487	513
36	f, Гц	800	790	810	811	789
37	f, Гц	1000	984	1016	991	1009
38	f, Гц	5000	4980	5020	4975	5025
39	f, Гц	10000	9980	10020	9991	10009
40	f, Гц	50000	50020	49980	49990	50010
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань періоду:				
41	T, мкс	10	12	8	11	9
42	T, мкс	50	53	47	54	46
43	T, мкс	100	106	94	95	105
44	T, мкс	200	188	212	193	207
45	T, мс	25	23	27	26	24
46	T, мс	40	44	36	37	43
47	T, мс	150	138	162	158	142
48	T, мс	400	389	411	391	409
49	T, с	0.50	0.53	0.47	0.44	0.56
50	T, с	0.90	0.86	0.94	0.93	0.87
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань активного опору:				
51	R, Ом	1.2	1.18	1.22	1.16	1.24
52	R, Ом	2.4	2.33	2.47	2.45	2.35
53	R, Ом	4.7	4.64	4.76	4.58	4.82
54	R, Ом	6.8	6.72	6.88	6.81	6.79
55	R, кОм	10	10.03	9.97	9.96	10.04
56	R, кОм	12	11.80	12.20	12.15	11.85
57	R, кОм	16	15.4	16.6	16.3	15.7
58	R, кОм	51	52	50	53	49
59	R, кОм	62	64	60	59	65
60	R, кОм	91	88	94	86	96
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань ємності конденсаторів:				
61	C, нФ	10	10.4	9.6	9.4	10.6
62	C, нФ	25	22	28	27	23
63	C, нФ	50	53	47	46	54
64	C, пФ	16	15.7	16.3	16.5	15.5
65	C, пФ	22	20	24	21.5	22.5
66	C, пФ	64	63.6	64.4	62	66
67	C, мФ	5	4.86	5.14	4.79	5.21
68	C, мФ	14	13.2	14.8	13.4	14.6
69	C, мФ	22	21.78	22.22	22.11	21.89
70	C, мФ	68	67.87	68.13	66	70
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань індуктивностей котушок:				
71	L, мГн	0.22	0.20	0.24	0.19	0.25
72	L, мГн	0.39	0.37	0.41	0.36	0.42
73	L, мГн	0.46	0.44	0.48	0.43	0.49
74	L, мГн	0.71	0.69	0.73	0.67	0.75
75	L, мГн	1.54	1.51	1.57	1.44	1.64

Продовження таблиці 9

76	L, мГн	3.45	3.39	3.51	3.41	3.49
77	L, мГн	3.3	3.18	3.42	3.21	3.39
78	L, мГн	3.9	3.77	4.03	3.82	3.98
79	L, мГн	15	13	17	14.4	15.6
80	L, мГн	25	22	28	23.9	26.1
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань температури:				
81	T ⁰ C	20	20.09	19.91	19.87	20.13
82	T ⁰ C	40	39.84	40.16	40.09	39.91
83	T ⁰ C	50	50.12	49.88	50.17	49.83
84	T ⁰ C	60	61.1	58.9	57.9	62.1
85	T ⁰ F	68	67.3	68.7	68.5	67.5
86	T ⁰ F	86	85	87	84	88
87	T ⁰ F	104	100	108	99	109
88	T(K)	122	119	125	118.5	125.5
89	T(K)	293	290	296	292.1	293.9
90	T(K)	313	310	316	311.8	314.2
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань рівня:				
91	мкМ	100	102	98	97	103
92	мкМ	151	149	148	151	152
93	мкМ	200	198	197	203	202
94	мм	48	50	52	49	51
95	мм	80	78	82	81	79
96	мм	122	121	120	118	119
97	м	1.2	1.0	1.8	1.9	2.1
98	м	1.4	1.6	1.5	1.7	1.3
99	м	5.0	4.8	5.2	5.3	4.7
100	м	9.8	9.9	10.0	10.2	10.1
№ варіанту	Умовне позначення	Результати вимірювань кутової швидкості:				
101	об/хв	502	501	500	499	498
102	об/хв	752	750	748	749	751
103	об/хв	1503	1497	1498	1502	1500
104	об/хв	2755	2695	2750	2758	2742
105	об/хв	3005	3003	2995	2997	3000
106	рад/с	1.12	1.09	1.10	1.08	1.11
107	рад/с	20.4	20.6	20.5	20.7	20.3
108	рад/с	57.3	57.0	56.7	56.6	57.4
109	рад/с	316	312	314	311	317
110	рад/с	626	630	628	625	631

4.3 Приклад оцінювання випадкових похибок прямих вимірювань на- пруги

4.3.1 Зразок індивідуального завдання

Індивідуальне завдання має бути наступним листом після титульного листа.

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Факультет _____ ФЕЕМ _____ Кафедра _____ КЕМСК

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Максим ЛУНІН

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема Оцінювання випадкових похибок прямих вимірювань

2. Термін здачі студентом закінченого РГР на 8-му тижні

3. Вихідні дані до розрахункової роботи:

3.1. Номер варіанту завдання Варіант № 130

3.2. Вихідні дані для нормування похибок засобів вимірювань:

Таблиця 10 – Варіант № 130

Варіант	U	U ₁	U ₂	U ₃	U ₄	U ₅
130	B	62.6	62.2	62.8	62.5	62.4

4. Дата видачі завдання до РГР «___» _____ 20__ р.

Викладач _____ (Підпис)

Завдання прийняв до виконання _____ (Підпис)

4.3.2 Алгоритм та результати виконання завдання

- 1) знайти математичне очікування для ряду вимірювань, що наведені в табл. 10.;
- 2) визначити випадкові відхилення (абсолютну випадкову похибку);
- 3) здійснити перевірку того, що сума випадкових відхилень дорівнює, або близька до нуля;
- 4) знайти оцінку експериментального середнього квадратичного відхилення;
- 5) визначити середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного;
- 6) визначити мінімальне і максимальне значення масиву вимірювальної інформації;
- 7) побудувати криву нормального закону розподілу;
- 8) подати результат у відповідності до однієї із стандартних форм.

Приклад виконання завдання:

Знайдемо математичне очікування (середнє арифметичне) для масиву випадкових значень (табл.10) вимірюваних напруг:

$$\bar{U} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 U_i = \frac{62.6 + 62.2 + 62.8 + 62.5 + 62.4}{5} = 62.5 \text{ В}$$

Оцінимо випадкові відхилення (абсолютну випадкову похибку) для кожного результату вимірювання (табл.10):

$$\begin{aligned}\vartheta_i &= X_i - \bar{X} = U_i - \bar{U}. \\ \vartheta_1 &= U_1 - \bar{U} = 62.6 - 62.5 = +0.1 \text{ В}; \\ \vartheta_2 &= U_2 - \bar{U} = 62.2 - 62.5 = -0.3 \text{ В}; \\ \vartheta_3 &= U_3 - \bar{U} = 62.8 - 62.5 = +0.3 \text{ В}; \\ \vartheta_4 &= U_4 - \bar{U} = 62.5 - 62.5 = 0.0 \text{ В}; \\ \vartheta_5 &= U_5 - \bar{U} = 62.4 - 62.5 = -0.1 \text{ В}.\end{aligned}$$

Перевіримо, чи сума випадкових відхилень дорівнює або близька до нуля:

$$\sum_{i=1}^5 \vartheta_i = +0.1 - 0.3 + 0.3 + 0 - 0.1 = 0 \text{ В}.$$

Оскільки сума випадкових відхилень близька до нуля, то результати розрахунків випадкових відхилень (абсолютної випадкової похибки) вірні.

Оцінимо значення відносної похибки і точності вимірювань випадкових величин.

Відносна похибка:

$$\begin{aligned}\delta_i &= \left| \frac{\vartheta_i}{\bar{U}} \right| \cdot 100\%. \\ \delta_1 &= \left| \frac{\vartheta_1}{\bar{U}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{0.1}{62.5} \right| \cdot 100\% = 0.16\%. \\ \delta_2 &= \left| \frac{\vartheta_2}{\bar{U}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{-0.3}{62.5} \right| \cdot 100\% = 0.48\%. \\ \delta_3 &= \left| \frac{\vartheta_3}{\bar{U}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{0.3}{62.5} \right| \cdot 100\% = 0.48\%. \\ \delta_4 &= \left| \frac{\vartheta_4}{\bar{U}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{0.0}{62.5} \right| \cdot 100\% = 0.00\%. \\ \delta_5 &= \left| \frac{\vartheta_5}{\bar{U}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{-0.1}{62.5} \right| \cdot 100\% = 0.16\%.\end{aligned}$$

Точність вимірювань:

$$\begin{aligned}\theta_i &= \frac{1}{\delta_i} = \frac{\bar{U}}{\vartheta_i}. \\ \theta_1 &= \left| \frac{\bar{U}}{\vartheta_1} \right| = \left| \frac{62.5}{+0.1} \right| = 625; \\ \theta_2 &= \left| \frac{\bar{U}}{\vartheta_2} \right| = \left| \frac{62.5}{-0.3} \right| \approx 208;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\theta_3 &= \left| \frac{\bar{U}}{\theta_3} \right| = \left| \frac{62.5}{+0.3} \right| \approx 208; \\ \theta_4 &= \left| \frac{\bar{U}}{\theta_4} \right| = \left| \frac{62.5}{0} \right| \approx \infty; \\ \theta_5 &= \left| \frac{\bar{U}}{5} \right| = \left| \frac{62.5}{-0.1} \right| = 625.\end{aligned}$$

Знайдемо оцінку експериментального середнього квадратичного відхилення:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(\theta_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(0.1)^2 + (-0.3)^2 + (0.3)^2 + (0)^2 + (-0.1)^2}{5-1}} \approx 0.22 \text{ В}.$$

Визначимо середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного:

$$\sigma = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{0.22}{\sqrt{5}} \approx 0.1 \text{ В}.$$

Оцінимо довірчі границі похибки вимірювання для нормального закону розподілу, скориставшись правилом «трьох сігм»:

$$\Delta_d = \pm 3 \cdot \sigma = \pm 3 \cdot 0.1 = \pm 0.3 \text{ В}.$$

З наведених в табл. 9 випадкових величин, визначимо мінімальне і максимальне значення вимірюваної напруги:

$$\begin{aligned}U_{\min} &= 62.2 \text{ В} \\ U_{\max} &= 62.8 \text{ В},\end{aligned}$$

Для побудови нормального закону розподілу зведемо до табл. 11 розраховані вище основні статистичні характеристики.

