


Еталони фізичних величин

Доповідач – науковий керівник
НДІ АЕД КПІ ім. Ігоря Сікорського,
доктор технічних наук, професор,
лауреат Державної премії України
в галузі науки і техніки,
заслужений діяч науки і техніки
Туз Юліан Михайлович



Загальна кількість
ідентифікованих фізичних величин
приблизно **600**

Терміни та визначення

Фізична величина

Властивість, спільна в якісному відношенні у багатьох матеріальних об'єктів та індивідуальна в кількісному відношенні у кожного з них.

Розмір фізичної величини

Кількісний вміст фізичної величини в даному об'єкті.

Одиниця фізичної величини

Фізична величина певного розміру, прийнята за угодою для кількісного відображення однорідних з нею величин.

Терміни та визначення

Міжнародна система одиниць SI

Когерентна система одиниць, прийнята та рекомендована Генеральною Конференцією з мір та ваг (ГКМВ).

Вимірювання

Відображення вимірюваних величин їх значеннями шляхом експерименту та обчислень за допомогою спеціальних технічних засобів.

Відтворення фізичної величини

Вимірювальна операція, що полягає у створенні та (чи) зберіганні фізичної величини заданого значення.

Терміни та визначення

Еталон одиниці фізичної величини

Засіб вимірювальної техніки, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниці фізичної величини та передавання її розміру відповідним засобам, що стоять нижче за повірочною схемою, офіційно затверджений як еталон.

Державний еталон

Первинний або спеціальний еталон, затверджений офіційно як державний.

Первинний еталон

Еталон, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниці фізичної величини з найвищою в країні (у порівнянні з іншими еталонами тієї ж одиниці) точністю.

Терміни та визначення

Міжнародний еталон

Еталон, який за міжнародною угодою призначений для погодження розмірів одиниць, що відтворюються і зберігаються державними (національними) еталонами.

Еталон передавання

Вторинний еталон, що призначається для взаємного звірення еталонів, які за тих чи інших обставин не можуть бути звірені безпосередньо.

Вихідний зразковий засіб вимірювальної техніки (засіб вимірювань)

Засіб вимірювальної техніки (засіб вимірювань), що має метрологічні характеристики, які відповідають найвищому ступеню повірочної схеми метрологічної служби.

Терміни та визначення

Стандартний зразок

Міра у вигляді речовини або матеріалу зі встановленими в результаті метрологічної атестації значеннями однієї або більше величин, що характеризують властивості або склад цієї речовини або матеріалу.

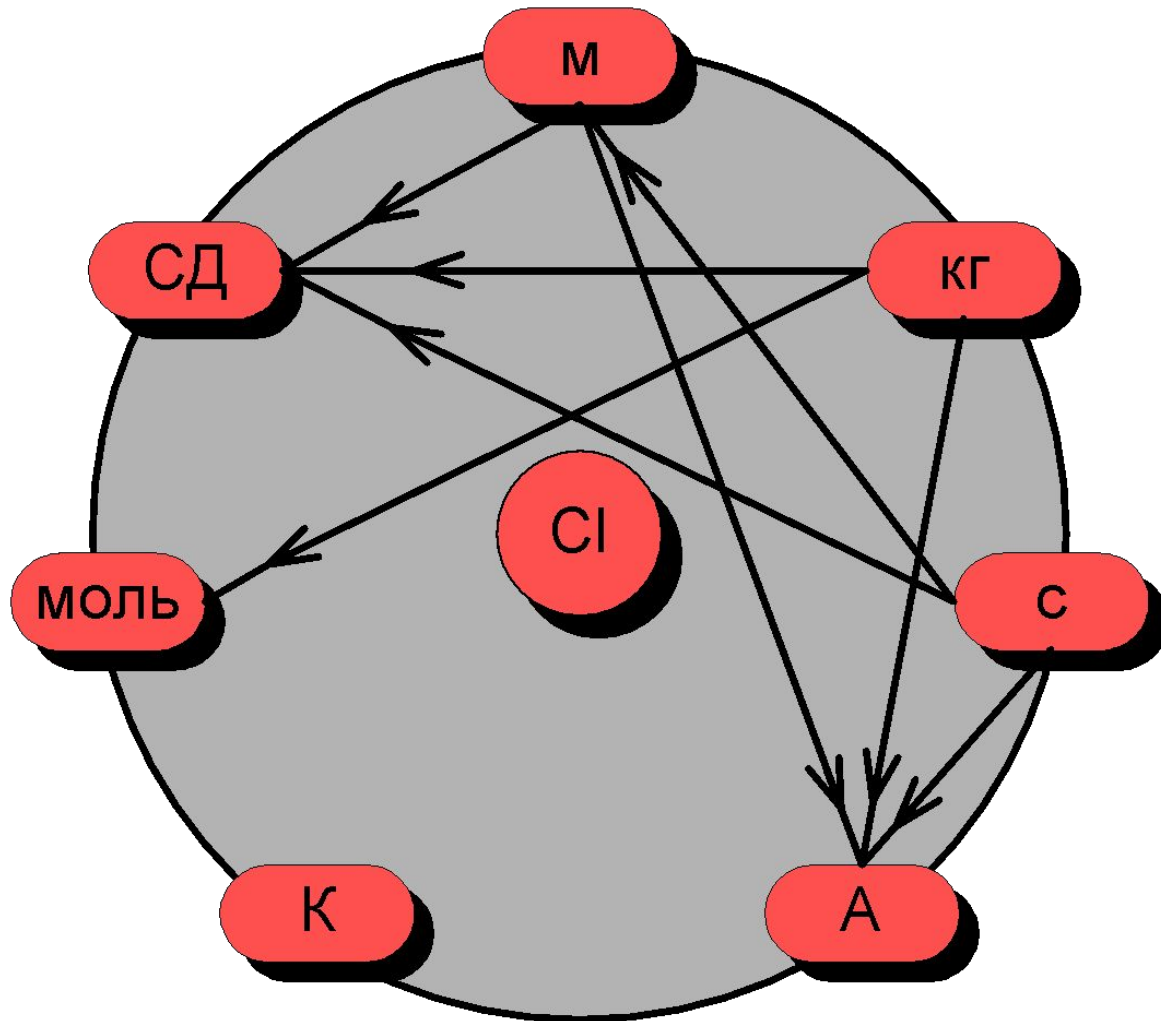
Відтворення одиниці фізичної величини

Відтворення шляхом формування фіксованої за розміром фізичної величини відповідно до визначення її одиниці.

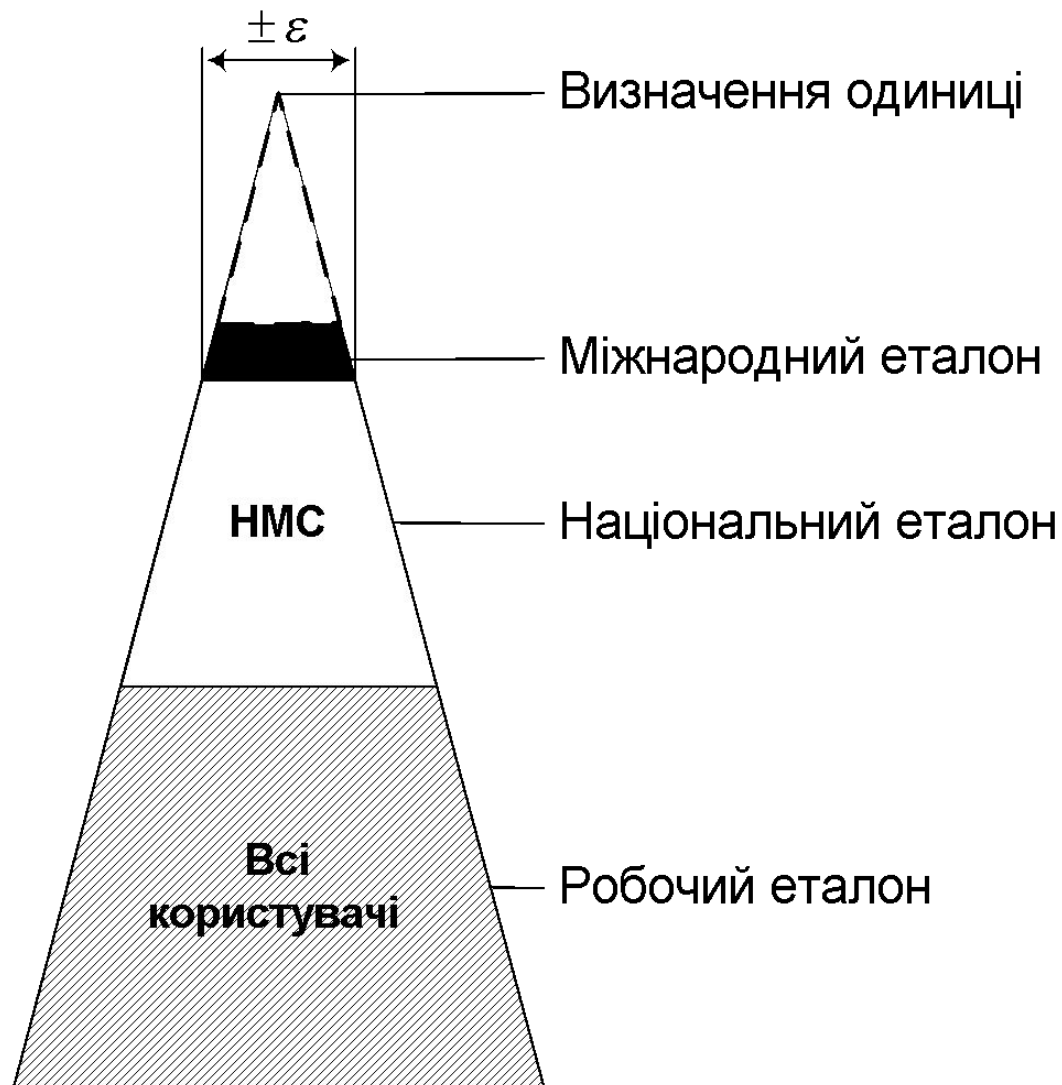
Повірочна схема

Нормативний документ, що регламентує метрологічну підпорядкованість засобів вимірювальної техніки (засобів вимірювань), які приймають участь у передаванні розміру одиниці фізичної величини від еталону або вихідного зразкового засобу вимірювальної техніки (засобу вимірювань) до інших засобів вимірювальної техніки (засобів вимірювань) зі встановленням методів і похибок передавання.

Одиниці системи СІ



Ієрархія еталонів



Фундаментальні фізичні константи

Назва величини	Символ	Початкове рівняння	Значення величини ± абсолютна похибка	Відносна похибка 10^{-6}
Універсальні постійні				
Швидкість світла в вакуумі	c	-	299792458 м/с	ТОЧНО
Магнітна постійна	μ_0	-	$4\pi 10^{-7}$ Гн/м = $12,566370614 \cdot 10^{-7}$ Гн/м	ТОЧНО
Електрична постійна	ϵ_0	$(\mu_0 c^2)^{-1}$	$8,854187817 \cdot 10^{-12}$ Ф/м	ТОЧНО
Гравітаційна постійна	G		$(6,67259 \pm 0,00085) \cdot 10^{-12}$ м ³ кг ⁻¹ с ⁻²	128
Постійна Планка	h		$(6,6260755 \pm 0,0000040) \cdot 10^{-34}$ Дж·с	0,60
Планковська маса	m_p	$(hc/2\pi G)^{\frac{1}{2}}$	$(2,17671 \pm 0,00014) \cdot 10^{-8}$ кг	64

Фундаментальні фізичні константи

Назва величини	Сим-вол	Початкове рівняння	Значення величини ± абсолютна похибка	Відносна похибка 10^{-6}
Електромагнітні постійні				
Елементарний заряд	e	-	$(1,60217733 \pm 0,00000049) \cdot 10^{-19}$ Кл	0,30
Квант магнітного потоку	Φ_0	$h/2e$	$(2,06783461 \pm 0,00000061) \cdot 10^{-15}$ Вб	0,30
Постійна Джозефсона	$K_{Дж}$	$2e/h$	$(4,8359767 \pm 0,0000014) \cdot 10^{14}$ Вб ⁻¹	0,30
Постійна Клитцинга	R_K	h/e^2	25812,8956 ± 0,0012 Ом	0,043
Гіромагнітне відношення протона	γ_p	-	$(26752,2128 \pm 0,0081) \cdot 10^4$ с ⁻¹ Тл ⁻¹	0,30

Основні одиниці системи СІ

Метр дорівнює довжині шляху, яку проходить у вакуумі світло за $1/299792458$ частину секунди (XVII ГКМВ, 1983 р., Резолюція 1).

Кілограм є одиницею маси і дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма (III ГКМВ, 1901 р.).

Секунда дорівнює 9192631770 періодам випромінювання, яке відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезія -133 (XIII ГКМВ, 1967 р., Резолюція 1).

Ампер дорівнює силі незмінного струму, який під час проходження по двох безмежно довгих паралельних прямолінійних провідниках надмалого кругового перерізу, розташованих на відстані 1 м один від одного у вакуумі, викликав би на кожній ділянці провідника довжиною 1 м силу взаємодії, яка дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ Н (МКМВ, 1946 р., Резолюція 2, яка схвалена IX ГКМВ, 1948 р.).

Основні одиниці системи СІ

Кельвін є одиницею термодинамічної температури і дорівнює $1/273,16$ частині термодинамічної температури потрійної точки води (XIII ГКМВ, 1967 р., Резолюція 4).

Кандела дорівнює силі світла в напрямі джерела, яке випромінює монохромне випромінення частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц, енергетична сила світла якого в цьому напрямі становить $1/683$ Вт/ср (XVI ГКМВ, 1979 р., Резолюція 3).

Моль дорівнює кількості речовини системи, яка містить стільки ж структурних елементів, скільки міститься атомів у нукліді ^{12}C масою $0,012$ кг. При застосуванні моля структурні елементи повинні бути специфіковані і можуть бути атомами, молекулами, йонами, електронами чи іншими частинками чи специфікованими групами частинок (XIV ГКМВ, 1971 р., Резолюція 3).

Радіан дорівнює куту між двома радіусами кола, довжина дуги між якими дорівнює радіусу, а *стерадіан* дорівнює тілесному куту з першиною у центрі сфери, який вирізає на поверхні сфери площу, що дорівнює площі квадрата із стороною, яка по довжині дорівнює радіусу сфери.

Міжнародний еталон метра, що використовувався з 1889 по 1960 рік



Еталон маси



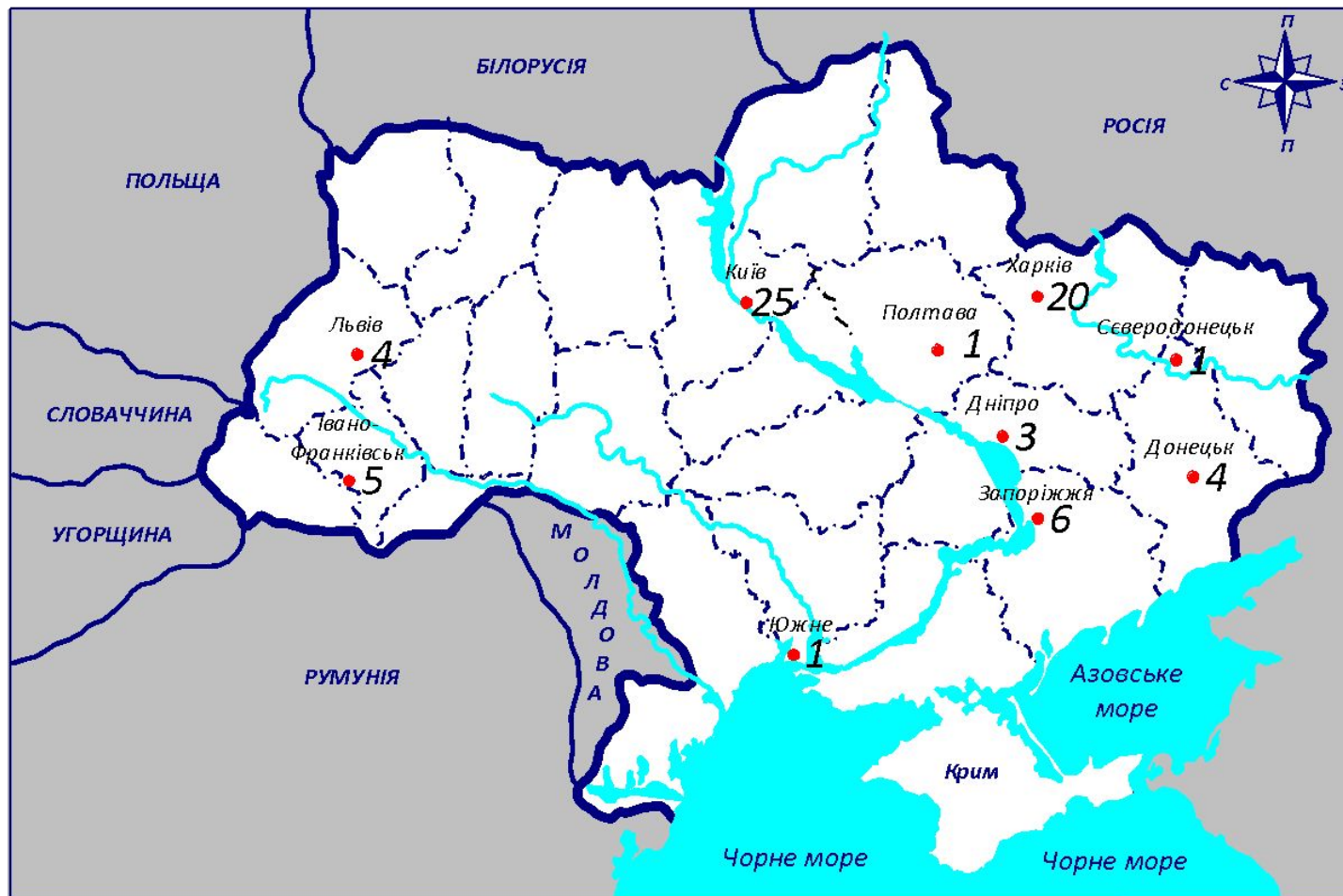
Кількість державних, вторинних та вихідних еталонів фізичних величин в Україні

	Фізична величина	Еталони			Загалом
		Державні	Вторинні	Вихідні	
01	Вимірювання геометричних величин	4	12	1	17
02	Вимірювання механічних величин	5	6	9	20
03	Вимірювання параметрів потоку, витрати, рівня, об'єму речовин	4	3	1	8
04	Вимірювання тиску, вакуумні вимірювання	3	7	-	10
05	Вимірювання фізико-хімічного складу і властивостей речовин	3	6	5	14
06	Температурні та теплофізичні вимірювання	6	6	-	12
07	Вимірювання часу та частоти	1	1	-	2
08	Вимірювання електричних і магнітних величин на постійному та змінному струмі	8	16	6	30
09	Радіотехнічні та радіоелектронні вимірювання	6	-	12	18
10	Вимірювання акустичних величин	1	1	1	3
11	Оптико-фізичні вимірювання	9	7	4	20
12	Вимірювання іонізуючих випромінень та ядерних констант	9	3	-	12
Всього:		59	68	39	166

Карта розташування Державних еталонів України



Карта розташування вторинних еталонів України



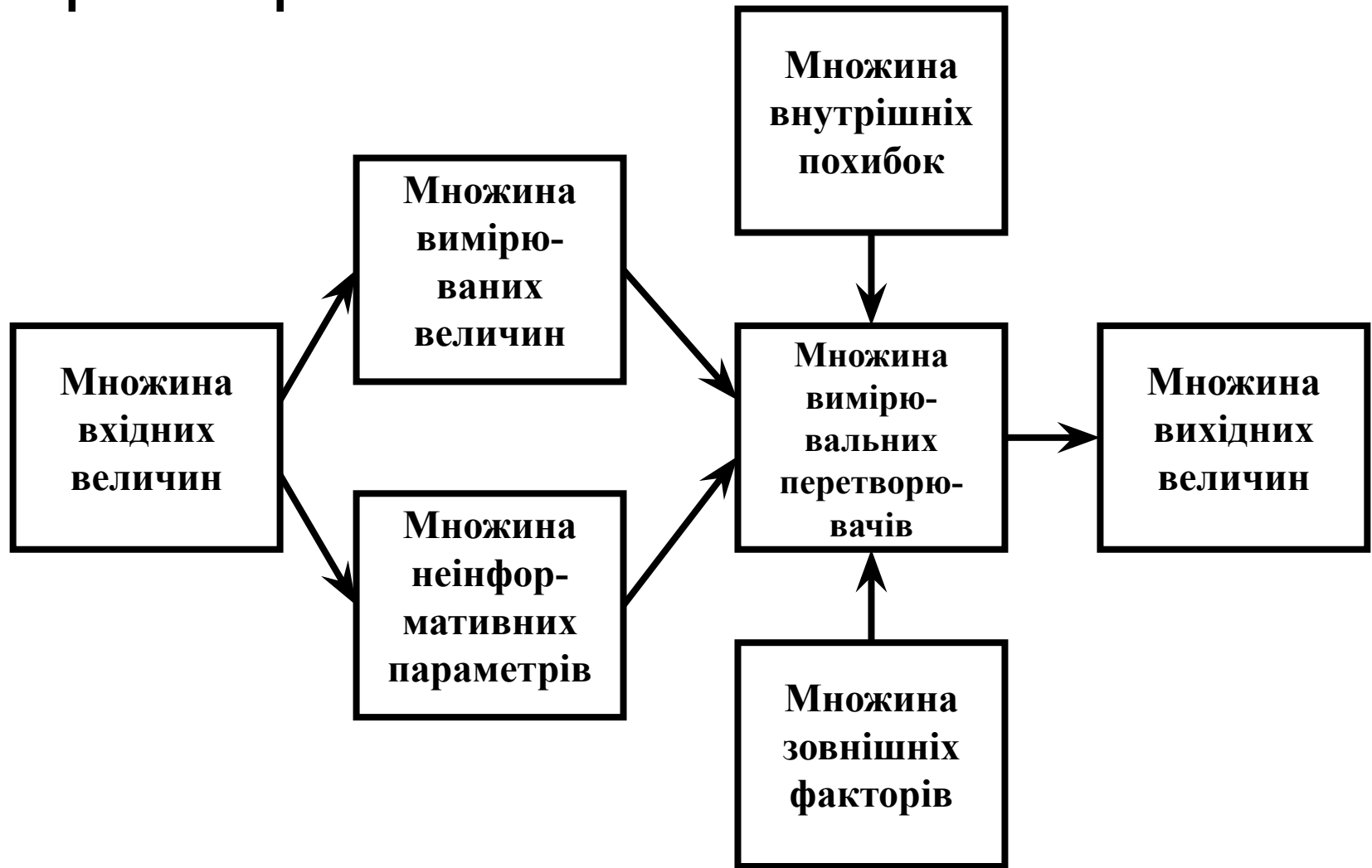
Методи підвищення точності

**Конструктивно-
технологічні**

**Захисто-
запобіжні**

**Структурно-
алгоритмічні**

Модель процесу вимірювального перетворення



Класи рівнянь

Тестування
за аргументом

$$y_0 = \varphi(x_0)$$

$$y_1 = \varphi(x_1)$$

$$y_2 = \varphi(x_2)$$

.....

$$y_n = \varphi(x_n)$$

Тестування
за функцією

$$y_0 = \varphi(x)$$

$$y_1 = \varphi_1(x)$$

$$y_2 = \varphi_2(x)$$

.....

$$y_n = \varphi_n(x)$$

**Військовий вторинний еталон одиниці
електричної напруги від 0,1 В до 1000 В
змінного струму в діапазоні частот
від 10 Гц до 30 МГц**

**Реєстраційний номер в Реєстрі державних, первинних
та вторинних еталонів: **ВВЕТУ 08-07-01-09****

Наказ Національного наукового центра (ННЦ «Інститут метрології») Держспоживстандарту України № 356 від 09 жовтня 2009 “Про затвердження військового вторинного еталона одиниці електричної напруги від 0,1 В до 1000 В змінного струму в діапазоні частот від 10 Гц до 30 МГц”

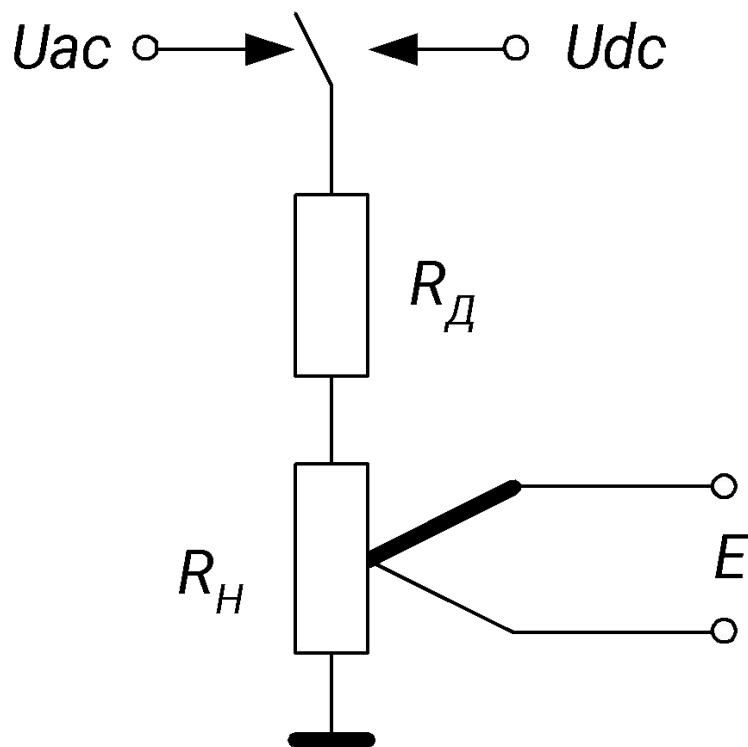
Основні технічні дані за ТТЗ на ДКР “Батуметр”

- Діапазон напруг $10^{-3} \text{ В} - 10^3 \text{ В}$
- Діапазон частот $10 \text{ Гц} - 30 \text{ МГц}$
- Θ $10^{-5} - 3 \cdot 10^{-3}$
- S $5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$
- $S_{\varepsilon\Sigma}$ $5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-3}$
- v $10^{-5} - 3 \cdot 10^{-3}$

Середньоквадратичне значення напруги змінного струму

$$U_{\text{СКЗ}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}$$

Схема термокомпарування



Якщо

$$E^{\sim} = E^{-},$$

то

$$U^{\sim} = U^{-}.$$

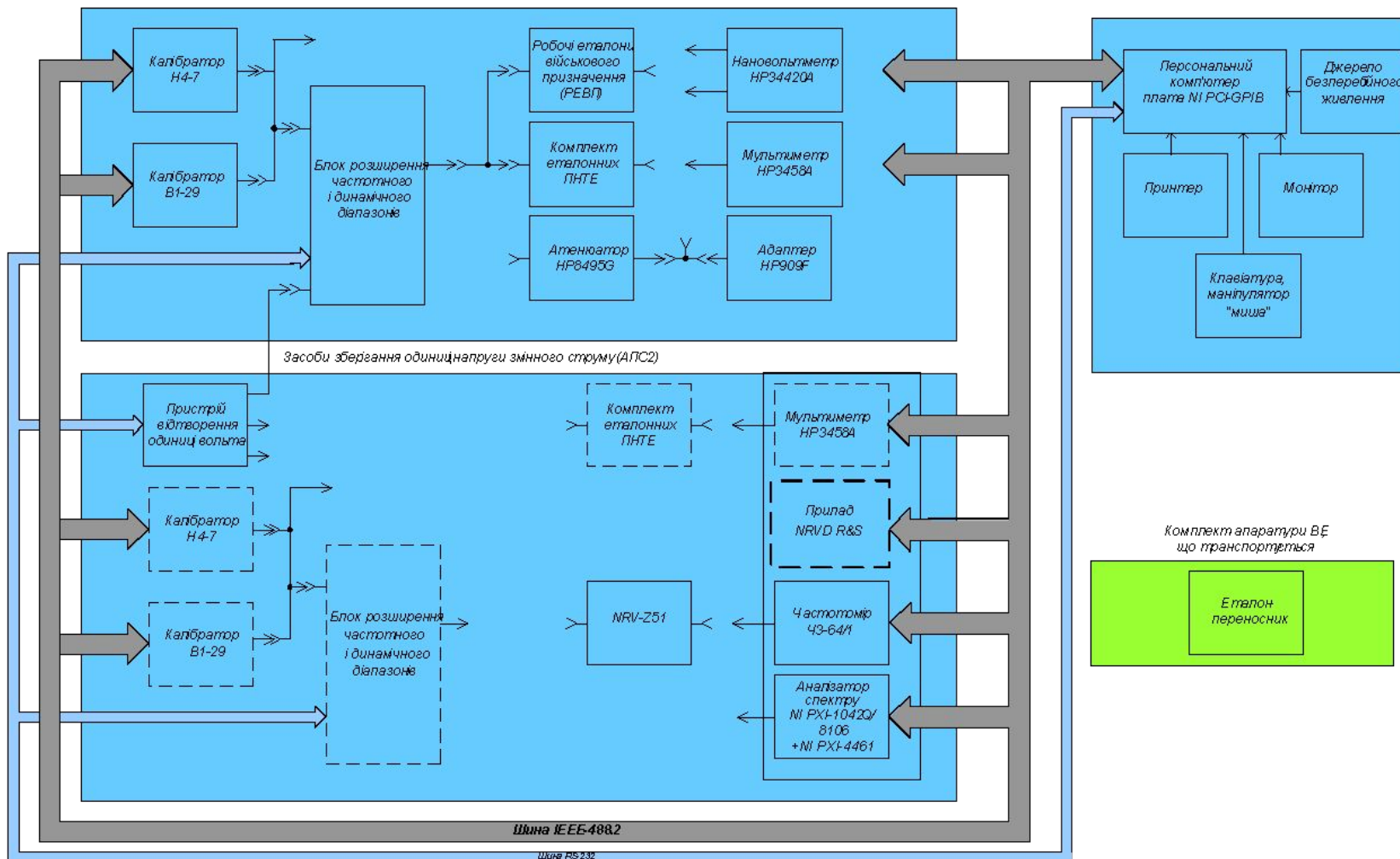
Загальний вигляд еталону «Батуметр»



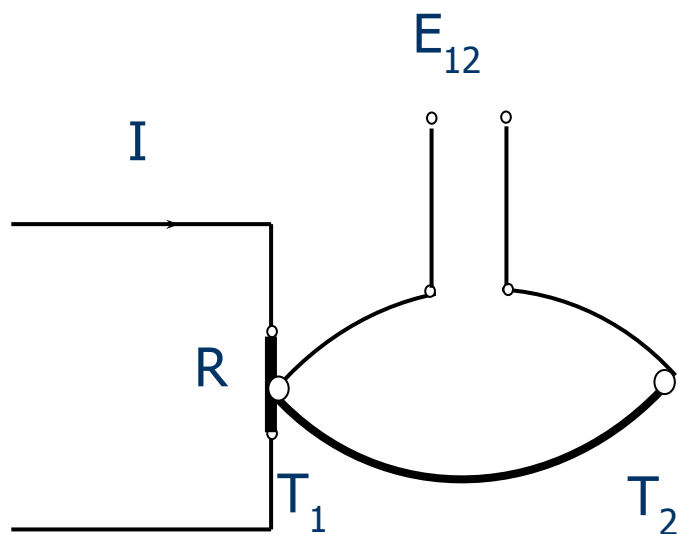
Структурна схема еталону «Батуметр»

Засоби відтворення та передавання розряду одиниці напруги змінного струму військовим засобам вимрювання (АПС1)

Пристрій автоматичної реєстрації та оброблення результатів вимірів (АПС3)



Термоелектричні ефекти



- Ефект Джоуля

$$Q_I = d R I^2 t$$

- Ефект Зеєбека

$$E_{12} = S_{12} (T_1 - T_2)$$

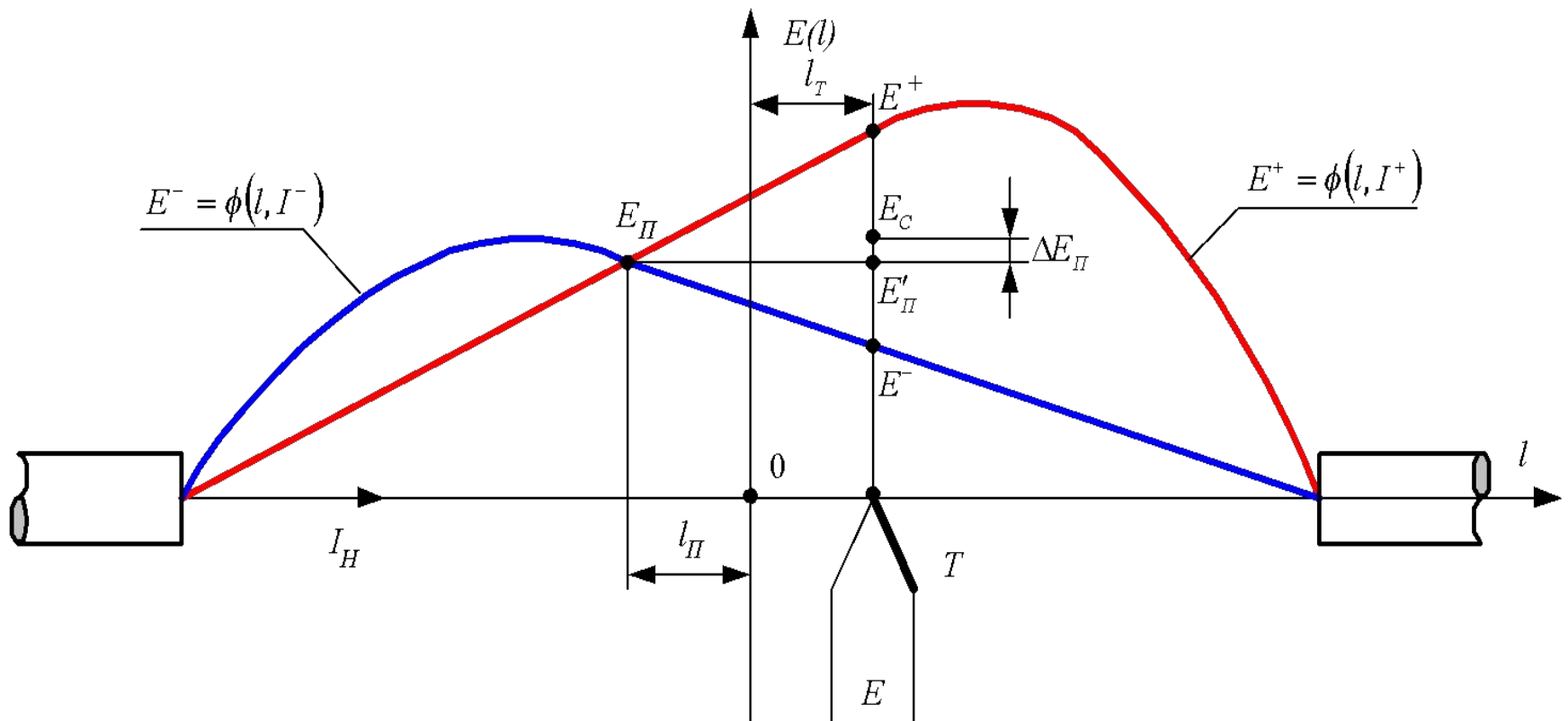
- Ефект Пельтьє

$$Q_p = P I t$$

- Ефект Томпсона

$$Q_m = \mu (T_1 - T_2) I t$$

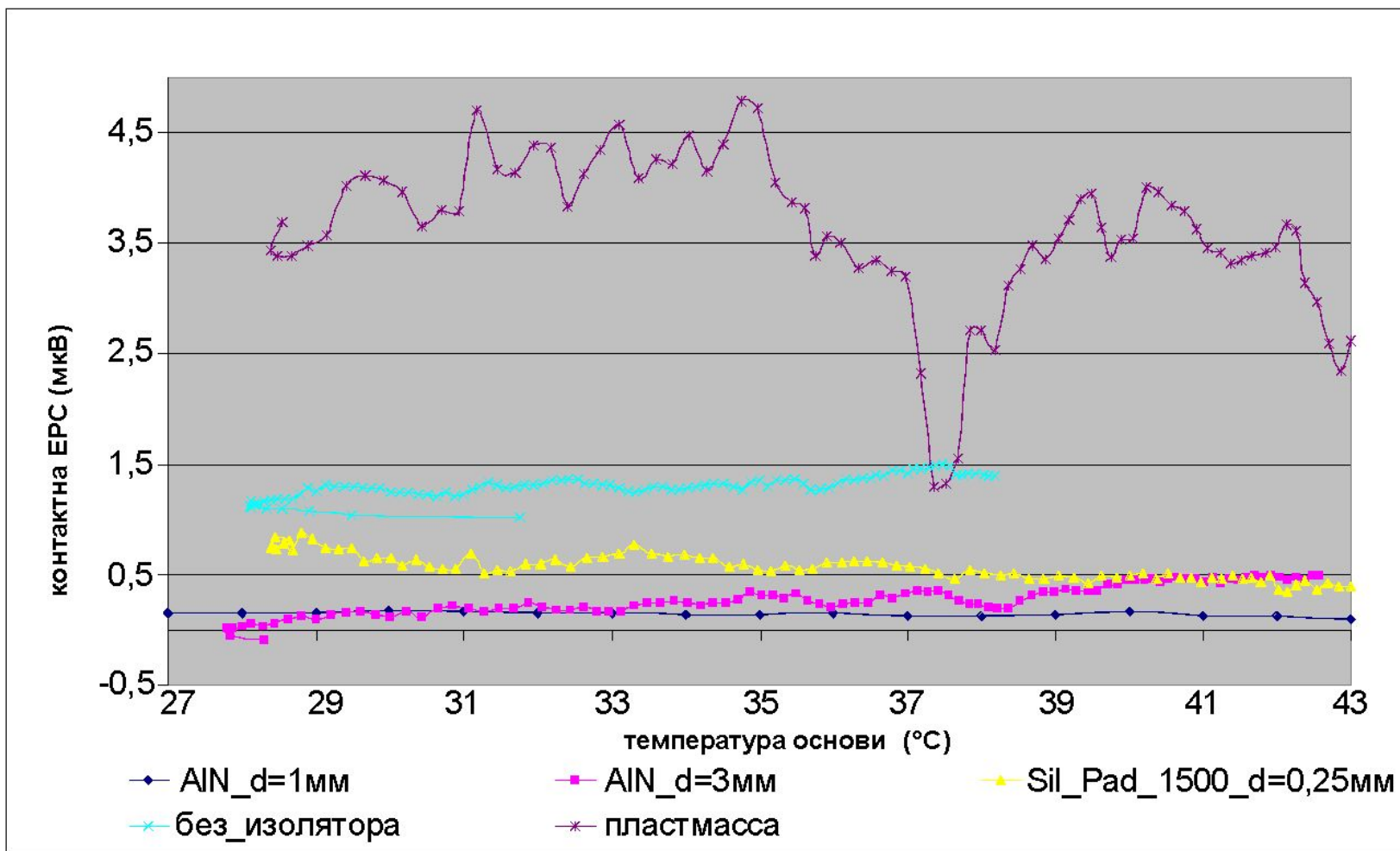
Графік розподілу температури (ЕРС) вздовж нагрівача



Відносна похибка переходу від постійної напруги до змінної в частках вхідної напруги

$$\delta_{acdc}^U = 0,25\delta_P^E \frac{\operatorname{tg}\alpha^+ - \operatorname{tg}\alpha^-}{\operatorname{tg}\alpha^+ + \operatorname{tg}\alpha^-}$$

Порівняльний графік температурної нестабільності затискачів з різними ізоляторами

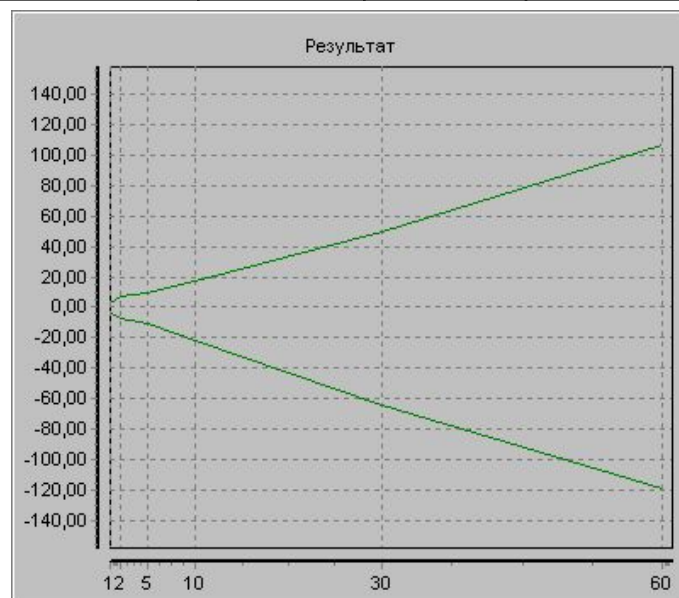


РТВ

Похибка різнополярності 21 ррт



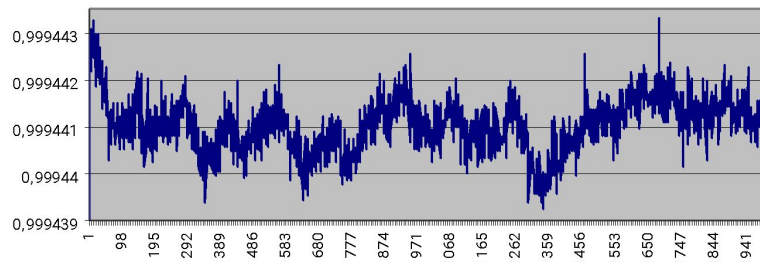
Вибірка, хвилини	Відхилення з вірогідністю 0,95		
	—	+	середнє
1	-3,82	3,2	3,51
2	-7,75	6,73	7,24
5	-11,12	9,26	10,19
10	-21,46	17,78	19,62
30	-64,25	49,68	56,97
60	-119,18	106,44	112,81



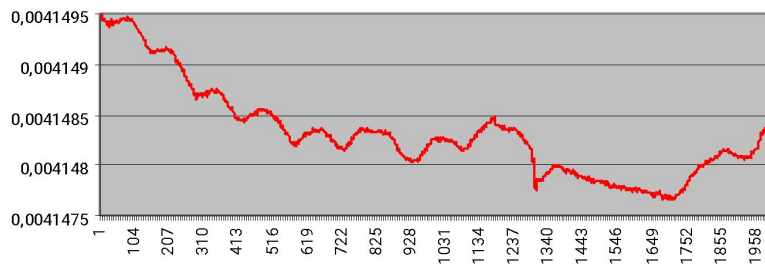
Rohde & Schwarz

Похибка різнополярності 55 ppm

Вхідна напруга

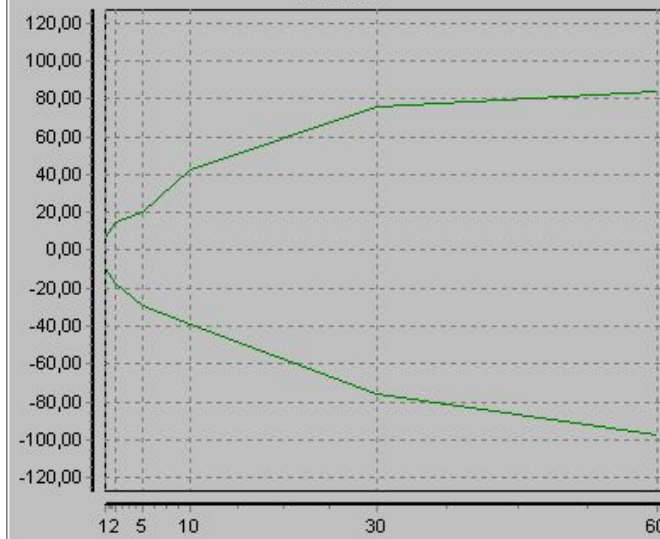


Вихідна напруга



Вибірка, хвилини	Відхилення з вірогідністю 0,95		
	-	+	середнє
1	-9,09	6,37	7,73
2	-17,53	15,24	16,39
5	-28,75	19,94	24,35
10	-39,47	42,31	40,89
30	-75,81	76,23	76,02
60	-97,06	84,26	90,66

Результат

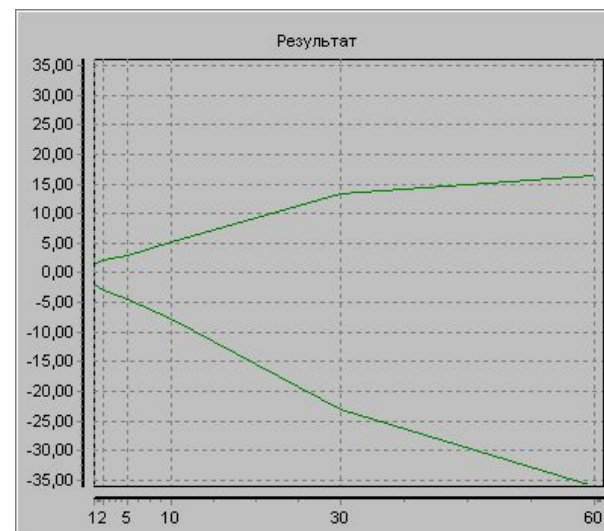


ТВБ-3 № 16 (найкраща)