Таблиця 11 – Основні статистичні оцінки вимірювання напруги

Назва статистичної оцінки	Числове значення	Одиниця вимірювання
1. Кількість вимірянних значень	5	-
2. Мінімальне значення	62.2	В
3. Максимальне значення	62.8	В
4. Середнє арифметичне значення	62.5	В
5. Середнє квадратичне відхилення	0.10	В

На основі статистичних характеристик, що наведено в табл. 11, побудуємо графік нормального закону розподілу (рис. 13):

$$f(U_i) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{U_i - \bar{U}}{\sigma}\right)^2\right]} = \frac{1}{0.1 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{U_i - 62.5}{0.1}\right)^2\right]}.$$

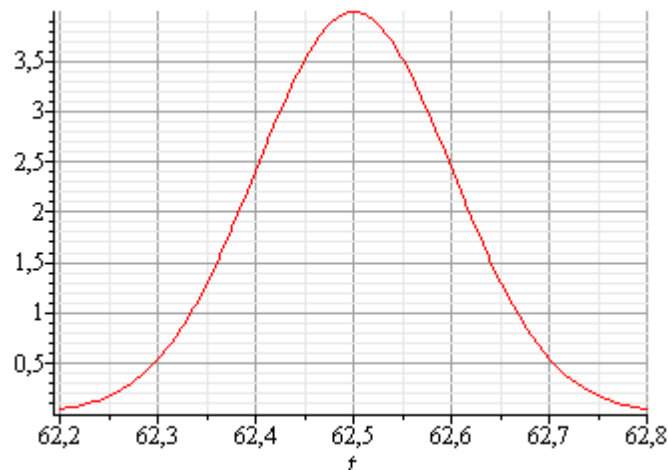


Рисунок 13 – Нормальний закон розподілу

Подамо результат вимірювання згідно до другої стандартної форми представлення результатів вимірювань:

$$U = \bar{U} \pm \Delta_d, P = 0.997; \quad U = 62.5 \text{ В} \pm 0.3 \text{ В}, P = 0.997.$$

***Контрольні питання та практичні завдання
до індивідуального розрахункового завдання ІнРЗ № 3***

1. Яку складову похибки називають випадковою. Чи принципово можливо вилучити випадкову похибку з результатів вимірювань.
2. Як визначити математичне очікування випадкової похибки і, яку складову похибки вимірювання воно характеризує?
3. Що собою являє випадкове відхилення і як воно визначається?
4. Наведіть формулу за якою встановлюють правильність визначення середнього арифметичного і випадкового відхилення.
5. Проведено багаторазові вимірювання і отримано такі числові значення випадкової величини: 10.1 В, 9.9 В, 9.8 В, 10.0 В, 10.2 В. Визначити середнє арифметичне всіх із результатів вимірювань.

Оцінити значення випадкових відхилень. Чому випадкове відхилення ще називають абсолютною випадковою похибкою.

6. Перевірте за відомим Вам критеріями правильність визначення середнього арифметичного і випадкових відхилень для завдання №5.
7. Наведіть формулу Бесселя для оцінювання експериментального середнього квадратичного відхилення. Для завдання №5 отримайте числове значення СКВ. Яку складову похибки воно характеризує.
8. Як визначити середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного? Для завдання №7 отримайте числове значення $\sigma[x]$.
9. Покажіть, що багаторазові вимірювання з наступним усередненням результатів є досить ефективним методом зменшення випадкових похибок. Суттєвий недолік даного методу.
10. Випадкова похибка засобу вимірювання не перевищує $S \leq 0.5$ Ом. Запропонуйте алгоритм зменшення цієї похибки до значення $S \leq 0.1$ Ом.
11. Швидкодія цифрового вимірювального каналу 10^5 вимірювань напруги за одну секунду. Для зменшення випадкової похибки S в десять разів застосували багаторазові вимірювання з наступним усередненням результатів. В скільки разів буде зменшена швидкодія вимірювального каналу.
12. Як визначити довірчий інтервал для розподілу Ст'юдента і як для нормального закону розподілу випадкових похибок?
13. Які два параметра необхідно знати, щоб по таблиці визначити числове значення коефіцієнту Ст'юдента.
14. Якими значеннями довірчої ймовірності P необхідно задатися для визначення коефіцієнту Ст'юдента, якщо вимірювання: звичайні; вимірювання не можливо повторити; прецизійні вимірювання.
15. Чому для подання випадкових похибок використовують не точкову а інтервальну форму.
16. В результаті багаторазових вимірювань напруги отримано такий ряд спостережень: 11.9; 12.1; 12.0; 11.8; 12.2 [В], похибка яких розподілена за нормальним законом. Визначити середнє значення виміряної напруги, його СКВ. Навести результат, вказавши границі довірчого інтервалу, в який попадає похибка вимірювання.
17. В результаті багаторазових вимірювань отримано ряд спостережень напруги: 120; 121; 119; 120; 118; 122 [В]. Навести результат, вказавши границі довірчого інтервалу, в який попадає похибка

вимірювання із встановленою довірчою ймовірністю $P=0.95$ (коефіцієнт Ст'юдента $k_t=2.51$).

18. Для прикладу №14 оцінити довірчий інтервал, який встановлено за правилом 3-х сігм. При виконанні яких двох умов можливо використовувати дане правило.
19. Наведіть аналітичне та графічне представлення нормального закону розподілу.
20. Які чотири статистичні характеристики необхідно знати щоб побудувати по експериментальним даним нормальний закон розподілу?
21. В результаті оцінювання випадкових похибок отримано числові значення таких статистичних характеристик: $X_{\min} = 48$ Гц, $X_{\max} = 52$ Гц, $\bar{X} = 50$ Гц, $\sigma =$. Наведіть графічне зображення нормального закону для наведених вище характеристик.
22. Як впливає на форму нормального закону розподілу систематична складова похибки. Проілюструйте відповідною графічною залежністю..
23. Як впливає на форму нормального закону розподілу середнє квадратичне відхилення? Проілюструйте відповідними графічними залежностями.
24. Як по графічній залежності нормального закону розподілу визначити значення систематичної похибки.
25. З яких причин результати багаторазових вимірювань розподілені, як правило за нормальним законом.

Часові діаграми роботи вимірювального каналу часового інтервалу наведені на рис. 15.

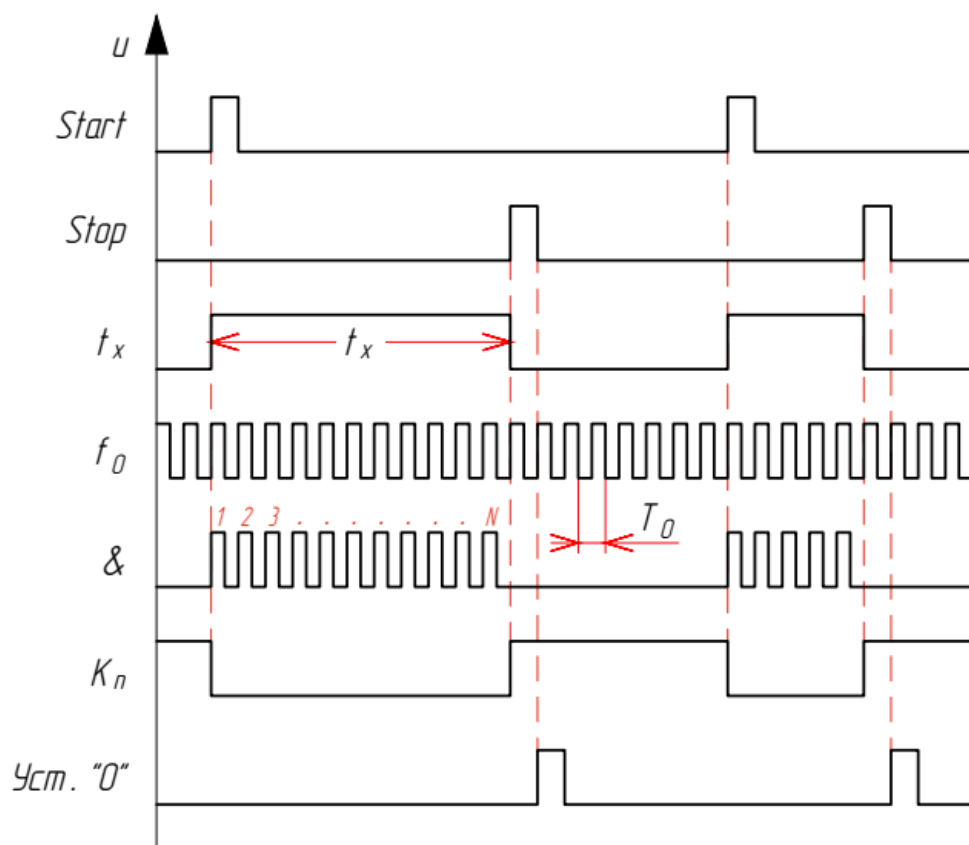


Рисунок 15 – Часові діаграми роботи вимірювального каналу часового інтервалу

На часовій діаграмі прийнято такі позначення: Start – сигнал початку часового інтервалу t_x ; Stop – сигнал завершення часового інтервалу t_x ; t_x – тривалість вимірюваного часового інтервалу; f_0 – сигнали зразкової частоти з періодом T_0 ; N – кількість імпульсів, що підрахував двійковий лічильник СТ2 за час вимірювання; K_n – сигнал кінець перетворення (завершення квантування часового інтервалу t_x періодами T_0 зразкової частоти f_0); Уст «0» – установка усіх тригерів (для наведеного прикладу їхня кількість $n=16$) двійкового лічильника СТ2 в стан логічного «0»; Reset – зовнішній сигнал обнулення усіх тригерів лічильника СТ2.

Розглянемо принцип дії схеми вимірювального каналу.

Вихідне положення. Після заживлення логічних елементів і елементів пам'яті з блока живлення (на схемі не показано) поступає сигнал Reset, який обнуляє всі тригери. На прямому виході RS-тригера формується рівень логічного нуля, який закриває логічну схему 2-І. З цієї причини імпульси зразкової частоти f_0 не подаються на тактовий С-вхід двійкового лічильника СТ2. Тому на всіх його виходах $2^0 \dots 2^{15}$ сформовані рівні логічного нуля. На інверсному виході цього RS-тригера – рівень логічної «1». Схема знаходиться в режимі очікування.

Вимірювання. В момент приходу одиничного сигналу на S-вхід тригер Т з нульового стану встановлюється в одиничний: на прямому виході логічна «1», а на інверсному – логічний «0». Сформований на інверсному виході тригера Т задній фронт (перепад з логічної «1» в логічний «0») не є інформативний для паралельного інтерфейсу PPI. Рівень логічної «1», сформований на прямому виході тригера Т, відкриває логічну схему 2-І для проходження через неї імпульсів зразкової частоти f_0 на тактовий С-вхід двійкового лічильника. В СТ2 здійснюється процес лічби: з приходом кожного імпульсу на С-вхід його стан збільшується на одиницю (+1 – режим інкременту).

В логічній схемі 2-І здійснюється квантування – метрологічна операція заміни аналогової (неперервної) фізичної величини часового інтервалу t_x квантованими (перервними) значеннями у вигляді двійкового коду на виходах N[00-15] двійкового лічильника СТ2. Квантування виконується порівнянням вимірюваної величини X і зразкової [x]:

$$N = \frac{X}{[x]}. \quad (4.1)$$

Для такого вимірювального перетворення справедливими є такі позначення:

$$X \xrightarrow{\text{вимірювана}} t_x \quad [x] \xrightarrow{\text{зразкова}} T_0.$$

Враховавши введені позначення операцію порівняння подамо так:

$$N = \frac{t_x}{[T_0]}. \quad (4.2)$$

Внаслідок цього порівняння неперервний аналоговий часовий інтервал t_x замінюють обмеженою цілою кількістю N зразкових часових інтервалів T_0 . Тому таку дію називають аналого-цифровим перетворенням, результат якого – аналогова величина t_x перетворюється в дискретизовану.

Оскільки період T_0 пов'язаний з частотою f_0 оберненою залежністю:

$$T_0 = \frac{1}{f_0}.$$

то остаточне рівняння перетворення для вимірювального каналу часового інтервалу матиме вигляд:

$$N = t_x \cdot f_0. \quad (4.3)$$

Отже протягом часового інтервалу t_x двійковий лічильник СТ2 підрахує N періодів T_0 зразкової частоти f_0 .

Процес лічби (вимірювання) продовжується до моменту подання на R-вхід RS-тригера Т керуючого сигналу Stop, який сигналізує про завершення часового інтервалу і відповідно процесу вимірювання. Даним сигналом на прямому виході тригера Т формується рівень логічного «0», що закриває логічну схему 2-І, а на його інверсному виході перепад сигналу з рівня логічного «0» до рівня логічної «1». Сформований таким чином передній фронт є сигналом Кп кінець перетворення, по якому двійковий код $N[00-15]$ запам'ятовується в портах (регістрах) паралельного інтерфейсу PPI. Після того, як вимірювальна інформація записана в портах PPI, по задньому фронту сигналу Stop формується сигнал Уст «0». Даним сигналом всі тригери двійкового лічильника СТ2 обнуляються. СТ2 готовий для виконання наступного циклу вимірювання.

Для отримання з функції перетворення (4.3) рівняння чутливості необхідно взяти похідну від (4.3):

$$S = \frac{dN}{dt_x} = f_0 = const.$$

Рівняння перетворення можна записати і через чутливість:

$$N = S \cdot t_x. \quad (4.4)$$

Оскільки чутливість є сталою величиною, то статична характеристика (графічне подання функції перетворення) є лінійною (рис.16). Відповідно і крок квантування у таких вимірювальних каналів є також сталою величиною:

$$h = T_0 = \frac{1}{f_0} = const. \quad (4.5)$$

В результаті квантування аналогову фізичну величину часовий інтервал t_x , що має нескінчену кількість значень, замінено перервною квантованою величиною з обмеженою кількістю значень, що і є причиною похибки квантування.

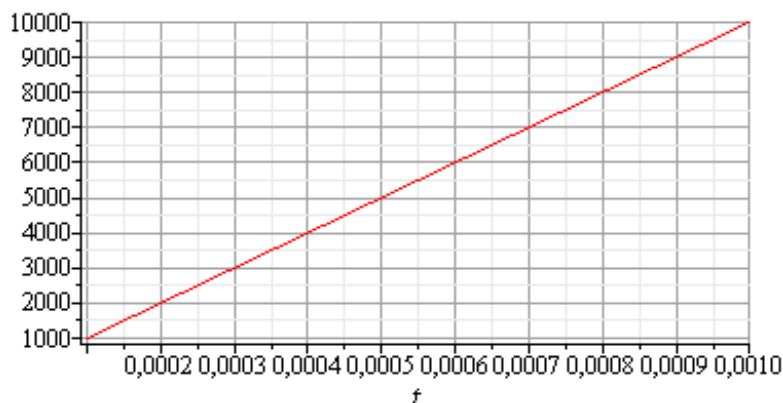


Рисунок 16 – Статична характеристика вимірювального каналу t_x

Абсолютну похибку квантування оцінюють як половину кроку квантування (4.5):

$$\Delta_k = \frac{1}{2} \cdot h = \frac{1}{2} \cdot T_0 = const. \quad (4.6)$$

З (4.6) видно, що абсолютна похибка квантування є методичною систематичною похибкою і має розмірність кроку квантування (в нашому випадку розмірність може бути секунда, мілісекунда, мікросекунда, наносекунда, пікосекунда і т.д.).

Відносну похибку квантування є величиною оберненою до кількості імпульсів N двійкового лічильника СТ2 і подають її у відсотках:

$$\delta_k = \frac{1}{N} \cdot 100\% = \frac{100\%}{t_x \cdot f_0}. \quad (4.7)$$

Графік зміни відносної похибки в діапазоні зміни вимірюваної величини t_x наведено на рис.17.

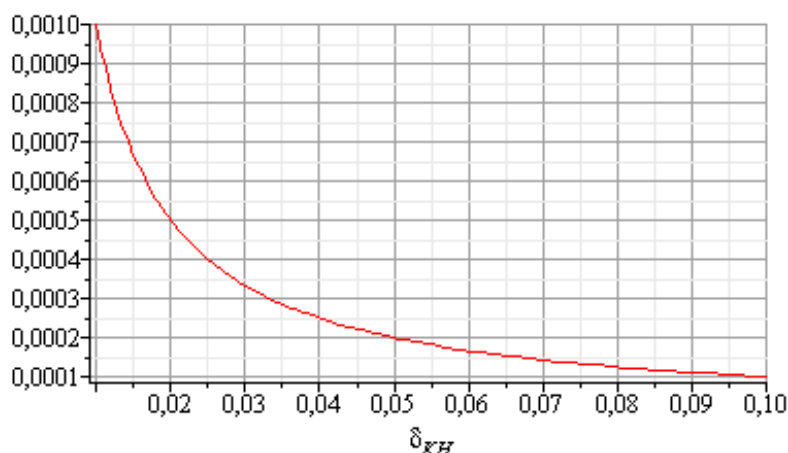


Рисунок 17 – Функціональна залежність $\delta_k = f(t_x)$

Аналіз результатів наведених на рис. 17 показує, що при вимірюванні малих значень часового інтервалу ($t_x=10^{-4}$ с) значення похибки квантування велике і дорівнює 0.1%. З ростом часового інтервалу ($t_x=10^{-3}$ с) значення похибки на порядок зменшується (до 0.01%). Отже, нижня межа вимірювання обмежена нормованим значенням похибки квантування $\delta_{кн}$.