Похибка різнополярності 7 ррт

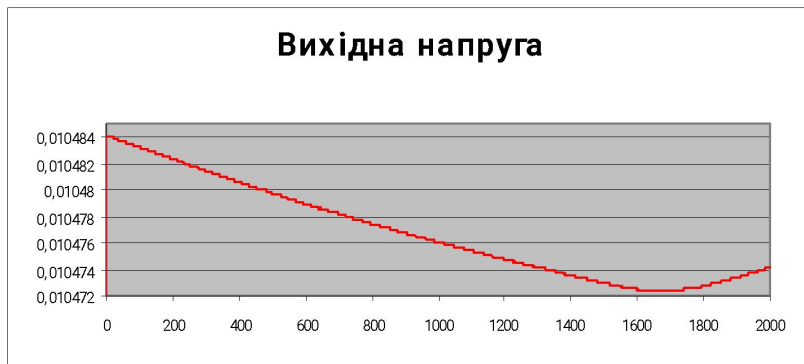


Вибірка, хвилини	Відхилення з вірогідністю 0,95		
	—	+	середнє
1	-1,82	1,36	1,59
2	-2,88	2,09	2,49
5	-4,57	2,97	3,77
10	-7,77	5,20	6,49
30	-23,05	13,39	18,22
60	-35,96	16,53	26,25

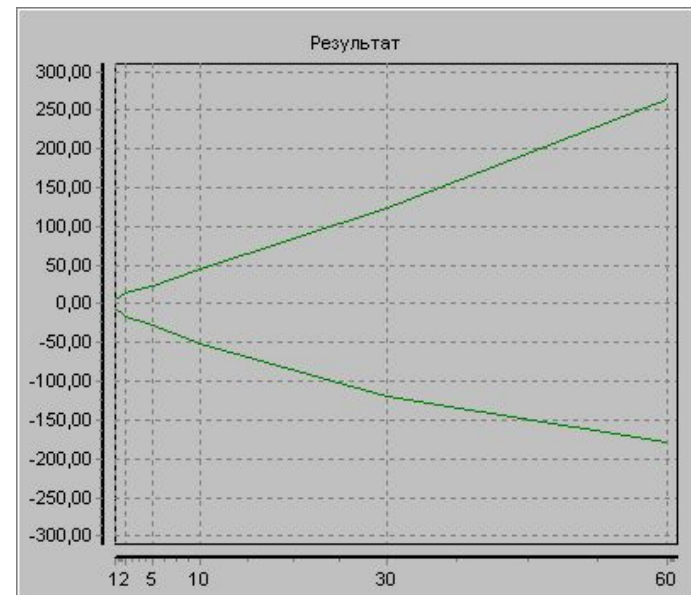


ТВБ-3 № 12 (найгірша)

Похибка різнополярності 90 ррт



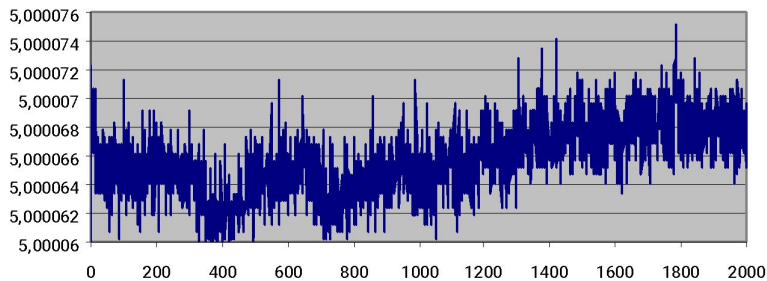
Вибірка, хвилини	Відхилення з вірогідністю 0,95		
	—	+	середнє
1	-5,52	4,46	4,99
2	-16,40	13,33	14,87
5	-26,43	22,76	24,59
10	-51,17	45,22	48,19
30	-120,13	123,84	121,99
60	-177,74	264,96	221,35



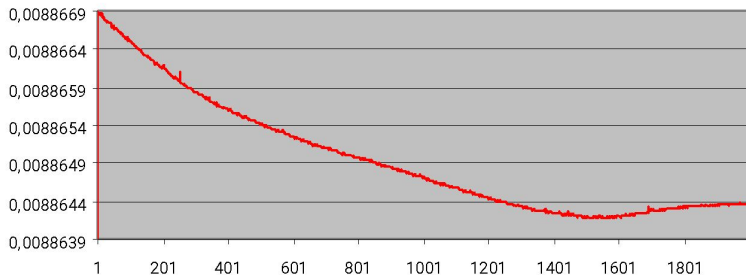
ДТПТ-6 № 109 (найгірша) 1-й нагрівач, 5 В

Похибка різнополярності 169 ppm

Вхідна напруга

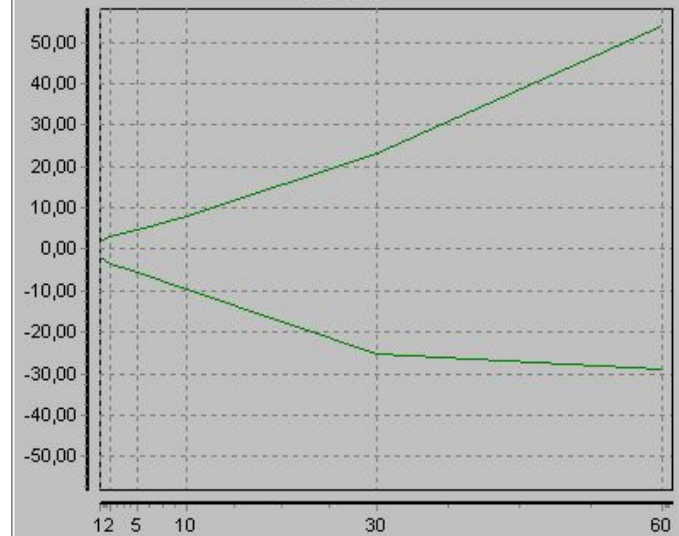


Вихідна напруга



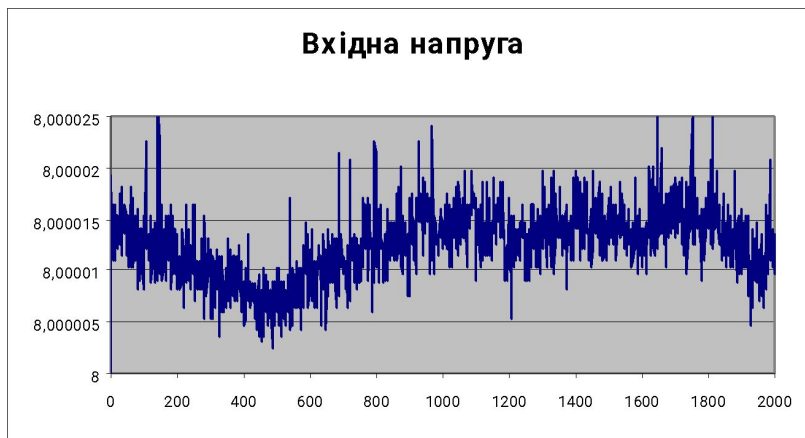
Вибірка, хвилини	Відхилення з вірогідністю 0,95		
	—	+	середнє
1	-2,02	1,77	1,89
2	-3,59	3,19	3,39
5	-5,58	4,72	5,15
10	-9,51	8,18	8,85
30	-25,24	23,14	24,19
60	-29,02	53,75	41,39

Результат

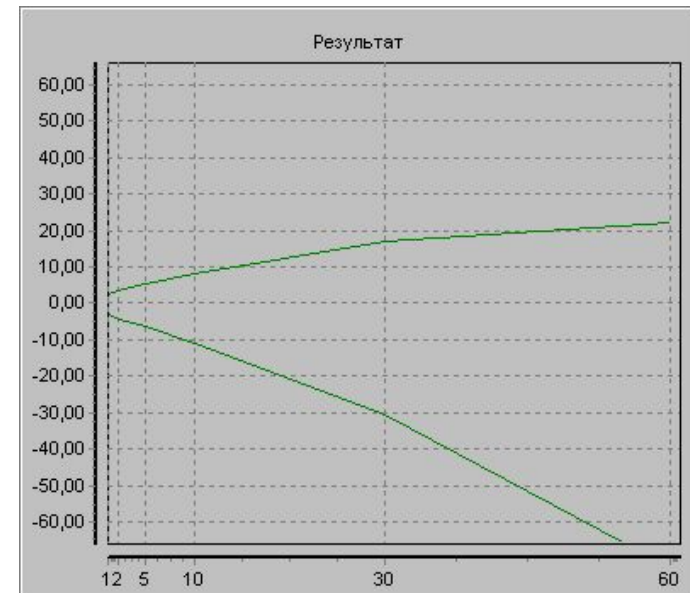


ДТПТ-6 № 134 (найкраща) 2-й нагрівач, 8 В

Похибка різнополярності 4 ppm



Вибірка, хвилини	Відхилення з вірогідністю 0,95		
	—	+	середнє
1	-3,12	2,54	5,66
2	-4,54	3,46	8,00
5	-6,24	5,23	11,47
10	-10,93	8,28	19,21
30	-30,72	17,02	47,74
60	-72,71	22,24	94,95



Загальний вигляд еталонного перетворювача напруги термоелектричного (ЕПНТЕ)



Принцип перетворення напруги в інтервал часу

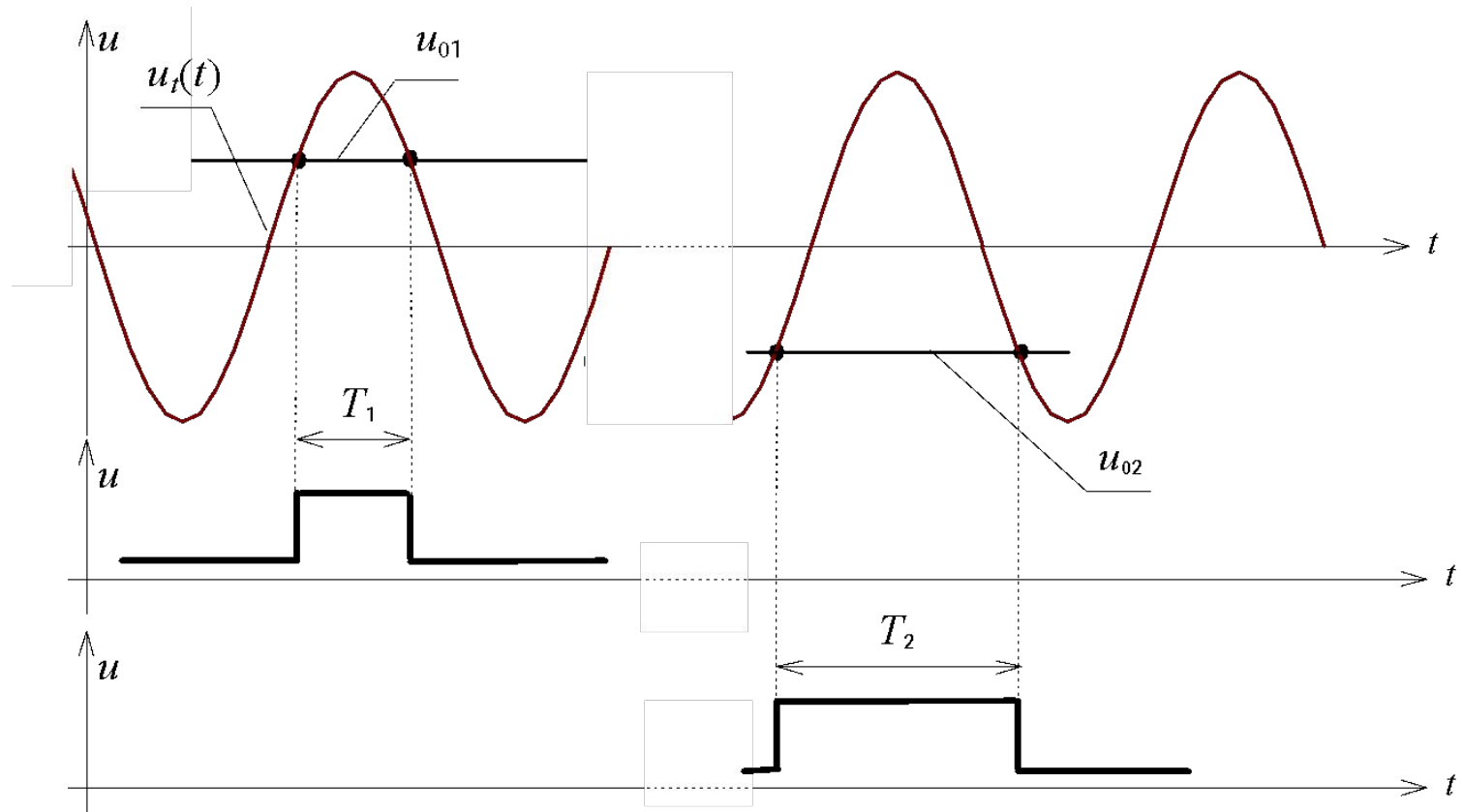
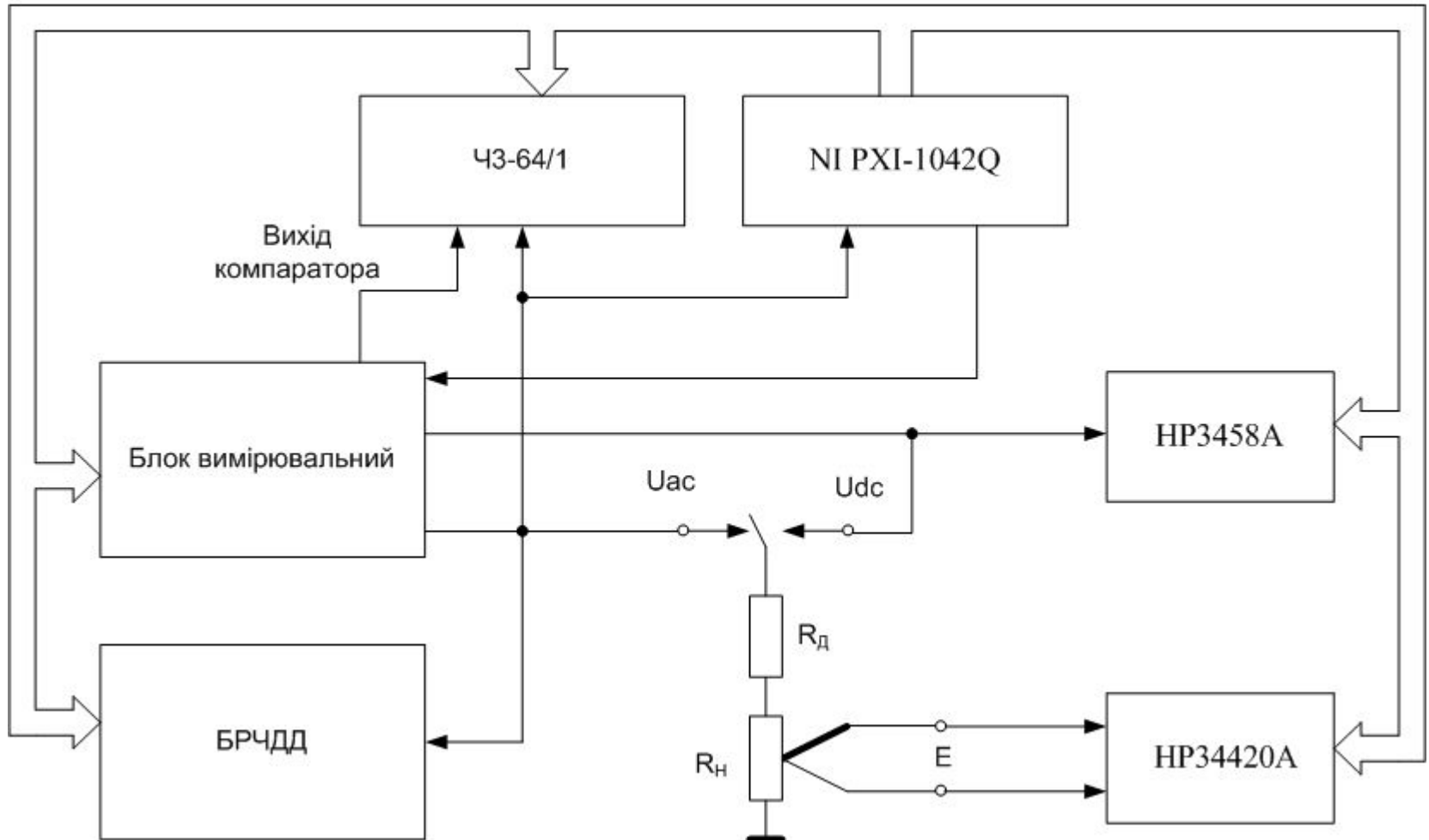


Схема визначення похибки переходу від змінного струму до постійного

Системний інтерфейс (GPIB, RS-232)



Визначення похибки переходу з напруги змінного струму на напругу постійного струму перетворювачів ЕПНТЕ 1В, ЕПНТЕ 2В

$$\delta_{acdc} = \frac{1}{\sqrt{2} \cos \pi f T_1} - 1,$$

де f – частота калібровки,

$$f = 1000 \pm 10$$

T_1 інтервал часу на рівні $\frac{1}{\sqrt{2}} U_a$

$$T_1 = 250 \pm 20$$

Необхідні вимоги для застосування методу компарування з однією опорною напругою

- $|U^+| = |U^-| = U^=$

- $E^{\sim} = E_c^=$

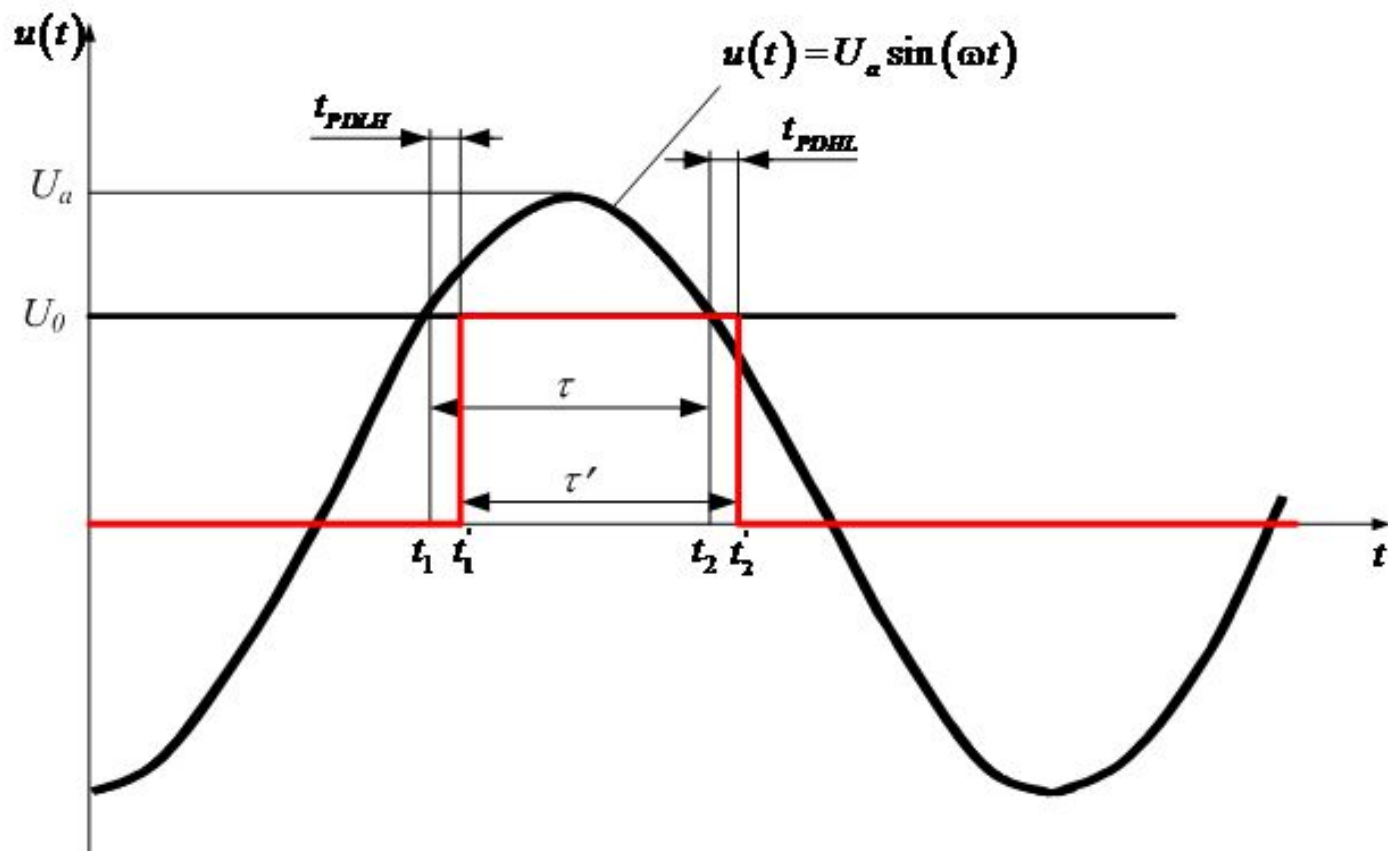
- Чистий спектральний склад синусної напруги

Джерела похибок при компаруванні

- *Динамічні похибки*
 - *Похибка від різниці затримок t_{PDLH} і t_{PDHL}*
- *Статичні похибки*
 - *Похибка від гістерезису*
 - *Похибка від напруги зсуву компаратора*

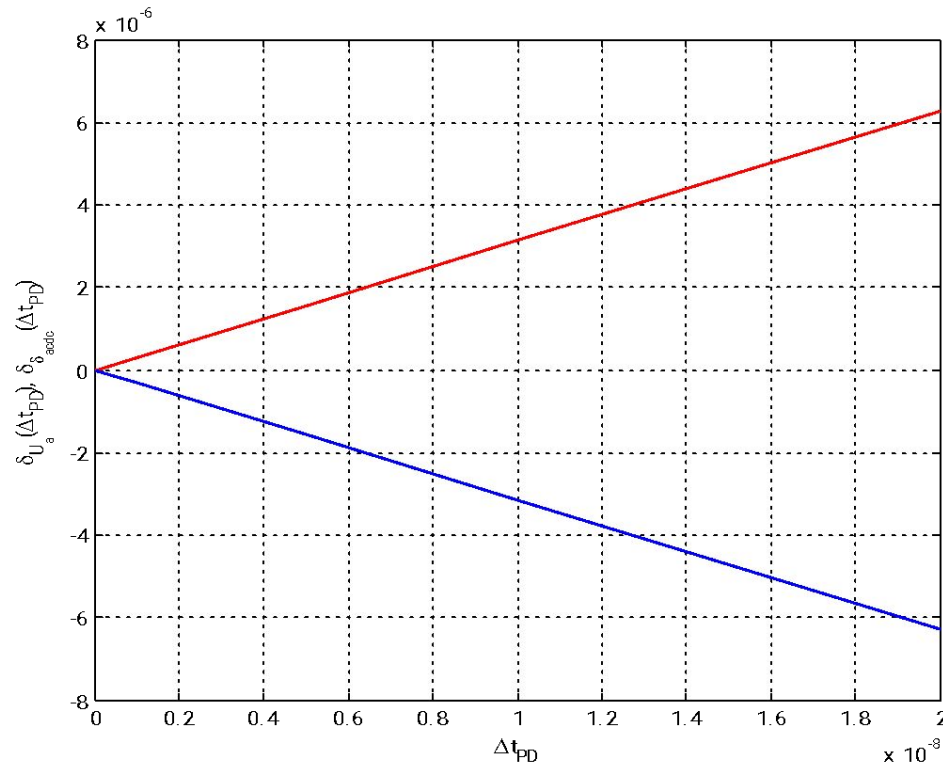
Джерела похибок при компаруванні

Похибка від різниці затримок t_{PDLH} і t_{PDHL}



Джерела похибок при компаруванні

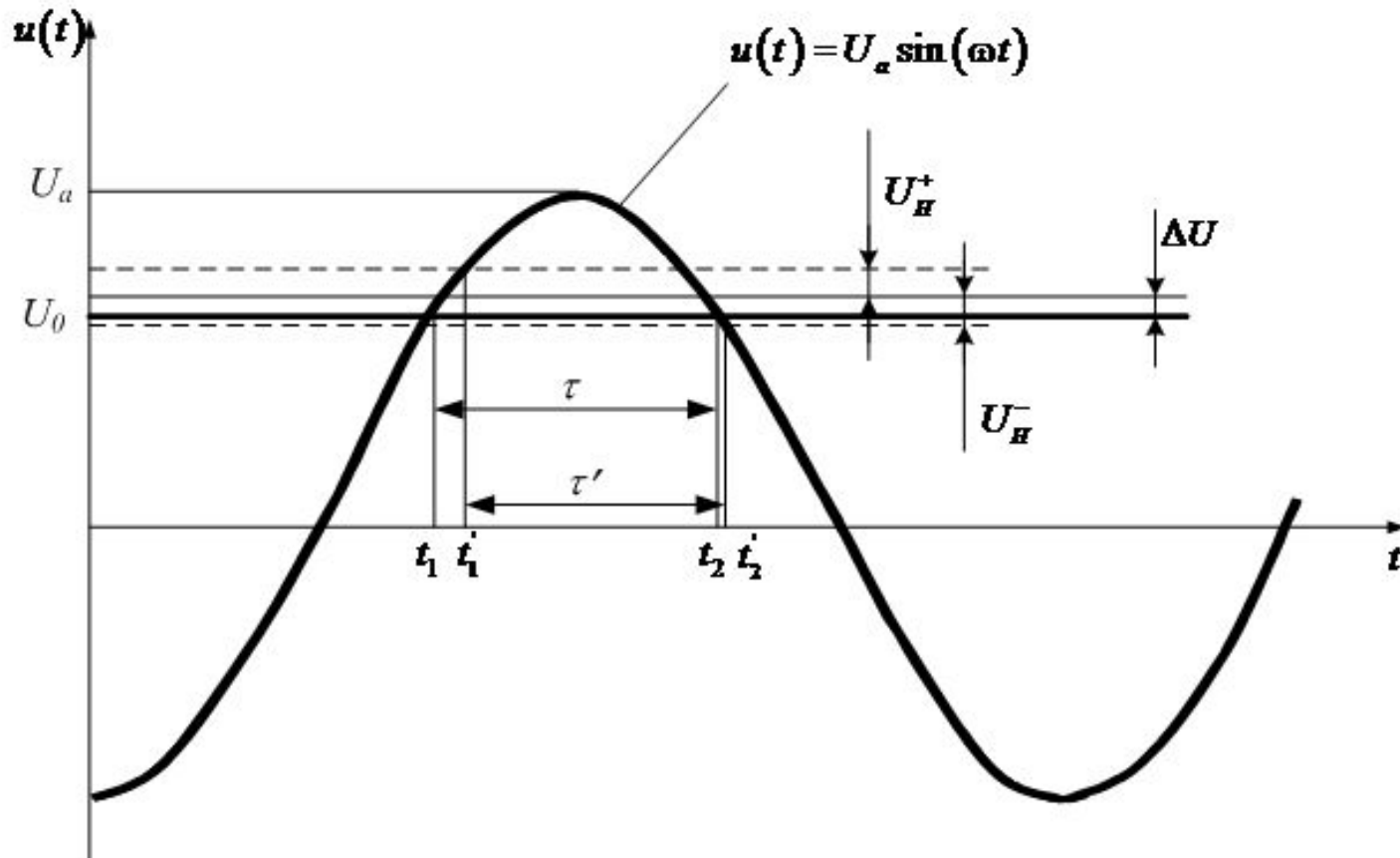
Похибка від різниці затримок t_{PDLH} і t_{PDHL}



$\Delta t_{PD} = t_{PDHL} - t_{PDLH}$, ns	δ_{U_a} , ppm	$\delta_{\delta_{acdc}}$, ppm
0	0	0
1	0,314	-0,314
5	1,572	-1,572
10	3,142	-3,142
20	6,283	-6,283

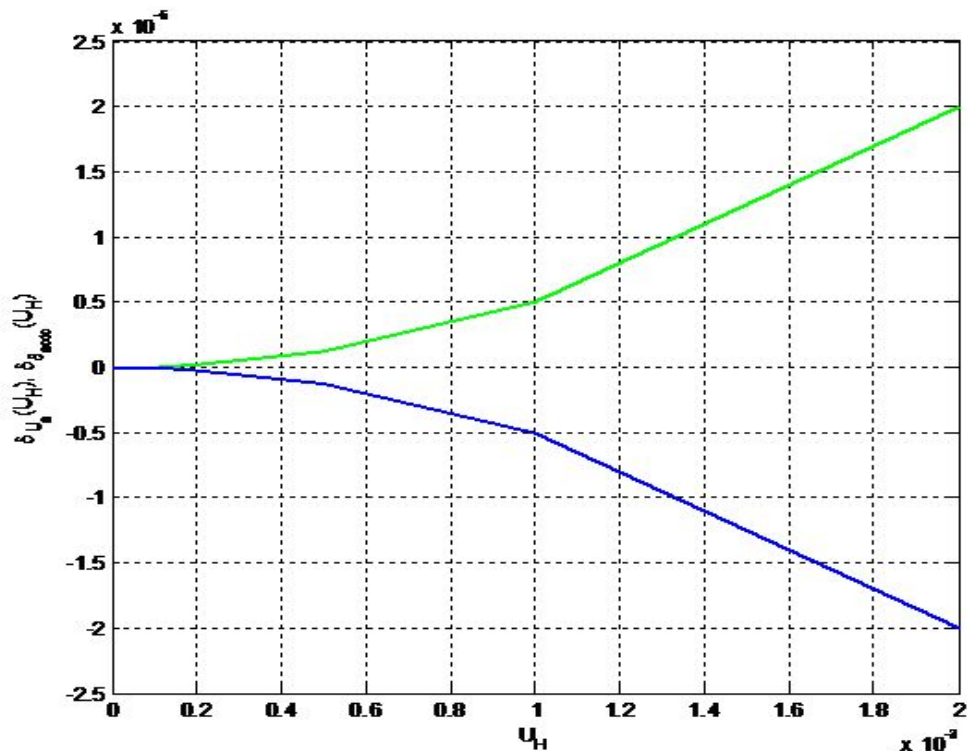
Джерела похибок при компаруванні

Похибка від гістерезису



Джерела похибок при компаруванні

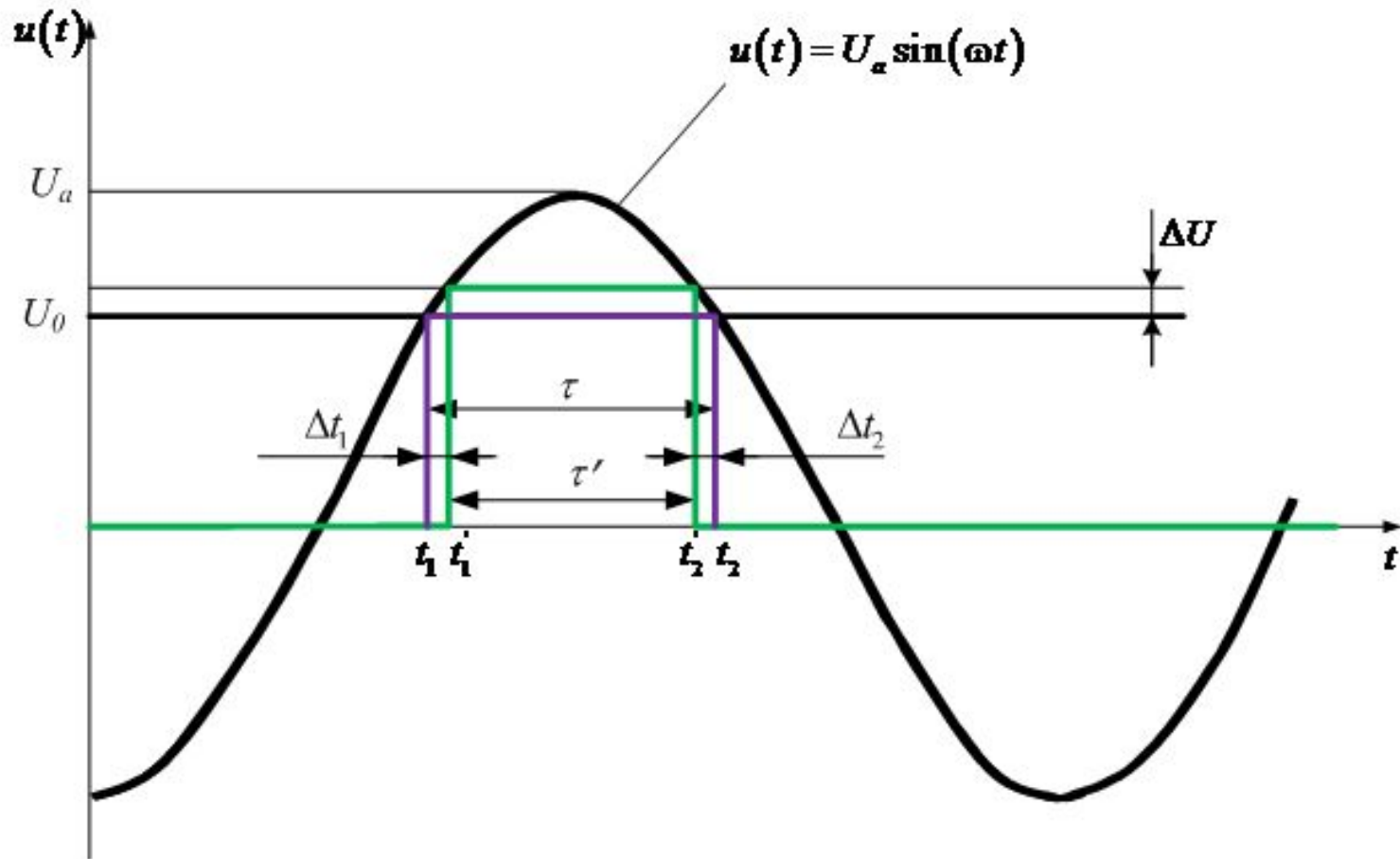
Похибка від гістерезису



U_H , mV	$\Delta\tau$, ns	δ_{U_a} , ppm	$\delta_{\delta_{acdc}}$, ppm
0	0	0	0
0,1	0,016	0,005	-0,005
0,2	0,064	0,02	-0,02
0,5	0,398	0,125	-0,125
1	1,592	0,5	-0,5
2	6,366	2	-2

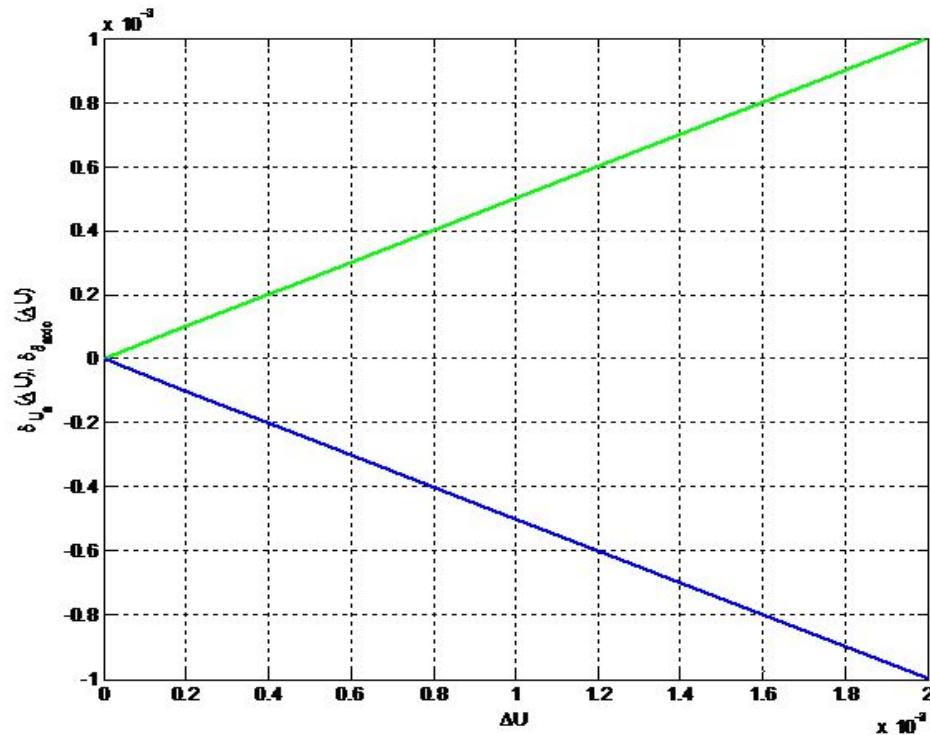
Джерела похибок при компаруванні

Похибка від напруги зсуву



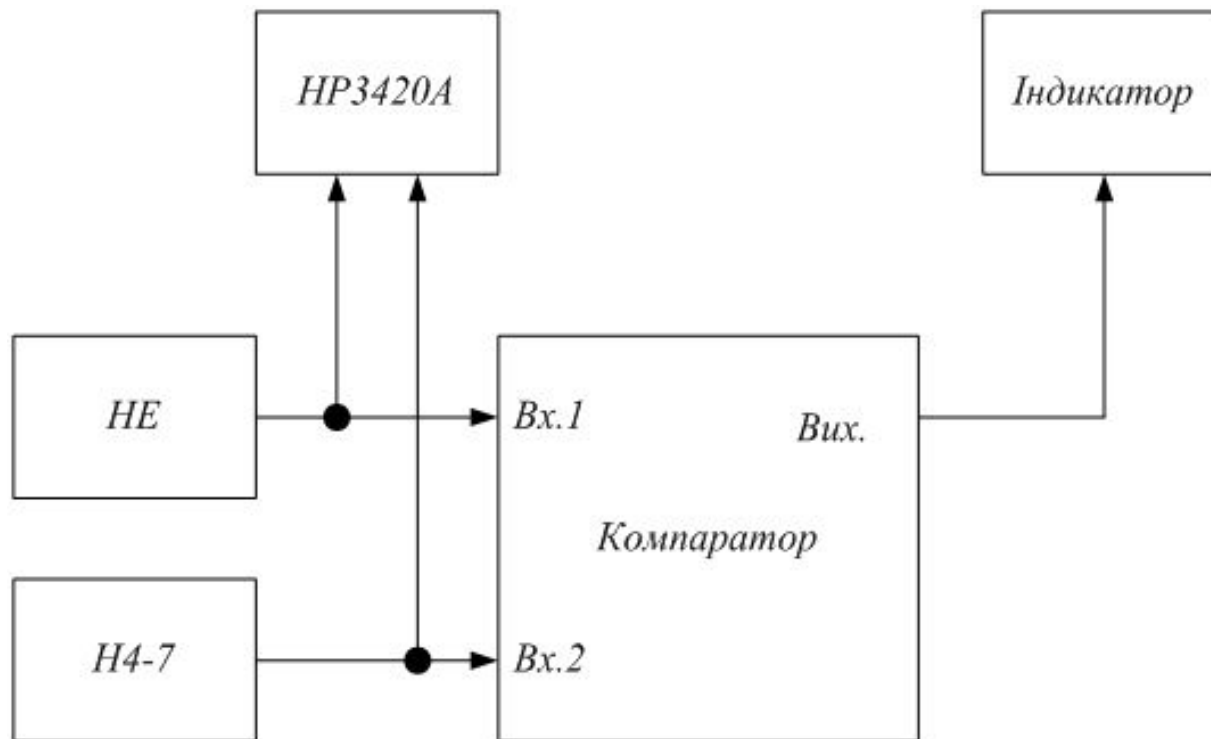
Джерела похибок при компаруванні

Похибка від напруги зсуву

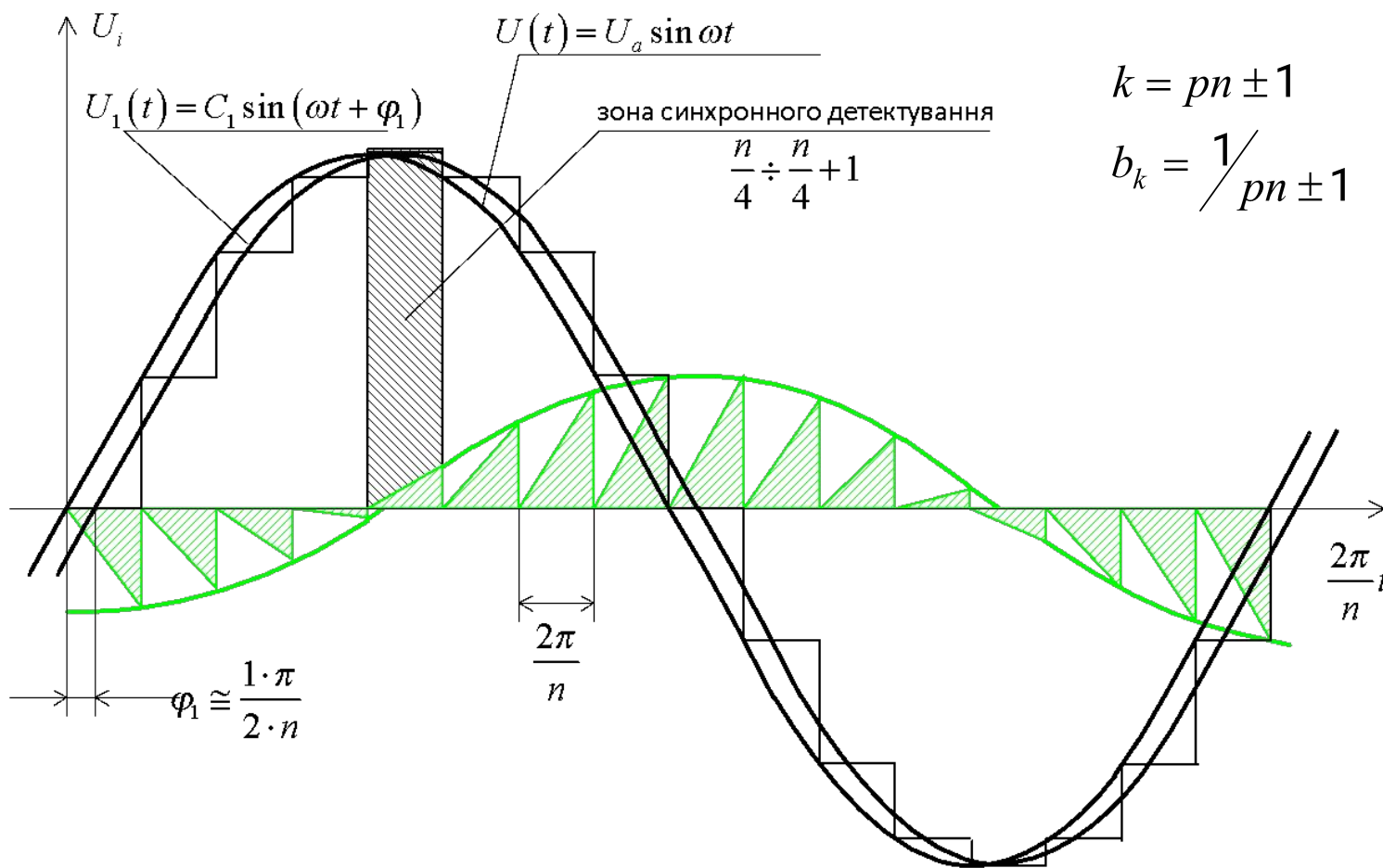


$U_H, \text{ mV}$	$\Delta\tau, \text{ ns}$	$\delta_{U_d}, \text{ ppm}$	$\delta_{\delta_{acc}}, \text{ ppm}$
0	0	0	0
0,1	15,9	50,006	-49,999
0,2	31,8	100,03	-99,995
0,5	79,6	250,16	-249,97
1	159,2	500,63	-499,88
2	318,6	1002,5	-999,5