Визначимо нижню межу вимірювання $t_{x \min}$. Для цього задамося нормованим значенням похибки квантування:

$$\delta_{кн} = \frac{100\%}{t_{x \min} \cdot f_0}. \quad (4.8)$$

З (4.8) нижня межа вимірювання часового інтервалу визначається:

$$t_{x \min} = \frac{100\%}{\delta_{KH} \cdot f_0}. \quad (4.9)$$

Залежність нижньої межі вимірювання $t_{x \min}$ від нормованого значення похибки квантування наведено на рис.18.

Наприклад, для значень частоти квантування $f_0 = 10^7$ Гц в діапазоні зміни інформативного параметру t_x нижня межа вимірювання змінюється від 10^{-3} с до 10^{-3} с.

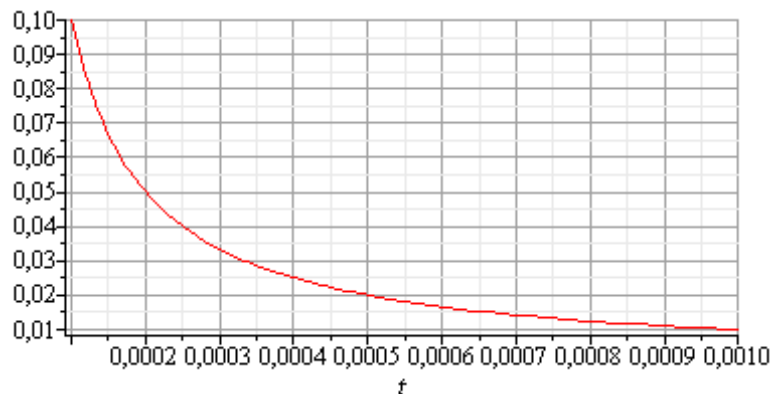


Рисунок 18 – Функціональна залежність $t_{x \min} = f(\delta_{KH})$

Окрім нижньої межі діапазон вимірювання обмежується ще і верхньою межею, яка визначається максимальною ємністю двійкового лічильника:

$$N_{\max} = 2^n, \quad (4.10)$$

де n – розрядність двійкового лічильника СТ2.

З урахуванням (4.10) рівняння перетворення (4.3) запишемо так:

$$N_{\max} = 2^n = t_{x \max} \cdot f_0, \quad (4.11)$$

З (11) Верхня межа вимірювання часового інтервалу визначається:

$$t_{x \max} = \frac{2^n}{f_0}. \quad (4.11)$$

Параметрами вимірювального каналу, які обмежують верхню межу вимірювання є частота квантування f_0 і розрядність n двійкового лічильника СТ2. Залежність верхньої межі вимірювання від розрядності n двійкового лічильника СТ2 і відповідно розрядності портів паралельного інтерфейсу PPI наведена на рис. 19.

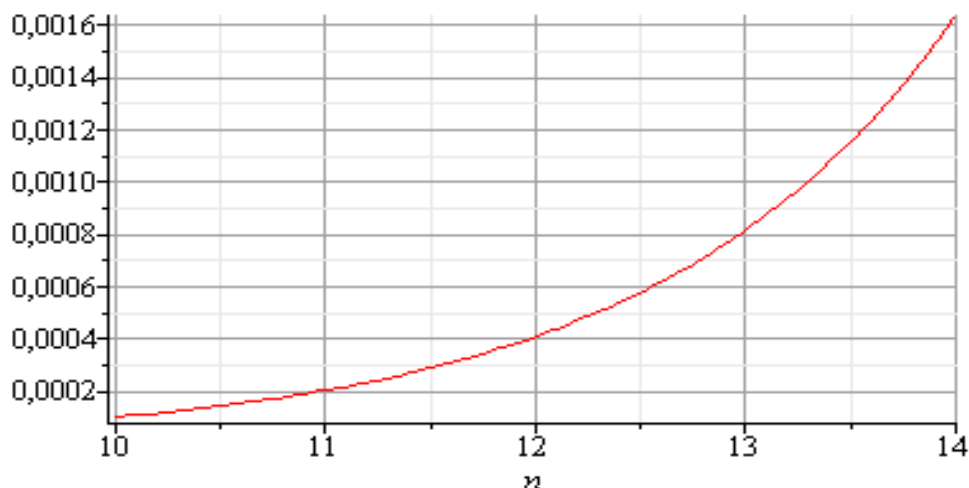


Рисунок 19 – Функціональна залежність $t_{x\max} = f(n)$

5.2 Варіанти індивідуальних завдань до ІнРЗ № 4

Варіанти індивідуальних завдань наведені в табл. 12.

Таблиця 12 – Варіанти індивідуальних завдань

№ вар	Найменування ВК	Числові значення параметрів ВК частоти				
		k	n	f ₀ , Гц	f _{xmin} , Гц	f _{xmax} , Гц
1.1	ВК частоти серед- ніх значень	1·10 ⁶	12	1·10 ⁶	1 000	2 000
1.2		2·10 ⁶	13	2·10 ⁶	2 000	4 000
1.3	ВК частоти миттє- вих значень	-	10	1·10 ⁴	10	50
1.4		-	11	1·10 ⁵	50	100
	Найменування ВК	k	n	f ₀ , Гц	t _{xmin} , с	t _{xmax} , с
1.5	ВК часового інтер- валу	-	10	4·10 ⁵	1·10 ⁻³	2,5·10 ⁻³
1.6		-	11	1·10 ⁷	1·10 ⁻⁴	2,0·10 ⁻⁴
	Найменування ВК	Числові значення параметрів ВК різниці фаз				
		f _x	n	f ₀ , Гц	φ _{xmin} , град	φ _{xmax} , град
1.7	ВК різниці фаз	50	12	1·10 ⁶	36	54
1.8	миттєвих значень	100	9	2·10 ⁵	45	90
		Числові значення параметрів ВК різниці фаз				
		k	n	f ₀ , Гц	φ _{xmin} , град	φ _{xmax} , град
1.9	ВК різниці фаз се- редніх значень	2·10 ³	8	-	18	45
1.10		10 ⁴	11	-	36	90
		Числові значення параметрів ВК напруги				
		k	n	f ₀ , Гц	U _{xmin} , В	U _{xmax} , В
1.11	ВК напруги час-ім.	10 ⁻²	12	10 ⁵	1.0	5.0
1.12	перетворення	5·10 ⁻¹	13	2·10 ³	5.0	10

Продовження табл. 12

№ вар	Найменування ВК	Числові значення параметрів ВК напруги					
		h, мВ	n	U ₀ , В	U _{xmin} , В	U _{xmax} , В	
1.13	ВК напруги послід. наближення	5	10	5.12	1.0	2.5	
1.14		2.5	11	5.12	2.5	5.0	
1.15	ВК напруги слідк.	20	9	10.24	2.0	10	
1.16	зрівноваження	5	11	10.24	4.0	8.0	
		Числові значення параметрів ВК опору					
		f ₀ , Гц	n	C ₀ , Ф	R _{xmin} , Ом	R _{xmax} , Ом	
1.17	ВК опору	1·10 ⁶	11	1·10 ⁻⁶	1000	2000	
1.18		1·10 ⁶	10	2·10 ⁻⁶	300.0	500.0	
		Числові значення параметрів ВК ємності					
		f ₀ , Гц	n	R ₀ , Ом	C _{xmin} , Ф	C _{xmax} , Ф	
1.19	ВК ємності	1·10 ⁶	9	100.0	1·10 ⁻⁶	5·10 ⁻⁶	
1.20		1·10 ⁵	10	1000	5·10 ⁻⁶	10·10 ⁻⁶	
Вимірювальні канали напруги з попереднім масштабуванням							
		Числові значення параметрів ВК напруги					
		h, мВ	КМП	n	U ₀ , В	U _{xmin} , В	U _{xmax} , В
1.21	ВК напруги послід. наближення	10	10 ²	10	10.24	5·10 ⁻²	10 ⁻¹
1.22	ВК напруги слідк. зрівноваження	2.5	10	11	5.12	10 ⁻¹	5·10 ⁻¹
		Числові значення параметрів ВК напруги					
		k	КМП	n	f ₀ , Гц	U _{xmin} , В	U _{xmax} , В
1.23	ВК напруги час-ім. перетворення	10 ⁻²	10 ²	10	5·10 ³	10 ⁻²	5·10 ⁻¹
№ вар	Найменування ВК	Числові значення параметрів ВК частоти					
		k	n	f ₀ , Гц	f _{xmin} , Гц	f _{xmax} , Гц	
2.1	ВК частоти сере- дніх значень	10 ⁵	18	2·10 ⁵	1000	10 000	
2.2		10 ⁴	16	5·10 ⁴	5·10 ³	5·10 ⁴	
2.3	ВК частоти мит- тєвих значень	-	16	2·10 ⁵	4	50	
2.4		-	20	4·10 ⁵	50	200	
	Найменування ВК	k	n	f ₀ , Гц	t _{xmin} , с	t _{xmax} , с	
2.5	ВК часового інтер- валу	-	14	4·10 ⁶	1.25·10 ⁻³	2.5·10 ⁻³	
2.6		-	12	8·10 ⁶	2.5·10 ⁻⁴	5.0·10 ⁻⁴	
		Числові значення параметрів ВК різниці фаз					
		f _x	n	f ₀ , Гц	φ _{xmin} , град	φ _{xmax} , град	
2.7	ВК різниці фаз	20	14	4·10 ⁵	36	90	
2.8	миттєвих значень	20	12	4·10 ⁵	9	60	
		Числові значення параметрів ВК різниці фаз					
		k	n	f ₀ , Гц	φ _{xmin} , град	φ _{xmax} , град	
2.9	ВК різниці фаз	6·10 ⁴	16	-	18	90	
2.10	середніх значень	5·10 ⁴	15	-	16	60	

Продовження табл. 12

№ вар	Найменування ВК	Числові значення параметрів ВК напруги				
		k	n	f ₀ , Гц	U _{xmin} , В	U _{xmax} , В
2.11	ВК напруги час-ім.	4·10 ⁻²	18	5·10 ⁵	0.2	13.0
2.12	перетворення	10 ⁻²	13	10 ⁵	1.0	8.0
		Числові значення параметрів ВК напруги				
		h _{мВ}	n	U ₀ , В	U _{xmin} , В	U _{xmax} , В
2.13	ВК напруги послід.	2.5	12	10.24	0.5	10.0
2.14	наближення	5	10	5.12	1.0	5.0
2.15	ВК напруги слідк.	1.25	12	5.12	0.5	5.0
2.16	зрівноваження	40	8	10.24	4.0	10.0
		Числові значення параметрів ВК опору				
		f ₀ , Гц	n	C ₀ , Ф	R _{xmin} , Ом	R _{xmax} , Ом
2.17	ВК опору	5·10 ⁵	20	5·10 ⁻⁵	100	1500
2.18		10 ⁵	18	4·10 ⁻⁴	50	500
		Числові значення параметрів ВК ємності				
		f ₀ , Гц	n	R ₀ , Ом	C _{xmin} , Ф	C _{xmax} , Ф
2.19	ВК ємності	8·10 ⁵	18	2·10 ⁴	1·10 ⁻⁶	10·10 ⁻⁶
2.20		5·10 ⁵	20	4·10 ⁴	1.5·10 ⁻⁶	8·10 ⁻⁶
№ вар	Найменування ВК	Числові значення параметрів ВК частоти				
		k	n	f ₀ , Гц	f _{xmin} , Гц	f _{xmax} , Гц
3.1	ВК частоти серед- ніх значень	10 ⁵	18	2·10 ⁵	550	1500
3.2		10 ⁴	16	5·10 ⁴	5·10 ³	5·10 ⁴
3.3	ВК частоти миттє- вих значень	-	16	2·10 ⁵	4	50
3.4		-	20	4·10 ⁵	1.5	25
3.5	ВК часового інтер- валу	-	10	2.5·10 ⁵	1.0·10 ⁻³	3.0·10 ⁻³
3.6		-	11	8·10 ⁵	2.0·10 ⁻³	5.0·10 ⁻³
		Числові значення параметрів ВК різниці фаз				
		f _x	n	f ₀ , Гц	φ _{xmin} , град	φ _{xmax} , град
3.7	ВК різниці фаз миттєвих значень	20	14	4·10 ⁵	8	72
3.8		20	12	4·10 ⁵	36	120
		Числові значення параметрів ВК різниці фаз				
		k	n	f ₀ , Гц	φ _{xmin} , град	φ _{xmax} , град
3.9	ВК різниці фаз се- редніх значень	6·10 ⁴	16	-	18	90
3.10		5·10 ⁴	15	-	36	120
		Числові значення параметрів ВК напруги				
		k	n	f ₀ , Гц	U _{xmin} , В	U _{xmax} , В
3.11	ВК напруги час-ім.	0.5	20	5·10 ⁵	0.2	4.0
3.12	перетворення	2·10 ⁻²	18	5·10 ⁵	0.5	26.0
		Числові значення параметрів ВК напруги				
		h, мВ	n	U ₀ , В	U _{xmin} , В	U _{xmax} , В
3.13	ВК напруги послід.	0.625	13	5.12	0.25	5.0
3.14	наближення	2.5	12	10.24	0.5	10.0
3.15	ВК напруги слідк.	0.156	16	10.24	0.8	10.0
3.16	зрівноваження	0.02	18	5.12	0.1	5.0

Продовження табл. 12

№ вар	Найменування ВК	Числові значення параметрів ВК опору				
		f_0 , Гц	n	C_0 , Ф	$R_{x\min}$, Ом	$R_{x\max}$, Ом
3.17	ВК опору	$5 \cdot 10^5$	20	$5 \cdot 10^{-5}$	100	4000
3.18		10^5	18	$4 \cdot 10^{-5}$	50	8000
		Числові значення параметрів ВК ємності				
		f_0 , Гц	n	R_0 , Ом	$C_{x\min}$, Ф	$C_{x\max}$, Ф
3.19	ВК ємності	$8 \cdot 10^5$	18	$2 \cdot 10^4$	10^{-6}	10^{-5}
3.20		$5 \cdot 10^5$	20	$4 \cdot 10^4$	10^{-7}	10^{-6}
№ вар	Найменування ВК	Числові значення параметрів ВК частоти				
		k	n	f_0 , Гц	$f_{x\min}$, Гц	$f_{x\max}$, Гц
4.1	ВК частоти серед- ніх значень	$1 \cdot 10^6$	13	$2 \cdot 10^6$	1 000	5 000
4.2		$1 \cdot 10^6$	12	$4 \cdot 10^6$	2 000	8 000
4.3	ВК частоти миттє- вих значень	-	11	$6 \cdot 10^4$	20	100
4.4		-	11	$1 \cdot 10^5$	5	50
4.5	ВК часового інтер- валу	-	13	$8 \cdot 10^6$	$4.0 \cdot 10^{-4}$	$6.5 \cdot 10^{-4}$
4.6		-	15	$4 \cdot 10^6$	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$5.0 \cdot 10^{-3}$
	Найменування ВК	Числові значення параметрів ВК різниці фаз				
		f_x	n	f_0 , Гц	$\varphi_{x\min}$, град	$\varphi_{x\max}$, град
4.7	ВК різниці фаз	15	9	$5.4 \cdot 10^4$	18	54
4.8	миттєвих значень	50	10	$1.8 \cdot 10^4$	24	90
		Числові значення параметрів ВК різниці фаз				
		k	n	f_0 , Гц	$\varphi_{x\min}$, град	$\varphi_{x\max}$, град
4.9	ВК різниці фаз се- редніх значень	$1.8 \cdot 10^3$	8	-	16	60
4.10		$3.6 \cdot 10^3$	10	-	24	90
		Числові значення параметрів ВК напруги				
		k	n	f_0 , Гц	$U_{x\min}$, В	$U_{x\max}$, В
4.11	ВК напруги час-ім. перетворення	10^{-3}	10	10^5	2.0	10.0
4.12		$5 \cdot 10^{-2}$	9	10^3	4.0	10.0
		Числові значення параметрів ВК напруги				
		$h_{\text{мв}}$	n	U_0 , В	$U_{x\min}$, В	$U_{x\max}$, В
4.13	ВК напруги послід. наближення	5	10	5.12	2.0	5.0
4.14		2.5	12	5.12	1.0	10.0
4.15	ВК напруги слідк. зрівноваження	20	8	10.24	2.0	5.0
4.16		10	10	10.24	4.0	10.0
		Числові значення параметрів ВК опору				
		f_0 , Гц	n	C_0 , Ф	$R_{x\min}$, Ом	$R_{x\max}$, Ом
4.17	ВК опору	$2.5 \cdot 10^6$	12	$4 \cdot 10^{-6}$	50.0	400.0
4.18		$2 \cdot 10^6$	11	$2.5 \cdot 10^{-6}$	100.0	400.0
		Числові значення параметрів ВК ємності				
		f_0 , Гц	n	R_0 , Ом	$C_{x\min}$, Ф	$C_{x\max}$, Ф
4.19	ВК ємності	$1 \cdot 10^4$	12	1000.0	$10 \cdot 10^{-6}$	$400 \cdot 10^{-6}$
4.20		$2 \cdot 10^5$	9	500	$1 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-6}$

Продовження табл. 12

Вимірювальні канали напруги з попереднім масштабуванням							
№ вар	Найменування ВК	Числові значення параметрів ВК напруги					
		h_{MB}	$K_{МП}$	n	$U_0, В$	$U_{xmin}, В$	$U_{xmax}, В$
4.21	ВК напруги послід. наближення	10	50	10	10.24	0.05	0.20
4.22	ВК напруги слідк. зрівноваження	5.0	10	10	5.12	0.10	0.50
		Числові значення параметрів ВК напруги					
		k	$K_{МП}$	n	$f_0, Гц$	$U_{xmin}, В$	$U_{xmax}, В$
4.23	ВК напруги час-ім. перетворення	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^2$	9	10^3	0.10	0.50

5.3. Приклад оцінювання основних статичних метрологічних характеристик вимірювального каналу часового інтервалу

5.3.1 Зразок індивідуального завдання

Індивідуальне завдання має бути наступним листом після титульного листа.