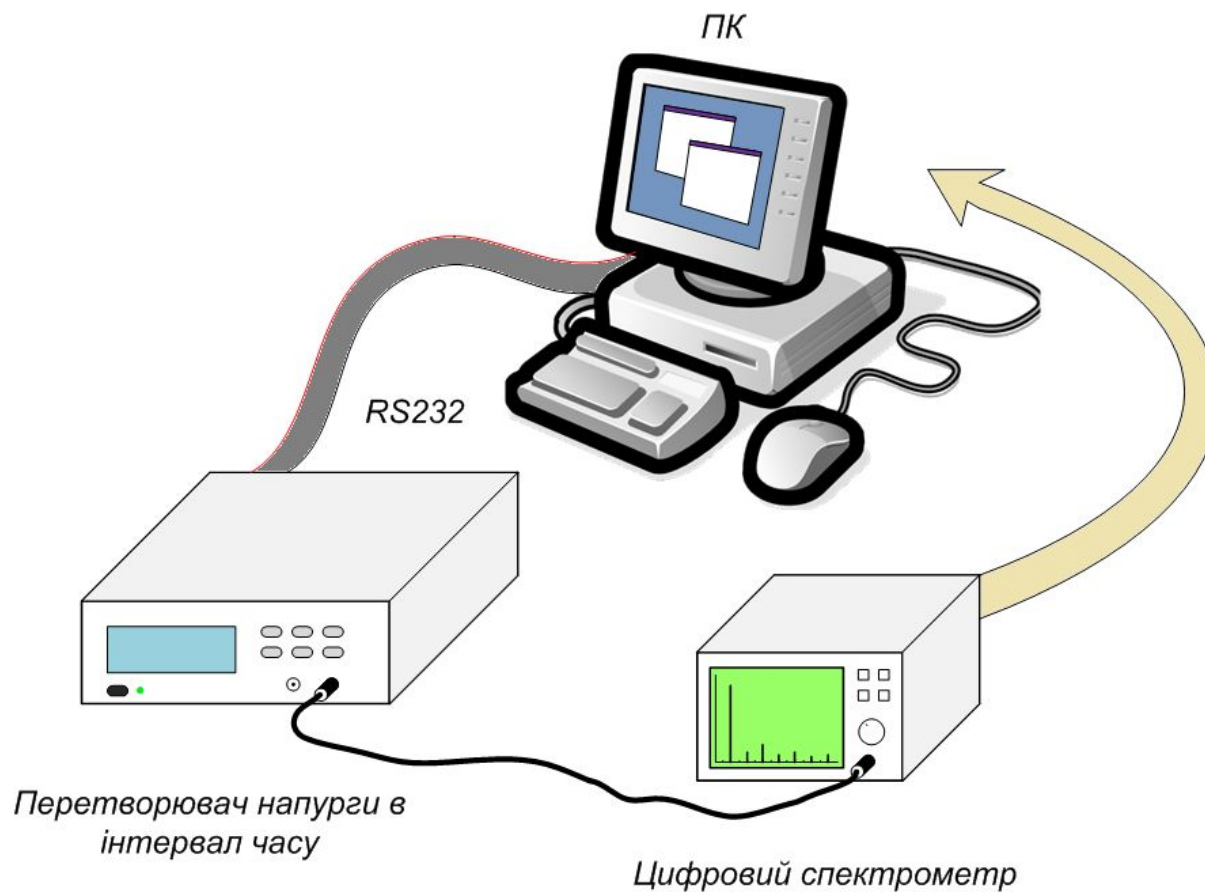
Схема дослідження компаратора



Синус-ступінчата напруга



Метод компенсації вищих гармонік шляхом корекції коду ЦАП



Похибки при вимірюванні напруги за миттєвими значеннями

$$\Delta_{кв} = \frac{1}{\sqrt{12}} LSB$$

$$LSB = \frac{U_0}{2^n}$$

$$\delta_{кв} = \frac{\Delta_{кв}}{U_0} = \frac{\frac{1}{\sqrt{12}} \cdot \frac{U_0}{2^n}}{U_0} = \frac{1}{\sqrt{12} \cdot 2^n}$$

Вимоги до розрядності АЦП

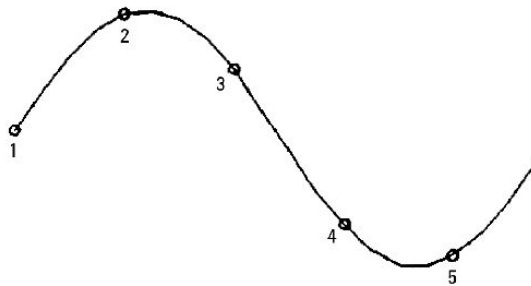
$$n = \log_2 \left(\frac{1}{\sqrt{12} \cdot \delta_{\kappa\beta}} \right)$$

$$\delta_{\kappa\beta} = 10^{-6}$$

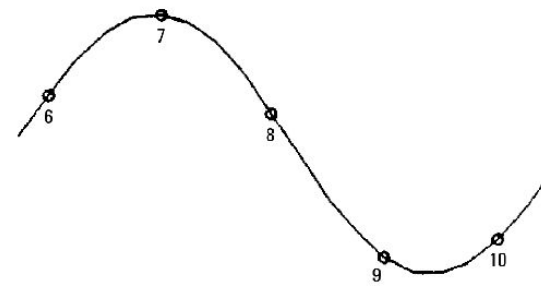
$$n = \log_2 \left(\frac{1}{\delta_{\kappa\beta}} \right) = \log_2 \left(\frac{1}{10^{-6}} \right) = 19,93$$

Підвищення діючої частоти дискретизації АЦП

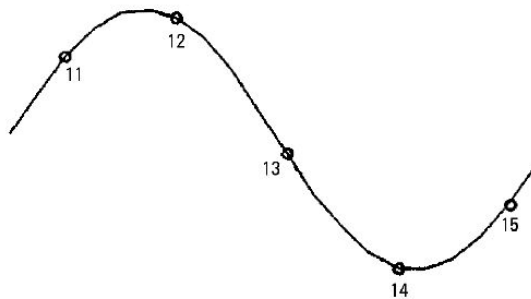
PERIOD 1



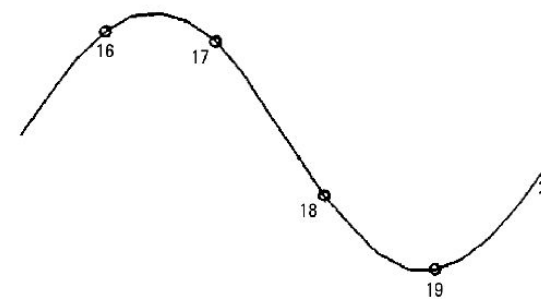
PERIOD 2



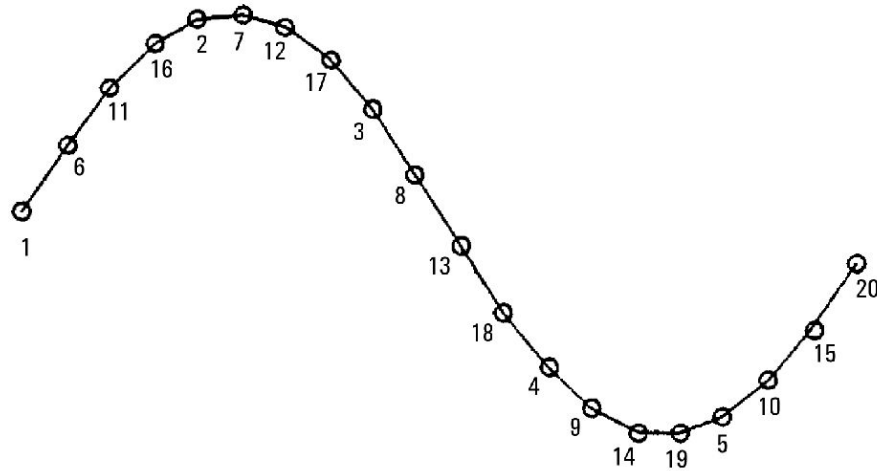
PERIOD 3



PERIOD 4

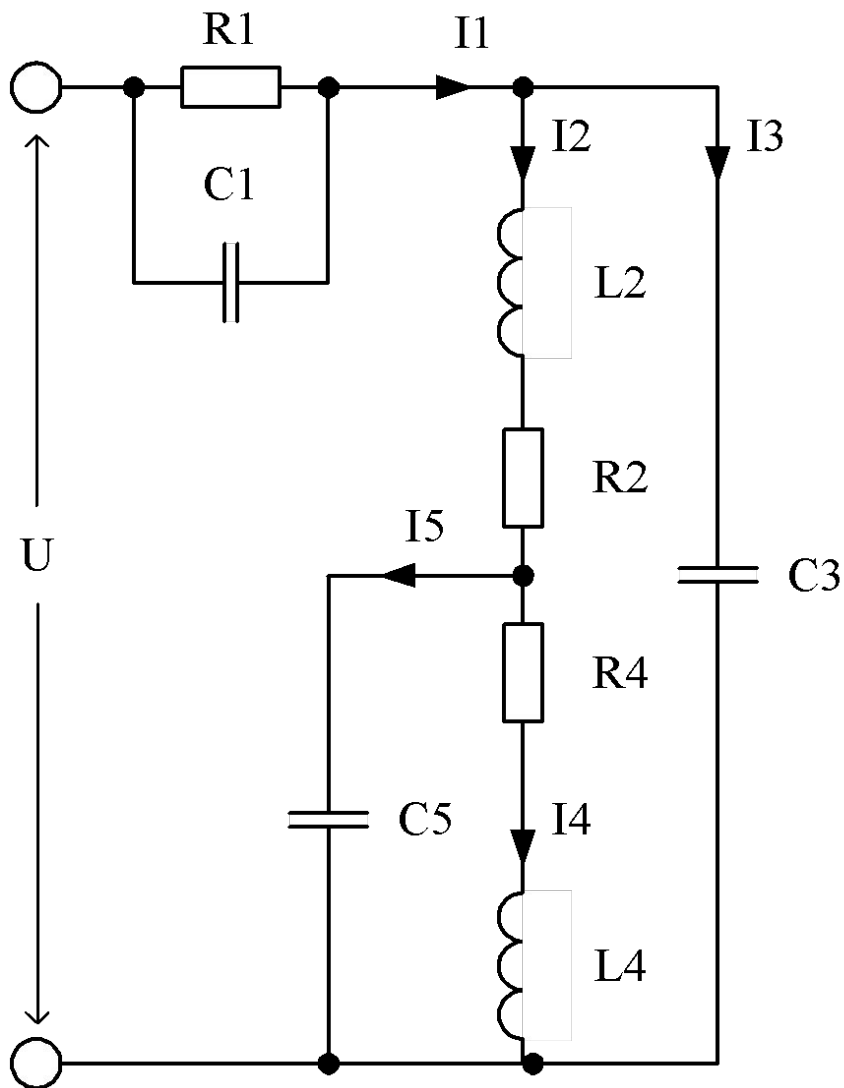


Підвищення діючої частоти дискретизації АЦП



Складений період сигналу в режимі
субдискретизації

Спрощена еквівалентна схема ЕПНТЕ 2 В



$R1$ – додатковий опір,

$C1$ – конструктивна ємність додаткового резистора $R1$,

$L2, L4$ – конструктивні індуктивності вводів нагрівача,

$R2, R4$ – півопори нагрівача,

$C5$ – ємність між гарячим спаєм термопари і серединою нагрівача,

$C3$ – конструктивна ємність входів нагрівача

Формула для підрахунку відносної частотної похибки, виражена через елементи еквівалентної схеми

$$\gamma_{(f)U} = 0,5 \times \left(\frac{(R_1 + R_2 + R_4)^2 (1 + \omega^2 \tau_1^2)^2}{R_2 + R_4} \cdot \left\{ R_2 \cdot \left[(1 - \omega^2 C_5 L_4)^2 + (\omega C_5 R_4)^2 \right] + R_4 \right\} : \right. \\
: \left\{ \left[(R_2 + R_4)(1 + \omega^2 \tau_1^2) - \omega^2 R_2 R_4 C_5 (\tau_2 + \tau_4)(1 + \omega^2 \tau_1^2) + R_1 + \omega^2 C_3 R_1 R_2 \times \right. \right. \\
\times (\tau_1 - \tau_2) - \omega^2 C_3 C_5 R_1 R_2 R_4 (1 + \omega^2 \tau_1 \tau_2 + \omega^2 \tau_1 \tau_4 - \omega^2 \tau_2 \tau_4) + \\
+ \omega^2 R_1 R_4 (\tau_1 - \tau_4)(C_5 + C_3) \left. \right]^2 + \omega^2 \left[(R_2 \tau_2 + R_4 \tau_4)(1 + \omega^2 \tau_1^2) + \right. \\
+ R_2 R_4 C_5 (1 - \omega^2 \tau_2 \tau_4)(1 + \omega^2 \tau_1^2) - R_1 \tau_1 + C_3 R_1 R_2 (1 + \omega^2 \tau_1 \tau_2) - \\
\left. \left. - C_3 C_5 R_1 R_2 R_4 \omega^2 (\tau_2 - \tau_1 + \tau_4 + \omega^2 \tau_1 \tau_2 \tau_4) + R_1 R_4 (1 + \omega^2 \tau_1 \tau_4)(C_3 + C_5) \right]^2 \right\} - 1 \left. \right)$$

Залежність частотної похибки на частоті 30 МГц (пакет MicroCap)

Залежність похибки на частоті 30 МГц від ємностей, ppm

< 300 ppm	< 1000 ppm	>= 1000 ppm
-----------	------------	-------------

C3 = 2 pF

		C1, pF				
		0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
C5, pF	0,50	-93,40	-48,47	56,41	221,21	445,93
	1,00	-166,09	-126,15	-26,27	133,53	353,24
	2,00	-346,78	-316,82	-226,94	-77,14	132,54

Залежність похибки на частоті 30 МГц від ємностей, ppm

< 300 ppm	< 1000 ppm	>= 1000 ppm
-----------	------------	-------------

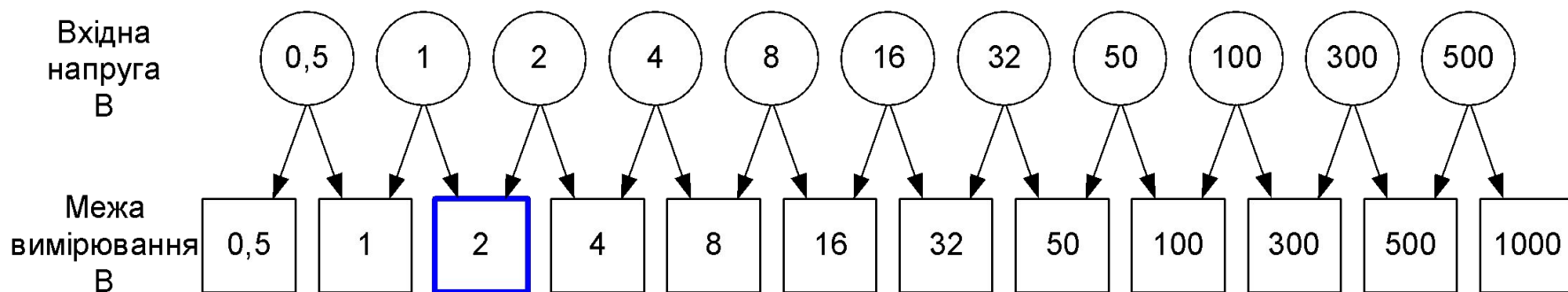
C3 = 1 pF

		C1, pF				
		0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
C5, pF	0,50	196,67	281,61	426,51	631,37	896,18
	1,00	173,95	253,88	393,78	593,63	853,43
	2,00	93,08	163,01	292,90	482,74	732,51

Залежність похибки на частоті 30 МГц від ємностей (в pF) при R = 180 Ом

		0,10	0,25	< 300 pF		< 1000 pF		>= 1000 pF				
				0,45	0,67	0,86	1,05	1,24	1,43	1,62	1,81	2,00
C2, pF	0,10	52,483	195,084	419,845	726,780	1115,900	1987,220	2140,749	2776,501	3494,484	4294,710	5177,189
	0,20	82,756	224,843	449,092	766,516	1144,129	1614,942	2167,967	2803,215	3520,697	4320,423	5202,402
	0,30	112,757	254,329	478,066	783,980	117,2085	1642,392	2194,912	2829,657	3546,637	4345,862	5227,341
	0,40	142,486	283,544	506,768	812,172	1199,768	1669,568	2221,583	2856,826	3572,302	4371,027	5252,007
	0,50	171,943	312,486	535,198	840,092	1227,179	1696,472	2247,982	2881,720	3597,696	4395,918	5276,398
	0,60	201,127	341,156	563,355	867,739	1254,317	1723,103	2274,108	2907,341	3622,814	4420,536	5300,514
	0,70	230,040	369,554	591,241	895,113	1281,183	1749,461	2299,960	2932,689	3647,659	4444,878	5324,357
	0,80	258,680	397,679	618,853	922,215	1307,775	1775,547	2325,639	2957,764	3672,230	4468,948	5347,925
	0,90	287,049	425,533	646,194	949,044	1334,096	1801,359	2350,845	2982,566	3696,528	4492,743	5371,219
	1,00	315,144	453,113	673,261	975,600	1360,142	1826,898	2375,878	3007,093	3720,552	4516,264	5394,239
	1,10	342,968	480,422	700,056	1001,884	1385,916	1852,164	2400,638	3031,347	3744,302	4539,512	5416,984
	1,20	370,519	507,458	726,579	1027,896	1411,418	1877,157	2425,124	3055,328	3767,779	4562,485	5439,455
	1,30	397,798	534,221	752,829	1053,633	1436,646	1901,877	2449,337	3079,036	3790,981	4585,184	5461,652
	1,40	424,804	560,712	778,806	1079,099	1461,601	1926,323	2473,276	3102,468	3813,910	4607,609	5483,574
	1,50	451,538	586,930	804,511	1104,291	1486,283	1950,497	2496,942	3125,628	3836,566	4629,760	5505,221
	1,60	478,000	612,876	829,942	1129,211	1510,692	1974,397	2520,334	3148,514	3858,945	4651,636	5526,594
	1,70	504,188	638,548	855,101	1153,857	1534,828	1998,023	2543,453	3171,126	3881,052	4673,238	5547,693
	1,80	530,104	663,949	879,987	1178,231	1558,691	2021,377	2566,298	3193,466	3902,886	4694,666	5568,516
	1,90	555,748	689,076	904,600	1202,332	1582,280	2044,457	2588,870	3215,529	3924,443	4715,919	5589,066
	2,00	581,118	713,930	928,940	1226,169	1605,597	2067,263	2611,168	3237,320	3945,728	4736,398	5609,340
	3,00	819,816	947,461	1157,322	1449,406	1823,724	2280,284	2819,093	3440,161	4143,493	4929,096	5796,977
	4,00	1031,199	1153,669	1368,367	1645,303	2014,486	2465,919	2999,613	3615,673	4313,804	5094,312	5967,103
	5,00	1215,233	1332,518	1532,044	1813,819	2177,850	2624,142	3152,701	3763,532	4456,639	5232,027	6089,699
	10,00	1724,262	1815,527	1969,064	2244,874	2582,968	3003,314	3505,943	4090,843	4758,011	5807,447	6339,147
	15,00	1546,934	1612,097	1759,509	1969,166	2301,061	2695,188	3171,540	3730,108	4370,886	5093,862	5899,030
	18,00	1111,273	1160,779	1292,496	1506,415	1802,526	2180,819	2641,282	3183,904	3808,673	4515,577	5304,603
	19,00	911,291	966,884	1032,071	1290,742	1581,586	1954,589	2409,740	2947,028	3666,438	4267,956	5051,570
	20,00	683,979	723,064	844,324	1047,746	1333,319	1701,030	2150,864	2682,809	3296,849	3992,970	4771,196
	21,00	429,375	463,267	579,292	777,467	1057,769	1420,184	1964,696	2391,951	2991,951	3690,662	4463,408
	22,00	147,520	176,205	287,020	479,960	754,981	1112,097	1651,281	2072,519	2675,792	3361,084	4128,376
	23,00	-161,539	-136,044	-32,445	165,243	425,003	776,819	1210,673	1726,548	2324,426	3004,288	3766,114
	24,00	-497,752	-479,440	-379,051	-196,602	67,889	414,405	842,926	1353,434	1945,910	2620,333	3376,683
25,00	-861,064	-847,925	-762,740	-675,525	-316,301	24,914	448,101	953,238	1540,305	2209,282	2960,145	
26,00	-1261,416	-1243,441	-1153,452	-981,467	-727,506	-391,589	26,261	526,024	1107,678	1771,201	2516,569	
27,00	-1668,744	-1666,923	-1581,121	-1414,359	-1166,657	-1166,038	-422,524	71,863	648,100	1306,162	2046,026	
28,00	-2112,979	-2115,302	-2036,679	-1874,132	-1630,686	-1306,360	-898,181	-409,172	161,644	814,241	1548,594	
29,00	-2584,051	-2591,504	-2517,050	-2360,712	-2122,514	-1802,479	-1400,634	-917,002	-361,610	296,517	1024,362	
30,00	-3081,881	-3094,452	-3026,157	-2874,018	-2641,062	-2326,314	-1929,800	-1451,545	-891,578	-249,925	473,386	
31,00	-3606,390	-3624,066	-3569,917	-3413,969	-3186,248	-2876,700	-2486,594	-2012,716	-1458,174	-821,998	-104,215	
32,00	-4157,492	-4180,268	-4121,244	-3960,476	-3757,981	-3453,788	-3067,926	-2600,422	-2051,306	-1420,608	-706,368	

Ланцюг визначення частотних похибок



$$\gamma_{E0,5} = D(0,5;1) + \gamma_{E1},$$

$$\gamma_{E1} = D(1;2) + \gamma_{E2},$$

$$\gamma_{E2} = \text{розрахункова},$$

$$\gamma_{E4} = D(4;2) + \gamma_{E2},$$

$$\gamma_{E8} = D(8;4) + \gamma_{E4},$$

$$\gamma_{E16} = D(16;8) + \gamma_{E8},$$

$$\gamma_{E32} = D(32;16) + \gamma_{E16},$$

$$\gamma_{E50} = D(50;32) + \gamma_{E32},$$

$$\gamma_{E100} = D(100;50) + \gamma_{E50},$$

$$\gamma_{E300} = D(300;100) + \gamma_{E100},$$

$$\gamma_{E500} = D(500;300) + \gamma_{E300},$$

$$\gamma_{E1000} = D(1000;500) + \gamma_{E500}.$$

Середньоарифметичне значення частотних похибок

$$\bar{\gamma}_{f_i}(0,5) = \bar{D}_{f_i}(0,5;1) + \bar{D}_{f_i}(1;2) + \gamma_{f_i}(2)$$

$$\bar{\gamma}_{f_i}(1) = \bar{D}_{f_i}(1;2) + \gamma_{f_i}(2)$$

$$\bar{\gamma}_{f_i}(2) = \gamma_{f_i}(2)$$

$$\bar{\gamma}_{f_i}(4) = \bar{D}_{f_i}(4;2) + \gamma_{f_i}(2)$$

$$\bar{\gamma}_{f_i}(8) = \bar{D}_{f_i}(8;4) + \bar{D}_{f_i}(4;2) + \gamma_{f_i}(2)$$

$$\bar{\gamma}_{f_i}(16) = \bar{D}_{f_i}(16;8) + \bar{D}_{f_i}(8;4) + \bar{D}_{f_i}(4;2) + \gamma_{f_i}(2)$$

$$\bar{\gamma}_{f_i}(32) = \bar{D}_{f_i}(32;16) + \bar{D}_{f_i}(16;8) + \bar{D}_{f_i}(8;4) + \bar{D}_{f_i}(4;2) + \gamma_{f_i}(2)$$

$$\bar{\gamma}_{f_i}(50) = \bar{D}_{f_i}(50;32) + \bar{D}_{f_i}(32;16) + \bar{D}_{f_i}(16;8) + \bar{D}_{f_i}(8;4) + \bar{D}_{f_i}(4;2) + \gamma_{f_i}(2)$$

$$\bar{\gamma}_{f_i}(100) = \bar{D}_{f_i}(100;50) + \bar{D}_{f_i}(50;32) + \bar{D}_{f_i}(32;16) + \bar{D}_{f_i}(16;8) + \bar{D}_{f_i}(8;4) + \bar{D}_{f_i}(4;2) + \gamma_{f_i}(2)$$

$$\bar{\gamma}_{f_i}(300) = \bar{D}_{f_i}(300;100) + \bar{D}_{f_i}(100;50) + \bar{D}_{f_i}(50;32) + \bar{D}_{f_i}(32;16) + \bar{D}_{f_i}(16;8) + \bar{D}_{f_i}(8;4) + \bar{D}_{f_i}(4;2) + \gamma_{f_i}(2)$$

$$\bar{\gamma}_{f_i}(500) = \bar{D}_{f_i}(500;300) + \bar{D}_{f_i}(300;100) + \bar{D}_{f_i}(100;50) + \bar{D}_{f_i}(50;32) + \bar{D}_{f_i}(32;16) + \bar{D}_{f_i}(16;8) + \bar{D}_{f_i}(4;2) + \gamma_{f_i}(2)$$

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}_{f_i}(1000) = & \bar{D}_{f_i}(1000;500) + \bar{D}_{f_i}(500;300) + \bar{D}_{f_i}(300;100) + \bar{D}_{f_i}(100;50) + \bar{D}_{f_i}(50;32) + \bar{D}_{f_i}(31;16) + \bar{D}_{f_i}(16;8) + \\ & + \bar{D}_{f_i}(8;4) + \bar{D}_{f_i}(4;2) + \gamma_{f_i}(2) \end{aligned}$$

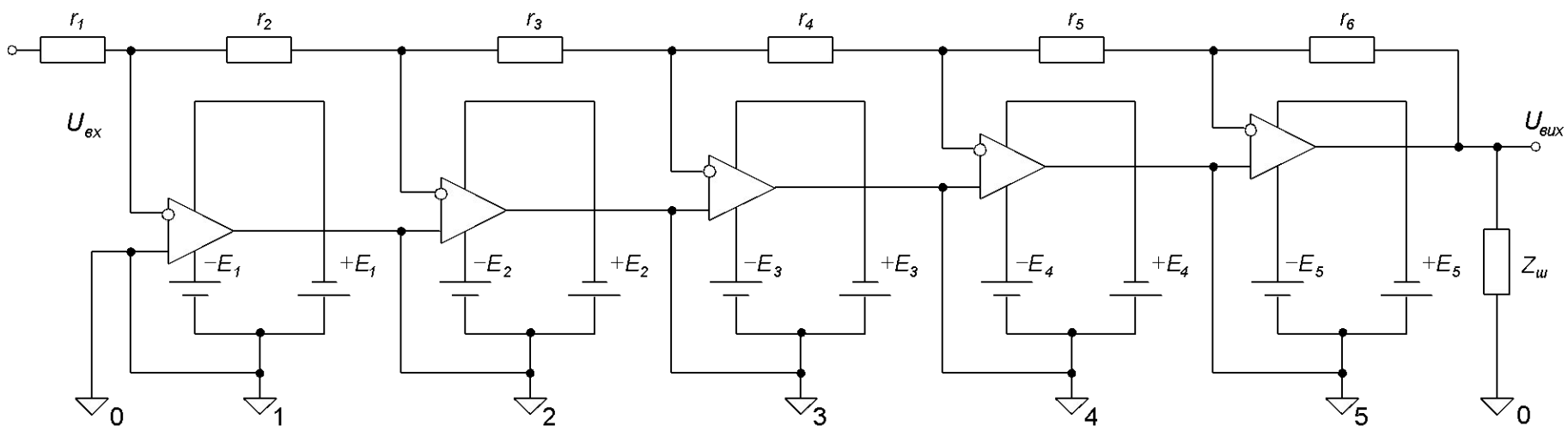
Необхідна вольт-герцова площа

Діапазон частот, МГц	Максимальна напруга (СКЗ), В	Площа, МГц·В
0 – 0,100	1000	100
0 – 1	100	100
0 – 30	30	900

Необхідна швидкість наростання сигналу

Напруга, В	Частота, МГц	Швидкість, В/мс
30	30	7969
100	1	885
1000	0,1	885

Схема високовольтного підсилювача з взаємозалежними зворотними зв'язками на п'яти операційних підсилювачах

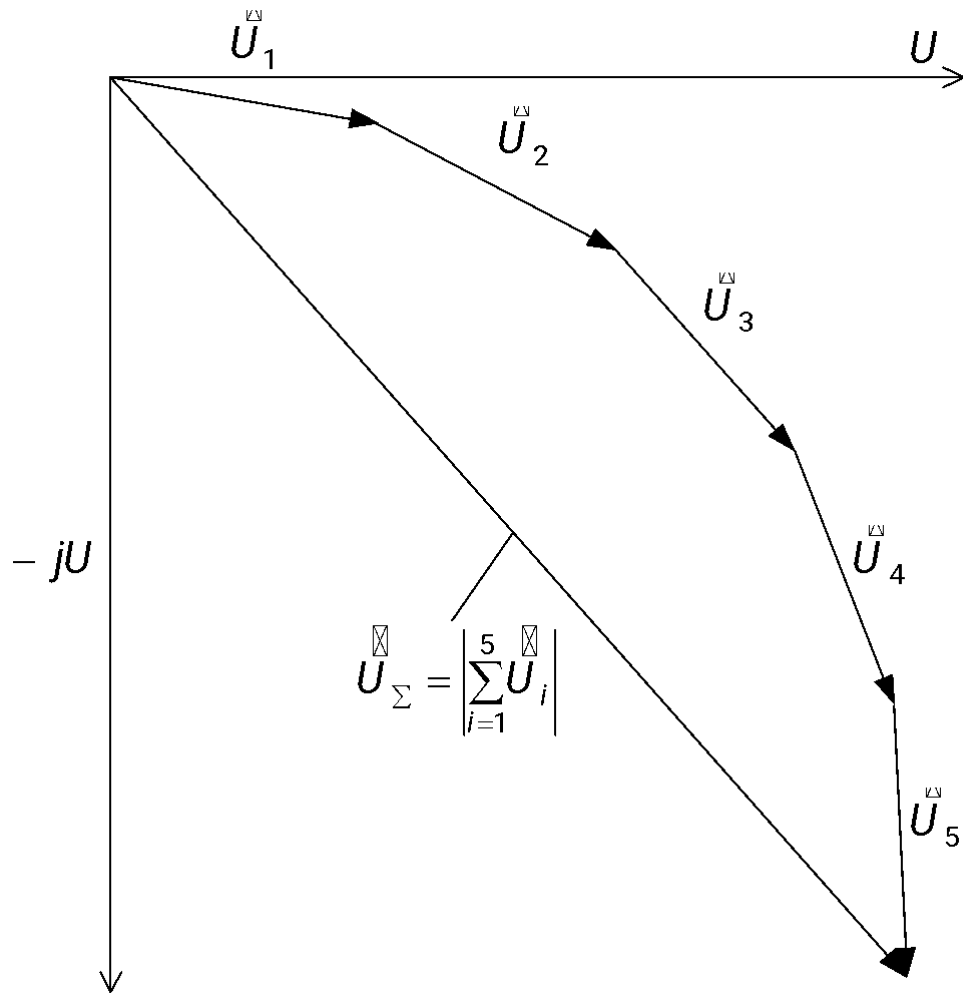


30 МГц

$$k = \frac{1}{r_1} \sum_2^{n+1} r_i$$

30 В

Векторна діаграма високовольтного багаточарункового підсилювача



$$U_c = U e^{j\varphi} \frac{1 - e^{jn\varphi}}{1 - e^{j\varphi}}$$

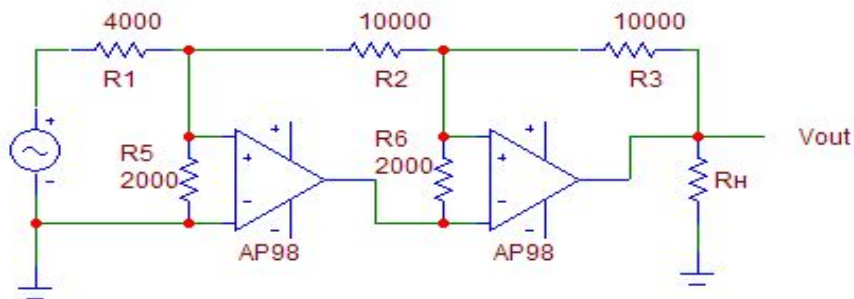
Залежність вихідної напруги окремих ОП від фазового зсуву та кількості ОП для досягнення сумарної напруги 30 В

	<i>n</i>						
	1	2	3	4	5	6	7
φ	$U(1)$	$U(2)$	$U(3)$	$U(4)$	$U(5)$	$U(6)$	$U(7)$
5	30	15	10	7,53	6,06	5,07	4,35
10	30	15,06	10,17	7,65	6,18	5,22	4,52
15	30	15,12	10,2	7,83	6,42	5,55	4,95
20	30	15,24	10,41	8,1	6,81	6	5,52
25	30	15,36	10,68	8,4	7,32	6,72	6,51
30	30	15,54	10,98	9	8,04	7,8	8,04
35	30	15,72	11,4	9,6	9	9,3	10,71
40	30	15,9	11,7	10,41	10,41	11,7	16,56
45	30	16,2	12,42	11,4	12,42	16,2	30,0

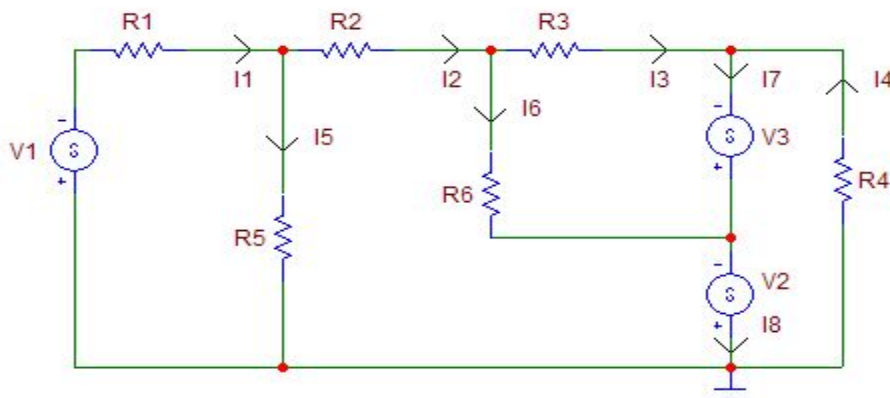
Залежність струмів кожного підсилювача від кількості каскадів в схемі

кількість каскадів		Струми через ОП в підсилювачі										I_M
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
номер каскаду	1	0	14,3	28,3	42,4	56,5	70,65	84,8	98,9	113	127	0
		60	74,3	88,3	102,4	116,5	13,65	144,8	158,9	173	187	60
	2	0	19	35,3	51	66	80,7	95,4	110,2	124,3	0	
		60	79	95,3	114	126	140,7	155,4	170,2	184,3	60	
	3	0	21,2	40	56,52	72,6	88,3	104,6	118,6	0		
		60	81,2	100	116,5	122,6	148,3	164,6	178,6	60		
	4	0	23	45,2	60,5	77,7	93,3	110,2	0			
		60	83	105,2	120,5	137,3	153,3	170,2	60			
	5	0	23,55	44,4	63,6	82	98,9	0				
		60	83,55	104,4	123,6	142	158,9	60				
6	$U = 30 \text{ В}$					0	24,3	46	65	85	0	
						60	84,3	106	125	145	60	
7	$f = 30 \text{ МГц}$					0	25	48	68	0		
						60	85	108	128	60		
8	$C_i = c = 5 \text{ нФ}$					0	25,43	48	0			
						60	85,43	108	60			
9	$C_M = 10 \text{ нФ}$					0	25,43	0				
						60	85,43	60				
10	$R_M = 1,5 \text{ к}$					0	0	0				
						60	60	60				

Спрощена принципова схема підсилювача 100 В, 1 МГц



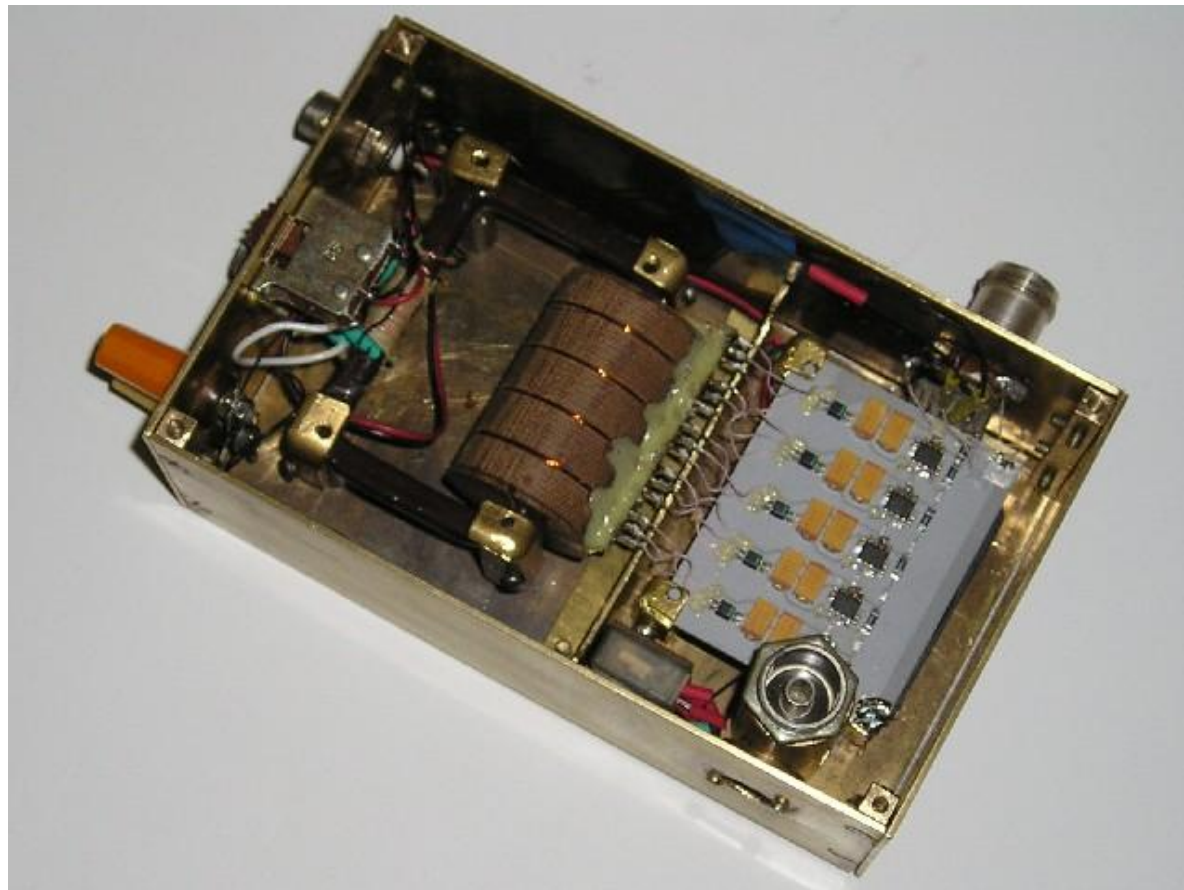
Еквівалентна схема підсилювача 100 В, 1 МГц на двох ОП типу AP98



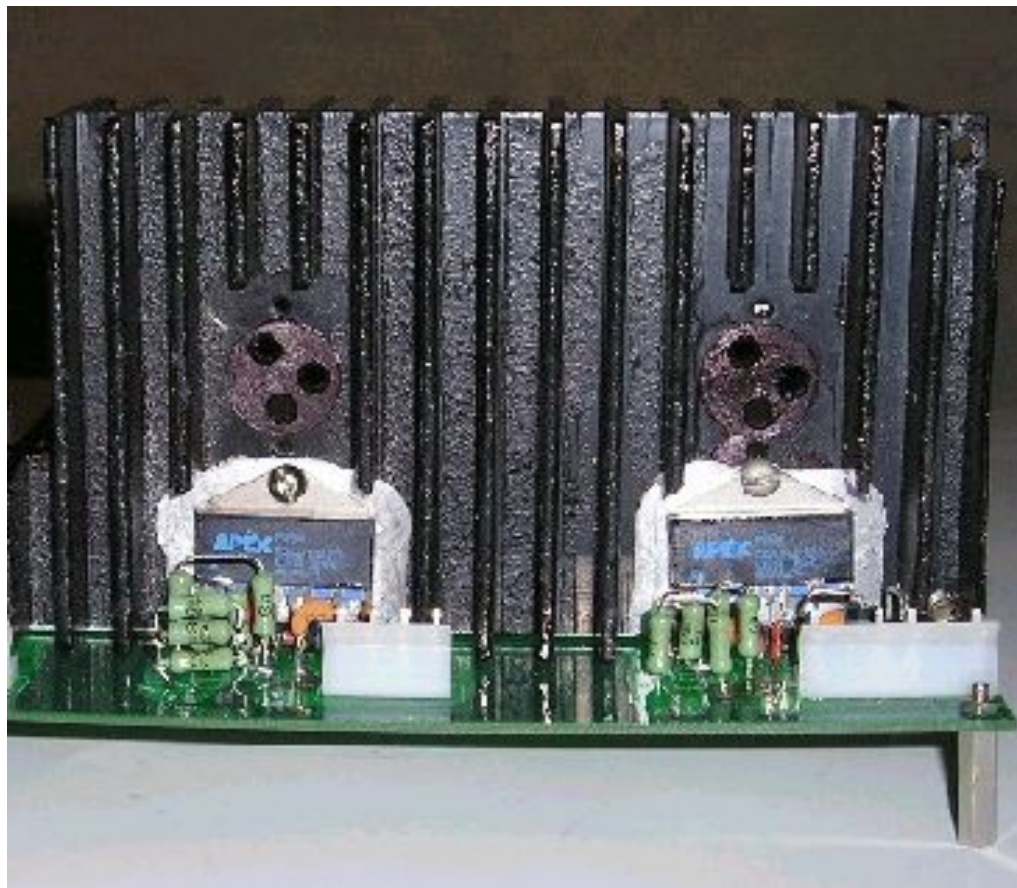
Підсилювач напруги 30 В 30 МГц з термоелектричним перетворювачем



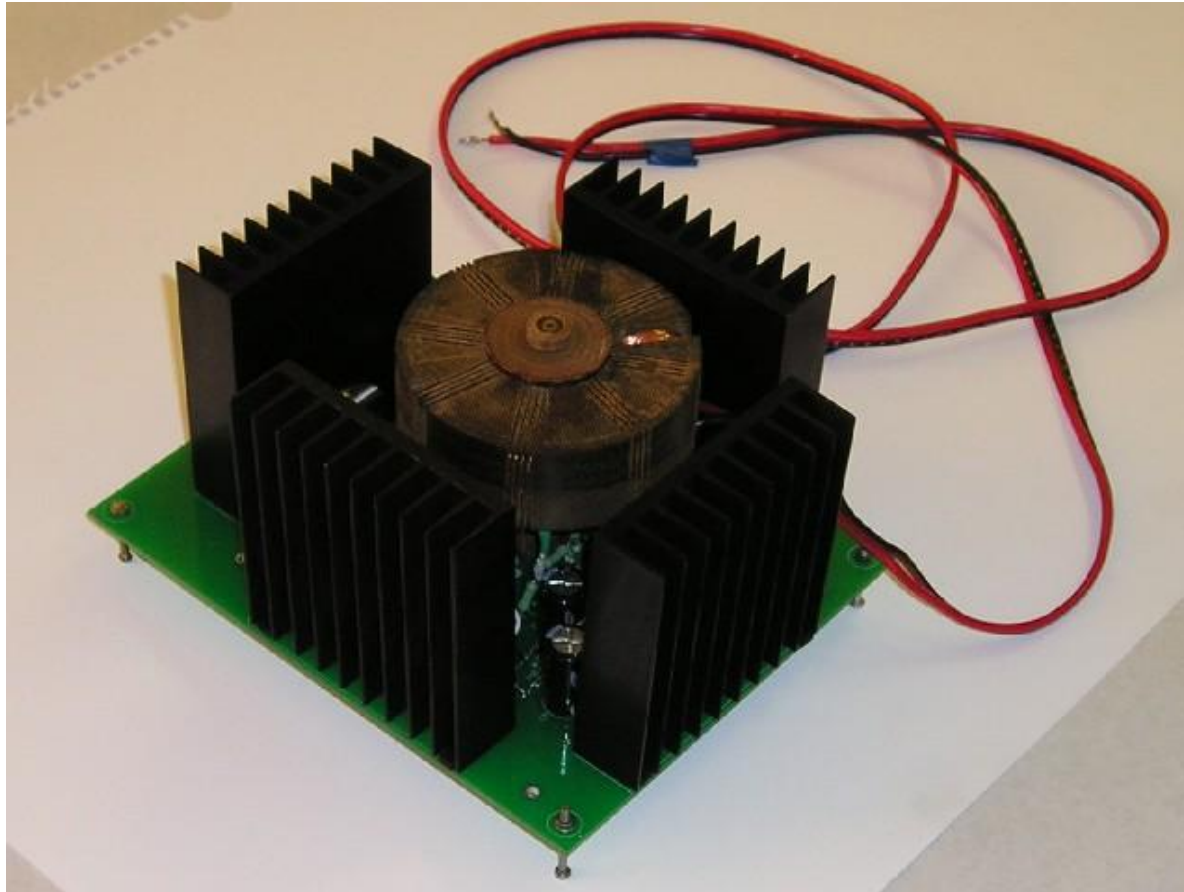
Підсилювач напруги 30 В 30 МГц без кришки



Підсилювачі 30 В 1 МГц, 100 В 1 МГц,
300 В 100 кГц



Підсилювач напруги 1000 В 100 кГц



Визначення шляхом термокомпарування похибок переходу зі змінної напруги на постійну ЕПНТЕ та ПНТЭ-12/2 з суміжними значеннями номінальних напруг на частоті калібрування 1 кГц

$$\delta_{\overline{acdc}} - \delta_{\overline{dc}} = 0,5 \left(\frac{E_{CE}}{E_{II}} \cdot \frac{E_{II}(f_i)}{E_E(f)} - 1 \right) \cdot 10^6,$$

де $E_{CE} = 0,5(E_{IE}^+ + E_{IE}^-)$, $E_C = 0,5(E^+ + E^-)$,

E_E^+ ФЕРС еталонного ПНТЕ, виміряне при заданій позитивній постійній напрузі,

E_E^- ФЕРС еталонного ПНТЕ, виміряне при заданій негативній постійній напрузі,

E_{II}^+ ФЕРС повіряемого ПНТЕ, виміряне при заданій позитивній постійній напрузі,

E_{II}^- ФЕРС повіряемого ПНТЕ, виміряне при заданій негативній постійній напрузі,

Експериментальна оцінка частотної похибки опорного ЕПНТЕ

$$\gamma_{E1} - \gamma_{NRV\ Z51} = 0,5 \left(\frac{N^2(f_K)}{E_{E1}(f_K)} \cdot \frac{E_{E1}(f_i)}{N^2(f_i)} - 1 \right) \cdot 10^6,$$

де γ_{E1} - частотна похибка атестуємого ЕПНТЕВ,

$\gamma_{NRV\ Z51}$ частотна похибка термоголівки NRV-Z51 № 100480,

$N(f_k)$ покази приладу NRVD на частоті f_k ка лібровки на частоті f_i відповідно,

$E_{E1}(f_k)$ покази нановольтметра HP34420A на частоті калібровки f_k , та частоті f_i .