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Факультет _____ ФЕЕМ _____ Кафедра _____ КЕМСК

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Максим ЛУНІН

(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема Оцінювання та аналіз основних статичних метрологічних характеристик вимірювального каналу часового інтервалу

2. Термін здачі студентом закінченого РГР на 14-му тижні

3. Вихідні дані до розрахункової роботи:

3.1. *Номер варіанту завдання* Варіант № 4.25

3.2. *Вихідні дані для нормування похибок засобів вимірювань:*

Таблиця 13 – Варіант № 4.25

Варіант	n	$f_0, Гц$	$t_x \min, c$	$t_x \max, c$
130	14	10^7	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$

4. Дата видачі завдання до РГР « » _____ 20__ р.

Викладач _____ (Підпис)

Завдання прийняв до виконання _____ (Підпис)

5.3.2 Алгоритм виконання та отримані результати

При виконанні даного індивідуального завдання необхідно дотримуватися такої методики (алгоритму):

1) Подати структурну схему вимірювального каналу згідно до Вашого варіанту, який наведено в табл. 12. Під схемою розкрити тільки умовні графічні позначення.

2) Сформулюйте принцип, що покладено в основу побудови вимірювального каналу.

3) Подати часові діаграми роботи вимірювального каналу. Під часовими діаграмами розкрити тільки умовні графічні позначення.

4) Усно пояснити принцип дії схеми сумісно з часовими діаграмами.

5) Записати рівняння перетворення і усно пояснити процес квантування вимірюваної фізичної величини. Визначитись, яка величина вимірювана, а яка зразкова.

6) Навести графічне подання функції перетворення – статичну характеристику. Усно пояснити чому вона лінійна чи не лінійна.

7) По рівнянню перетворення отримати рівняння чутливості.

8) Навести рівняння абсолютної та відносної похибок квантування. Усно пояснити причини їх виникнення та шляхи зменшення.

9) Навести формулу для оцінювання нижньої межі вимірювання. Усно пояснити, який параметр її обмежує.

10) Навести графічну залежність нижньої межі вимірювання від параметра, що її обмежує.

11) Навести формулу для оцінювання верхньої межі вимірювання. Усно пояснити, який параметр її обмежує.

12) Навести графічну залежність верхньої межі вимірювання від параметра, що її обмежує.

13) Зробити висновки до отриманих результатів.

1. Принцип дії

Принцип дії засновано на квантуванні вимірюваного часового інтервалу t_x періодами T_0 зразкової частоти f_0 , що формується на виході генератора.

2. Структурна схема вимірювального каналу

Структурна схема, що реалізує сформульований вище принцип дії, наведена на рис. 20.

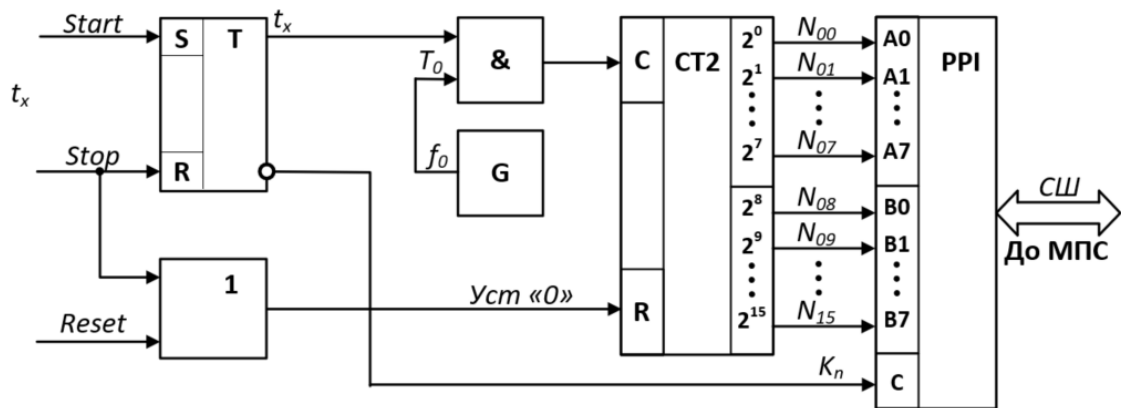


Рисунок 20 – Структурна схема вимірювального каналу часового інтервалу

Основними складовими цієї схеми є такі: Т – RS тригер; & – логічна схема 2-І; логічна схема 2-АБО; G – генератор зразкової частоти f_0 , в основу побудови якого покладено кварцовий резонатор; CT2 – двійковий 16-ти розрядний лічильник, який призначений для підрахунку кількості періодів T_0 зразкової частоти f_0 протягом вимірюваного часового інтервалу t_x ; PPI – паралельний порт (інтерфейс) для проміжного запам'ятовування двійкового коду $N[00-15]$, що поступає на його паралельні входи $[A0-7]$ і $[B0-7]$ з відповідних виходів двійкового лічильника $[2^0 \dots 2^{15}]$. Далі результат вимірювання у вигляді паралельного двійкового коду $N[00-15]$ через системну шину CШ передається в акумулятор мікропроцесорної системи МПС.

3. Часові діаграми роботи вимірювального каналу

Часові діаграми роботи вимірювального каналу часового інтервалу наведені на рис. 21.

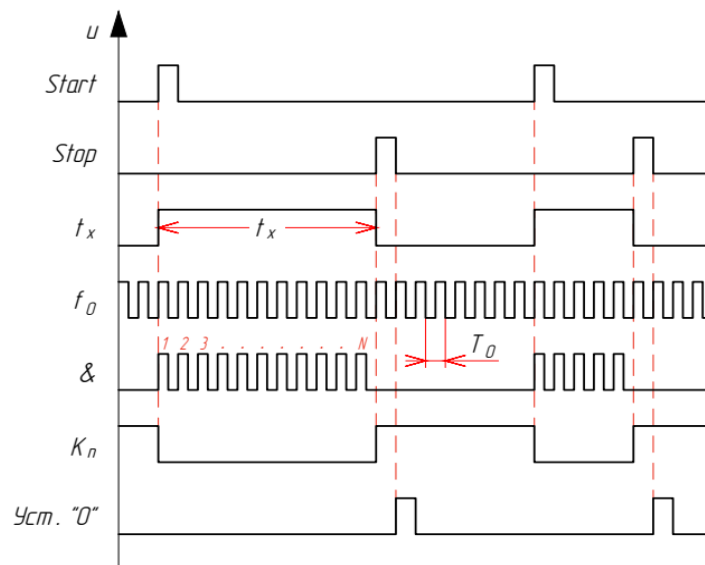


Рисунок 21 – Часові діаграми роботи вимірювального каналу часового інтервалу

На часовій діаграмі прийнято такі позначення:
 Start – сигнал початку часового інтервалу t_x ;
 Stop – сигнал завершення часового інтервалу t_x ;
 t_x – тривалість вимірюваного часового інтервалу;
 f_0 – сигнали зразкової частоти з періодом T_0 ;
 N – кількість імпульсів, що підрахував двійковий лічильник СТ2 за час вимірювання;
 K_n – сигнал кінець перетворення (завершення квантування часового інтервалу t_x періодами T_0 зразкової частоти f_0);
 Уст «0» – установка усіх тригерів (для наведеного прикладу їхня кількість $n=16$) двійкового лічильника СТ2 в стан логічного «0»;
 Reset – зовнішній сигнал обнулення усіх тригерів лічильника СТ2.

4. Квантування і функція перетворення

В логічній схемі 2-І здійснюється квантування – метрологічна операція заміни аналогової (неперервної) фізичної величини часового інтервалу t_x квантованими (перервними) значеннями у вигляді двійкового коду на виходах $N[00-15]$ двійкового лічильника СТ2.

На рис. 22 діаграму, що розкриває суть квантування:

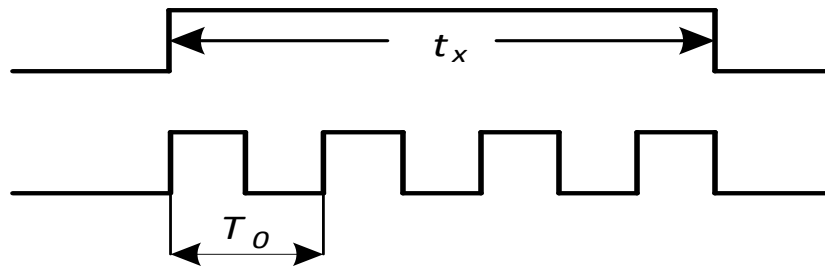


Рисунок 22 – До питання квантування часового інтервалу

Квантування виконується порівнянням вимірюваної величини X і зразкової $[x]$:

$$N = \frac{X}{[x]}.$$

Для даного перетворювача відповідають такі позначення:

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{\quad} & t_x \\ \text{вимірювана} & & \end{array} \quad \begin{array}{ccc} [x] & \xrightarrow{\quad} & T_0 \\ \text{зразкова} & & \end{array}$$

Врахувавши введені позначення операцію порівняння подамо так:

$$N = \frac{t_x}{[T_0]}.$$

Оскільки період T_0 пов'язаний з частотою f_0 оберненою залежністю

$$T_0 = \frac{1}{f_0},$$

то остаточне рівняння (функції) перетворення для вимірювального каналу часового інтервалу матиме вигляд:

$$N = t_x \cdot f_0$$

5. Рівняння чутливості

Для отримання рівняння чутливості необхідно з функції перетворення взяти похідну:

$$S = \frac{dN}{dt_x} = f_0 = 10^7 \text{ Гц}$$

Рівняння перетворення можна записати і через чутливість:

$$N = S \cdot t_x = 10^7 \cdot t_x.$$

6. Подання функції перетворення в трьох видах

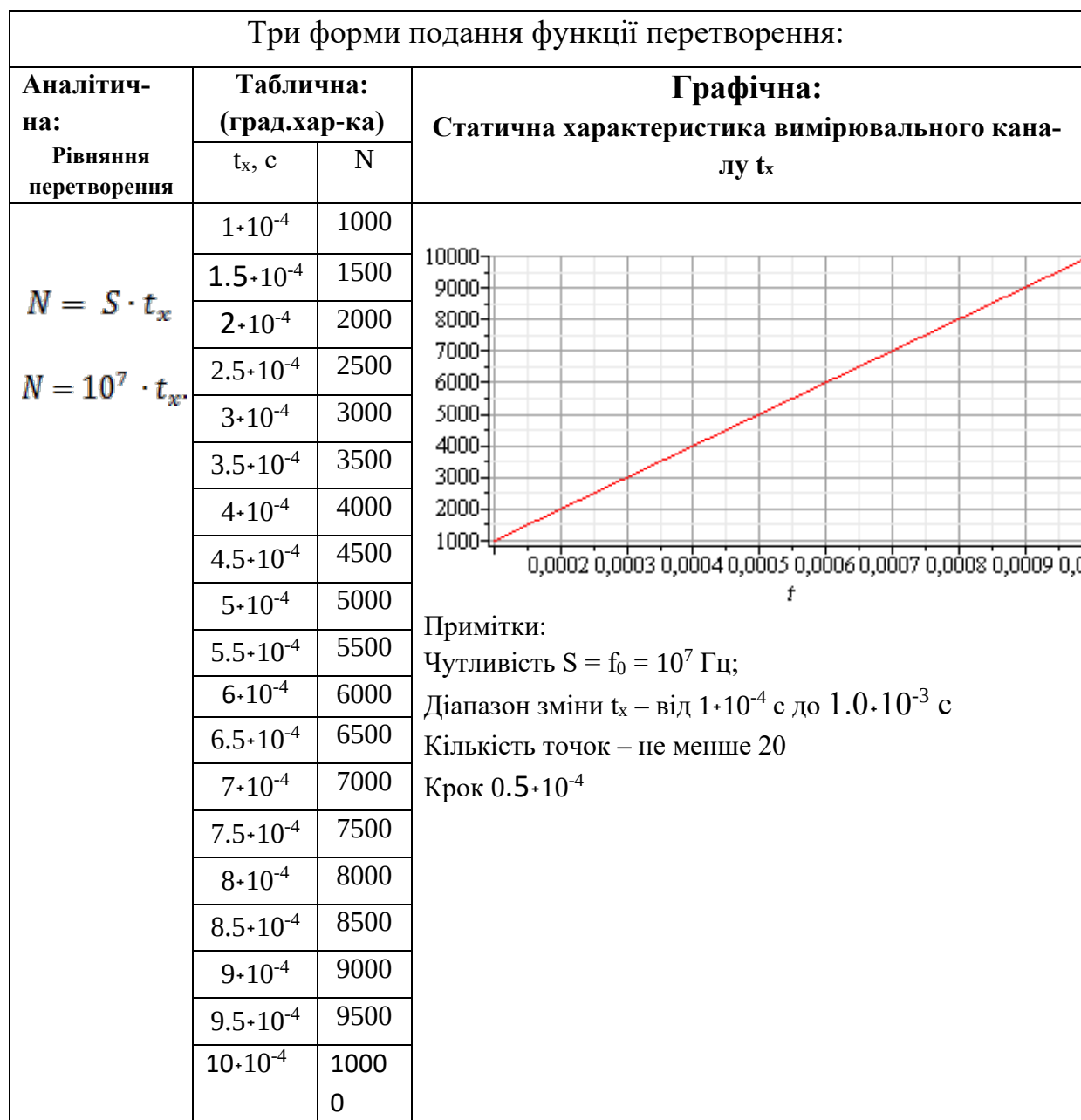


Рисунок 23 – Аналітичне, табличне та графічне подання функції перетворення вимірювального каналу часового інтервалу

7. Похибка квантування

В результаті квантування аналогову фізичну величину часовий інтервал t_x , що має нескінчену кількість значень, замінено перервною квантованою величиною з обмеженою кількістю значень, що і є причиною похибки квантування.

Абсолютну похибку квантування оцінюють як половину кроку квантування:

$$\Delta_k = \frac{1}{2} h = \frac{1}{2} 0.1 \text{ мкс} = 0.05 \text{ мкс} = 50 \text{ нс}$$

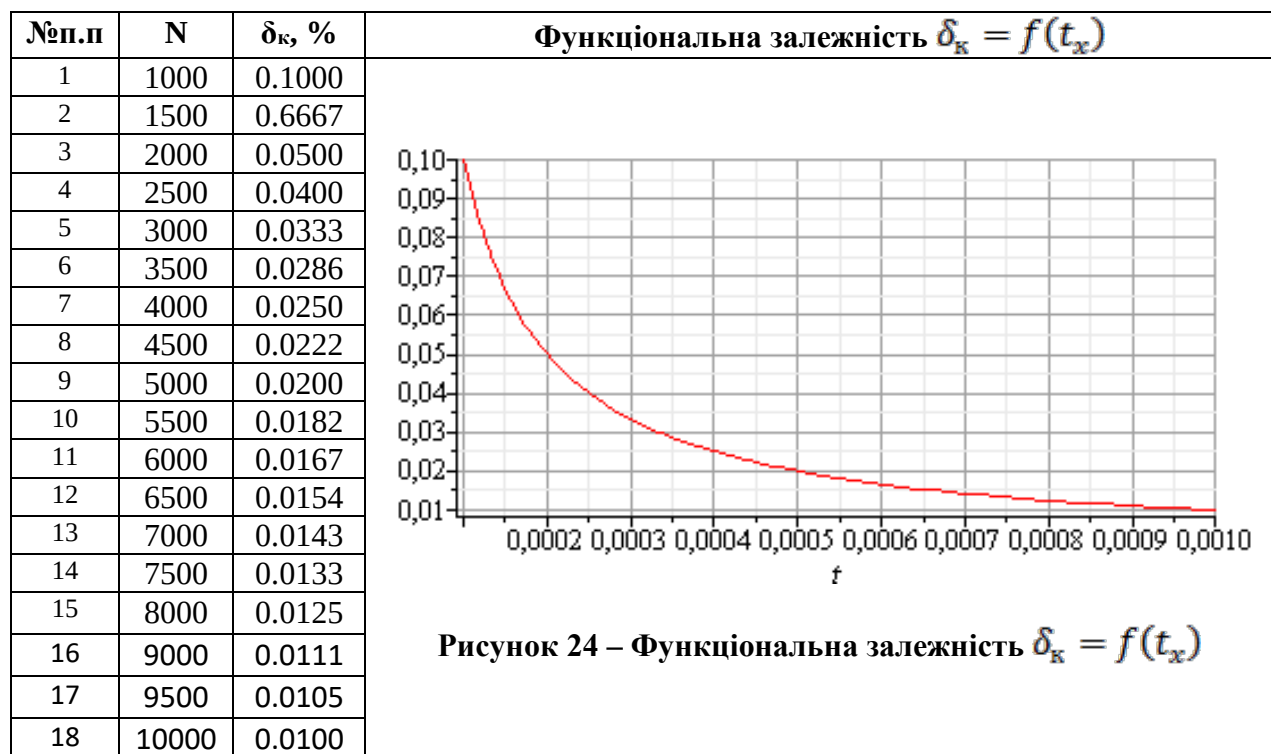
де крок квантування:

$$h = T_0 = \frac{1}{f_0} = \frac{1}{10^7 \text{ Гц}} = 10^{-7} \text{ с} = 0.1 \text{ мкс} = 100 \text{ нс}$$

Відносну похибку квантування є величиною оберненою до кількості імпульсів N двійкового лічильника СТ2 і подають її у відсотках:

$$\delta_k = \frac{1}{N} \cdot 100\% = \frac{100\%}{t_x \cdot f_0} = \frac{100\%}{t_x \cdot 10^7} = \frac{10^{-5}}{t_x}.$$

Числові значення і побудований по ним графік зміни відносної похибки в діапазоні зміни вимірюваної величини t_x наведено на рис. 24.