Визначення інструментальної складової невилученої систематичної похибки автоматизованої системи ВЕ при вимірюваннях для визначення різниці похибок переходу зі змінної напруги до постійної шляхом термокомпарування

$$\delta_{acdc1} - \delta_{acdc2} = 0,5 \left(\frac{E_{EC2}}{E_{EC1}} \cdot \frac{E_E(f_i)_1}{E_E(f_i)_2} - 1 \right) \cdot 10^6,$$

де $E_{CE1} = 0,5(E_{E1}^+ + E_{E1}^-)$, $E_{CE2} = 0,5(E_{E2}^+ + E_{E2}^-)$,

$E_E(f_i)_1$ ТЕРС на поточній частоті f_i виміряна каналом 1,

$E_E(f_i)_2$ ТЕРС на поточній частоті f_i виміряна каналом 2,

E_{E1}^+ ТЕРС еталонного ПНТЕ, виміряне при за даній позитивній напрузі каналом 1 нановольтметра,

E_{E2}^+ ТЕРС еталонного ПНТЕ, виміряне при за даній позитивній напрузі каналом 2 нановольтметра,

E_{E1}^- ТЕРС еталонного ПНТЕ, виміряне при за даній негативній напрузі каналом 1 нановольтметра,

E_{E2}^- ТЕРС еталонного ПНТЕ, виміряне при за даній негативній напрузі каналом 2 нановольтметра.

Визначення інструментальної складової невилученої систематичної похибки автоматизованої системи ВЕ при вимірюваннях для визначення різниці частотних похибок

$$\delta_{f1} - \delta_{f1} = 0,5 \left(\frac{E_E(f_k)_2}{E_E(f_k)_1} \cdot \frac{E_E(f_i)_1}{E_E(f_i)_2} - 1 \right) \cdot 10^6,$$

де $E_E(f_k)_1$ - ТЕРС на частоті калібровки f_k , виміряна каналом 1 нановольтметра,

$E_E(f_k)_2$ ТЕРС на частоті калібровки f_k виміряна каналом 2 нановольтметра,

$E_E(f_i)_1$ ТЕРС на поточній частоті f_i виміряна каналом 1 нановольтметра,

$E_E(f_i)_2$ ТЕРС на поточній частоті f_i виміряна каналом 2 нановольтметра.

Визначення похибки передачі розміру одиниці напруги від ЕПНТЕ та ПНТЭ-12/2 до ППНТЕ та ПНТЭ-12

$$\gamma_{\Pi} - \gamma_{\text{E}} = 0,5 \left(\frac{E_{\text{E}}(f_k)}{E_{\Pi}(f_k)} \cdot \frac{E_{\Pi}(f_i)}{E_{\text{E}}(f_i)} - 1 \right) \cdot 10^6,$$

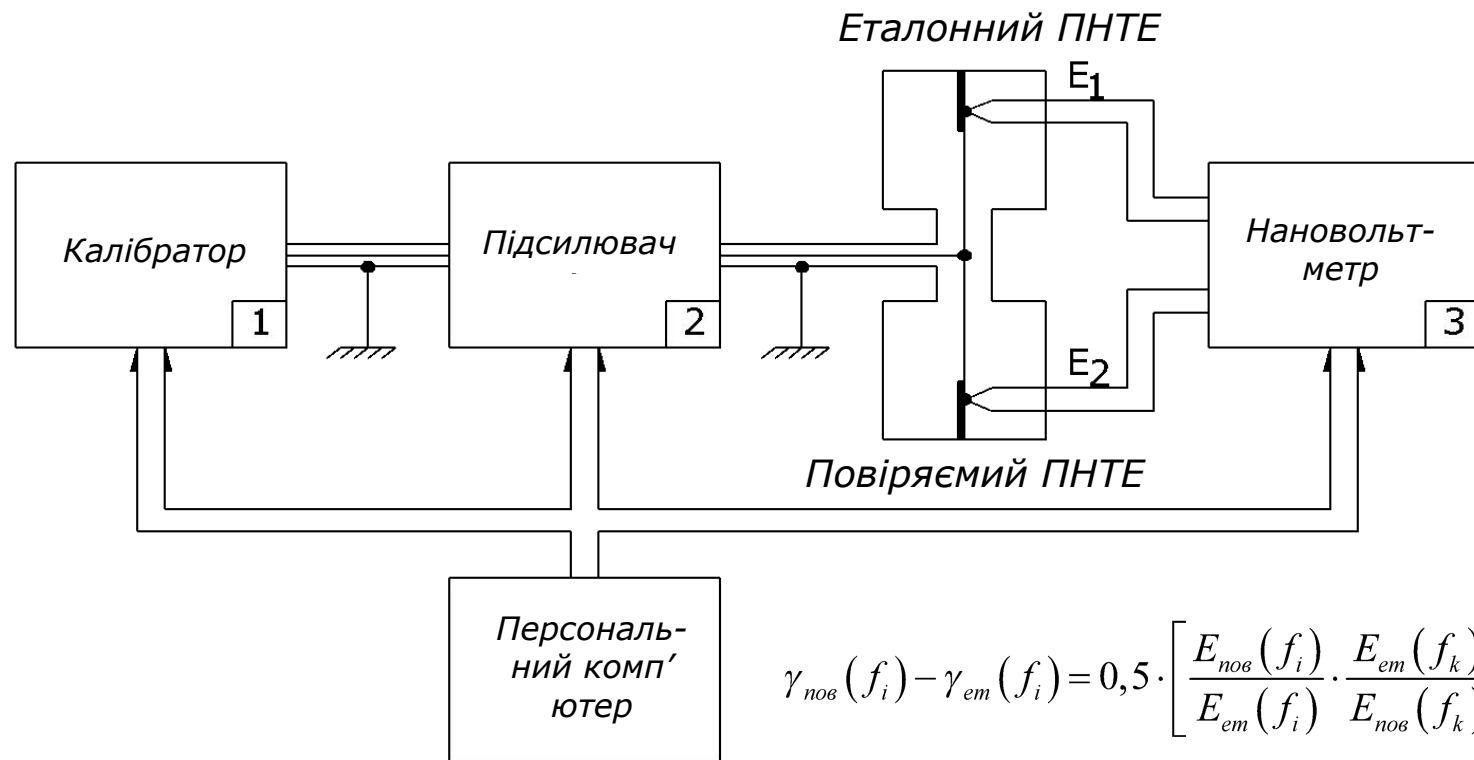
де $E_{\text{E}}(f_k)$ - ТЕРС еталонного ПНТЕ на частоті калібровки f_k ,

$E_{\Pi}(f_k)$ ТЕРС повіряемого ПНТЕ на частоті калі бровки f_k ,

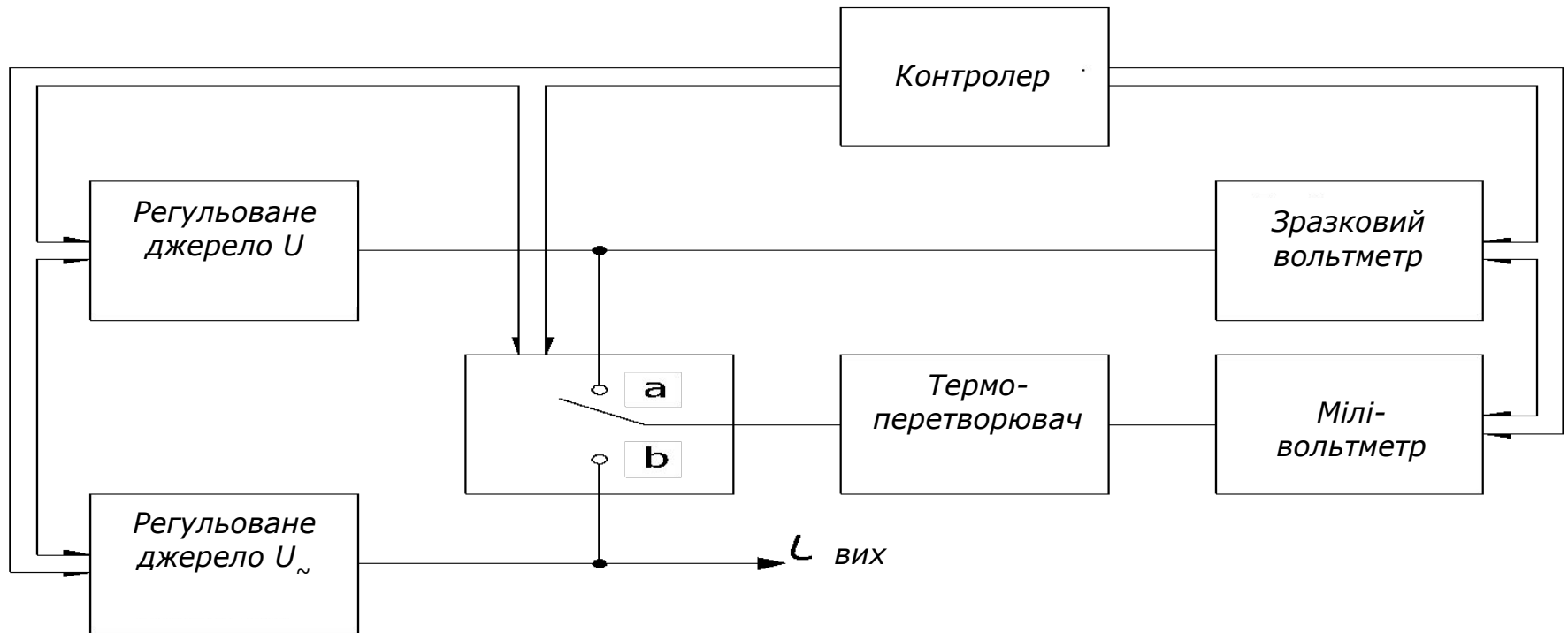
$E_{\text{E}}(f_i)$ ТЕРС еталонного ПНТЕ на поточній част оті f_i ,

$E_{\Pi}(f_i)$ ТЕРС повіряемого ПНТЕ на пото чній частоті f_i .

Структурна схема системи дослідження частотної похибки повіряємого термоперетворювача



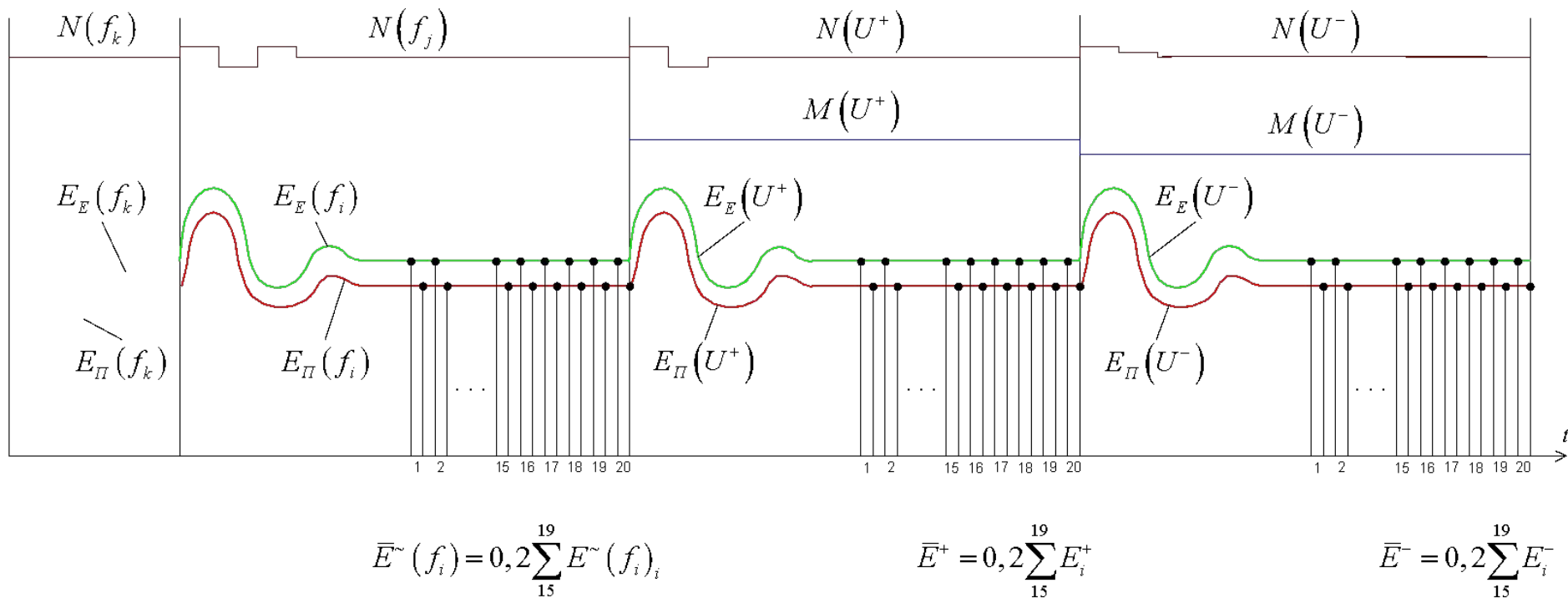
Структурна схема підсистеми стабілізації



Рекурентна формула регулювання напруги

$$U_{in} = 0,5U_{i(n-1)} \left[3 - \frac{E_{i(n-1)}}{E_{k0}} \right]$$

Часова діаграма роботи



Вікно переліку можливих експериментів

Эталон напряжения переменного тока

Управление отдельными приборами | Работа приборов в составе системы

Алгоритм компенсационного термокомпарирования

Настройка параметров эксперимента | Начать эксперимент | Стоп !

ТермоЭДС $E_{\text{пов.}}$ = В; $E_{\text{обр.}}$ = В

$U_{\text{вх. ПНТЭ}}$ = В; Погр.уст.уровня = ppm

Определение частотной погрешности с помощью Н4-7

Настройка параметров эксперимента | Начать эксперимент | Стоп !

ТермоЭДС $E_{\text{пов.}}$ = В; $E_{\text{обр.}}$ = В

Определение частотной погрешности с помощью В1-29

Настройка параметров эксперимента | Начать эксперимент | Стоп !

ТермоЭДС $E_{\text{пов.}}$ = В; $E_{\text{обр.}}$ = В

Генерация разнополярного напряжения с Н4-7

$U_{\text{вых}} = +$ 1.0 В; $t_{\text{пер}} =$ 30 с; $N =$ 25 циклов | Старт !

$-$ 1.0 В | Точная настройка $U_{\text{вых}}$ | Стоп !

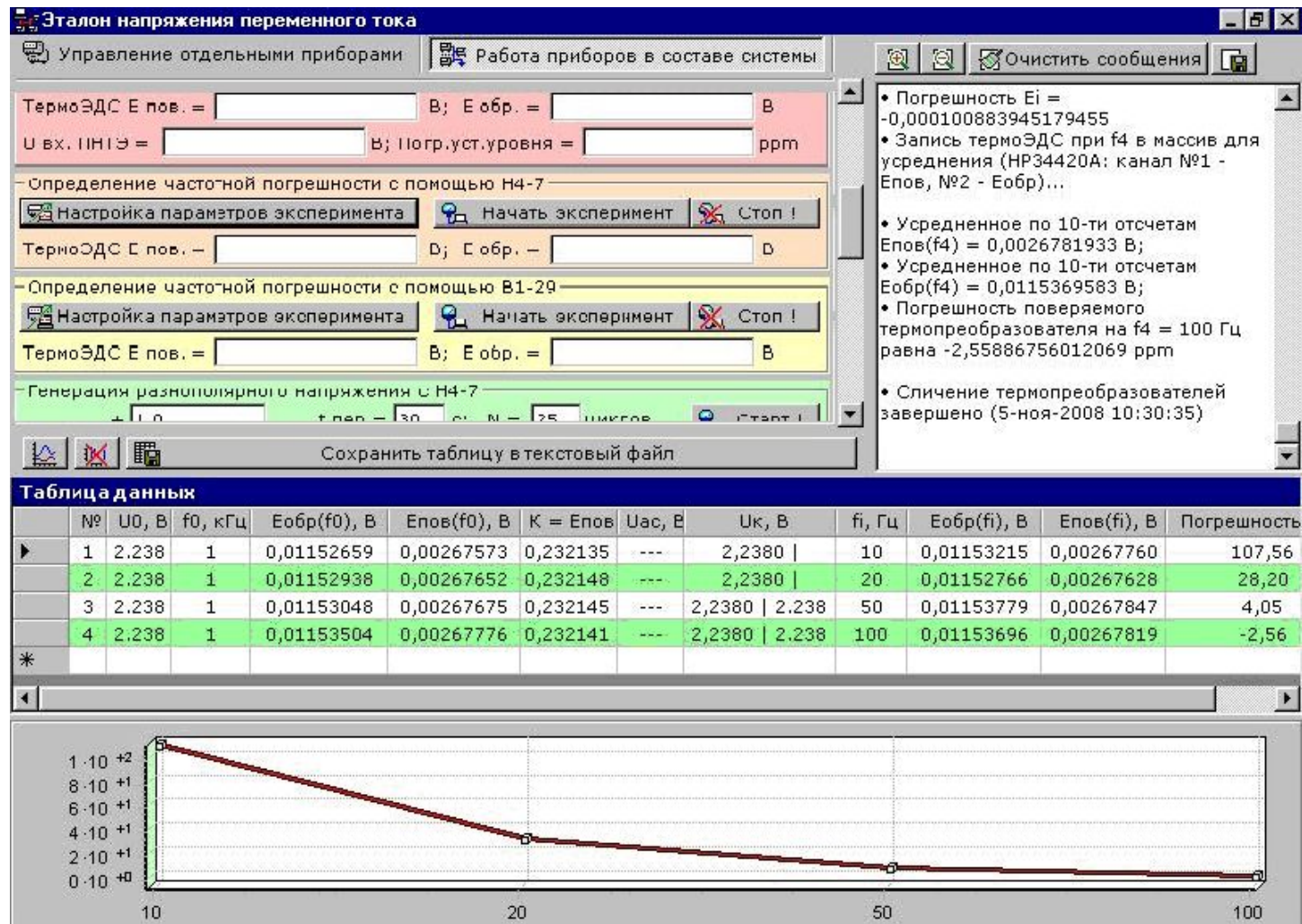
Алгоритм интерполяционного термокомпарирования

Настройка параметров эксперимента | Начать эксперимент | Стоп !

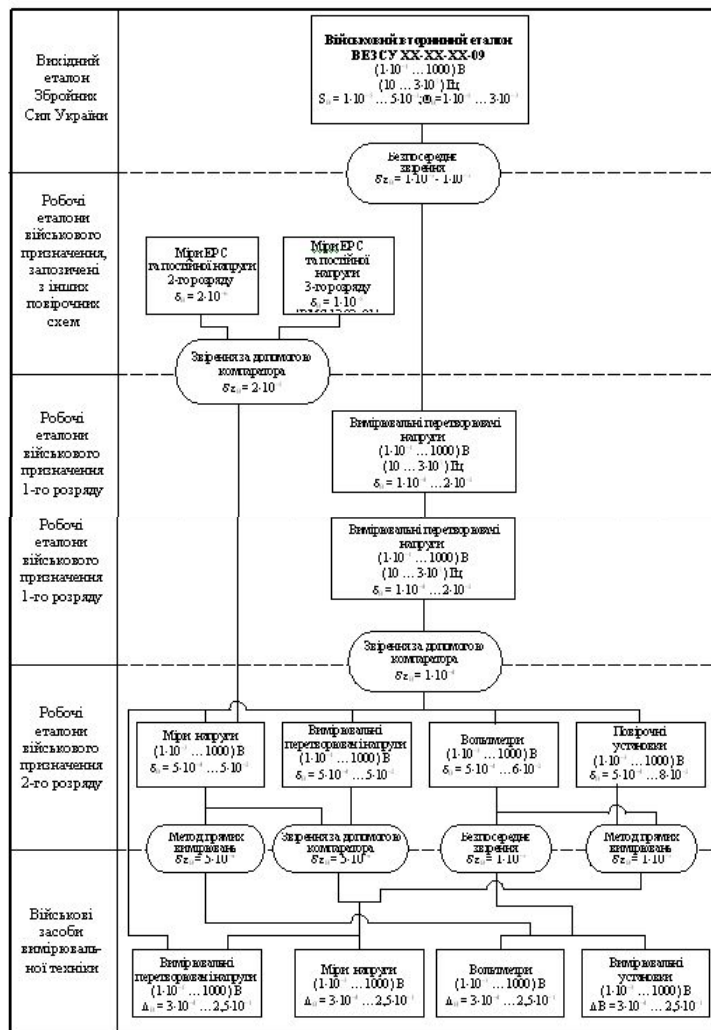
ТермоЭДС $E_{\text{пов.}}$ = В; $E_{\text{обр.}}$ = В

$U_{\text{вх. ПНТЭ}}$ = В; $U_{\text{к. (код)}}$ = В

Візуалізація даних вимірювання та графіку різниці частотних похибок





Військова метрологічна схема передавання розміру одиниці електричної напруги від 0,1 В до 1000 В змінного струму в діапазоні частот від 10 Гц до 30 МГц




Вольт-частотні площі еталону «Батуметр» та державних еталонів України

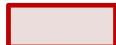
Напруга, В	Частота										
	10 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц	10 МГц	30 МГц	1 ГГц			
0.001											
0,003											
0,01			Еталон «Батуметр»								
0,03											
0,1		Державний еталон України									
0,3											
0,5											
1											
2											
4											
8											
16											
32											
50											
100											
300											
500											
1000											

-  - еталон «Батуметр»
-  - ДЕ України

Вольт-частотні площі еталону «Батуметр» та національних еталонів США

Напруга, В	Частота								
	10 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц	10 МГц	30 МГц	1 ГГц	
0.001	Еталон «Батуметр»					Еталон «Батуметр»			
0,003	Еталон «Батуметр»					Еталон «Батуметр»			
0,01	Еталон «Батуметр»					Еталон «Батуметр»			
0,03	Еталон «Батуметр»					Еталон «Батуметр»			
0,1	Еталон «Батуметр»					Еталон «Батуметр»		НЕ США	
0,3	Еталон «Батуметр»					Еталон «Батуметр»		НЕ США	
0,5	Еталон «Батуметр»					Еталон «Батуметр»		НЕ США	
1	NIST (США)					Еталон «Батуметр»		НЕ США	
2	NIST (США)					Еталон «Батуметр»			
4	NIST (США)					Еталон «Батуметр»			
8	NIST (США)					Еталон «Батуметр»			
16	NIST (США)					Еталон «Батуметр»			
32	NIST (США)					Еталон «Батуметр»			
50	NIST (США)					Еталон «Батуметр»			
100	NIST (США)					Еталон «Батуметр»			
300	NIST (США)					Еталон «Батуметр»			
500	NIST (США)					Еталон «Батуметр»			
1000	NIST (США)					Еталон «Батуметр»			


 - еталон «Батуметр»

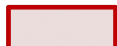
 - НЕ США

Вольт-частотні площі еталону «Батуметр» та національних еталонів ФРН

Напруга, В	Частота								
	10 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц	10 МГц	30 МГц	1 ГГц	
0,001									
0,003									
0,01			Еталон «Батуметр»						
0,03									
0,1									
0,3									
0,5									
1									
2									
4									
8									
16									
32									
50									
100									
300									
500									
1000									

РТВ (ФРН)

 - еталон «Батуметр»

 - НЕ ФРН

Вольт-частотні площі еталону «Батуметр» та державних еталонів РФ


Напруга, В	Частота							
	10 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц	10 МГц	30 МГц	3 ГГц
0.001	Еталон «Батуметр»							
0,003								
0,01								
0,03								
0,1	ВНИИМ (РФ)							
0,3								
0,5								
1								
2								
4								
8								
16								
32								
50								
100								
300								
500								
1000								

 - еталон «Батуметр»

 - НЕ РФ

Вольт-частотні площі еталону «Батуметр» та державних еталонів Білорусі



Напруга, В	Частота							
	10 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц	10 МГц	30 МГц	2 ГГц
0.001								
0,003			Еталон «Батуметр»					
0,01	БелГИМ (Білорусь)							
0,03								
0,1								
0,3								
0,5								
1								
2								
4								
8								
16								
32								
50								
100								
300								
500								
1000								

 - еталон «Батуметр»

 - ДЕ Білорусі

Вольт-частотні площі еталону «Батуметр» та еталонів виробництва фірми HOLT

Напруга, В	Частота							
	10 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц	10 МГц	30 МГц	1 ГГц
0.001								
0,003								
0,01			Еталон «Батуметр»					
0,03								
0,1								
0,3								
0,5								
1								
2								
4								
8								
16								
32								
50								
100								
300								
500								
1000								

-  - еталон «Батуметр»
-  - еталони фірми HOLT

Порівняльна таблиця похибок за ТТЗ та за результатами атестації

Напруга, В	Вид похибки	Значення відносних похибок в ррм на частотах						
		10 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц	10 МГц	30 МГц
0,5	$S_{ТТЗ}$	100	50	50	50	200	500	1000
	S_A	8,0	2,2	5,1	7,1	24,0	15,0	12,0
1	$S_{ТТЗ}$	100	50	50	50	200	500	750
	S_A	12,0	4,7	2,7	5,6	21,0	15,0	10,0
2	$S_{ТТЗ}$	100	50	50	50	200	500	750
	S_A	5,5	2,3	1,7	4,2	19,0	6,0	16,0
4	$S_{ТТЗ}$	100	50	50	50	200	300	750
	S_A	6,5	2,6	3,5	4,1	19,0	11,0	7,0
8	$S_{ТТЗ}$	100	50	50	50	200	300	750
	S_A	5,5	3,4	2,4	4,6	21,0	5,0	17,0
16	$S_{ТТЗ}$	100	50	50	100	200	500	1000
	S_A	9,2	6,2	1,5	7,7	24,0	13,0	23,0
32	$S_{ТТЗ}$	100	50	50	100	200	500	1000
	S_A	15,0	13,0	4,1	76,0	27,0	14,0	24,0
50	$S_{ТТЗ}$	100	50	50	100	1000	*	*
	S_A	15,0	6,1	6,0	11,0	28,0	*	*
100	$S_{ТТЗ}$	100	50	50	100	1000	*	*
	S_A	17,0	8,3	6,1	13,0	14,6	*	*
300	$S_{ТТЗ}$	100	50	50	100	*	*	*
	S_A	21,0	4,2	3,6	37,0	*	*	*
500	$S_{ТТЗ}$	100	50	50	1000	*	*	*
	S_A	28,0	4,0	6,9	38,0	*	*	*
1000	$S_{ТТЗ}$	100	50	100	100	*	*	*
	S_A	32,0	12,0	12,0	39,0	*	*	*

$S_{ТТЗ}$ – похибки за ТТЗ

S_A – похибки за результатами атестації

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
БЮРО КОДИФІКАЦІЇ У ВІЙСЬКОВІЙ СФЕРІ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ



СВДОЦТВО

про ідентифікацію виробника (постачальника) продукції
для Збройних Сил України № 175

Видане НАЦІОНАЛЬНОМУ ТЕХНІЧНОМУ УНІВЕРСИТЕТУ
УКРАЇНИ «Київський політехнічний інститут»

НТУУ «КПІ»

(повне та скорочене найменування виробника /постачальника)

02070921

(ідентифікаційний код юридичної особи)

яке розташоване за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, про те, що
зазначений суб'єкт підприємницької діяльності України є виробником
(постачальником) продукції для потреб Збройних Сил України.

Виробнику (постачальнику) призначено:

код NCAGE **A481J**

“23” листопада 2009 р.

код SCAGE _____

“__” _____ 200_ р.

Начальник Бюро кодифікації у військовій
сфері Збройних Сил України



(посада)

(підпис)

М.П. ЗАЙЧЕНКО

(ініціали, прізвище)

М.П.

Примітка. Виробник (постачальник) шороку до 1 грудня зобов'язується подати (надіслати
рекомендованим листом) до Бюро кодифікації у військовій сфері Збройних Сил України всі документи про
підтвердження відомостей про суб'єкта підприємницької діяльності України та зміни (за наявності) до переліку
продукції, яка ним постачається.

Еталони довжини

- 1 Державний первинний еталон одиниці довжини
- 2 Вторинний еталон – інтерференційна установка для штрихових мір в діапазоні від 1 мкм до 0,2 м
- 3 Вторинний еталон – інтерференційна установка для повірки вимірювальних кілець в діапазоні від 1 до 100 мм.
- 4 Вторинний еталон одиниці довжини для вимірювання плоскопаралельних кінцевих мір довжини в діапазоні від 100 мкм до 0,1 м.
- 5 Вторинний еталон одиниці довжини в діапазоні від 1 м до 50 м.
- 6 Вторинний еталон одиниці довжини в діапазоні від 24 м до 1 км.
- 7 Державний еталон одиниці довжини в області вимірювань параметрів шорсткості в діапазоні від 25 нм до 1,6 мм.
- 8 Державний еталон одиниці довжини в області зубчатих зачеплень та кута нахилу лінії зуба.
- 9 Державний еталон одиниці довжини в області вимірювань прямолінійності та площинності.
- 10 Еталон одиниці довжини в діапазоні від 10 нм до 10 мкм.

Державний первинний еталон одиниці довжини



Державний еталон довжини є еталоном основної одиниці фізичної величини метра. З ним пов'язані державні еталони відповідних одиниць.

Згідно ДСТУ 3741-98 передача розміру одиниці довжини передається усім робочим еталонам та засобам вимірювальної техніки.

Діапазон значень довжини, у якому відтворюється та передається одиниця довжини, становить від 1 мкм до 1 м.

Еталон забезпечує відтворення одиниці довжини з середнім квадратичним відхиленням результату вимірювань, яке не перевищує $2,5 \cdot 10^{-11}$.

- Невилучена систематична похибка не перевищує $1,2 \cdot 10^{-11}$.

- Нестабільність еталона за рік становить $7 \cdot 10^{-12}$.

Державний первинний еталон одиниці довжини створений для забезпечення відтворення, зберігання та передавання одиниці довжини - метра. Еталон застосовується у відповідності з державною повірочною схемою для засобів вимірювання довжини для забезпечення єдності вимірювань у різних галузях народного господарства, науки та техніки України.

В даний час державний еталон одиниці довжини проходить модернізацію, зокрема механіки та електроніки, а так же актуалізацію повірочної схеми 3741-98 шляхом розширення дії в області нанодіапазона.

Пройде оновлення ДСТУ 3741-98 з раніше розробленими ГОСТом 8053-84 в великі довжини.

Вторинний еталон – інтерференційна установка для штрихових мір в діапазоні від 1 мкм до 0,2 м



Вторинний еталон забезпечує передачу розміру одиниці довжини від первинного еталона мірам довжини (скляним та металевим) – робочим еталонам 1 розряду у діапазоні від 10 мкм до 0,2 м методом прямих вимірювань.

Метрологічні характеристики еталона:

середнє квадратичне відхилення результату вимірювань не перевищує $(0,01 + 0,04L)$ мкм, L – номінальна довжина міри в метрах.

Вторинний еталон – інтерференційна установка для повірки вимірювальних кілець в діапазоні від 1 до 100 мм



Вторинний еталон забезпечує передачу розміру одиниці довжини від первинного еталона вимірювальним кільцям – робочим еталонам 1 розряду методом прямих вимірювань у діапазоні від 1 до 100 мм.

Сумарна відносна невизначеність вимірювань не перевищує 1×10^{-7} .

Невилучена систематична похибка $5,07 \times 10^{-8}$.

Еталон застосовується у відповідності з державною повірочною схемою для засобів вимірювань діаметрів отворів, що забезпечує єдність вимірювань у територіальних органах, промисловості та у науці.

Вторинний еталон одиниці довжини для вимірювання плоскопаралельних кінцевих мір довжини в діапазоні від 100 мкм до 0,1 м



Еталон – копія - інтерференційна установка призначена для повірки плоскопаралельних кінцевих мір довжини у довжинах хвиль у діапазоні від 100 мкм до 100 мм.

Існуючий у теперішній час парк засобів вимірювань кінцевих мір довжини, який знаходиться в експлуатації в територіальних органах Держспоживстандарту та на промислових підприємствах різноманітний по номенклатурі і досить великий за кількістю. Так лише у територіальних органах Держспоживстандарту використовується у повірочній практиці більш 4000 одиниць повірочного обладнання різного рівня точності. При цьому робочих еталонів 1-го розряду налічується більш ніж 300 одиниць.

Середнє квадратичне відхилення результату звірень еталона-копії з Державним первинним еталоном одиниці довжини ДЕГУ 01-03-98 не перевищує $9,4 \cdot 10^{-9}$, невилучена систематична похибка складає $8,9 \cdot 10^{-9}$.

Вторинний еталон одиниці довжини в діапазоні від 1 м до 50 м

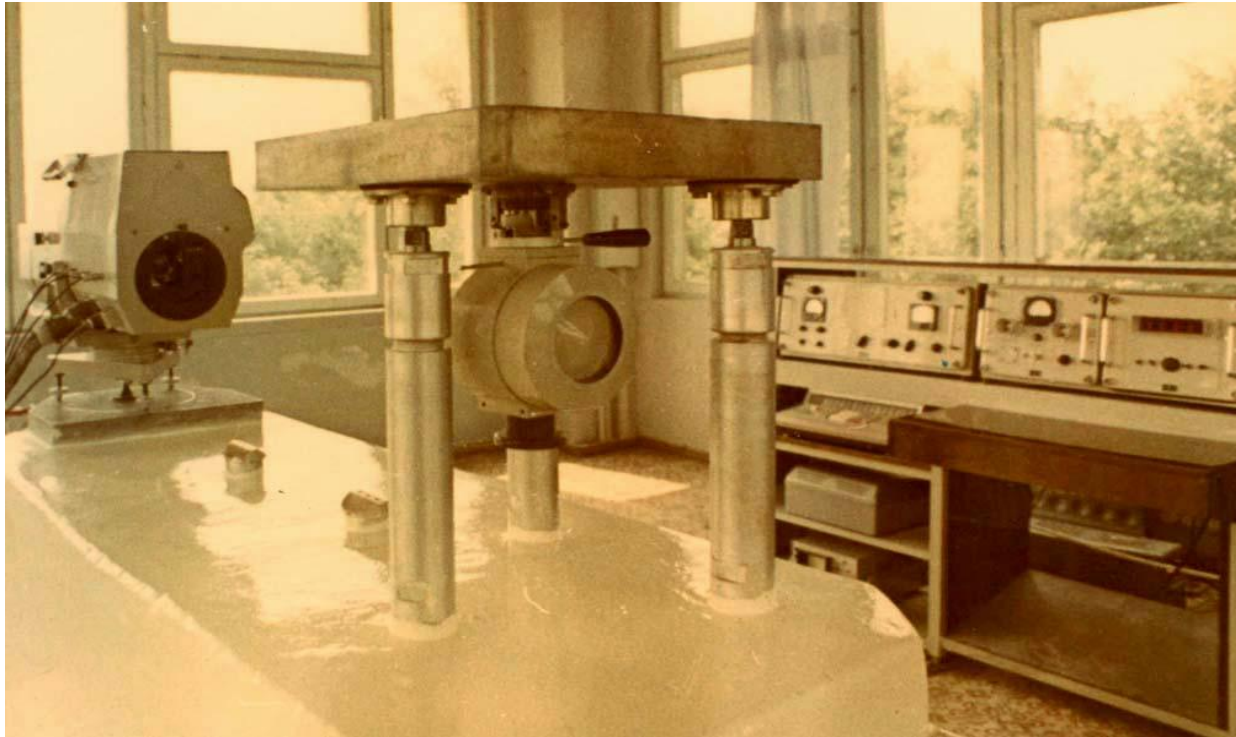


Середньоквадратичне відхилення результату вимірювань при звірненні еталона з державним $(0,08+0,2L)$ мкм.

Вторинний еталон для відтворення одиниці довжини у діапазоні від 1 м до 50 м (ВЕТУ 01-03-05-98) входить до складу Національного лінійно-геодезичного полігону ННЦ “Інститут метрології”, який є метрологічною базою України з передачі розміру одиниці довжини в область великих довжин.

На вторинному еталоні для відтворення одиниці довжини проводяться роботи по повірці та метрологічній атестації вимірювальних стрічок 2-го розряду, штрихових мір довжини, вимірювальних рулеток, землемірних стрічок, вимірювачів лінійних переміщень, інших засобів вимірювання довжини, а також при комплексній повірці та атестації світловіддалемірів та тахеометрів (м. Харків, Львів, Донецьк, Запоріжжя, Дніпропетровськ). Крім того на вторинному еталоні ВЕТУ 01-03-05-98 також проводяться за наказами Держспоживстандарту державні приймальні та контрольні випробування різноманітних засобів вимірювальної техніки (інтерферометрів, тахеометрів, ін.)

Вторинний еталон одиниці довжини в діапазоні від 24 м до 1 км



Номер за реєстром ВЕТУ 01-03-02-98.

Діапазон значень довжини, що зберігається еталоном від 24 до 1000 м.

Середньоквадратичне відхилення результату вимірювань еталона $(0,1 + 5 \cdot 10^{-7}L)$ мм.

Мобільний еталонний лазерний далекомір, що входить до складу еталона і не має аналогів у світі, надає можливість передавати значення одиниці довжини зразковим лінійним базисам, розміщеним по всій території України, з інструментальною похибкою вимірювання 0,1 мм.

Принцип роботи заснований на синхронному вимірі номінальної довжини польового компаратора зразковим та повіряємим далекомірами з одночасним вимірюванням метеопараметрів для урахування середньоінтегрального показника заломлення.

В останні роки, у зв'язку з будівництвом складних інженерних споруд, в авіаційній та корабельно-будівній промисловості, в трубобудівництві, маркшедерії, при будівництві Державних геодезичних мереж, в Чорнобилі та ряді інших галузей, різко підвищились вимоги до точності лінійних вимірювань. При цьому, основним засобом, що дозволяє виконувати точні вимірювання довжин в цій галузі стали лазерні інтерферометри, нівеліри та тахеометри.

Державний еталон одиниці довжини в області вимірювань параметрів шорсткості в діапазоні від 25 нм до 1,6 мм



Номер за реєстром ДЕТУ 01-04-07.

Середнє квадратичне відхилення результату вимірювання:

- $S=3$ нм в діапазоні від 25 нм до 1,0 мкм включно. Невилучена систематична похибка 4 нм;
- $S=20$ нм в діапазоні від 1,0 мкм до 1600 мкм включно. Невилучена систематична похибка 40 нм.

Якість обробки поверхонь впливає на показники продукції, що пов'язані з втратами енергії, та на собівартість виробів машинобудування. Параметри шорсткості є показниками якості обробки поверхні.

Державний первинний еталон одиниці довжини для вимірювань параметрів шорсткості є найвищою ланкою системи забезпечення єдності геометричних вимірювань що до параметрів шорсткості. Еталон затверджено 21.05.2007 року наказ №109.

Державний еталон одиниці довжини в області зубчатих зачеплень та кута нахилу лінії зуба



Номер за реєстром ДЕТУ 01-01-96.

Середнє квадратичне відхилення результату вимірювання:

- $S=0,25$ мкм в діапазоні r_0 від 37 до 150 мм включно. Невилучена систематична похибка 0,15 мкм.

Державний первинний еталон одиниці довжини та кута нахилу лінії зуба є міжнародною найвищою ланкою системи забезпечення єдності параметрів евольвентної поверхні.

Державний еталон одиниці довжини в області вимірювань прямолінійності та площинності



Номер за реєстром ДЕТУ 01-02-96.

Фізична величина або діапазон значень фізичної величини, що відтворює еталон - (0 – 10) мкм.

Середньоквадратичне відхилення результату вимірювань - 0,1 Л мкм.

Невилучена систематична похибка - 0,1 Л мкм.

Державний еталон одиниці довжини для відхилень від прямолінійності та площинності призначений для відтворення і зберігання одиниці довжини у галузі вимірювань відхилень від прямолінійності та площинності і передавання розміру одиниці за допомогою вторинних та робочих еталонів робочим засобам вимірювальної техніки, з метою забезпечення єдності вимірювань в Україні.

Еталон одиниці довжини в діапазоні від 10 нм до 10 мкм

Розробка вторинного еталона одиниці довжини в нанометровому діапазоні, який буде базуватися на поєднанні методів зондової мікроскопії та лазерної інтерферометрії, дасть змогу створити в Україні сучасну систему метрологічного забезпечення єдності лінійних вимірювань довжини з включенням нанометрового діапазону, що сприятиме розвитку вітчизняної нанотехнології та nanoіндустрії.

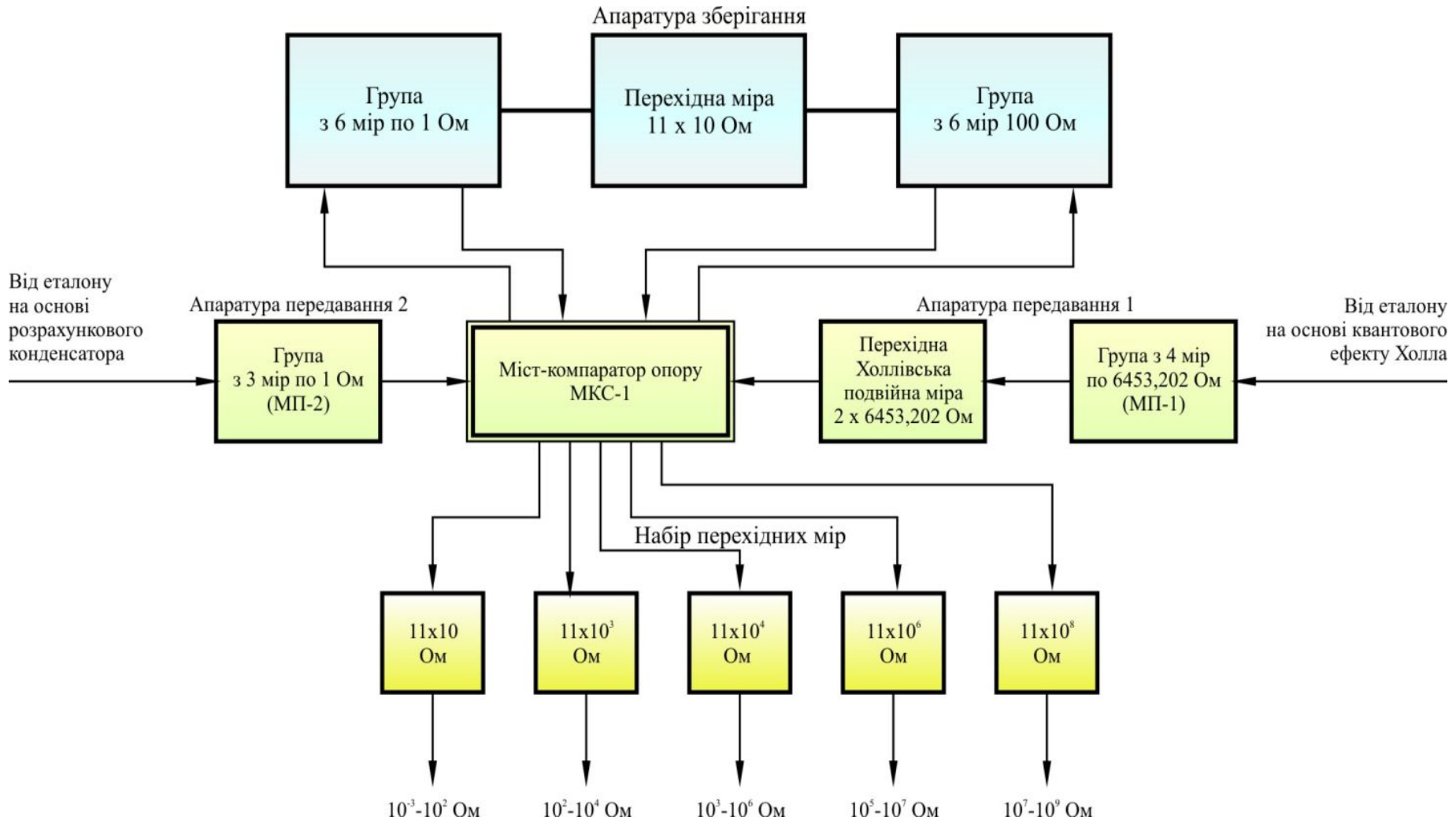
Очікувані метрологічні характеристики еталона: діапазон вимірювань - від 1×10^{-9} до 1×10^{-5} м;

Середньоквадратичне відхилення результату вимірювань - від 5×10^{-10} до 2×10^{-8} м.

Завдання НІОКР «УДОСКОНАЛЕННЯ ДЕРЖАВНОГО ЕТАЛОНА ОДИНИЦІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ»

- ✓ Підвищення метрологічних характеристик і функційних можливостей еталона
- ✓ Доповнення еталона системою *відтворення одиниці* електричного опору
- ✓ Розширення діапазону електричного опору, в який передається розмір одиниці
- ✓ Доповнення еталона сучасними мостами-компараторами опору
- ✓ Модернізація обладнання і інфраструктури еталона

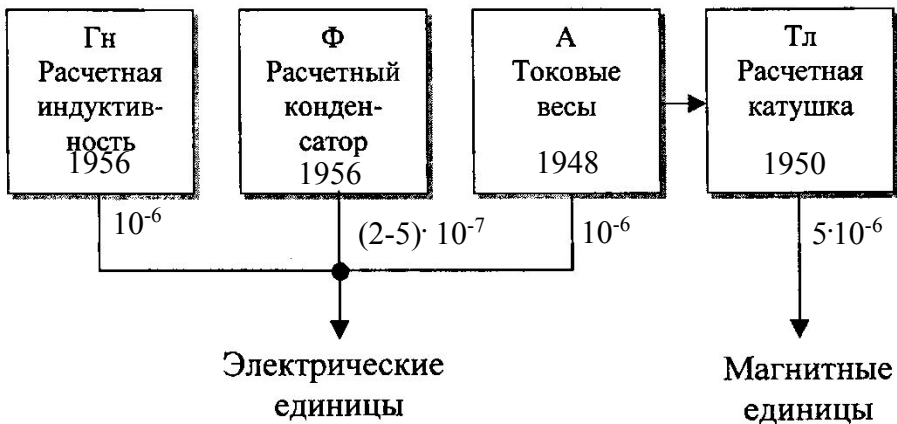
Еталон одиниці електричного опору (перша черга)



Еволюція відтворення електричних одиниць

Через механические измерения (единицы СИ)

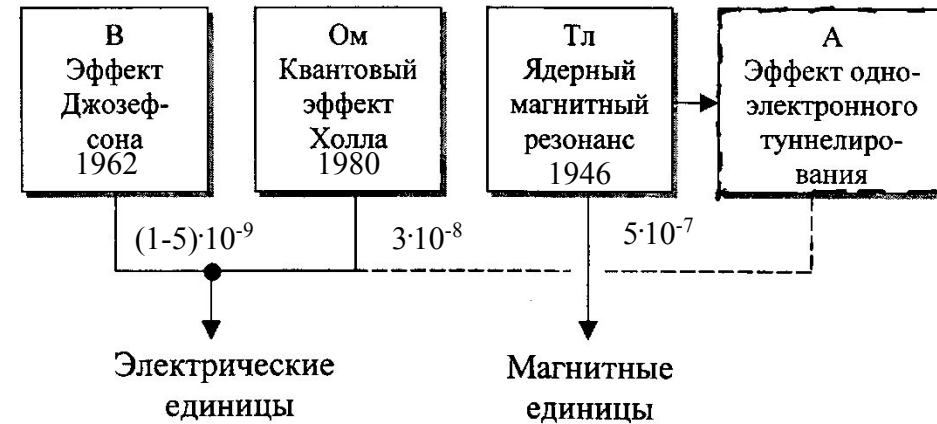
Кг, м, сек, $\mu_0 = \text{Const} = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м



- Минимальные погрешности $(1-5) \cdot 10^{-6}$
- Чрезвычайная трудоемкость
- Ограниченная доступность
- Соответствие СИ

На основе квантовых эффектов и ФФК

$2e/h$, h/e^2 , γ_p , e



- Минимальные погрешности $(5-10) \cdot 10^{-9}$
- Удобство воспроизведения и эксплуатации
- Доступность
- Не полное соответствие СИ ($\mu_0 \neq \text{Const}$), постулирование ФФК

Квантові ефекти

Ефект Джозефсона

$$U_J = n \frac{h}{2e} f_0 \text{ [В]}$$

Квантовий ефект Холла

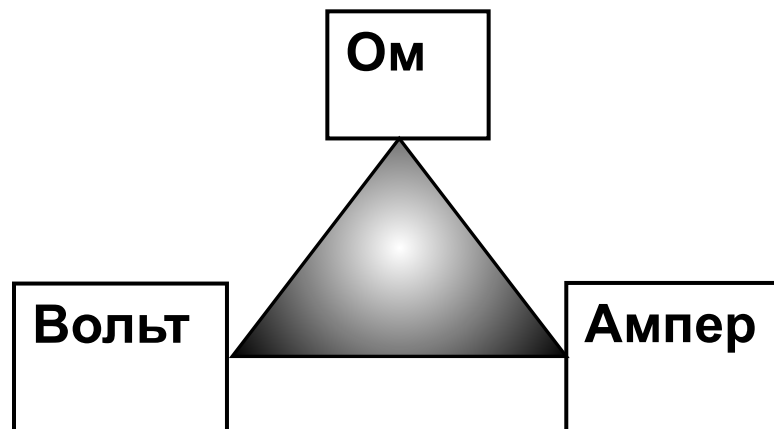
$$R_x = \frac{h}{me^2} \text{ [Ом]}$$

Ядерний магнітний резонанс

$$B = \frac{2\pi f_{\text{ямп}}}{\gamma_p} \text{ [Тл]}$$

Одноелектронне тунелювання

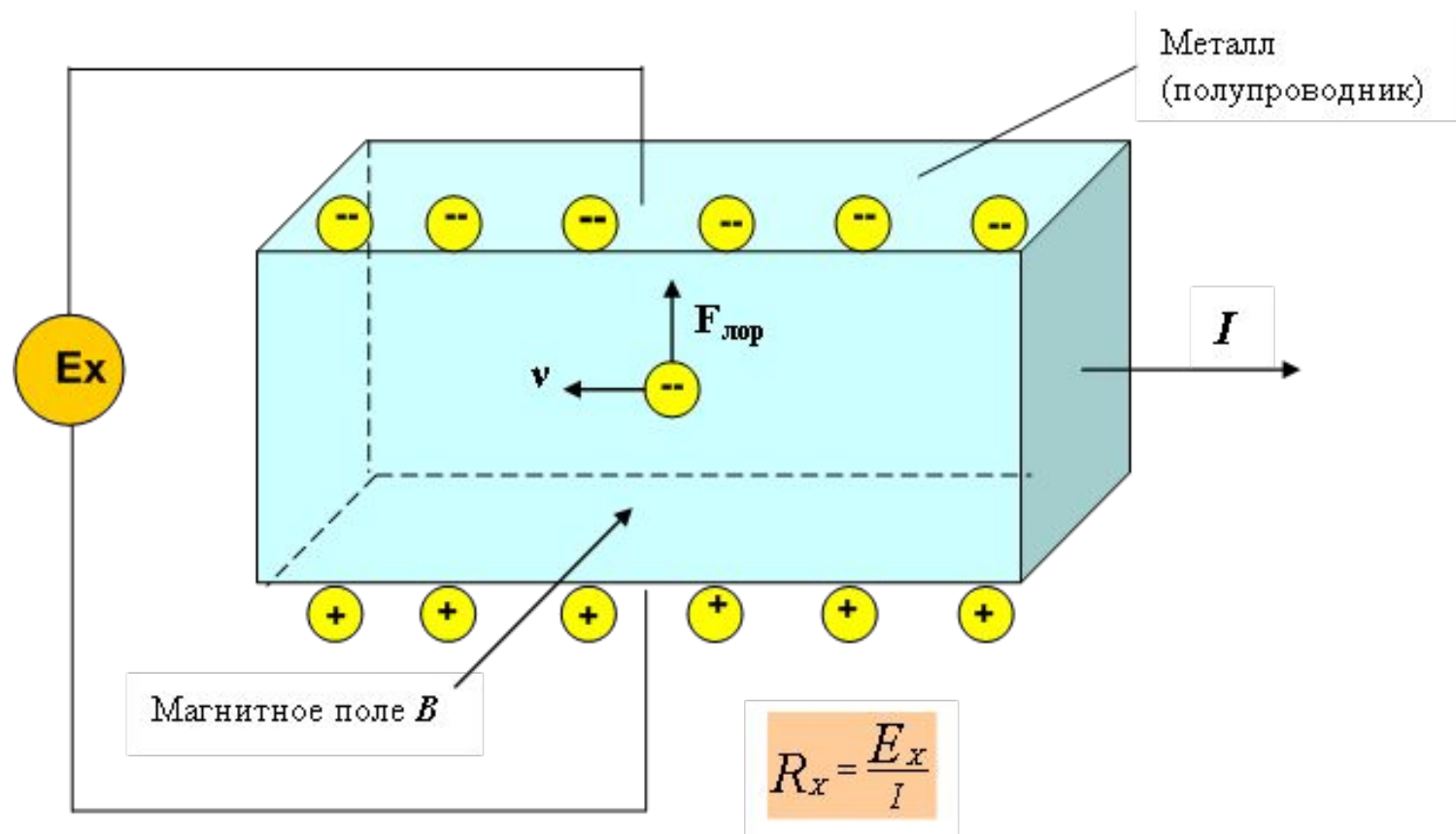
$$I = ef_T \text{ [А]}$$

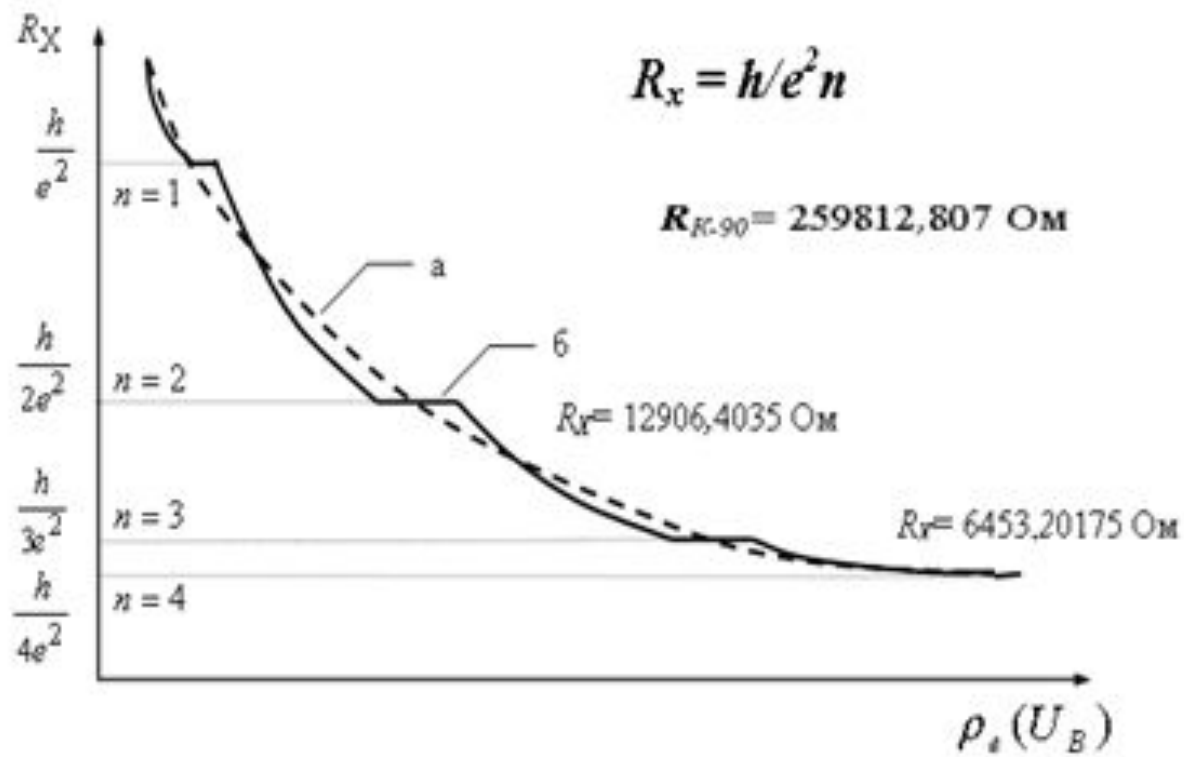


Відтворення вольта, ома і ампера за допомогою квантових ефектів



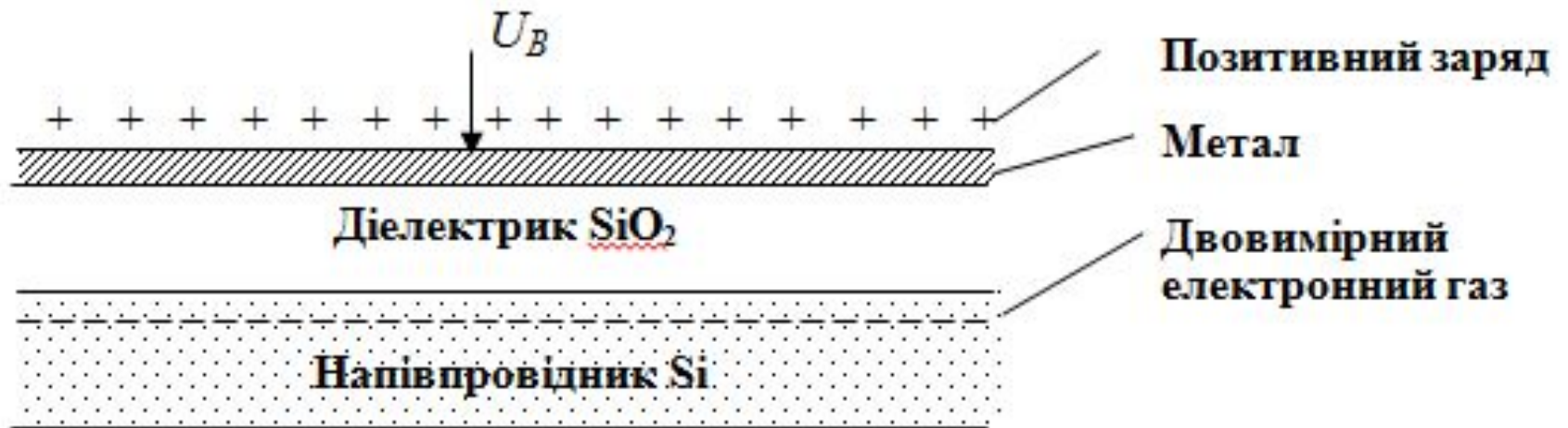
Эффект Холла



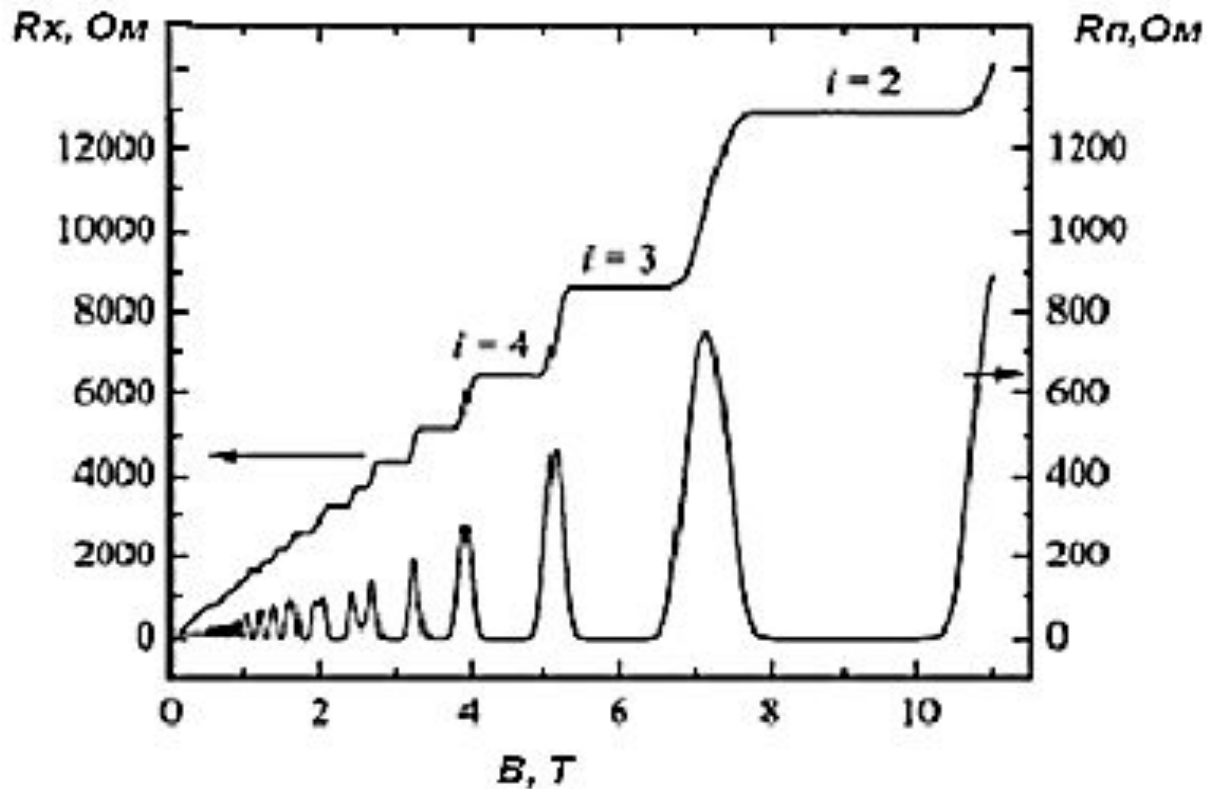


Двовимірна структура

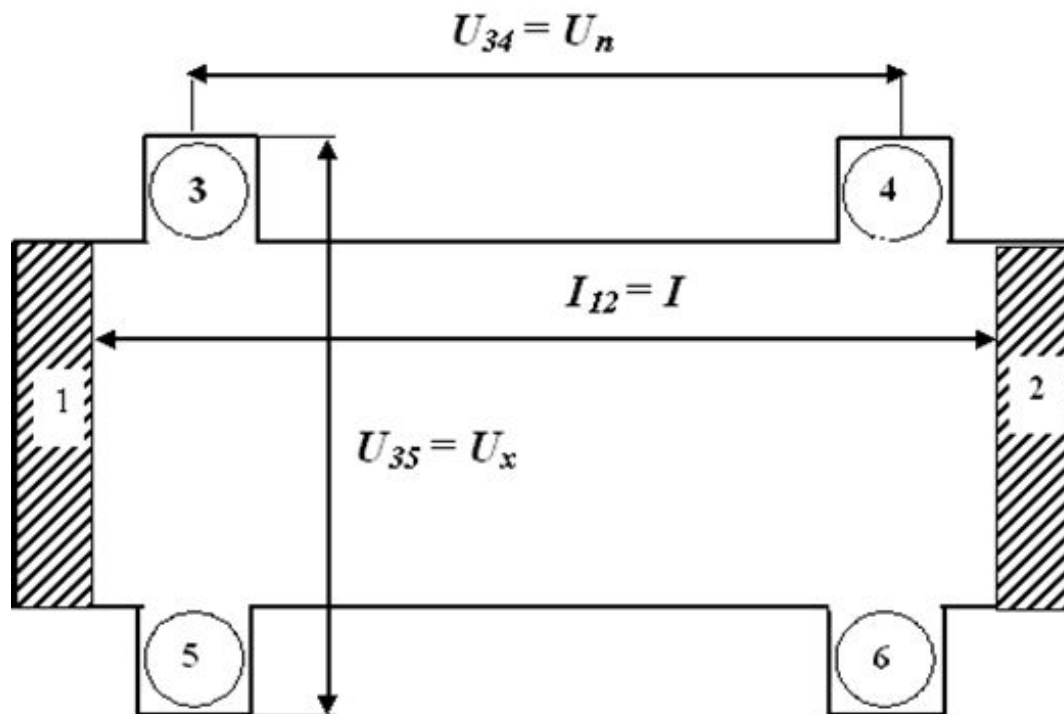
МДН-структура



Залежність холлівського і подовжнього опору від магнітної індукції



Холлівська двовимірна структура



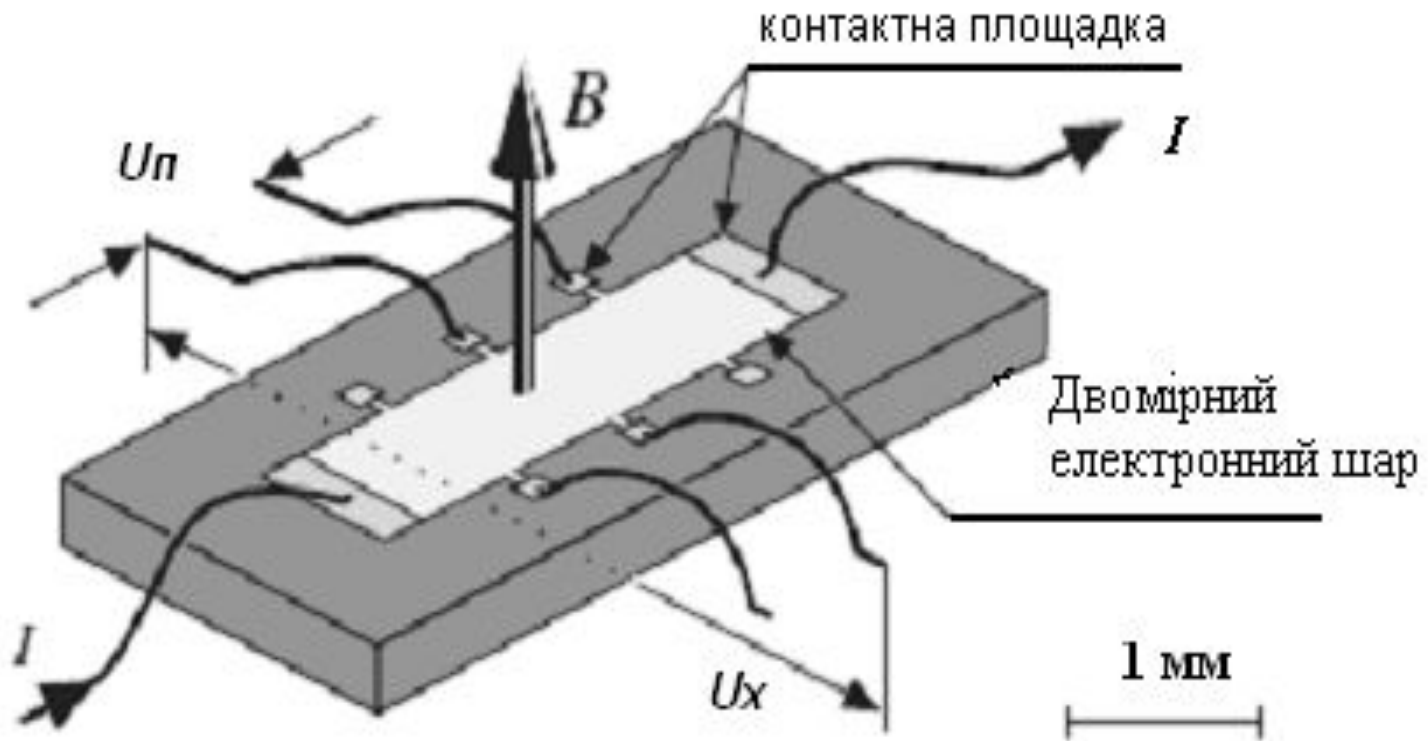
$$R_x = \frac{U_x}{I}$$

$$R_n = \frac{U_n}{I}$$

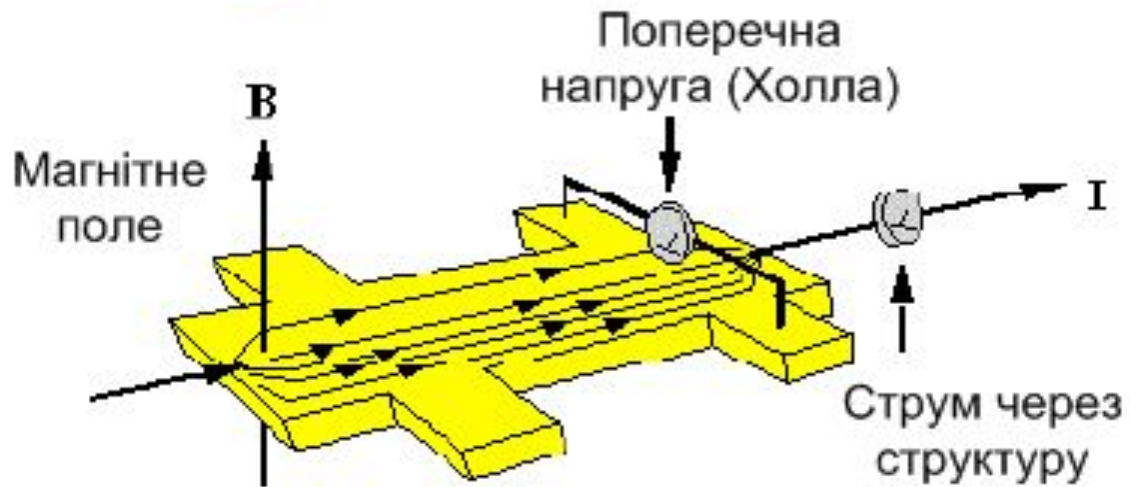
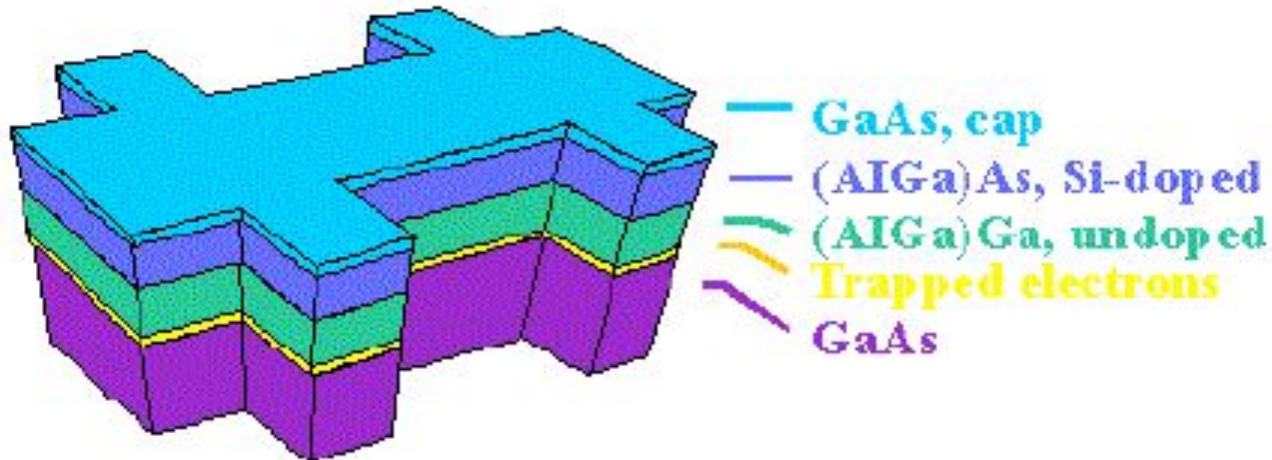
$$U_{35} = U_{46} = U_x$$

$$U_{34} = U_{56} = U_n$$

Холлівська двовимірна структура



Структура Холла



Надпровідний магніт

Соленоїд з обмоткою з надпровідного матеріалу

Умови надпровідності: $T < T_{кр}$, $I < I_{кр}$, $H < H_{кр}$

Стабільне поле, відсутність пульсацій (ефект Мейснера)

Матеріали обмотки: ніобій – цирконій ($T_{к} = 10,5 \text{ K}$)

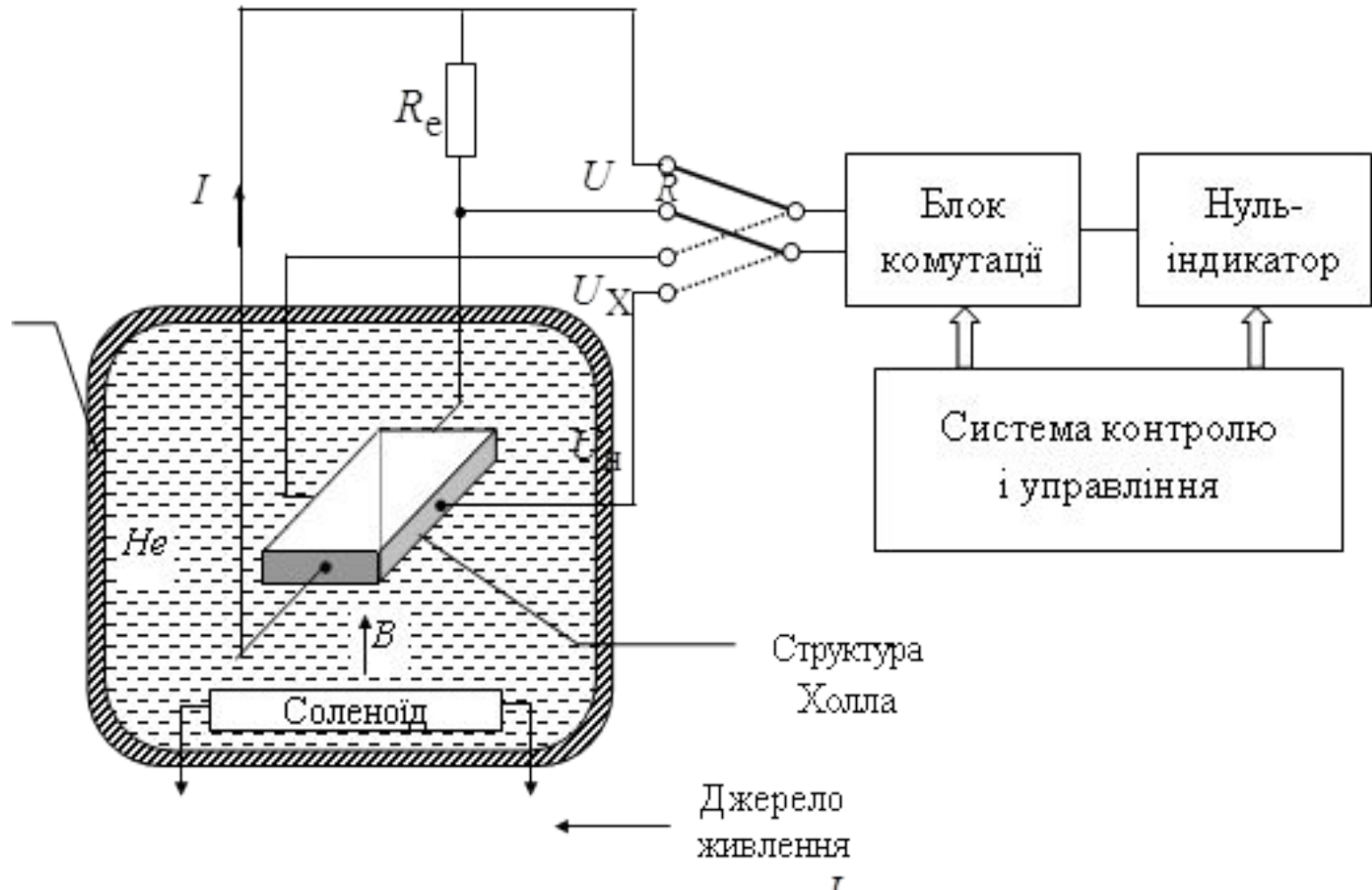
ніобій – титан ($T_{к} = 9,8 \text{ K}$)

ніобій – олово ($T_{к} = 18,1 \text{ K}$)

ніобій – галій ($T_{к} = 14,5 \text{ K}$)

Використання: сильні стабільні магнітні поля

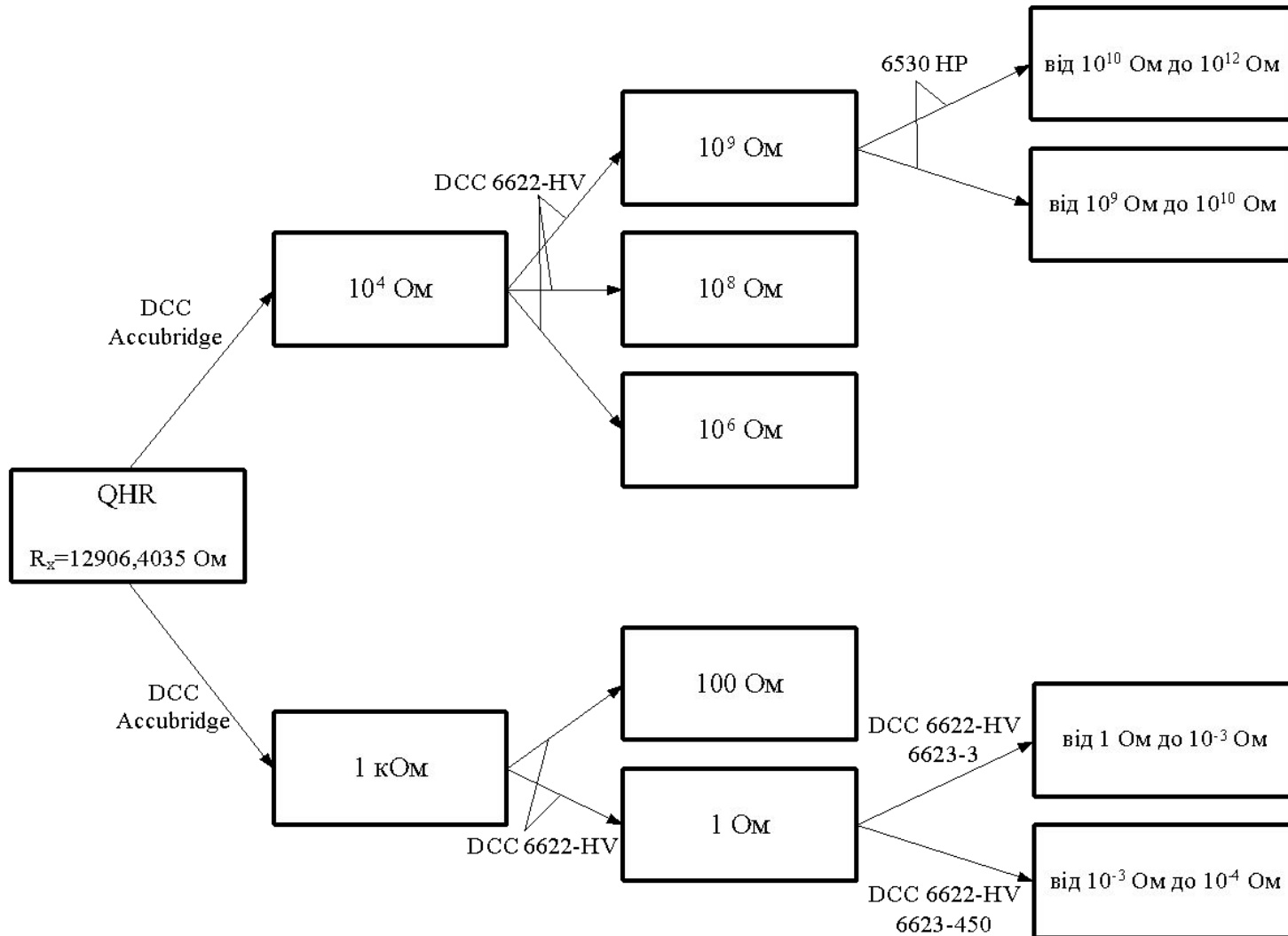
Схема реалізації КЕХ



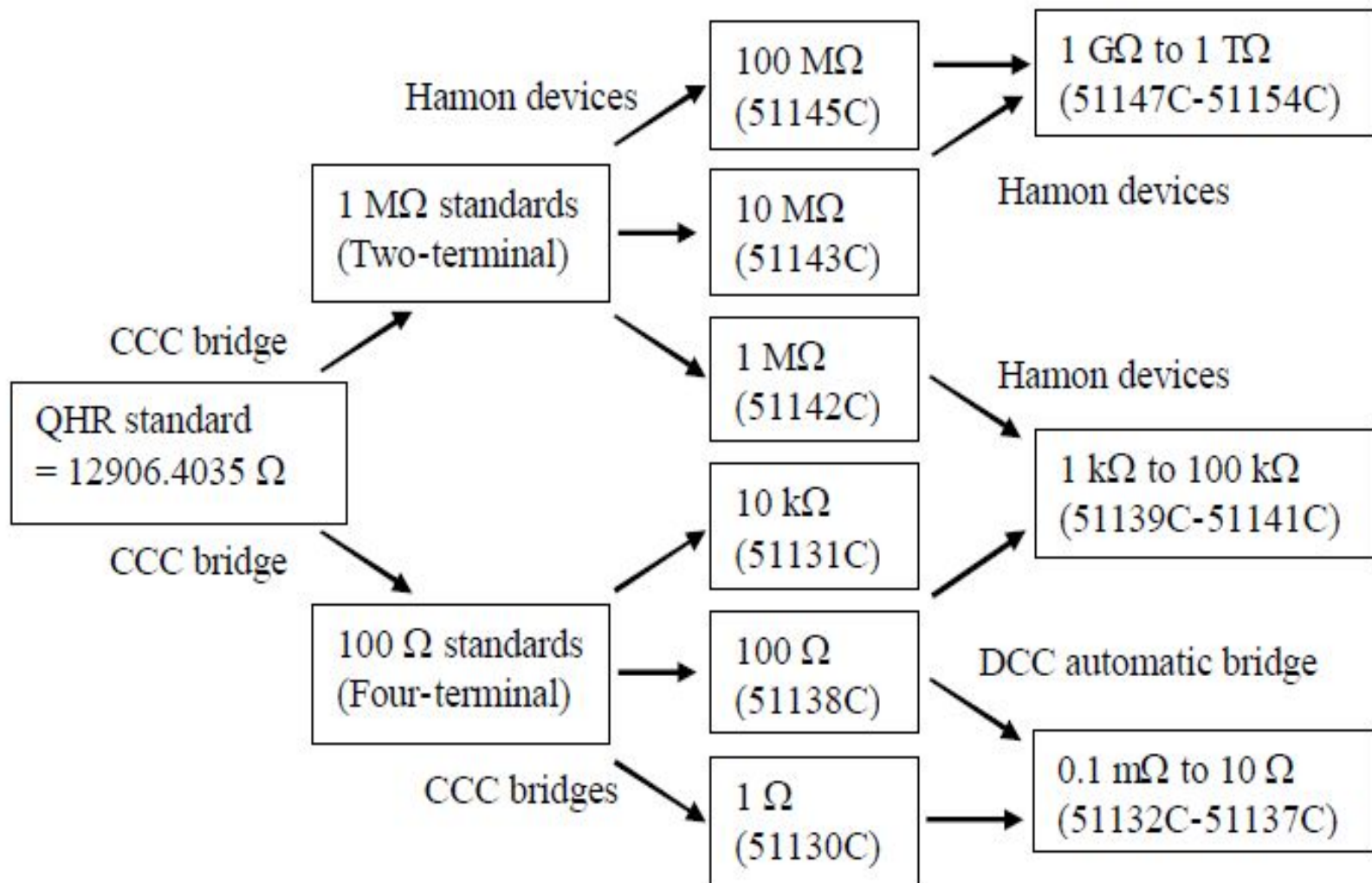
Квантова міра Холла 6800А



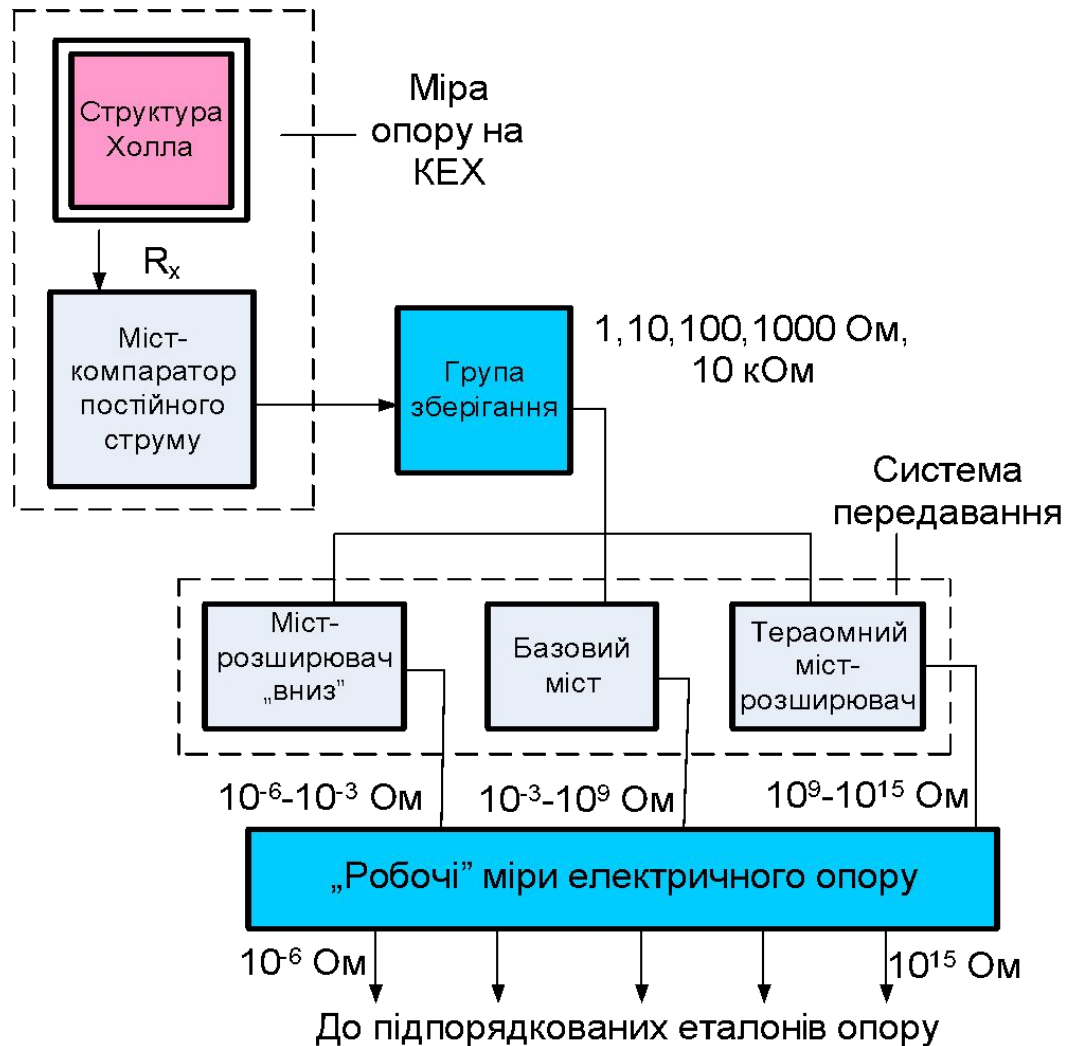
Система передачі одиниці від QHR в діапазон від 10^{-4} Ом до 10^{12} Ом