8. Нижня межа вимірювання

Нижня межа вимірювання часового інтервалу визначається:

$$t_{x \min} = \frac{100\%}{\delta_{\text{кн}} \cdot f_0} = \frac{10^{-5}}{\delta_{\text{кн}}}$$

За нормоване значення вибираємо максимальне із рис. 23

$$\delta_{\max} = 0.1\%$$

а гарантію забезпечує число із метрологічного ряду

$$[1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0] \cdot 10^n,$$

де n може набувати значень 1; 0; -1; -2;

Подамо максимальне значення похибки квантування згідно до наведеного метрологічного ряду:

$$\delta_{\max} = 0.1\% = 1 \cdot 10^{-1}\%$$

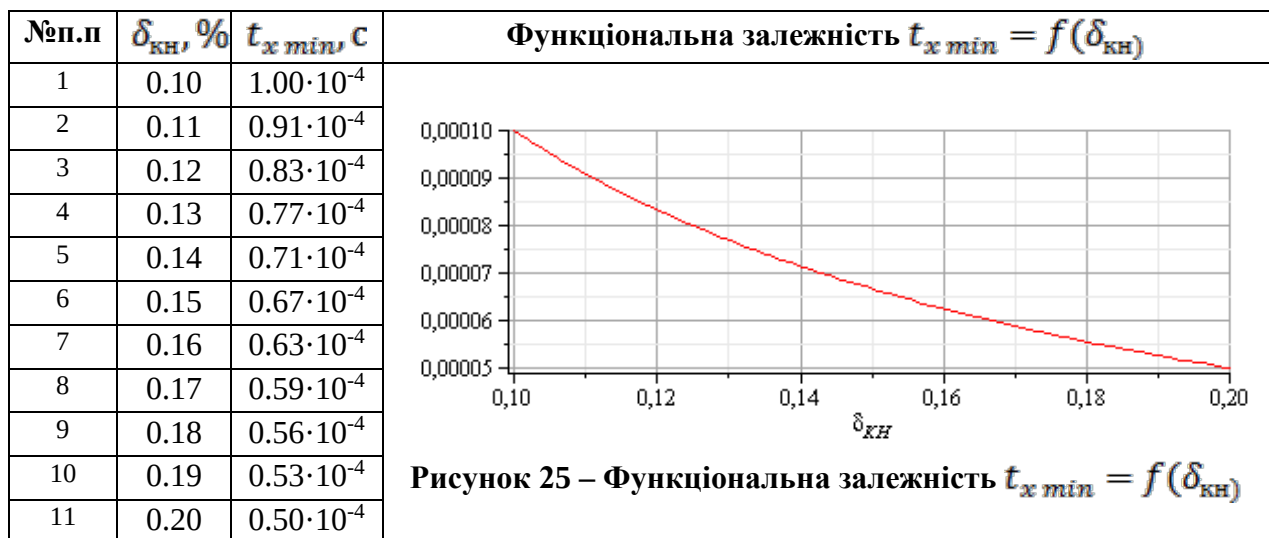
Для забезпечення гарантованого нормованого значення похибки квантування з наведеного ряду вибирає наступне за $10^{-10}\%$. Таким є значення $1.5 \cdot 10^{-10}\%$.

Отже за нормоване значення похибки квантування обираємо максимальне гарантоване:

$$\delta_{\text{кн}} = 0.15\% = 1.5 \cdot 10^{-1}\%$$

Для побудови залежності $t_{x \min} = f(\delta_{\text{кн}})$ задаємо значеннями зміни $\delta_{\text{кн}}$ від 0.1% до 0.2% з кроком 0.01%.

Залежність нижньої межі вимірювання $t_{x \min}$ від нормованого значення похибки квантування наведено на рис. 25.



9. Верхня межа вимірювання

Верхня межа вимірювання часового інтервалу визначається:

$$t_{x\max} = \frac{2^n}{f_0}.$$

Параметрами вимірювального каналу, які обмежують верхню межу вимірювання є частота квантування f_0 і розрядність n двійкового лічильника СТ2.

$$t_{x\max} = \frac{2^n}{f_0} = \frac{2^n}{10^7} = 2^n \cdot 10^{-7}$$

Залежність нижньої межі вимірювання від розрядності n двійкового лічильника СТ2 і відповідно розрядності портів паралельного інтерфейсу РРІ наведена на рис. 26. Діапазон зміни розрядності n від 13 до 15.



10. Висновки

Порівняльна характеристика отриманих значень і заданих в індивідуальному завданні наведена в табл. 14.

Таблиця 14 – Порівняльна характеристика отриманих результатів

Варіант №130	n	f_0 , Гц	$t_{x\min}$, с	$t_{x\max}$, с	$\delta_{\text{кн}}$, %
Задані параметри	14	10^7	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	-
Розрахункові параметри	13...15	10^7	$1.0 \cdot 10^{-4}$		0.15

***Контрольні питання та практичні завдання
до індивідуального розрахункового завдання ІнРЗ № 4***

1. Наведіть уточнене поняття цифрових засобів вимірювань.
2. Яку фізичну величину називають аналоговою?
3. За якими двома параметрами неперервну величину можна замінити перервною? Для практичних задач така заміна необхідна?
4. Яку фізичну величину називають квантованою?
5. Дайте поняття процесу квантування.
6. Які Ви знаєте три методи квантування? Наведіть графічну інтерпретацію кожного із них.
7. Поясніть основну причину виникнення похибки квантування. Наведіть формулу для оцінювання абсолютної похибки квантування.
8. Які Ви знаєте шляхи зменшення абсолютної похибки квантування?
9. До яких класифікаційних ознак відносять абсолютну похибку квантування: методична чи інструментальна; статична чи динамічна.
10. Яку фізичну величину називають дискретизованою?
11. Дайте поняття процесу дискретизації і графічно його проілюструйте.
12. Поясніть основну причину виникнення похибки дискретизації. Наведіть формулу для оцінювання похибки дискретизації.
13. Проаналізуйте шляхи зменшення похибки дискретизації.
14. Графічно проілюструйте зменшення похибки дискретизації пристроєм вибірки-зберігання (аналоговою пам'яттю).
15. В процесі метрологічних операцій квантування і дискретизації виникають відповідні похибки. Чому в процесі цифрового кодування похибка відсутня?

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення. З поправкою (ІПС № 8-96). Київ : Держстандарт України, 1994. 68 с.
2. Орнатський П. П. Вступ до методології науки про вимірювання : навч. посіб. Київ : ІСЛО, 1994. 160 с.
3. Основи метрології та вимірювальної техніки : підручник / за ред. Б. Стадника. Львів : НУ «Львівська політехніка», 2005. Т. 1. Основи метрології. 532 с.
4. Основи метрології та вимірювальної техніки : підручник / за ред. Б. Стадника. Львів : НУ «Львівська політехніка», 2005. Т. 2. Вимірювальна техніка. 656 с.
5. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем : підручник / В. П. Бабак, С. В. Бабак, С. В. Єременко та ін. Київ : Ун-т новітніх технологій ; НАУ, 2017. 496 с.
6. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / за ред. В. Кухарчука. Херсон : Олді-Плюс, 2014. 538 с.
7. Кухарчук В. В. Основи метрології та електричних вимірювань : конспект лекцій. Частина І. Вінниця : ВНТУ, 2018. 148 с.
8. Кухарчук В. В. Основи метрології та електричних вимірювань : конспект лекцій. Частина ІІ. Вінниця, 2020. 150 с.
9. Метрологія та вимірювальна техніка / Є. С. Поліщук та ін. Львів : Бескид-Біт, 2003. 544 с.

ДОДАТОК А

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів

Індивідуальне розрахункове завдання ІнРЗ № 1

«Оцінювання та аналіз основних метрологічних характеристик аналогових засобів вимірювань»

з дисципліни

ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Виконав: студент групи _____

(Підпис)

(Прізвище, ініціали)

«____» _____ 20__ р.

Перевірив: _____

(Науковий ступінь, вчене звання)

(Підпис)

(Прізвище, ініціали)

«____» _____ 20__ р.

Вінниця – 20__р.

Електронне навчальне видання

Василь Васильович Кухарчук

**Методичні вказівки до виконання самостійної роботи з
дисципліни «Основи метрології та електричних вимірювань»
зі спеціальності «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»**

Рукопис оформив В. Кухарчук

Редактор Н. Слободянюк

Оригінал-макет виготовлено в РВВ ВНТУ

Підписано до видання 27.07.2026

Гарнітура Times New Roman.

Зам. № P2026-094.

Видавець та виготовлювач

Вінницький національний технічний університет,

Редакційно-видавничий відділ.

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Хмельницьке шосе, 95,

м. Вінниця, 21021.

press.vntu.edu.ua;

Email: rvv.vntu@gmail.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК No 3516 від 01.07.2009 р.