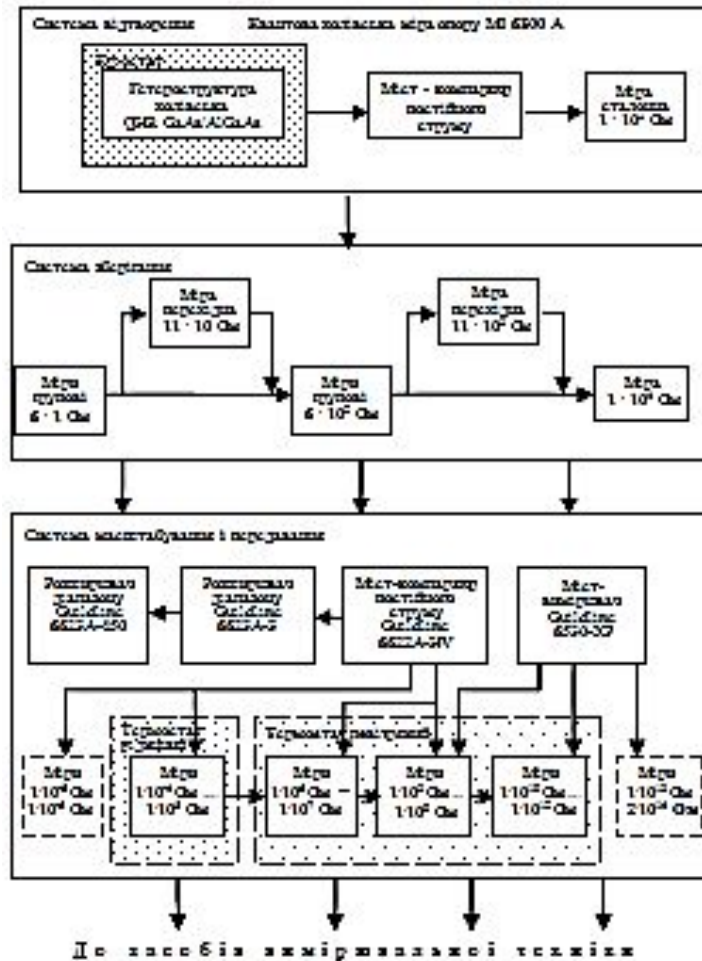
Система передачі одиниці від QHR в NIST (США)



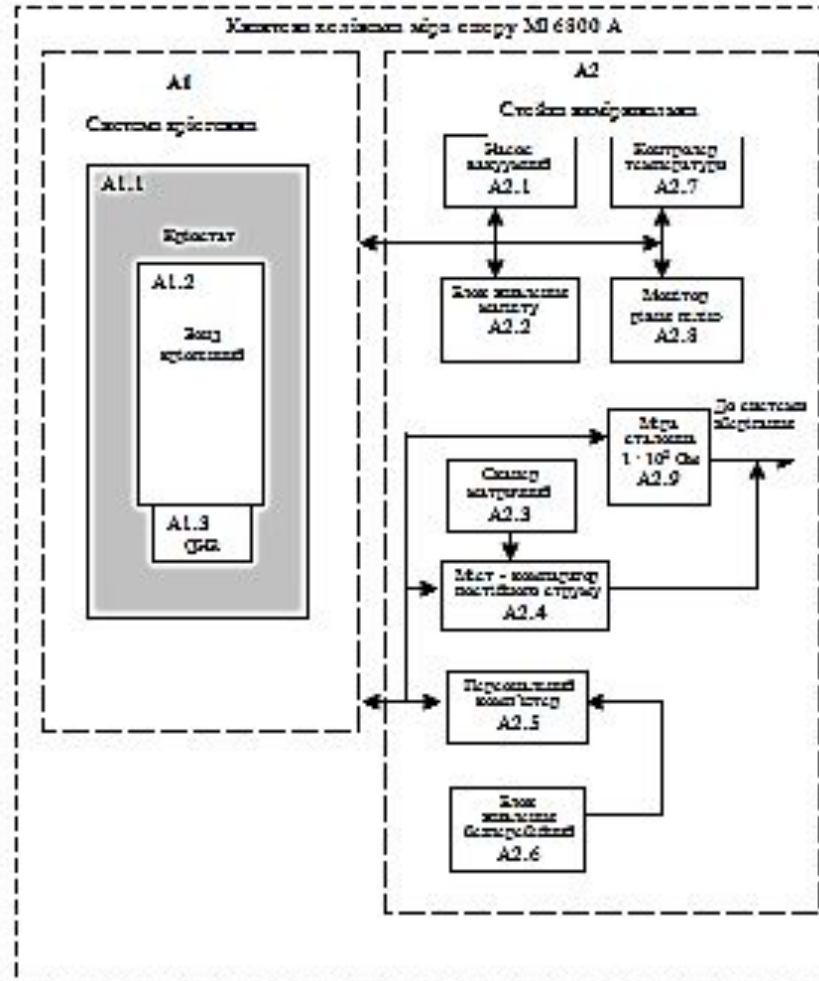
Функційна схема еталона



Структурна схема еталона

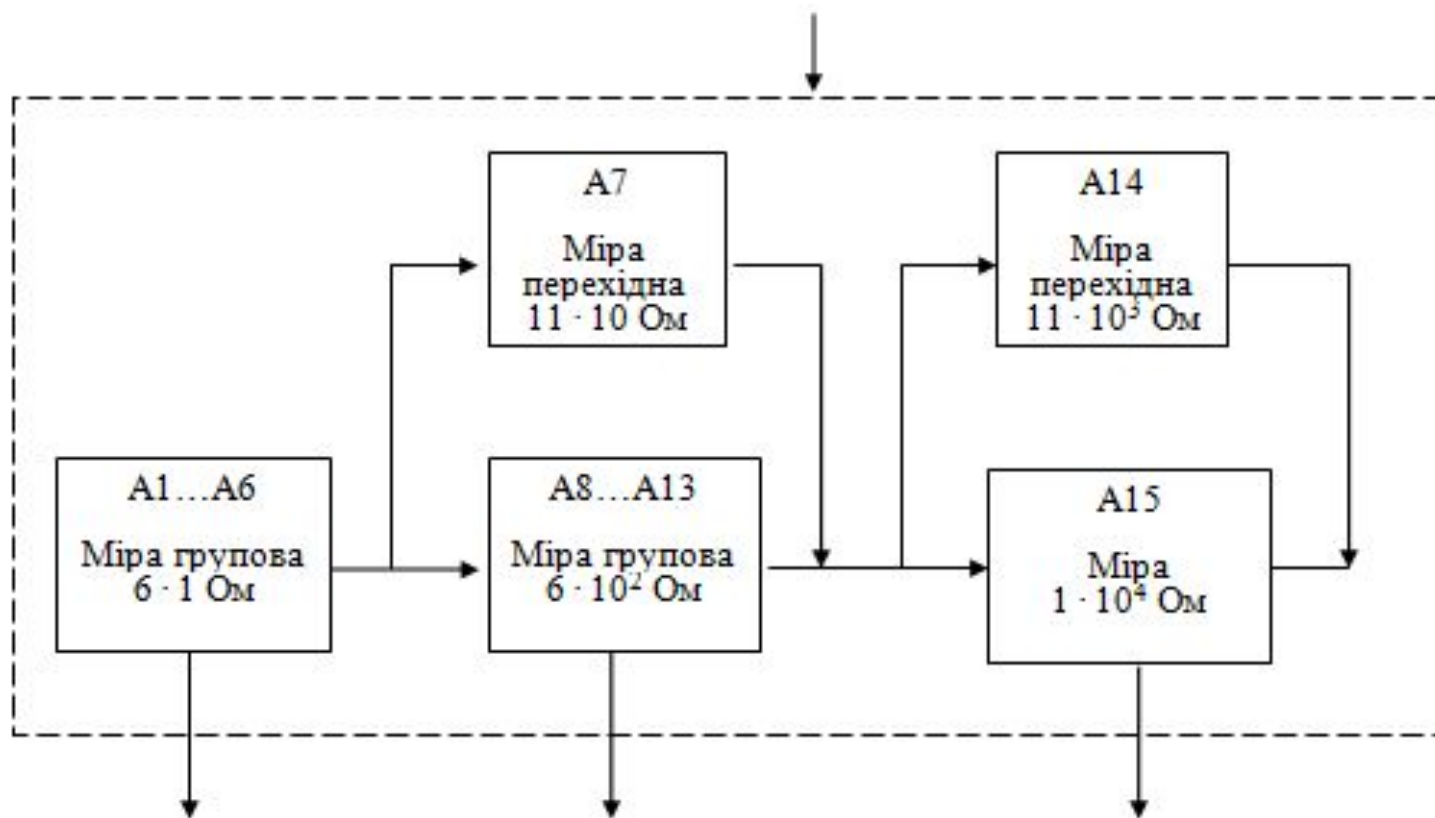


Система відтворення



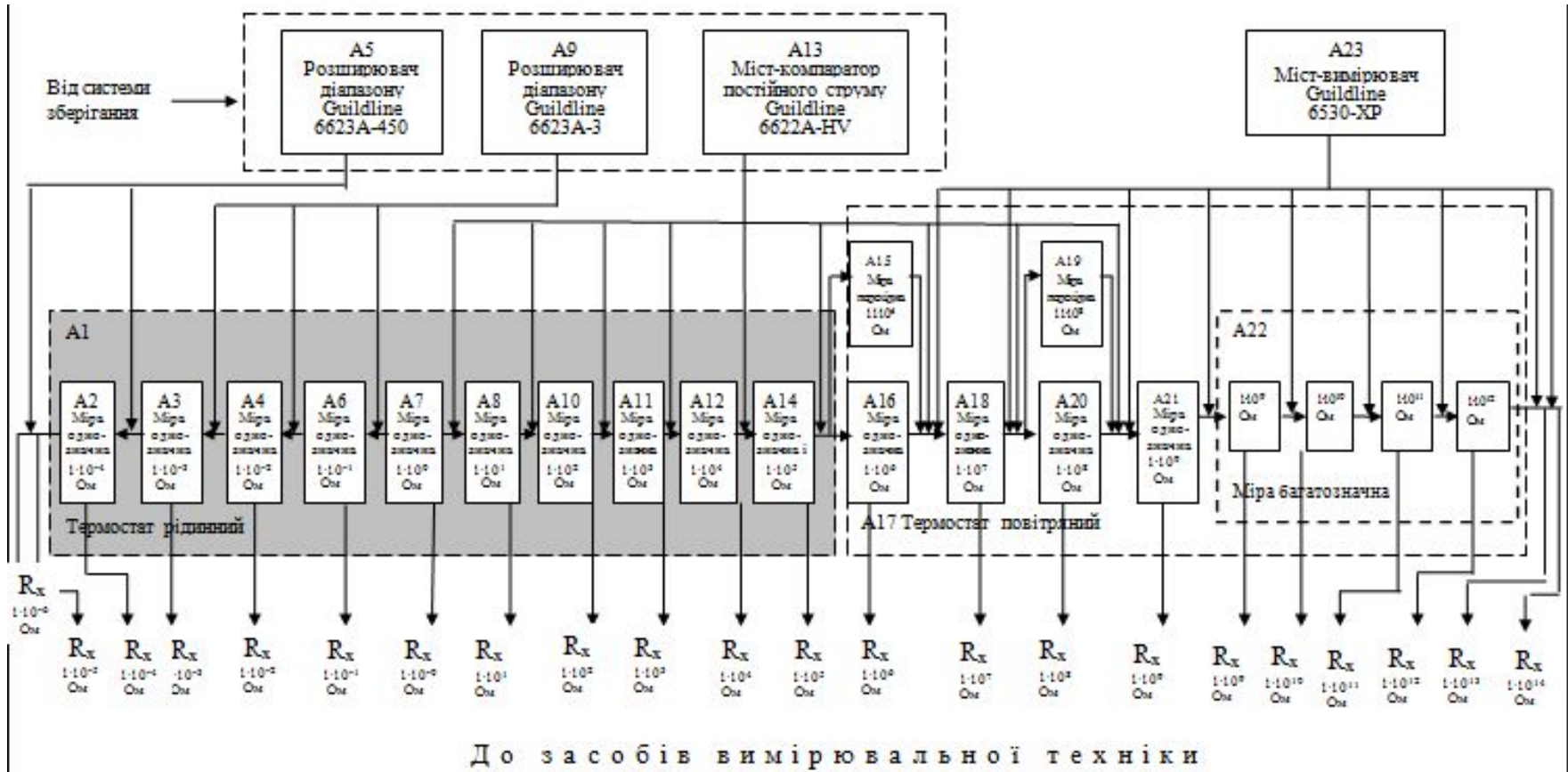
Система зберігання

Від квантової міри Хола 6800 А



До системи масштабування та передавання

Система масштабування і передавання



Кріогенна система

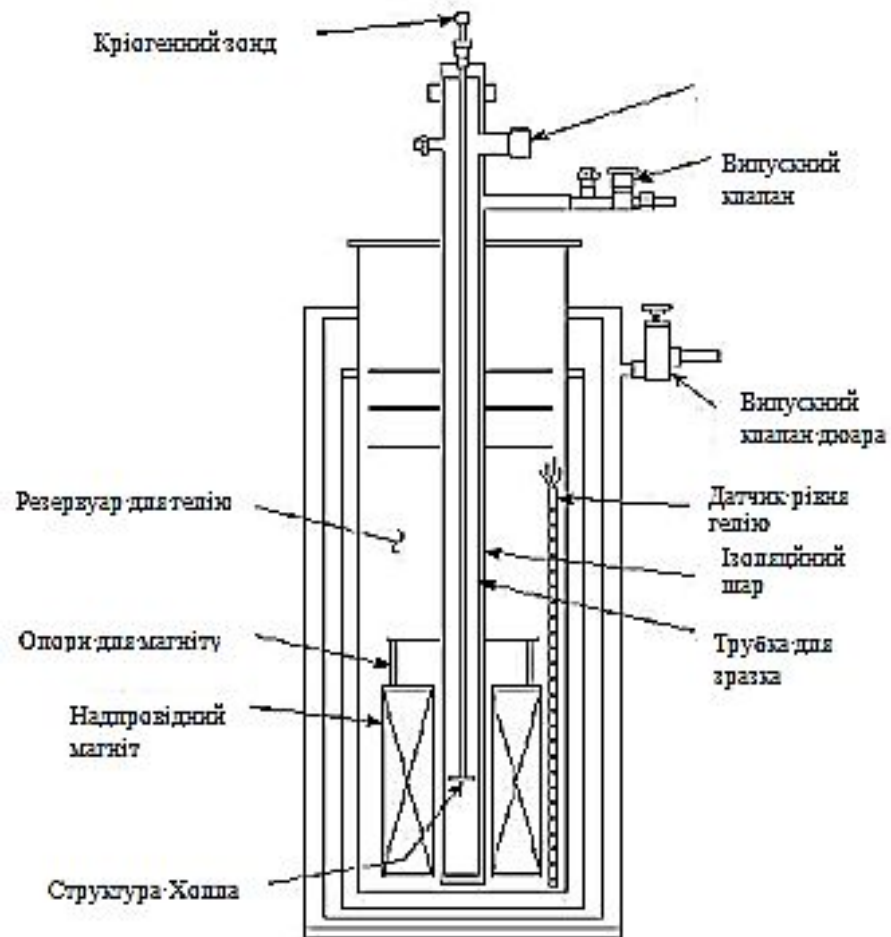
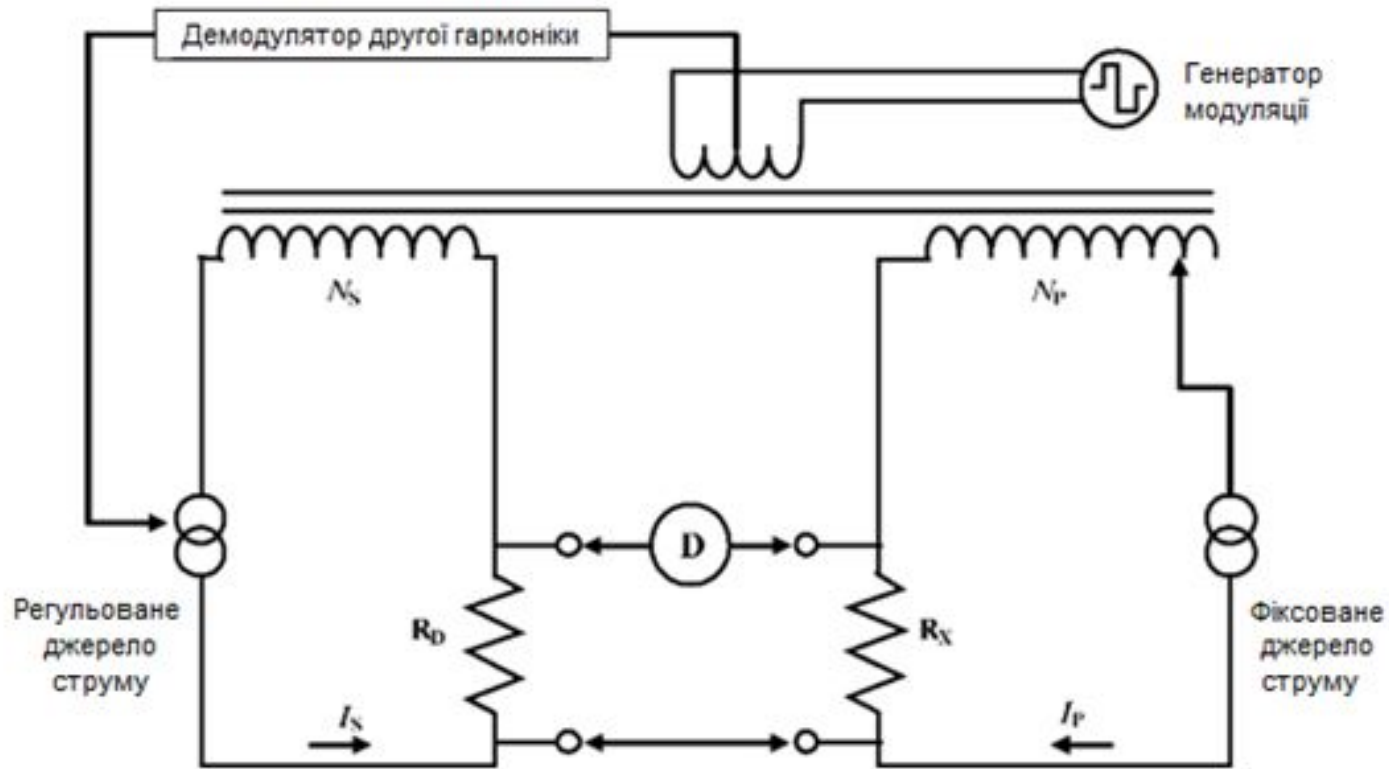


Схема моста EccuBridge



$$R_X = (N_P / N_S) R_D$$

$$R_X = \left(1 + \frac{\Delta N_P}{N'_P} \right) R_S$$

Перелік експериментальних досліджень

- ✓ Передавання «холлівського» розміру ома мірам системи зберігання за допомогою моста Eccubridge.
- ✓ Передавання одиниці від системи зберігання в середньоомний діапазон за допомогою базового моста 6622A-NV.
- ✓ Передавання одиниці від системи зберігання в низькоомний діапазон за допомогою моста 6622A і розширювача 6623A.
- ✓ Передавання одиниці від системи зберігання в високоомний діапазон за допомогою мостів 6622A та 6530.
- ✓ Атестація квантової міри Холла.
- ✓ Атестація моста 6622A-NV.
- ✓ Дослідження СКВ (u_A) високоомних мір.
- ✓ Дослідження СКВ мір груп зберігання.
- ✓ Розрахунок похибок і невизначеностей.

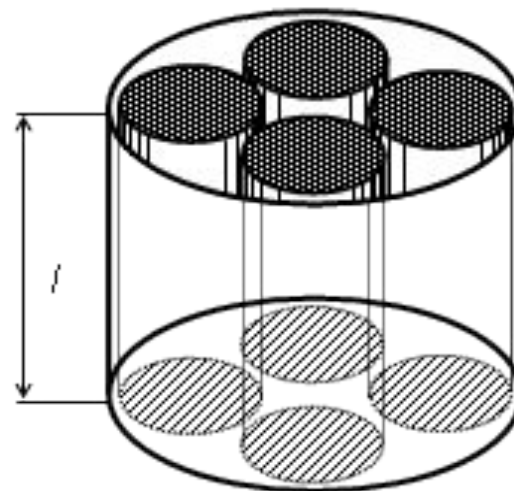
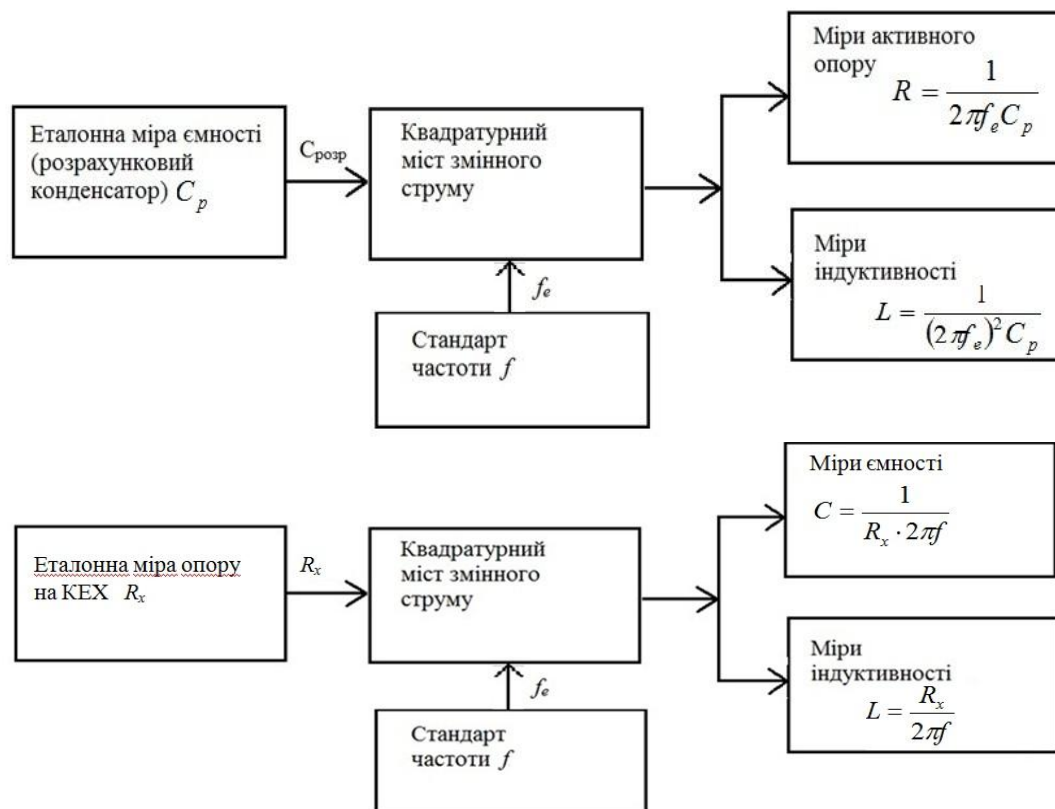
Метрологічні характеристики еталона

Характеристика	Значення
Значення відтвореного опору на мірі Холла, Ом	12906,4035
Значення відтворення опору на мірах зберігання	1 Ом, 100 Ом, 1 кОм, 10 кОм
НСП відтворення	$2 \cdot 10^{-8}$ (R=1 кОм); $3,2 \cdot 10^{-8}$ (R=1 Ом, 100 Ом)
СКО відтворення	$3 \cdot 10^{-9}$
u_a відтворення	$3 \cdot 10^{-9}$
u_b відтворення	$1 \cdot 10^{-8}$ (R = 1 кОм); $1,6 \cdot 10^{-8}$ (R = 1 Ом, 100 Ом)
U_p відтворення	$2 \cdot 10^{-8}$ (R = 1 кОм); $3,2 \cdot 10^{-8}$ (R = 1 Ом, 100 Ом)
Нестабільність зберігання за рік	
1 Ом	$0,42 \cdot 10^{-7}$
100 Ом	$1 \cdot 10^{-7}$
10000 Ом	$0,05 \cdot 10^{-7}$
Діапазон опорів, в який передається розмір одиниці	Від 10^{-4} Ом до 10^{12} Ом
Розширена невизначеність в діапазоні передавання	$8 \cdot 10^{-7}$ (R = $1 \cdot 10^{-3}$ Ом) $1 \cdot 10^{-6}$ (R = $1 \cdot 10^{-4}$ Ом) $12 \cdot 10^{-7}$ (R = $1 \cdot 10^6$ Ом) $10 \cdot 10^{-6}$ (R = $1 \cdot 10^9$ Ом) $60 \cdot 10^{-6}$ (R = $1 \cdot 10^{12}$ Ом)

Порівняння з еталонами

№ п/п	Країна	Діапазон передавання, Ом	Невизначеність типу А, Ом	Невизначеність типу В, Ом
1	Росія	$1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^9$	$<5 \cdot 10^{-9}$	$<1,5 \cdot 10^{-8}$
2	Німеччина	$1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^9$	$<3 \cdot 10^{-9}$	$<1 \cdot 10^{-8}$
3	США	$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{12}$	$<3 \cdot 10^{-9}$	$<1 \cdot 10^{-8}$
4	Україна	$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{12}$	$<3 \cdot 10^{-9}$	$<1 \cdot 10^{-8}$

Калібрування C і L

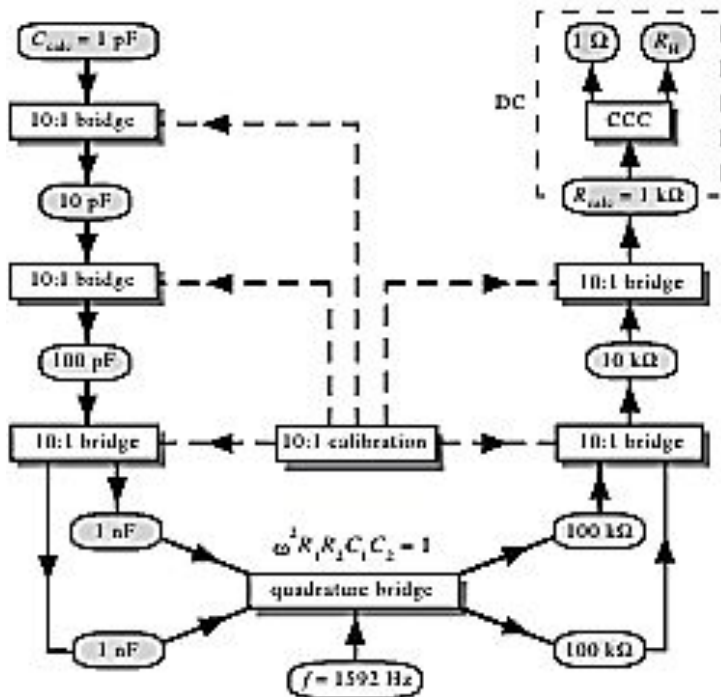
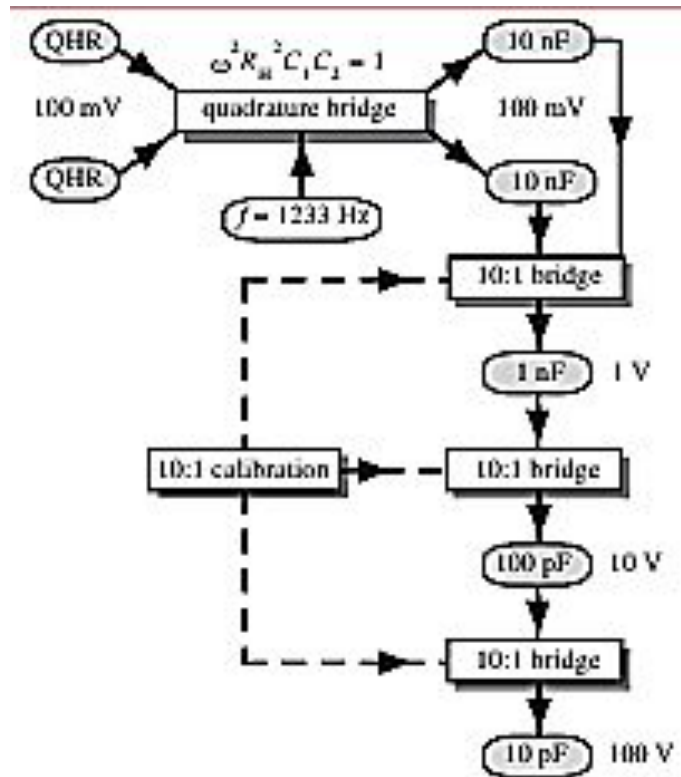
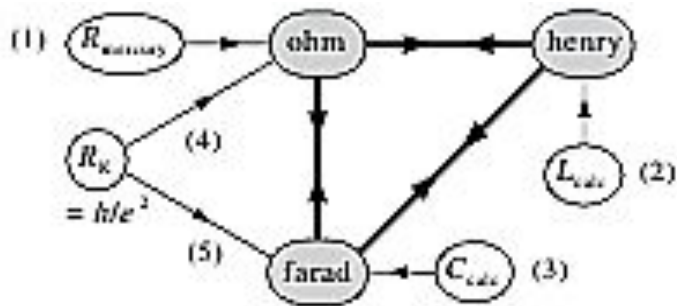


$$C = \bar{C}l = \frac{\varepsilon_0 \ln 2}{\pi} l$$

$$R = \frac{1}{\omega C} = \omega L \qquad L = \frac{1}{\omega^2 C} = \frac{R}{\omega}$$

$$C = \frac{1}{R\omega} = \frac{1}{\omega^2 L}$$

Квантовий ефект Холла на змінному струмі



ПЕРСПЕКТИВА – КВАНТОВИЙ ЕФЕКТ ХОЛЛА НА ГРАФЕНІ

Характеристики еталона	Існуюча структура міри Холла	Структура на графені (прогноз)
Охолодження	Рідкий гелій + дроселювання	Без рідкого гелію
Температура	1,2 К	3-5 К
Магнітна індукція	~ 8 Тл	< 2 Тл
Частота змінного струму	~ 1 кГц	до 100 кГц
Невизначеність - на постійному струмі - на змінному струмі	10^{-8} 10^{-7}	10^{-9} 10^{-8}

Квантові еталони

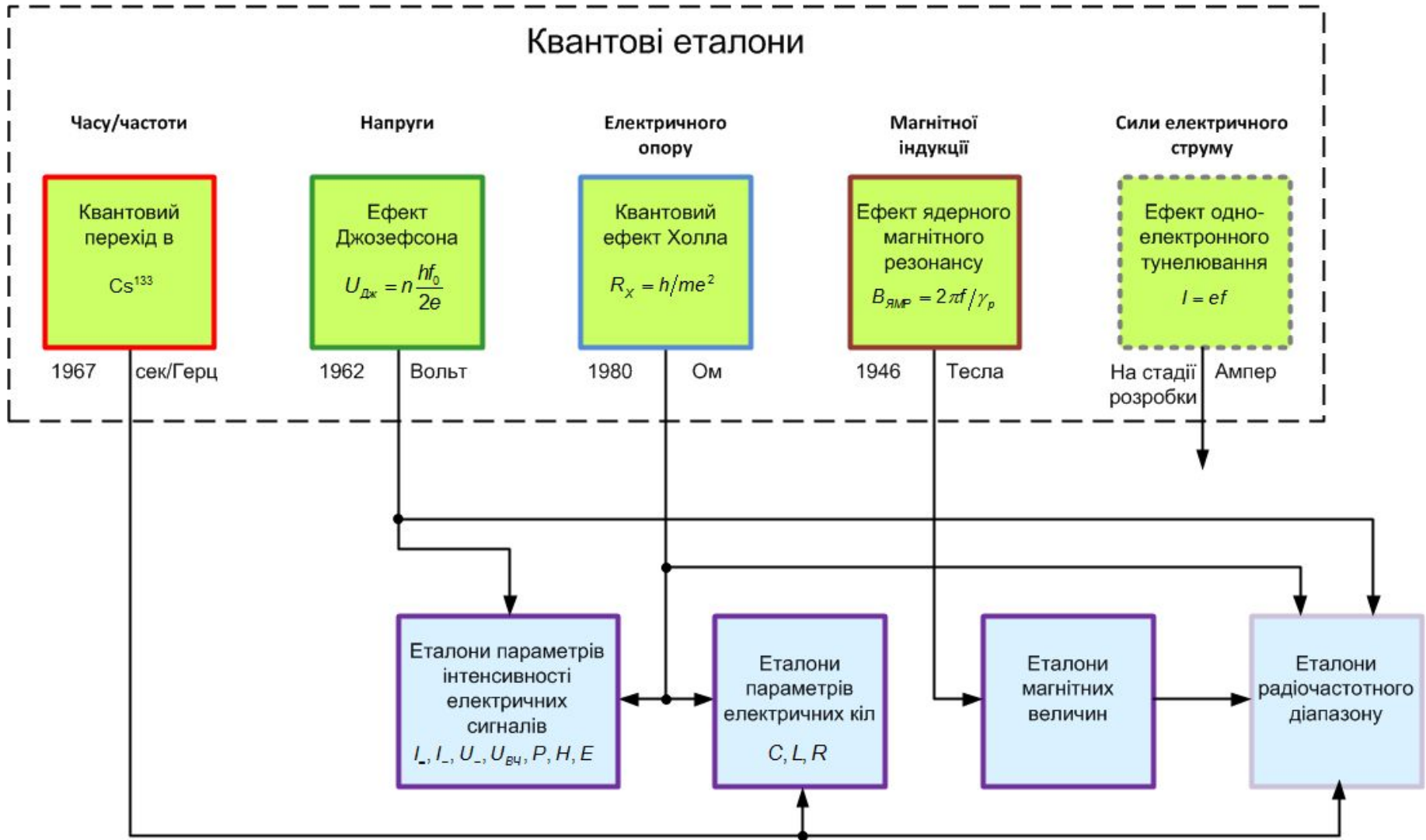
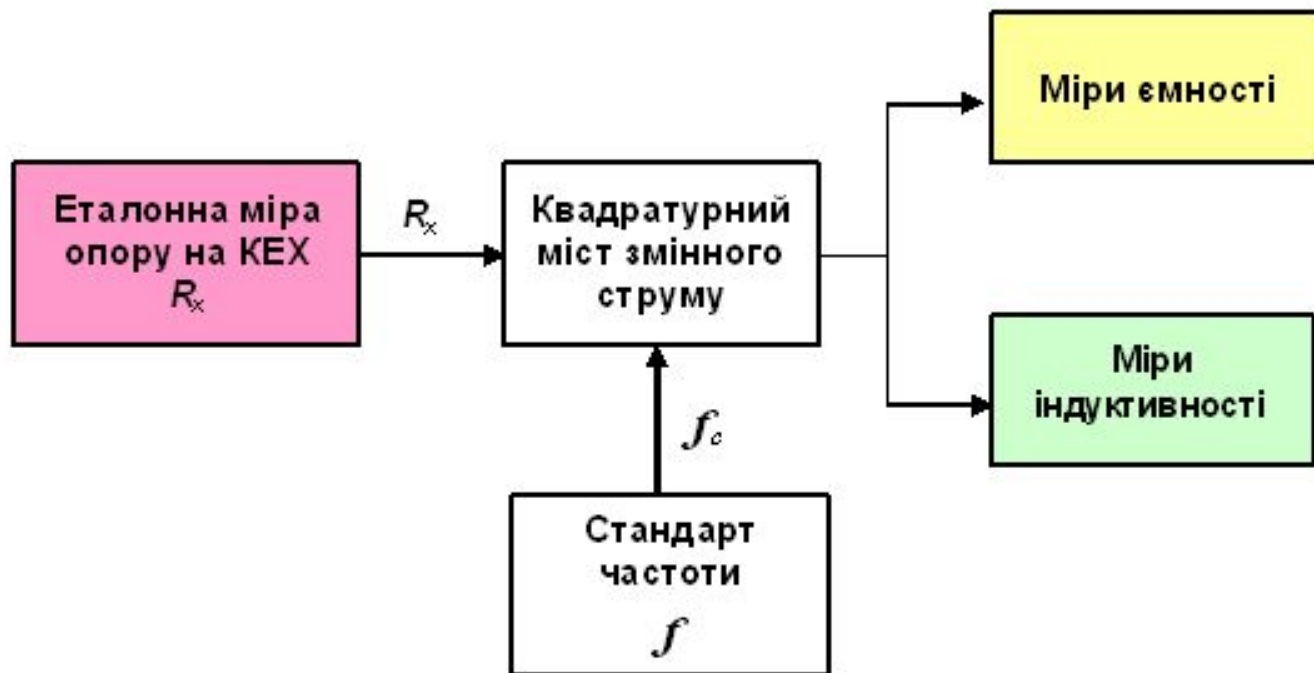


Схема калібрування ємності і індуктивності

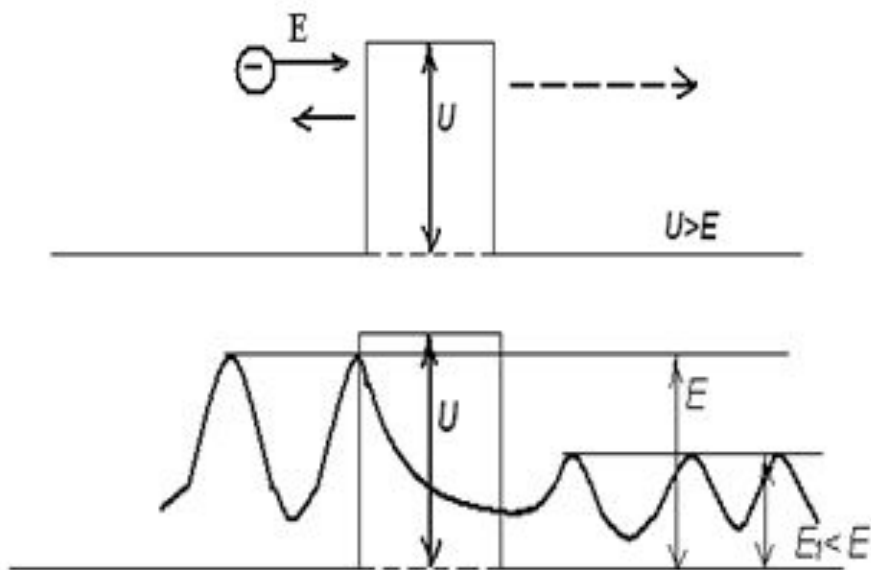


Фізичні ефекти

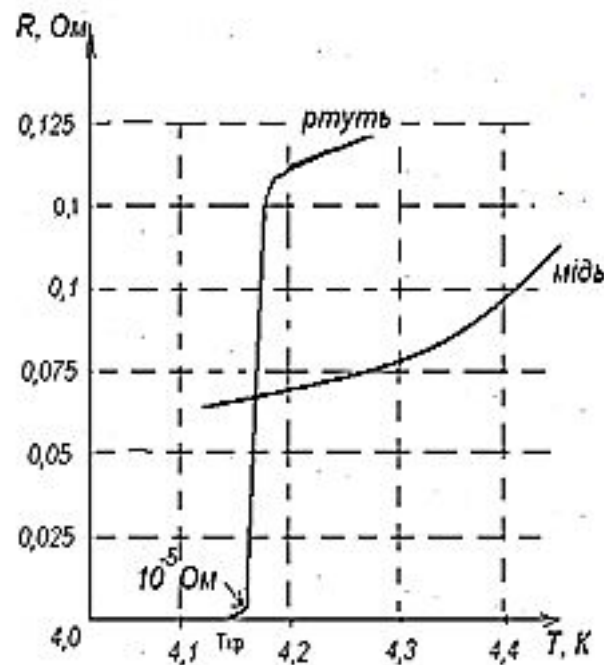
Квантовий перехід

$$\Delta E = h\nu, \quad V = \frac{\Delta E}{h}$$

Тунелювання
електронів



Надпровідність,
ефект Мейснера



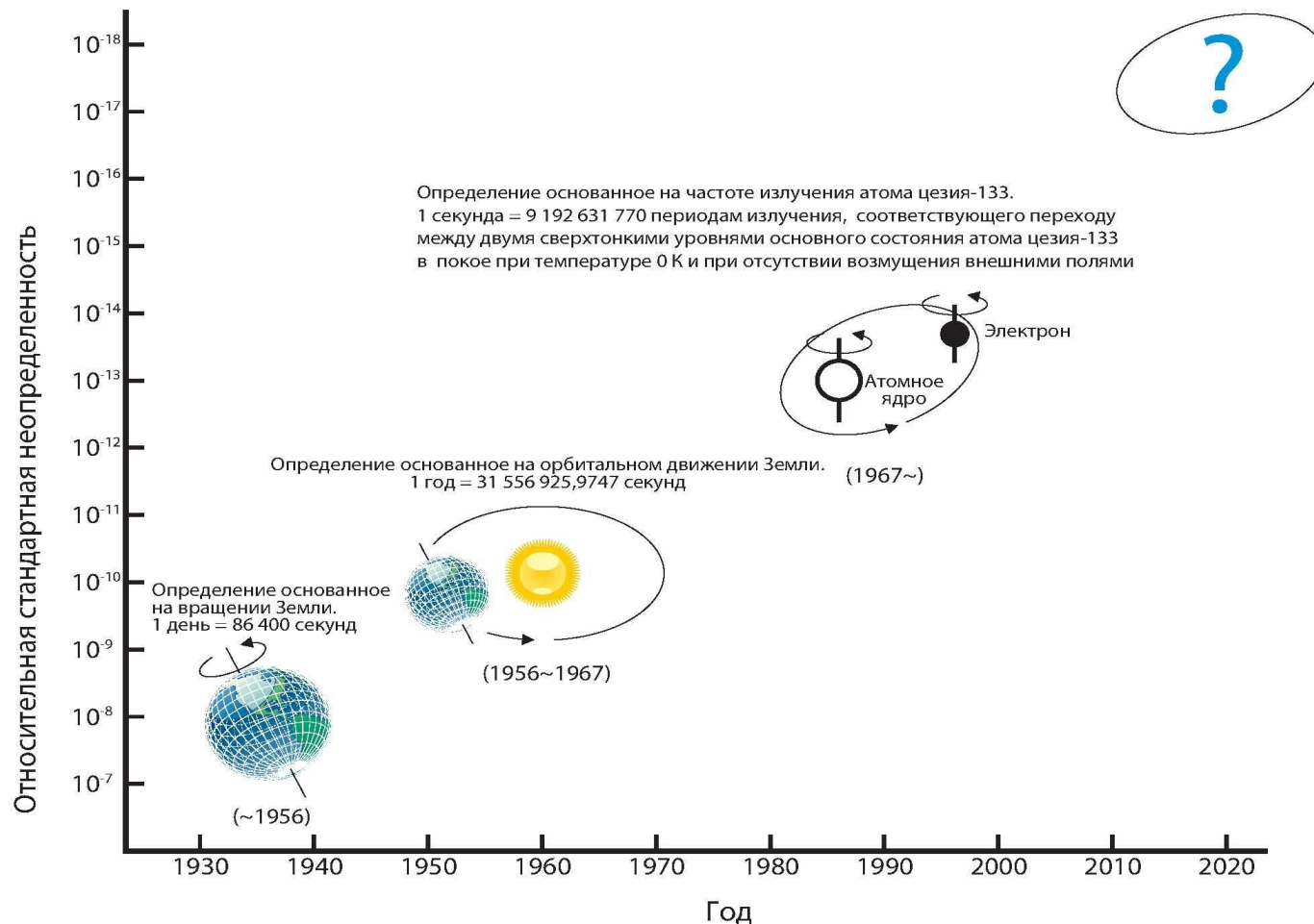
Методи відтворення електричних одиниць в SI і New SI

Одиниця	Відтворення в SI	Відтворення в New SI
Ампер	Через механічні величини за допомогою ампер - вагів	Опосередковано через квантові ефекти Джозефсона і Холла
Вольт	Нормальні елементи	Ефект Джозефсона
Ом	Розрахунковий конденсатор і міст-компаратор	Квантовий ефект Холла
Тесла	Через струм і розрахункову котушку	Ефект ядерного магнітного резонансу
Фарада	Розрахунковий конденсатор	За допомогою КЕХ і моста-компаратора
Генрі	Розрахункова котушка	За допомогою КЕХ і моста-компаратора

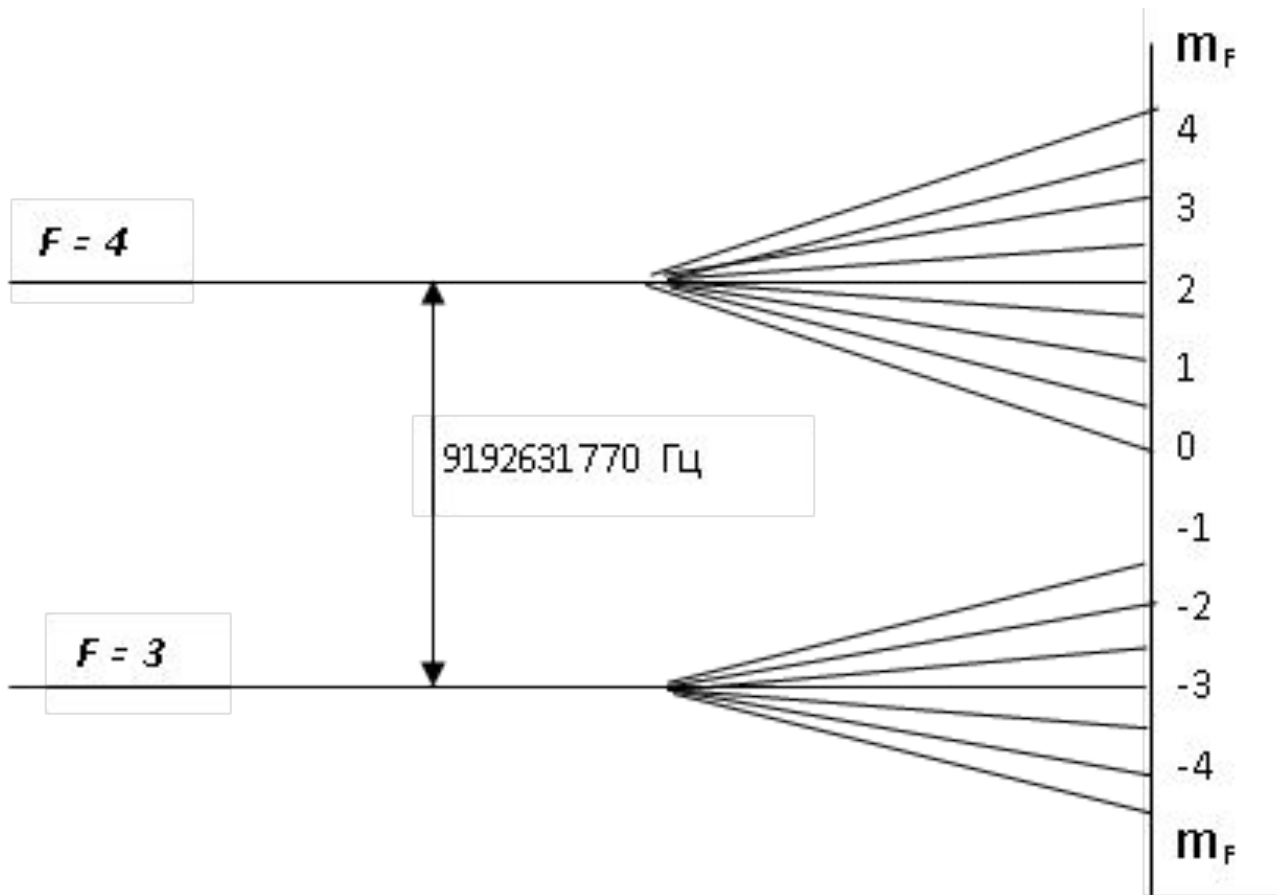
Загальний вигляд державного первинного еталона одиниці електричного опору



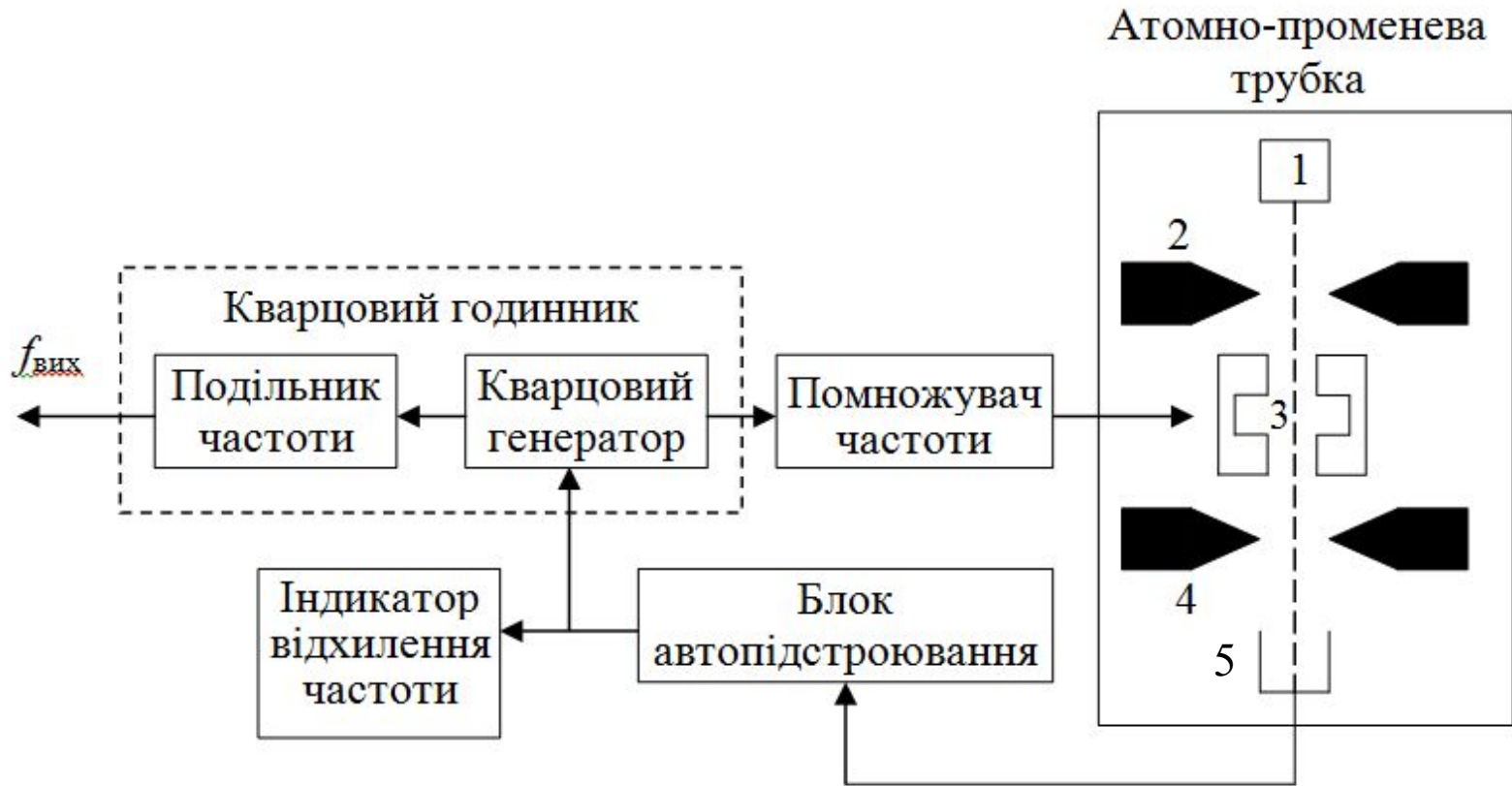
Еволюція визначення і точності відтворення секунди



Енергетичні рівні атома ^{133}Cs в основному стані

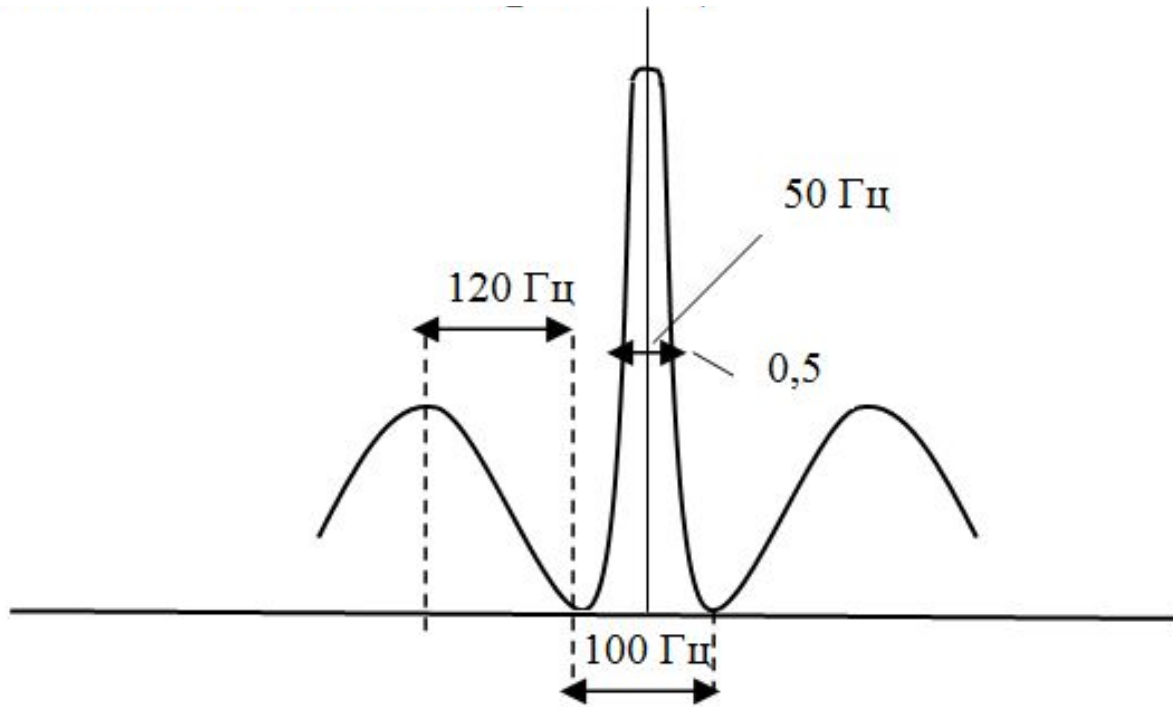


Структурна схема цезієвого репера

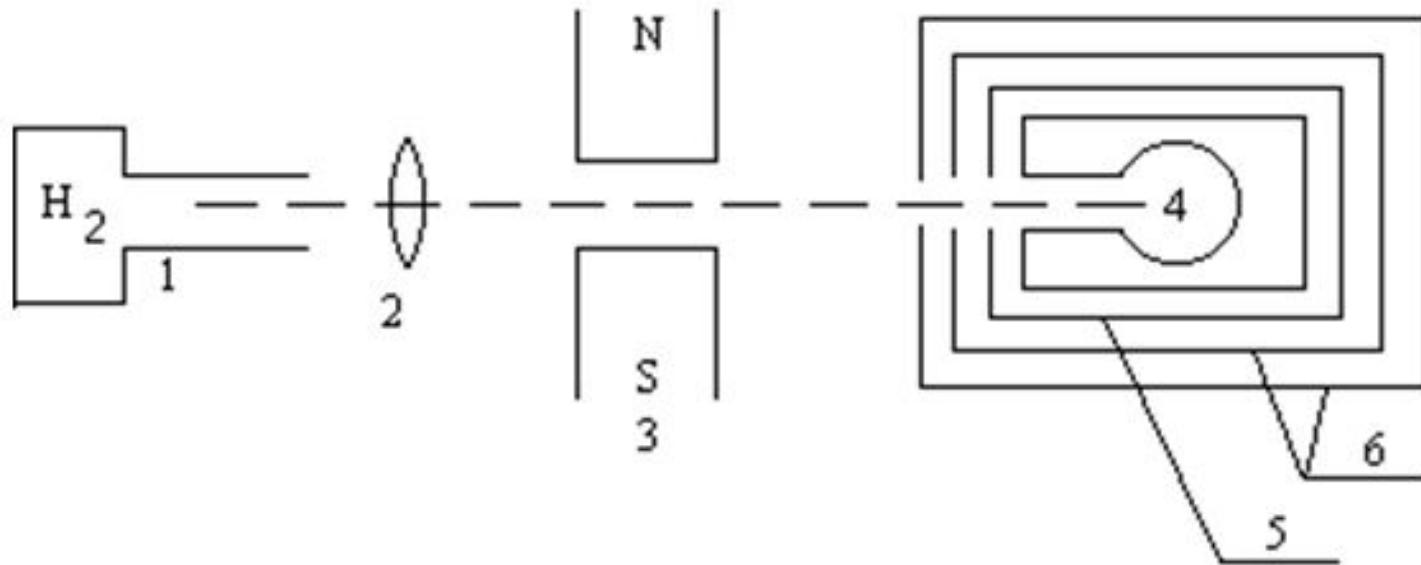


1 – джерело атомів цезію-133 (цезієва піч); 2, 4 – магніти;
3 – резонатори; 5 – детектор

Форма резонансної кривої (спектральної лінії цезієвого переходу)



Структурна схема водневого генератора

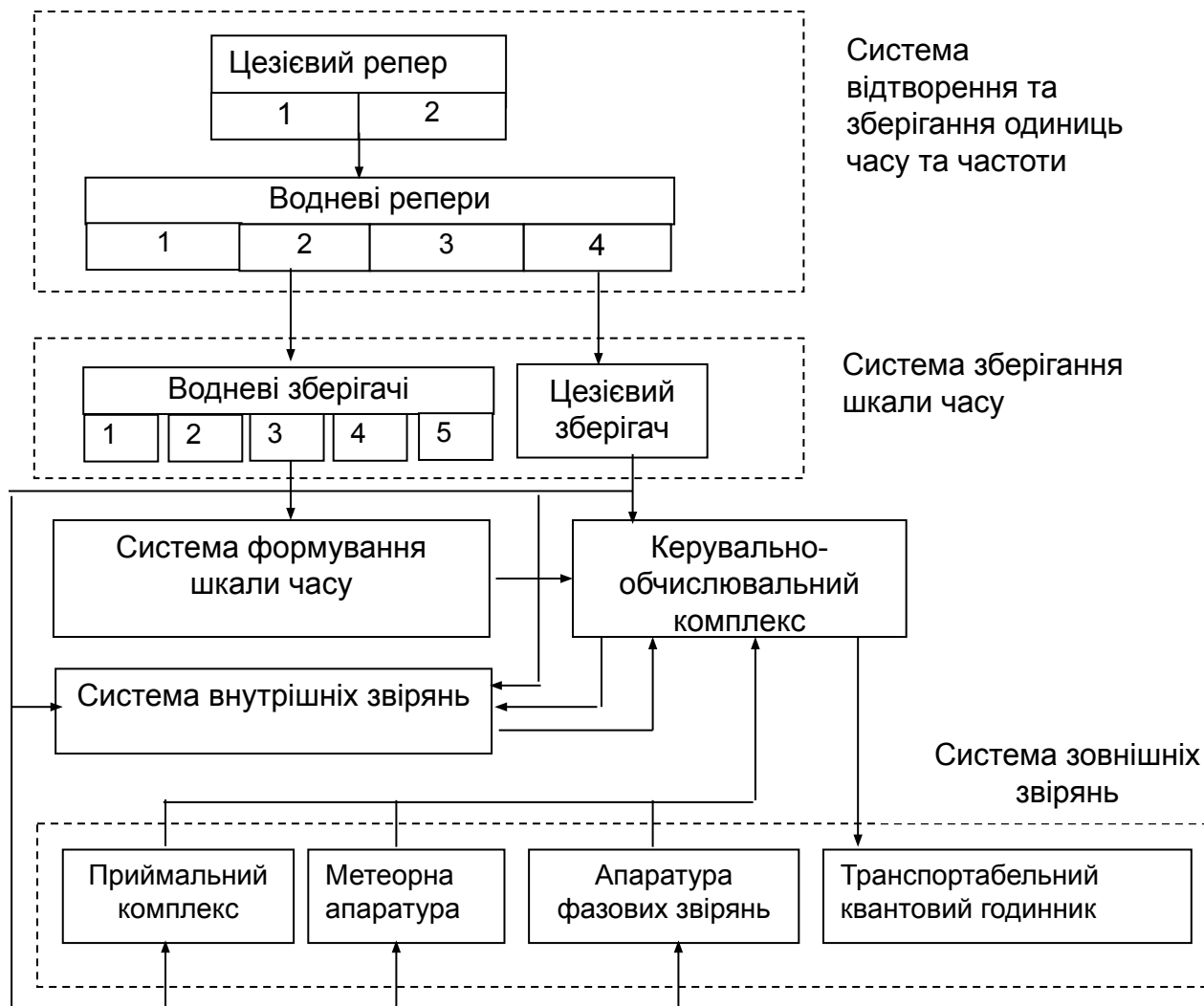


1 – балон з воднем; 2 – коліматор; 3 – осьовий магніт;
4 – накопичувальна чарунка; 5 – резонатор; 6 – багат шаровий екран

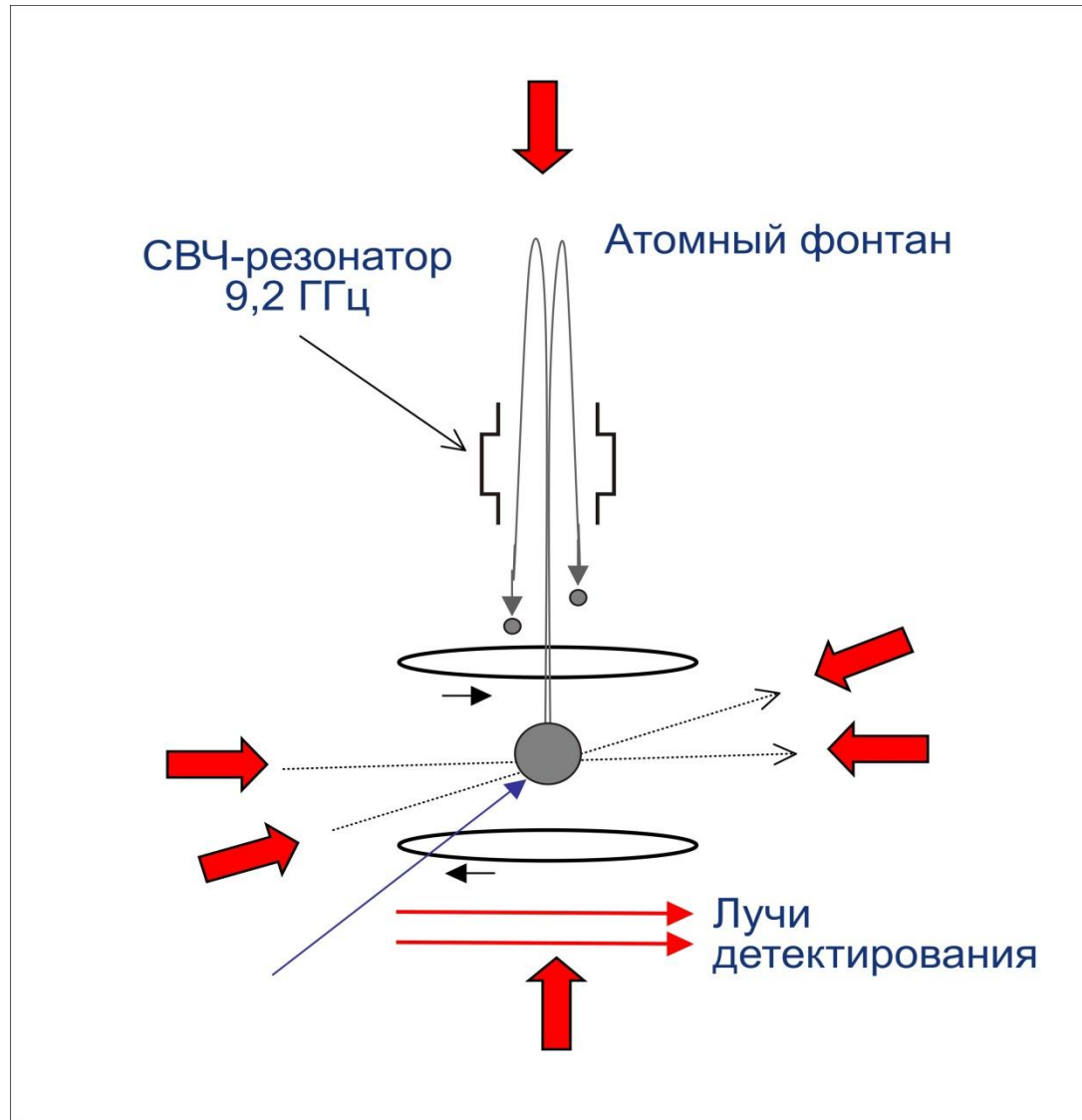
Таблиця порівняння з основними даними квантових стандартів частоти

Тип КСЧ	Тип переходу	Активний/ пасивний	Частота, МГц	Сфера основного використання
Цезієвий	Надтонкий	Пасивний	9192, 631770	Первинний еталон
Водневий	Надтонкий	Активний	1420,40575	Первинний еталон (зберігач)
Аміачний	Молекулярна інверсія	Активний	23870,129	Робочий еталон
Рубідієвий	Надтонкий	Пасивний (активний)	6834, 682	Вторинний еталон, робочий еталон

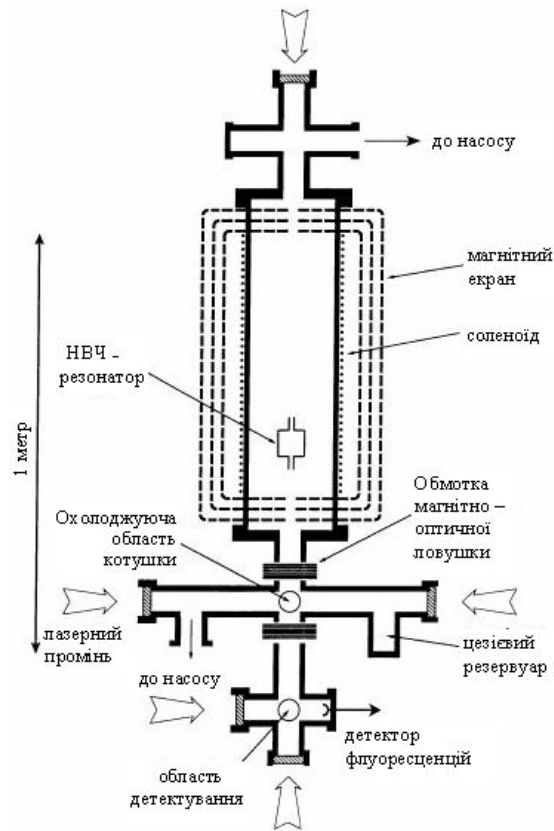
Структурна схема державного еталона часу і частоти України



Принцип дії цезієвого фонтана



Цезієвий фонтан NPL: структурна схема та зовнішній вигляд



Оптичний годинник на іонах стронцію

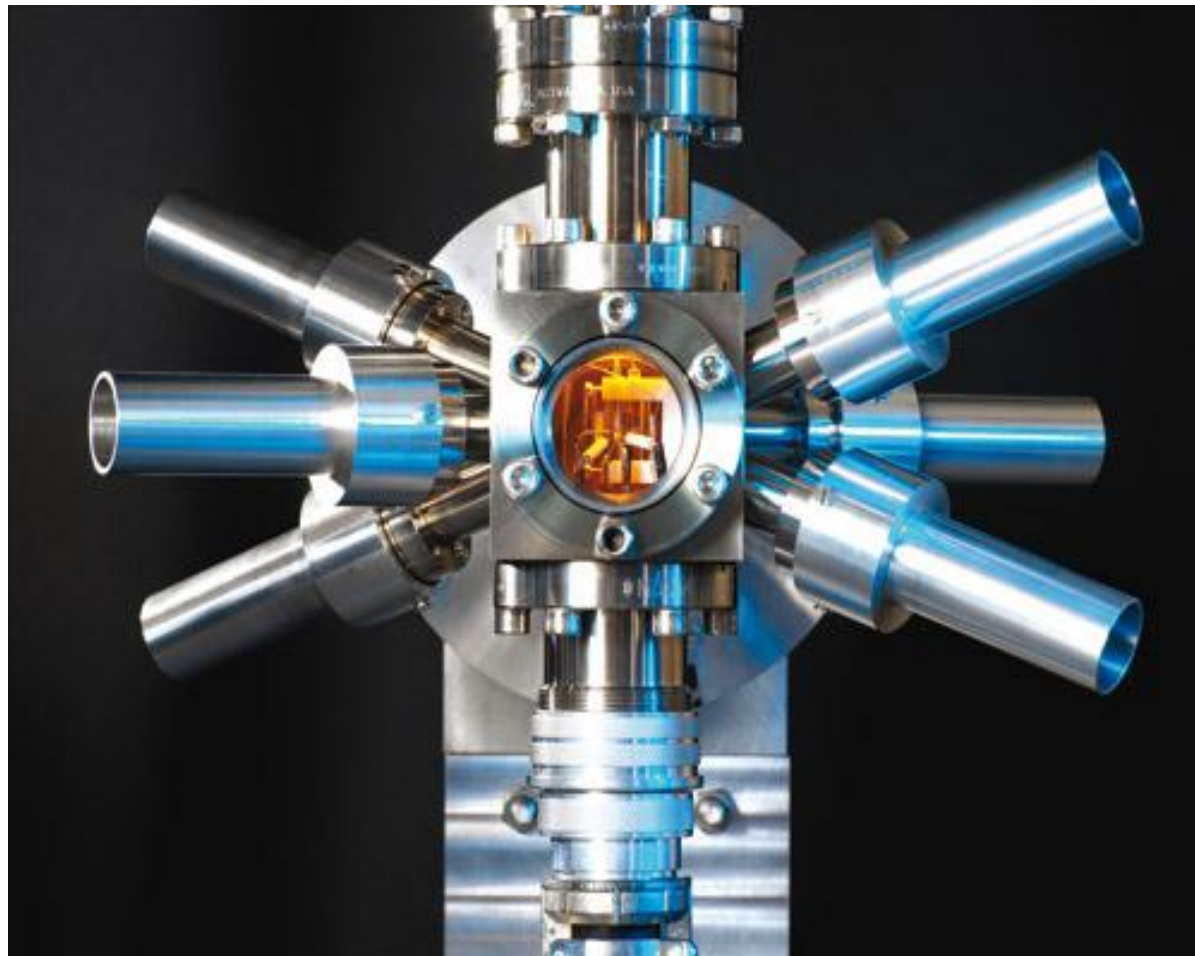
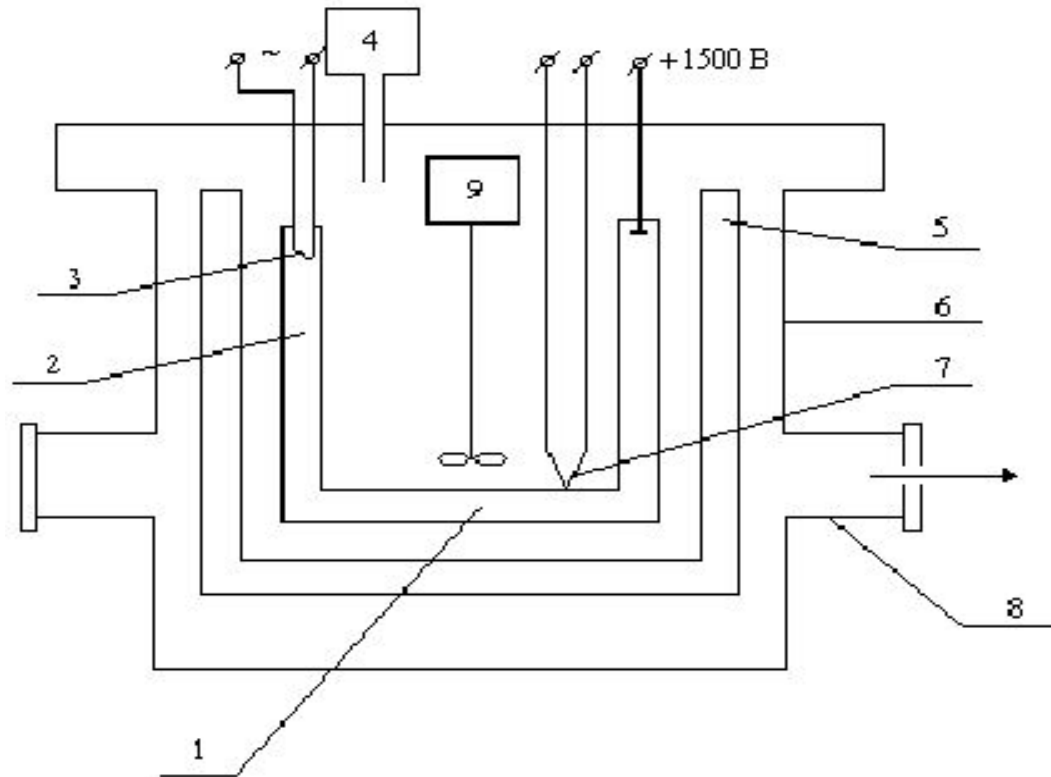


Схема криптонового еталона метра

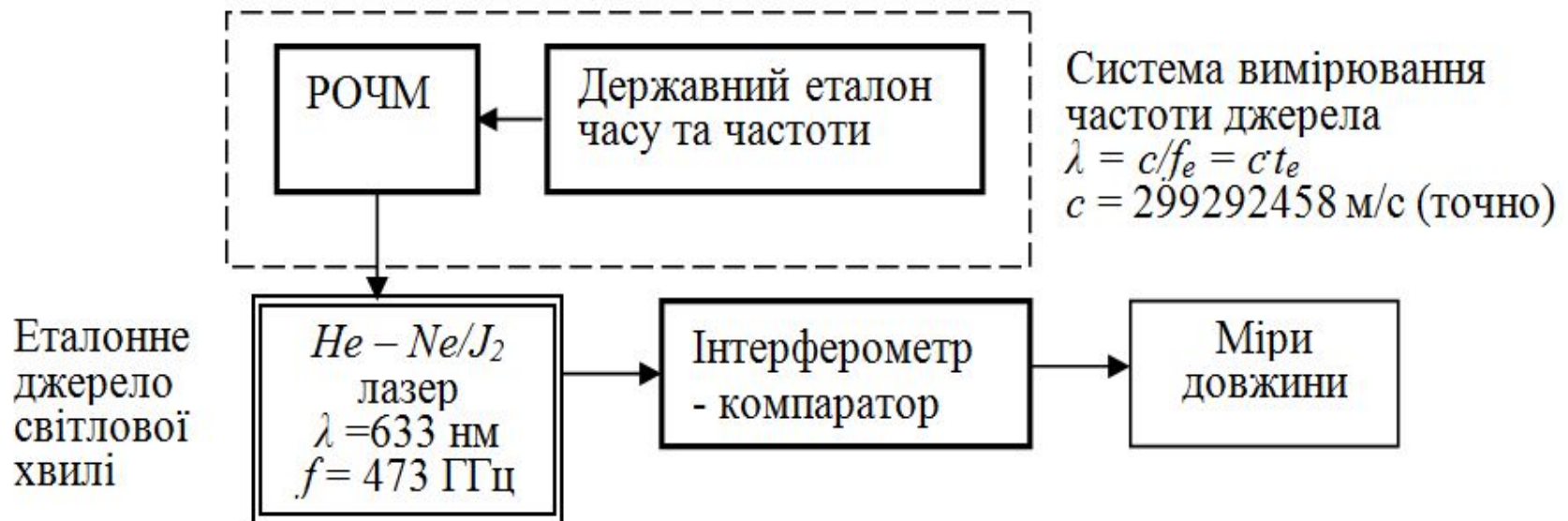


- 1 – капіляр; 2 – газорозрядна трубка з криптоном; 3 – розжарений катод; 4 – манометр; 5 – посудина Дьюара з рідким азотом; 6 – герметична камера; 7 – термопара; 8 – окуляр; 9 – мотор з лопаткою для перемішування рідкого азоту

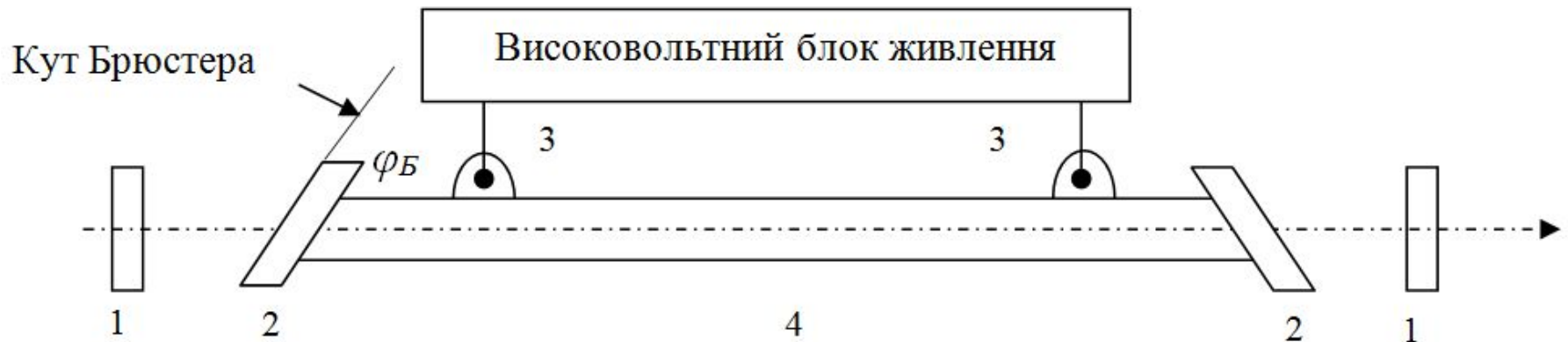
Криптоновый эталон метра



Спрощена схема еталона одиниці ДОВЖИНИ

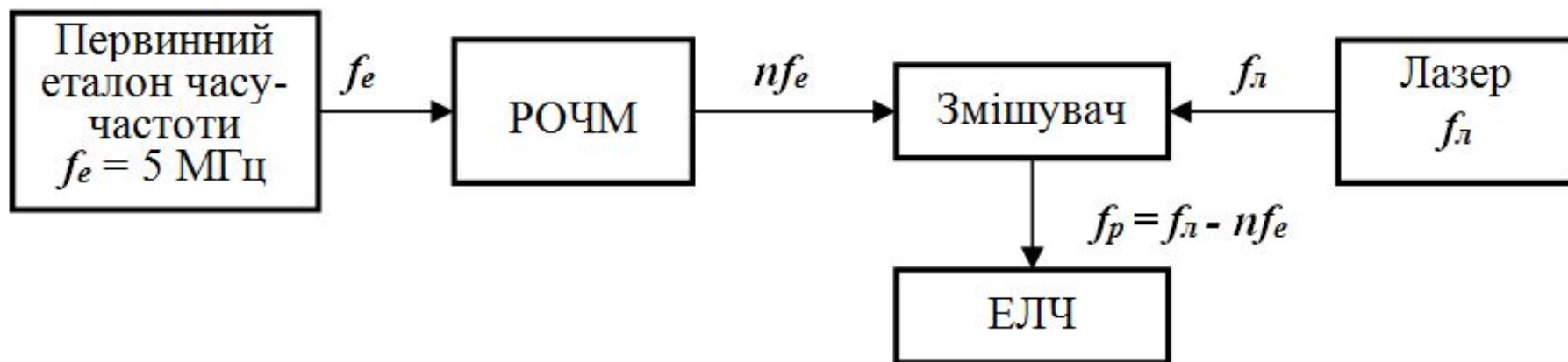


Структурна схема газового лазера

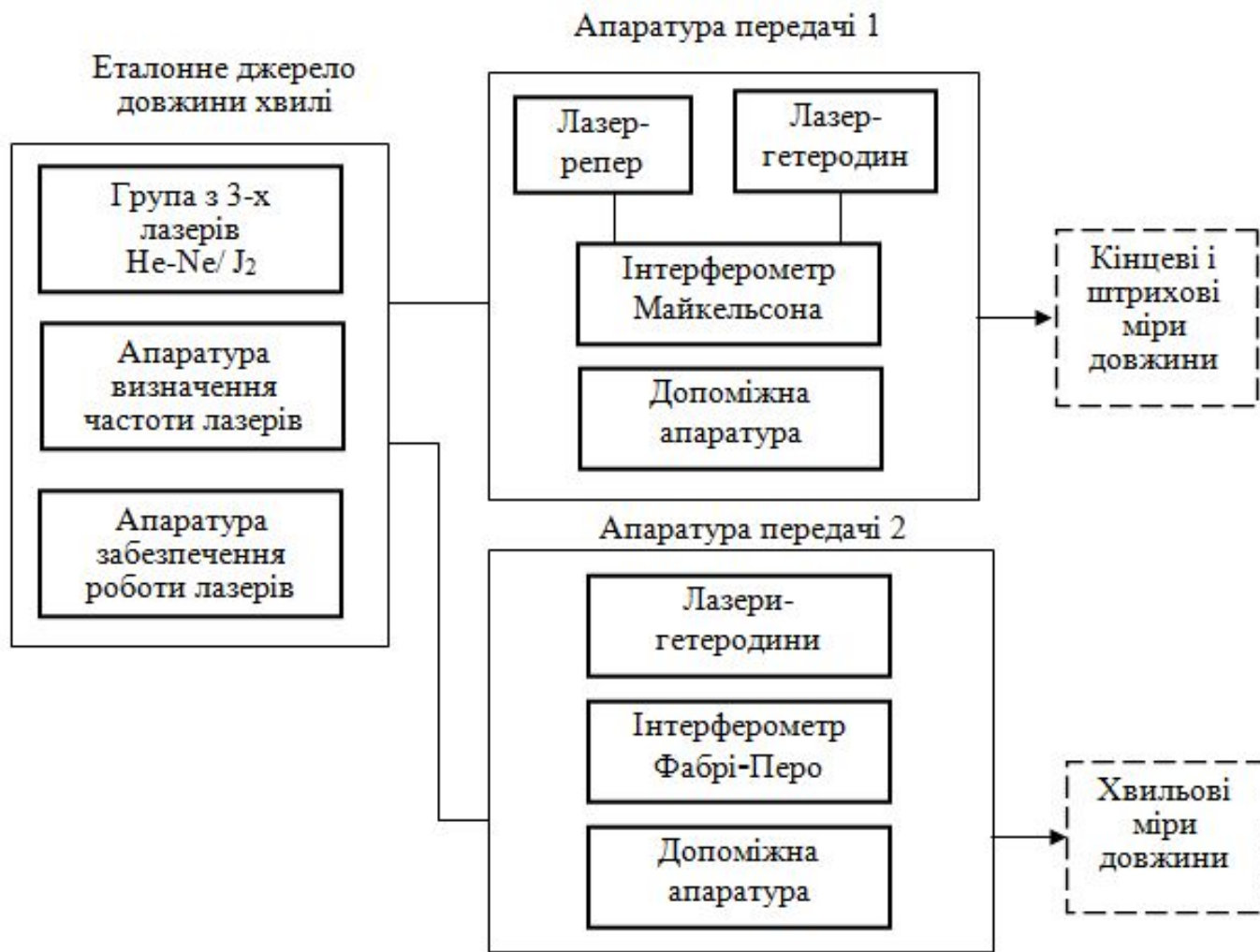


1 – дзеркала; 2 – вікна для виходу випромінювання;
3 – катод та анод; 4 – газорозрядна трубка

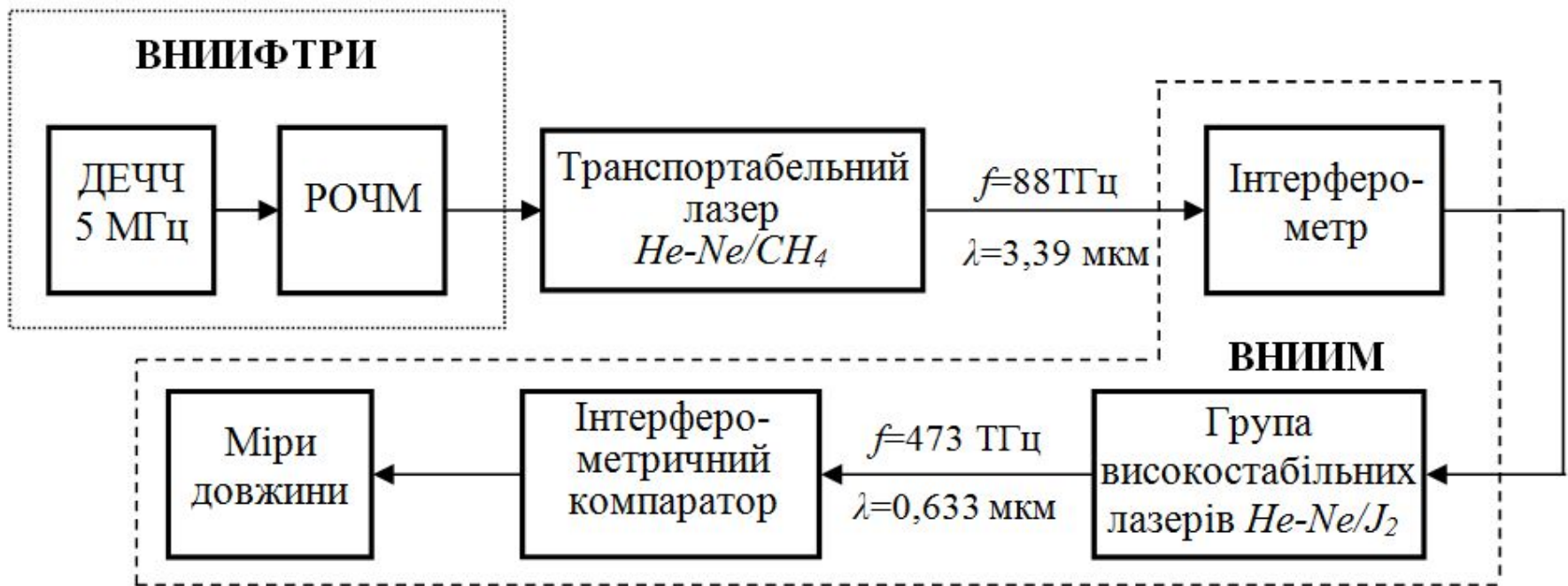
Методика вимірювання частоти лазера



Структурна схема первинного еталона одиниці довжини



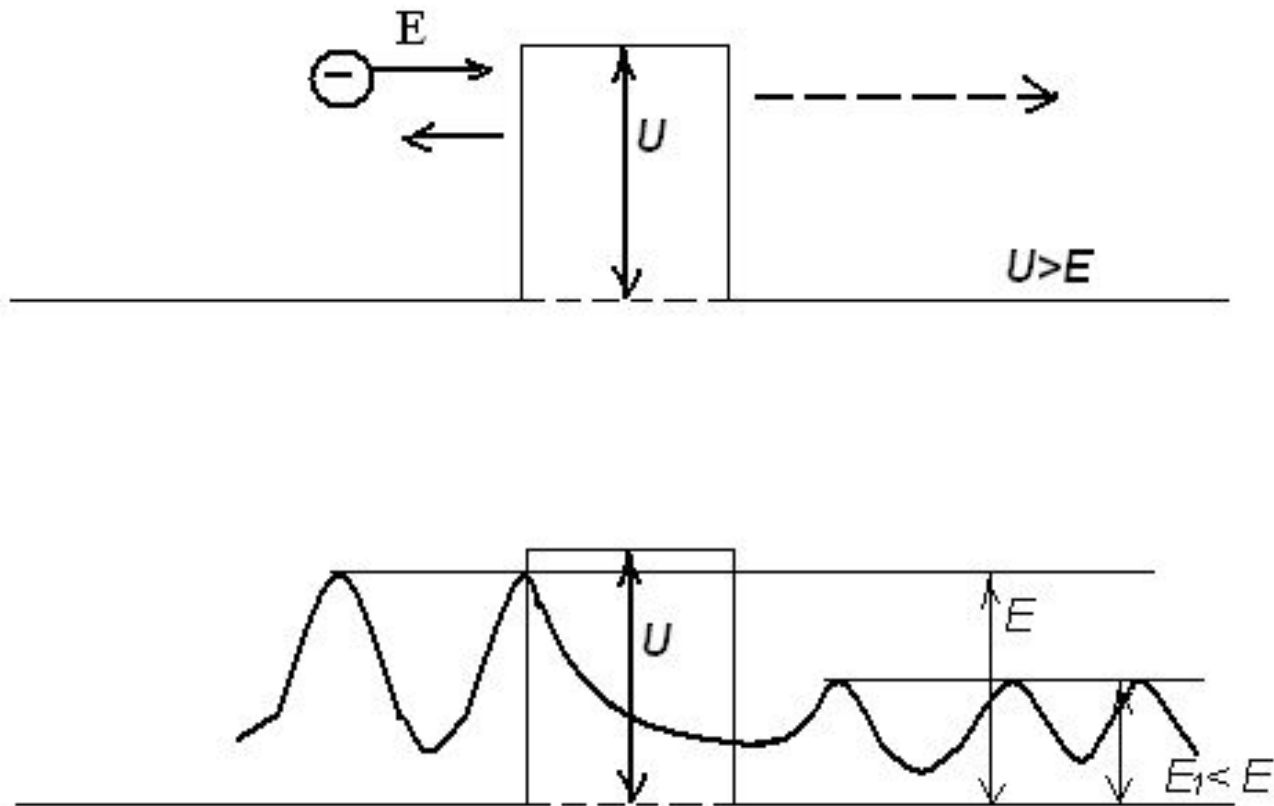
Структура державного еталону часу, частоти і довжини



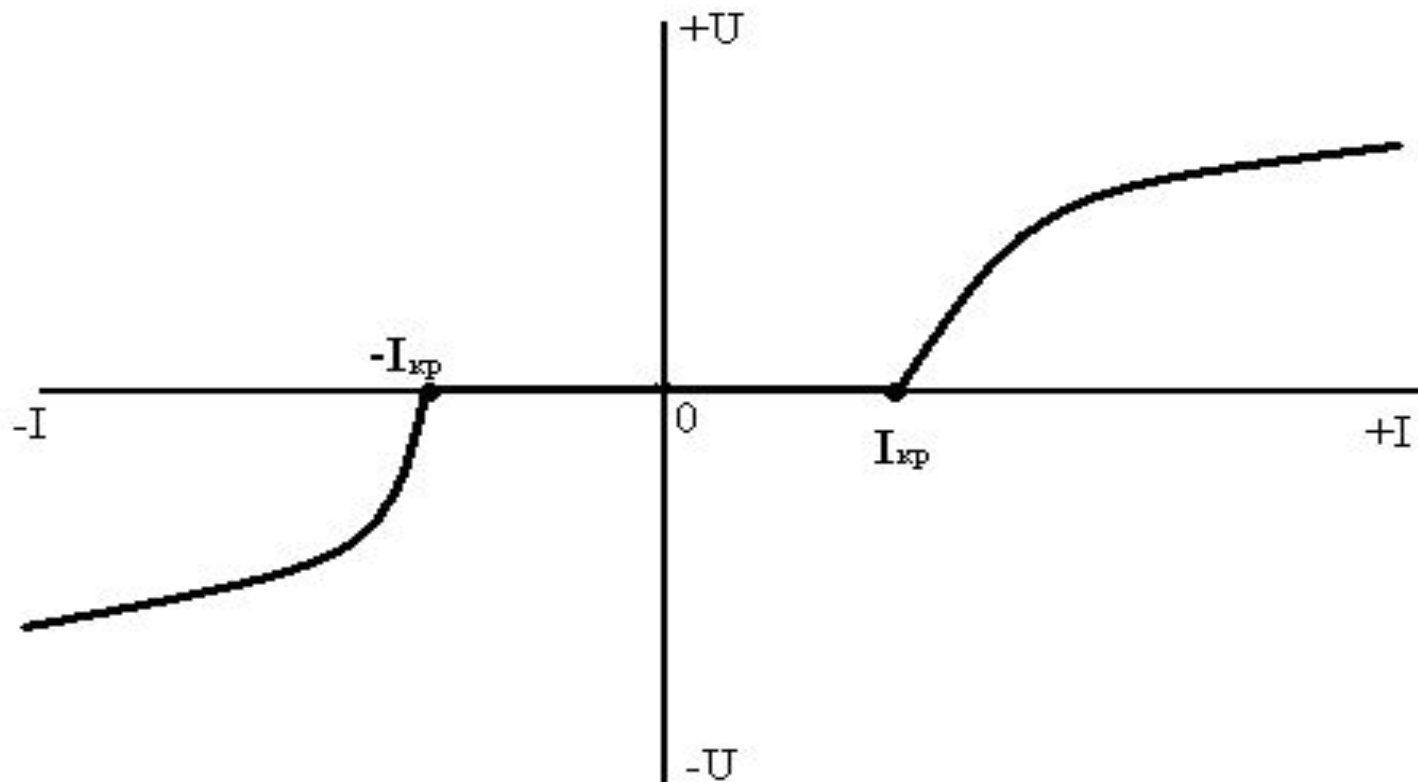
Фізичні основи ефекту Джозефсона

Наведемо деякі відомості з квантової фізики. Унікальною особливістю квантових частинок, в тому числі електронів, є їх особливість проникати через перешкоду (енергетичний бар'єр) навіть в тих випадках, коли їхня енергія нижча від потенційного бар'єра, властивого для даної перешкоди. Це явище носить назву тунелювання. Схематично воно показане на рис. 4.3. Якби електрон був класичною частинкою з енергією E , то він, зустрівши на своєму шляху перешкоду, для подолання якої необхідна енергія $U > E$, повинен би був відбитись від цієї перешкоди. Однак, як хвиля, що володіє відповідною хвильовою функцією, він проходить через цю перешкоду, хоча і з витратою енергії. Ймовірність подолання перешкоди тим вища, чим геометрично тонший бар'єр і чим менша різниця між енергією електрона і енергетичною висотою бар'єра.

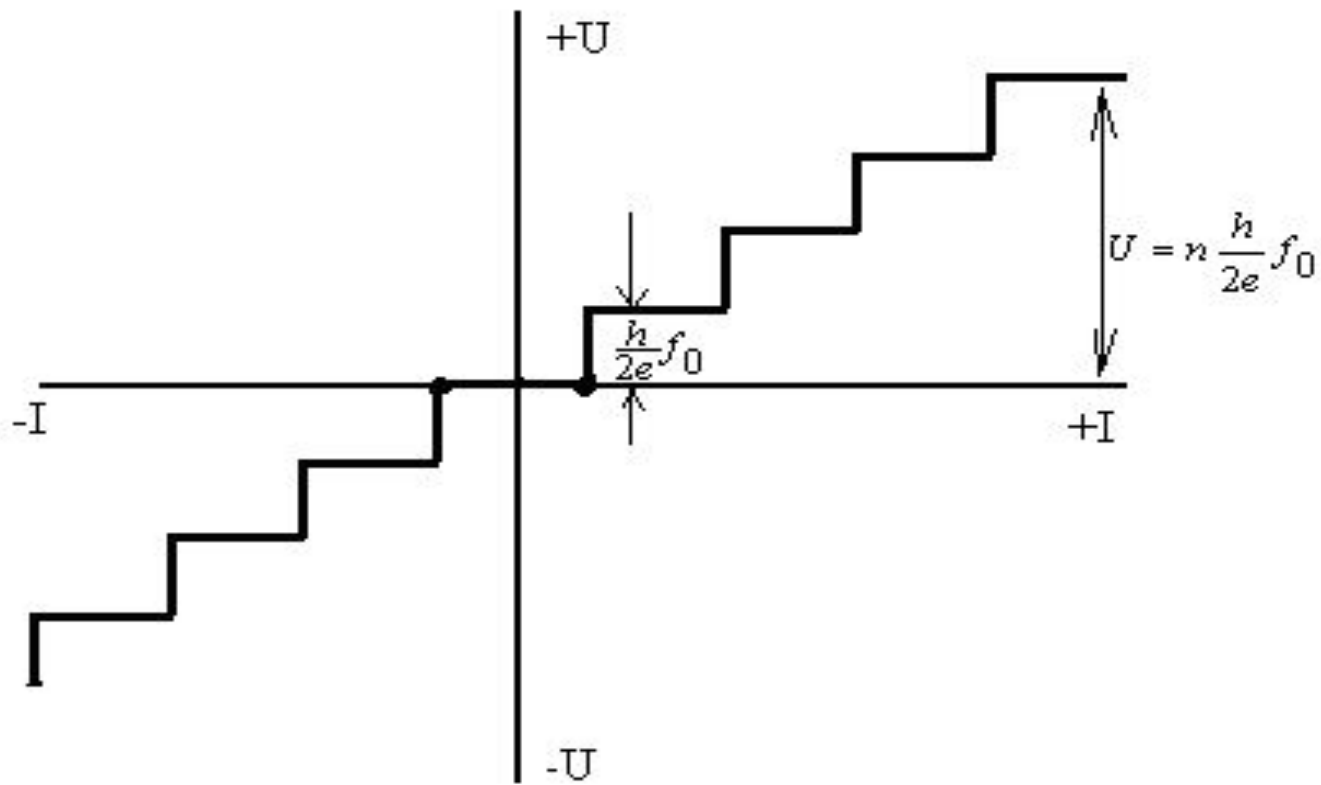
Тунелювання електрона через бар'єр



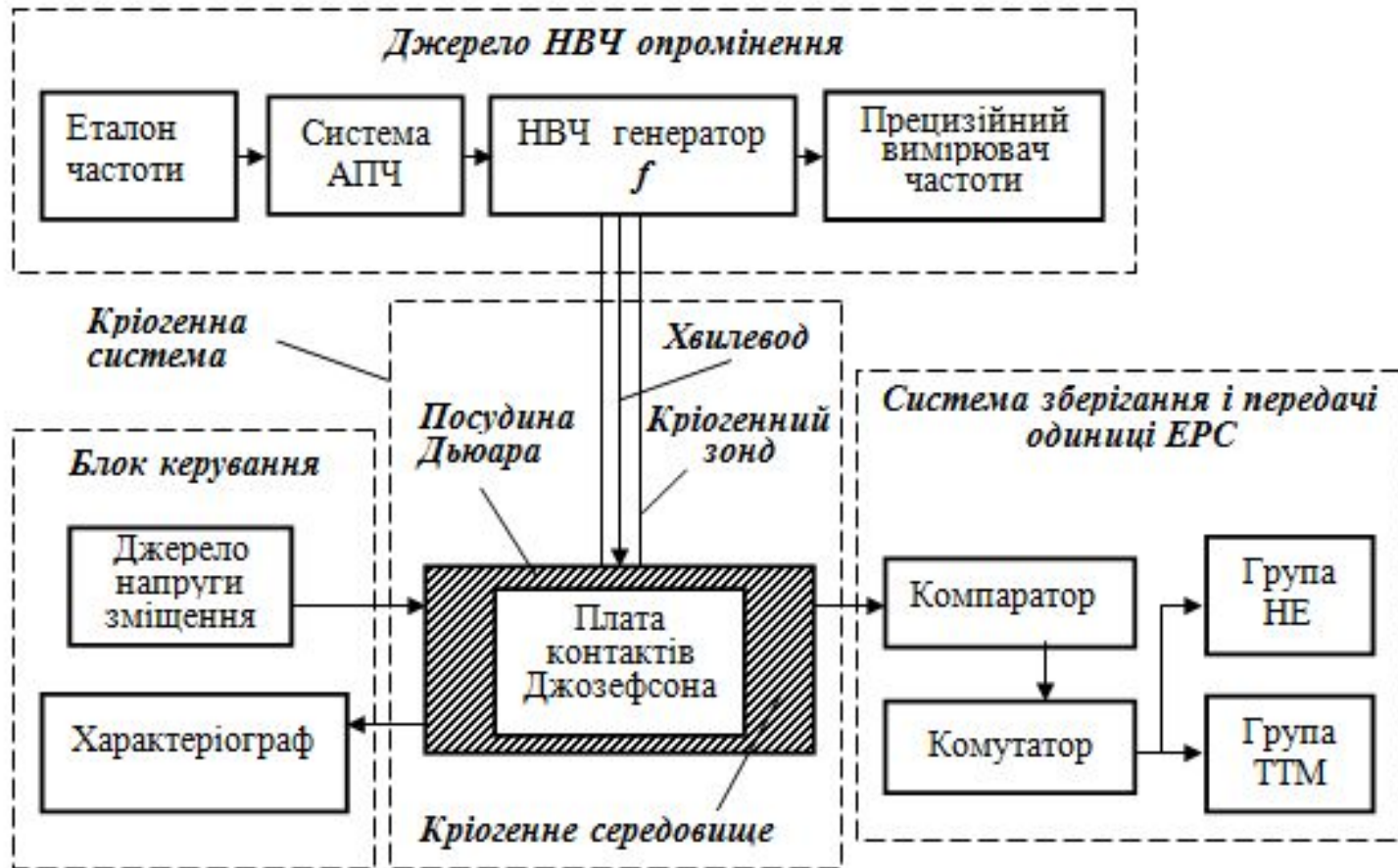
ВАХ тунельного контакту при стаціонарному ефекті Джозефсона



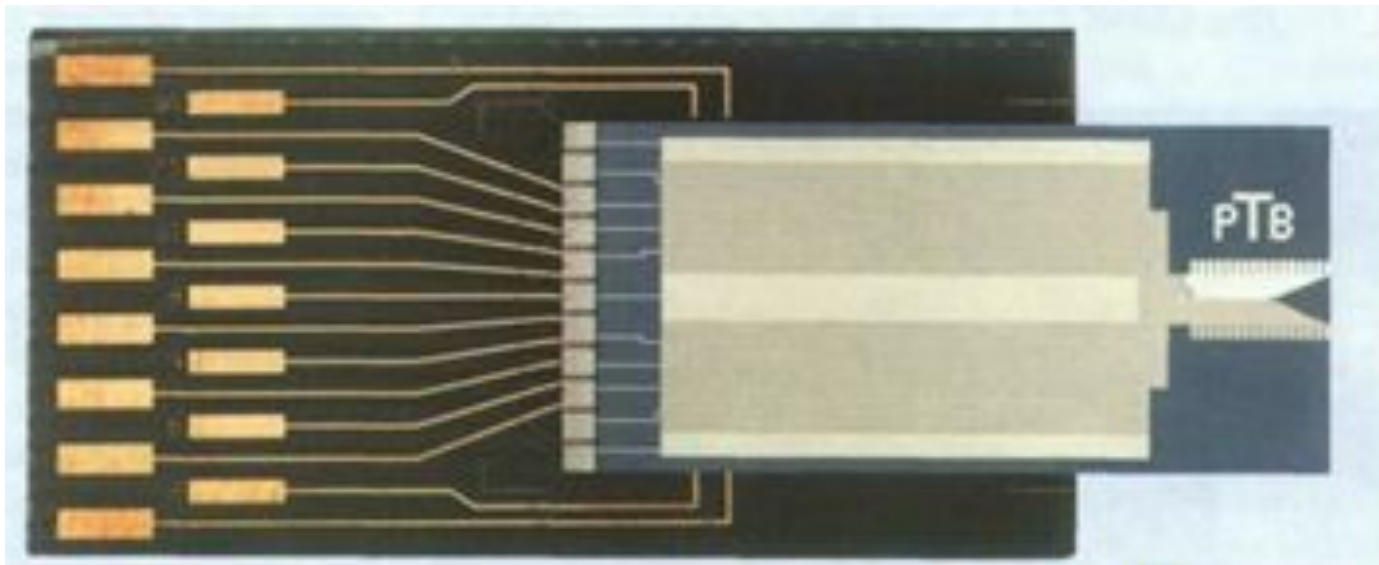
ВАХ тунельного контакту при нестационарному ефекті Джозефсона



Апаратура для відтворення напруги на основі ефекту Джозефсона



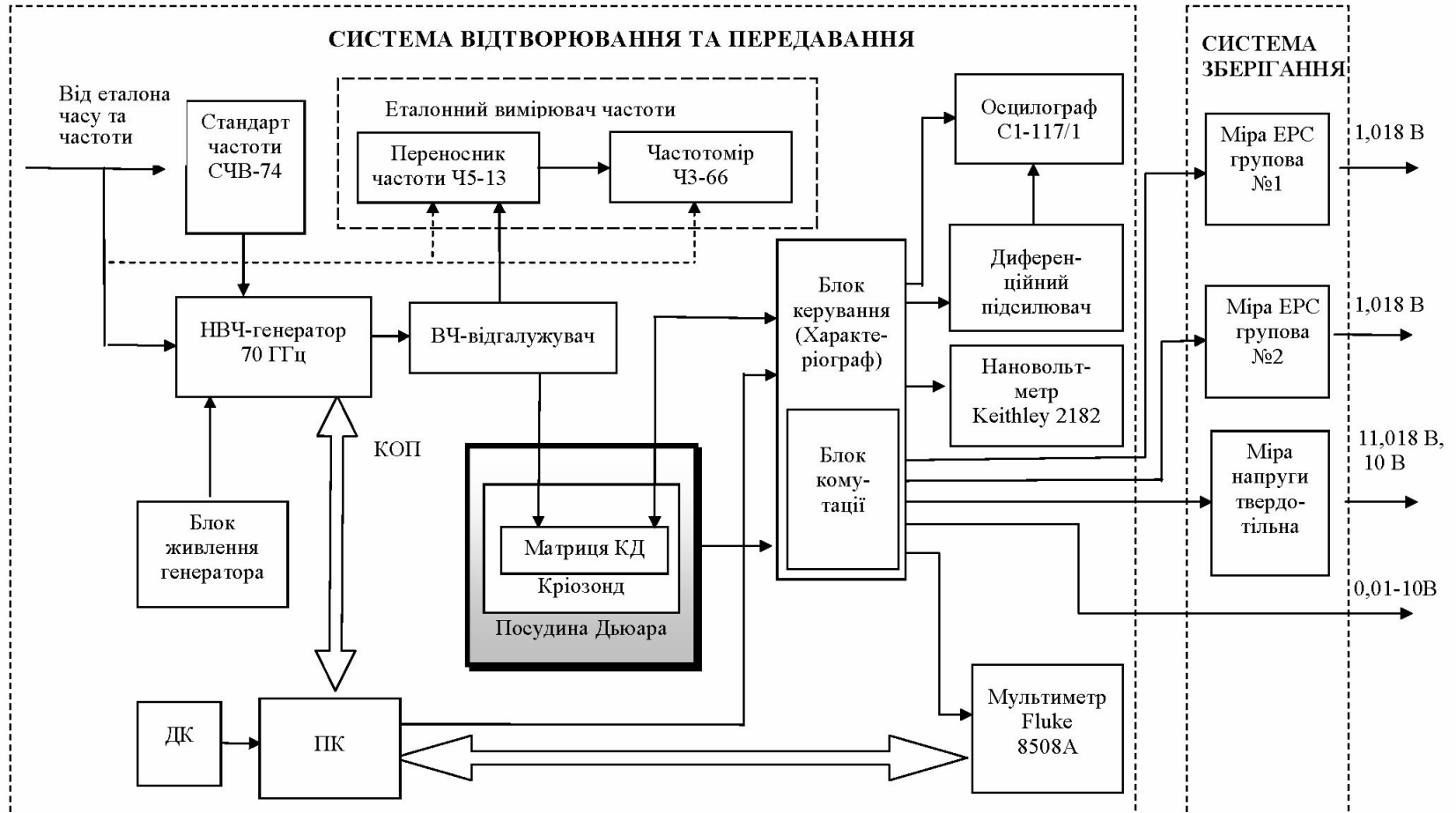
Зовнішній вигляд матриці Джозефсона (РТВ), розмір 17 X 10 мм



Зовнішній вигляд первинного еталона одиниці ЕРС



Структурна схема первинного еталона одиниці ЕРС (еталон України)



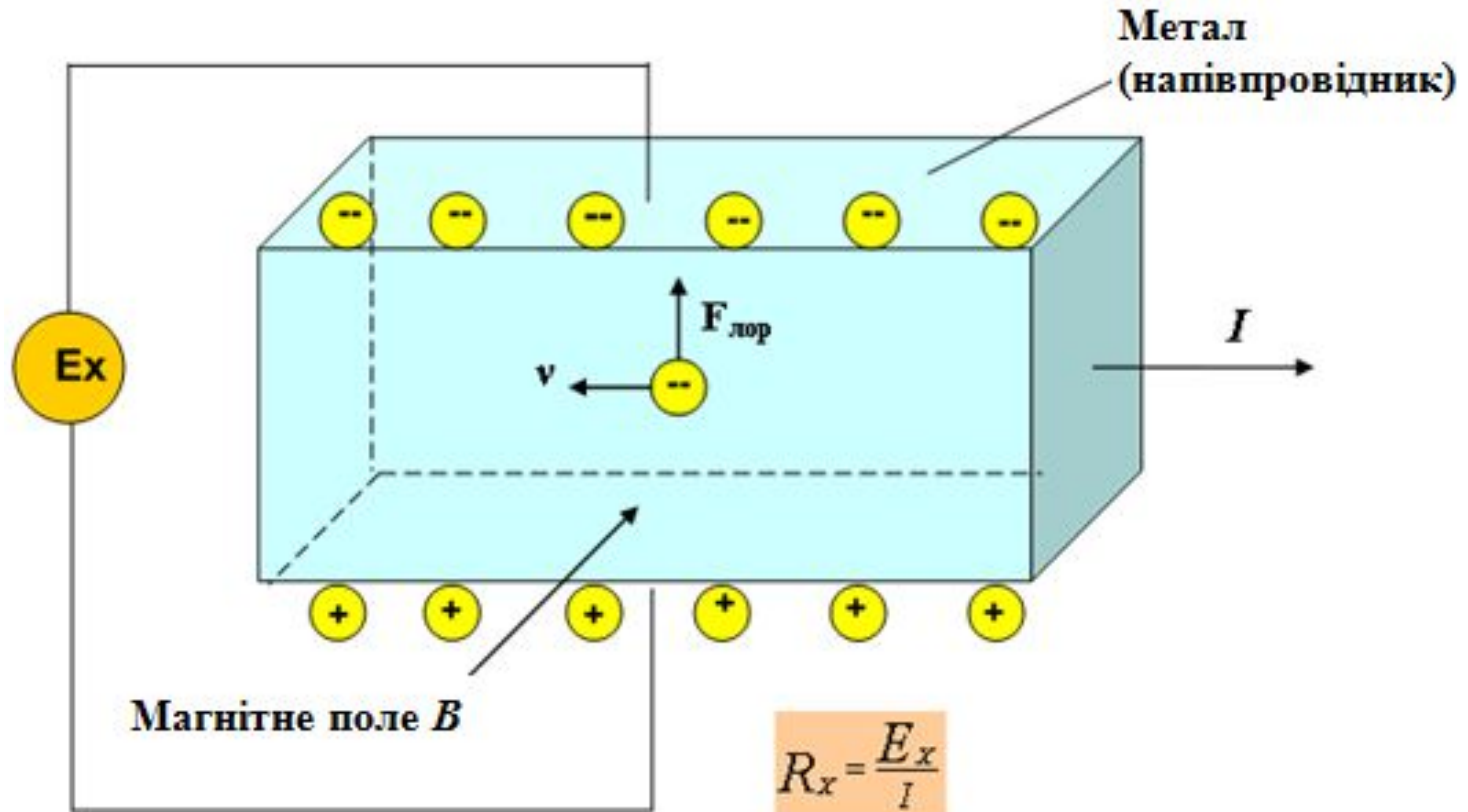
Складові і сумарна оцінка похибок, а також перераховані через відомі співвідношення значення невизначеностей державного еталона України

Складові відносної похибки (невизначеності)	Значення похибки		Стандартна невизначеність	
	S_i	Θ_i	Тип	Значення
Похибка визначення частоти опромінення	–	$1 \cdot 10^{-10}$	B	$0,6 \cdot 10^{-10}$
Похибка через нестабільність частоти	$1 \cdot 10^{-11}$	–	A	$1 \cdot 10^{-11}$
Похибка через нестабільність термоЕРС	$5 \cdot 10^{-9}$ (U=1 В) $5 \cdot 10^{-10}$ (U=10 В)	–	A	$5 \cdot 10^{-9}$ (U=1 В) $5 \cdot 10^{-10}$ (U=10 В)
Похибка через наявність струму витоку	–	$6 \cdot 10^{-9}$	B	$3,5 \cdot 10^{-9}$
Сумарна оцінка	$5 \cdot 10^{-9}$ (U=1 В) $5 \cdot 10^{-10}$ (U=10 В)	$7 \cdot 10^{-9}$		$6 \cdot 10^{-9}$ (U=1 В) $3,5 \cdot 10^{-9}$ (U=10 В)

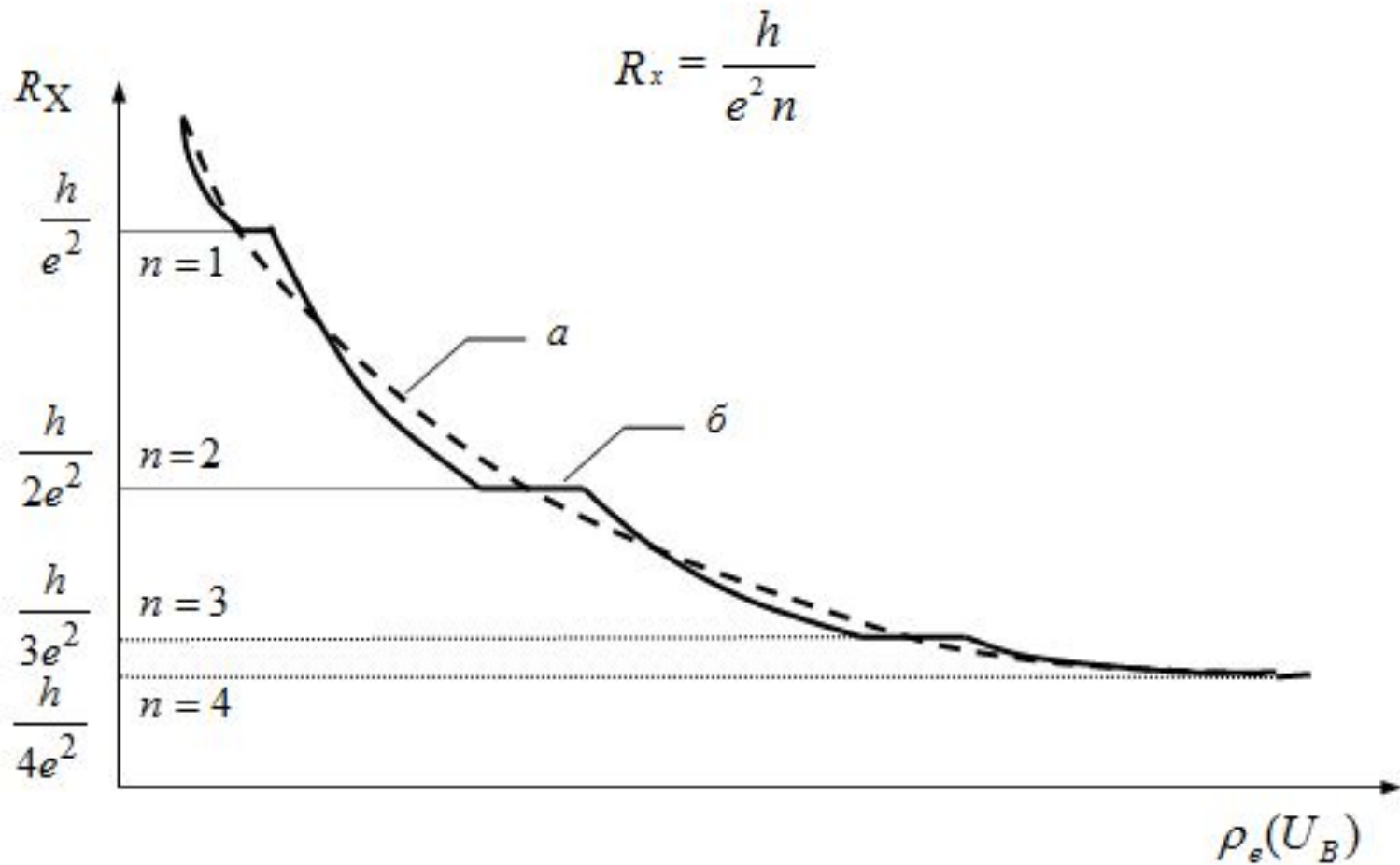
Фізичні основи квантового ефекту Холла

Для розуміння квантового ефекту Холла розглянемо спочатку «звичайний ефект Холла», відкритий відомим фізиком у 1879 р. Він полягає в тому, що в металі, або в напівпровідникові зі струмом, який поміщено в магнітне поле, перпендикулярне до вектора напрямку струму, виникає поперечне електричне поле і різниця потенціалів – ЕРС Холла E_x . Причиною ефекту Холла є відхилення електронів, які рухаються в магнітному полі, під дією сили Лоренца. На рисунку вказані напрямки магнітної індукції B і струму I , швидкості електронів v і сили Лоренца F_L , а також знаки зарядів, що накопичуються на верхній і нижній поверхнях металу або напівпровідника. Відхилення електронів магнітним полем буде мати місце, поки дія сили в поперечному електричному полі не врівноважить силу Лоренца.

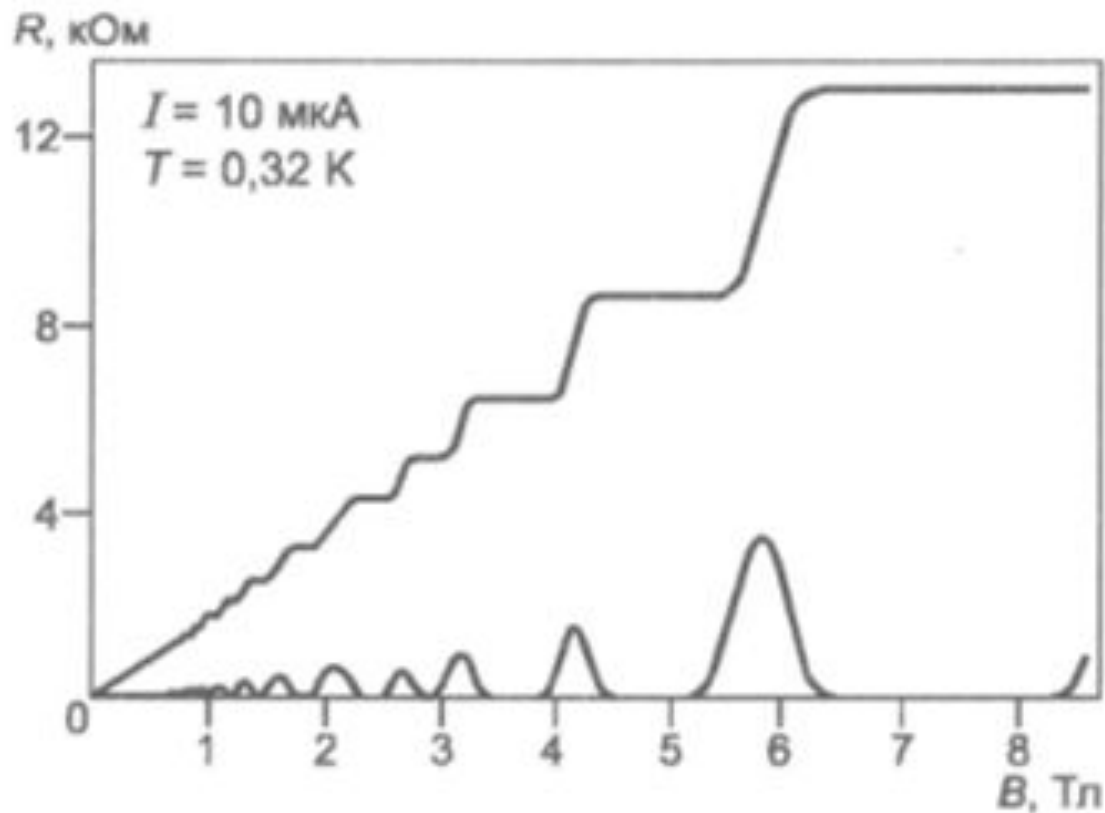
Ефект Холла



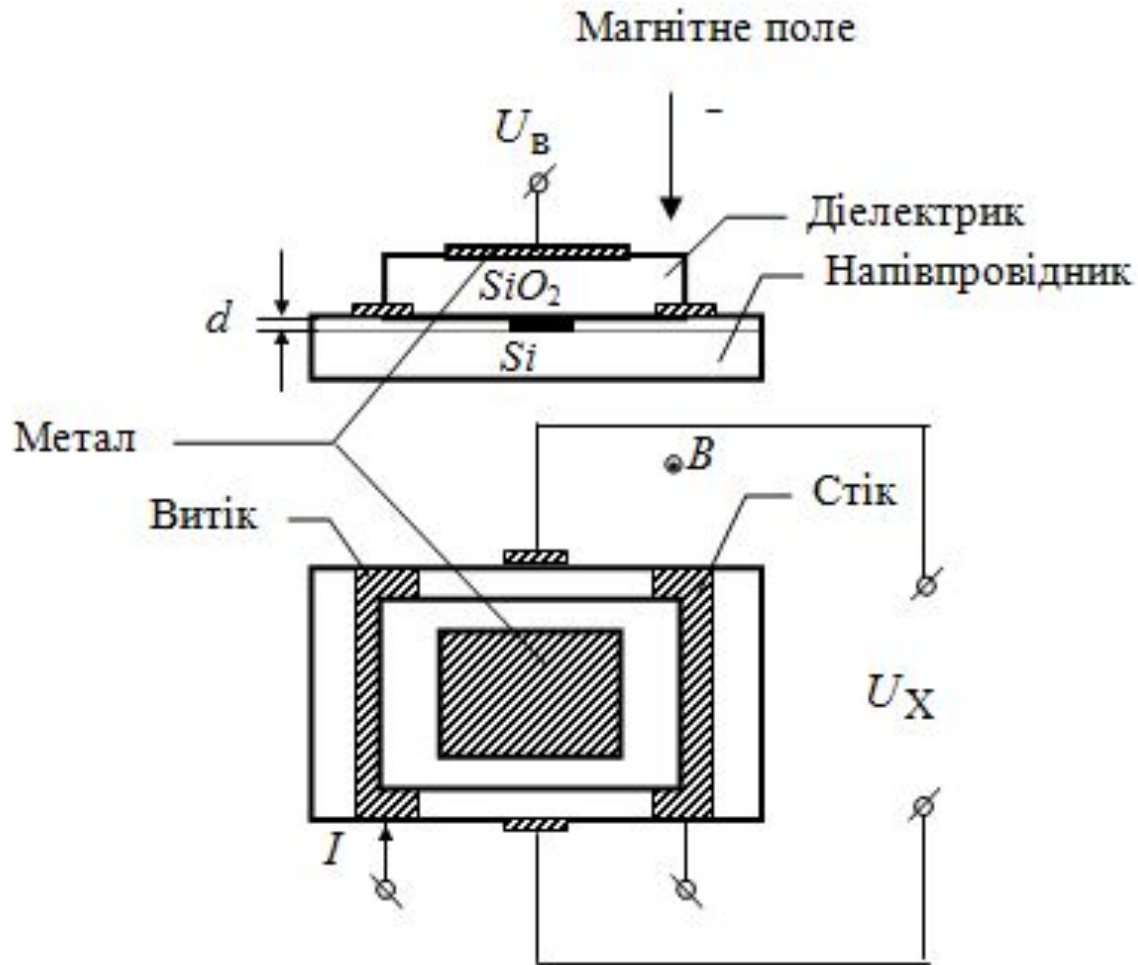
Залежність холлівського опору від щільності електронів у каналі



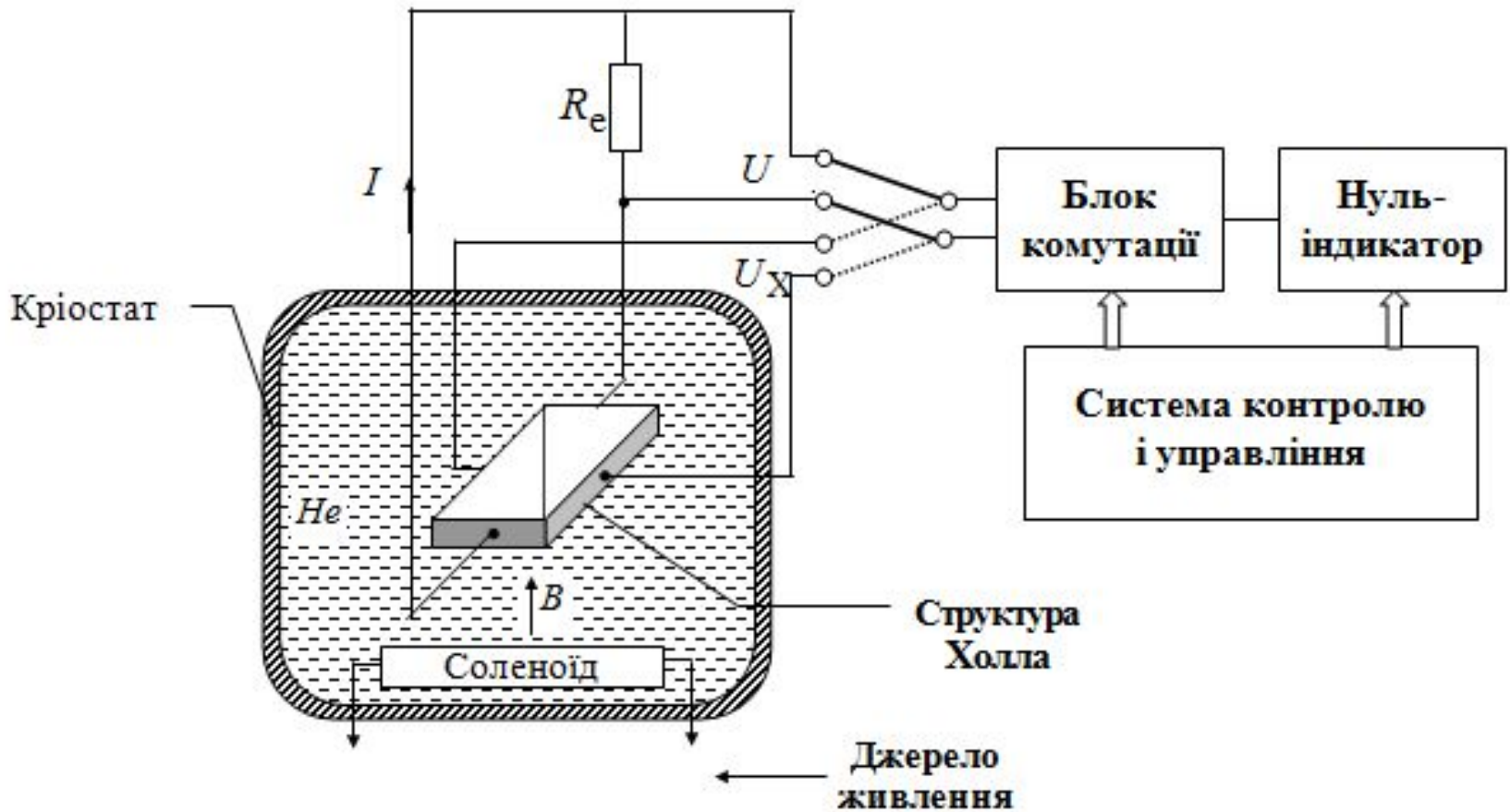
Залежність холлівського і подовжнього опору від магнітної індукції



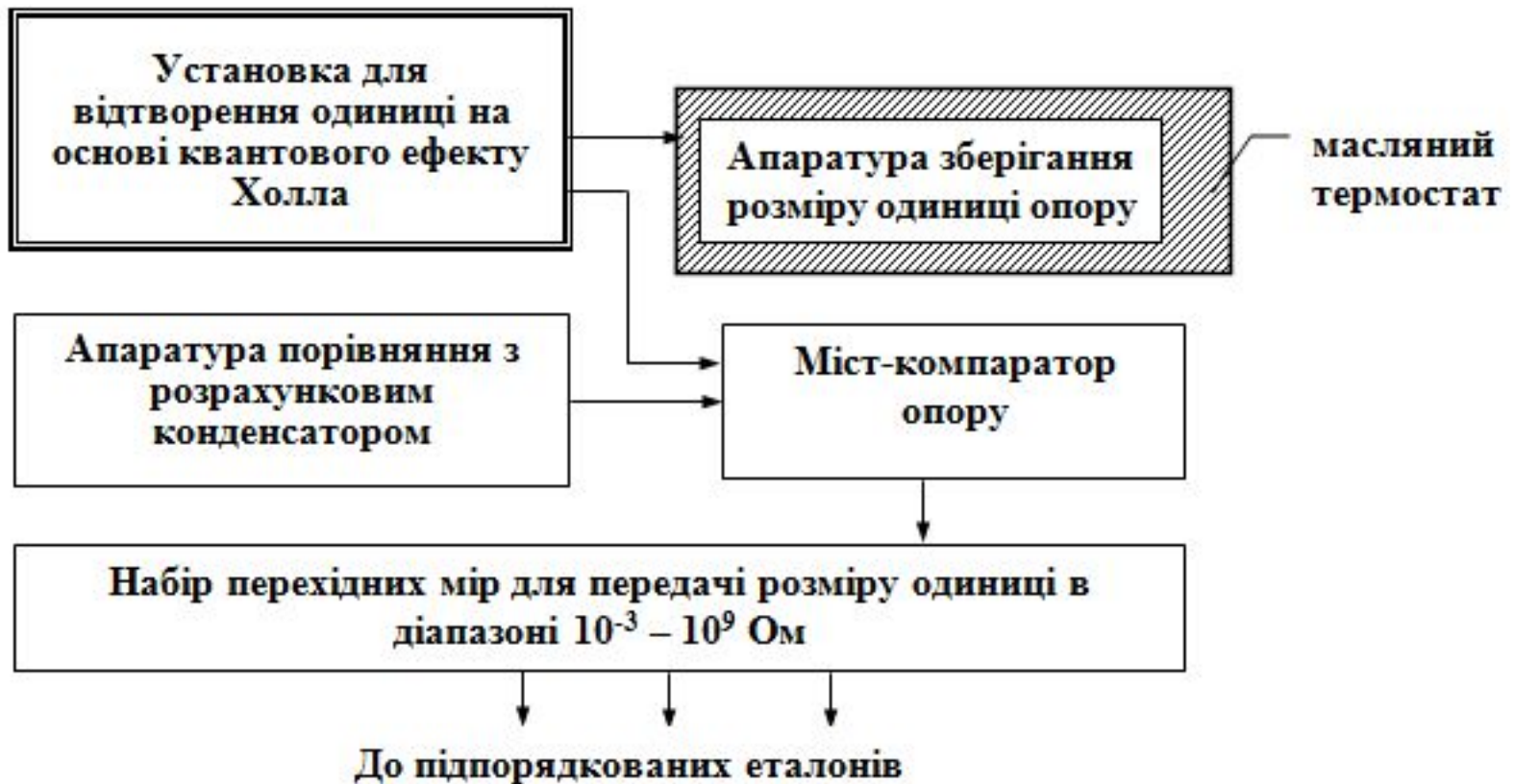
Холлівська структура типу метал – діелектрик – напівпровідник



Структурна схема установки для реалізації квантового ефекту Холла



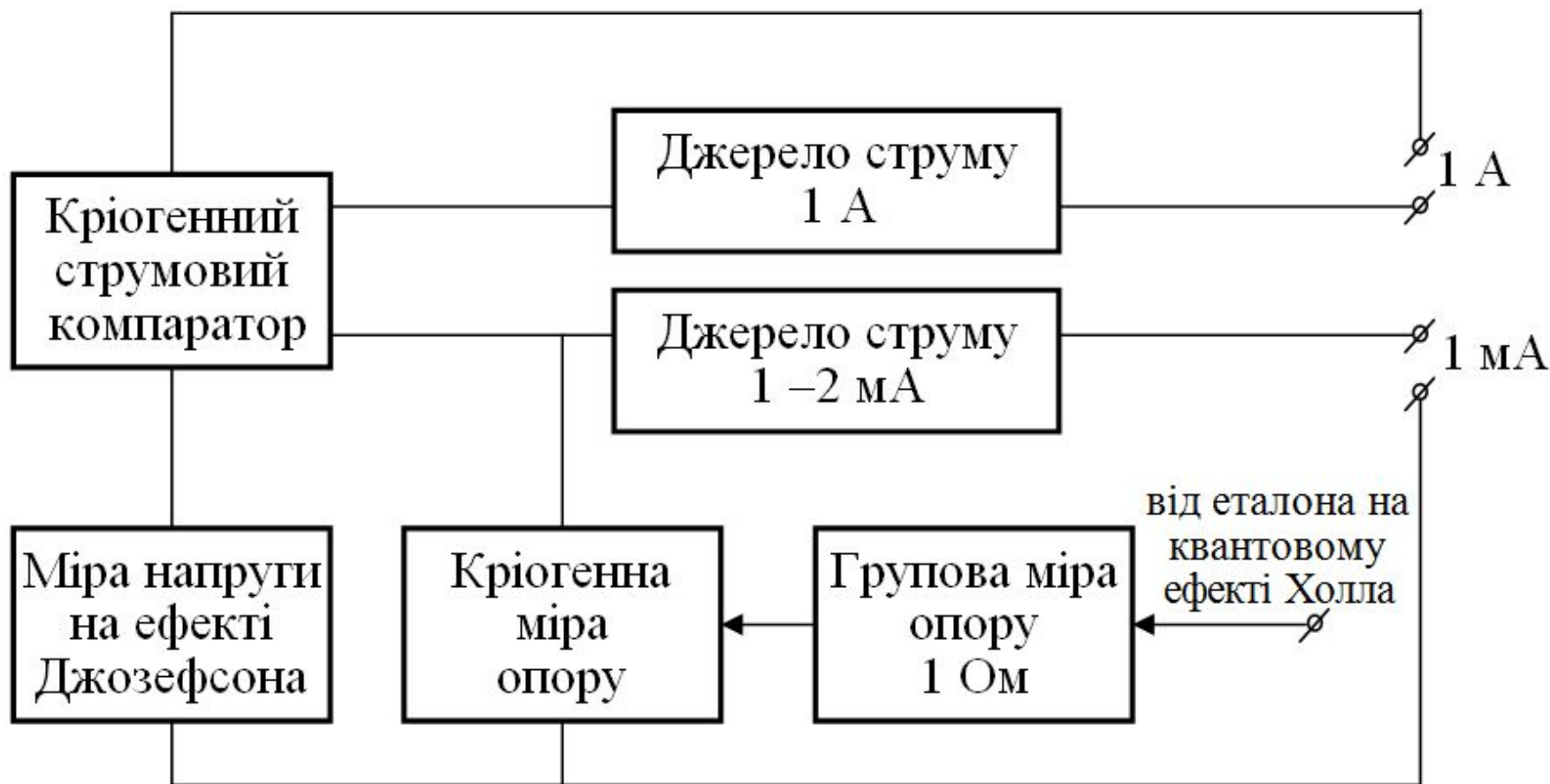
Структурна схема первинного еталона одиниці електричного опору



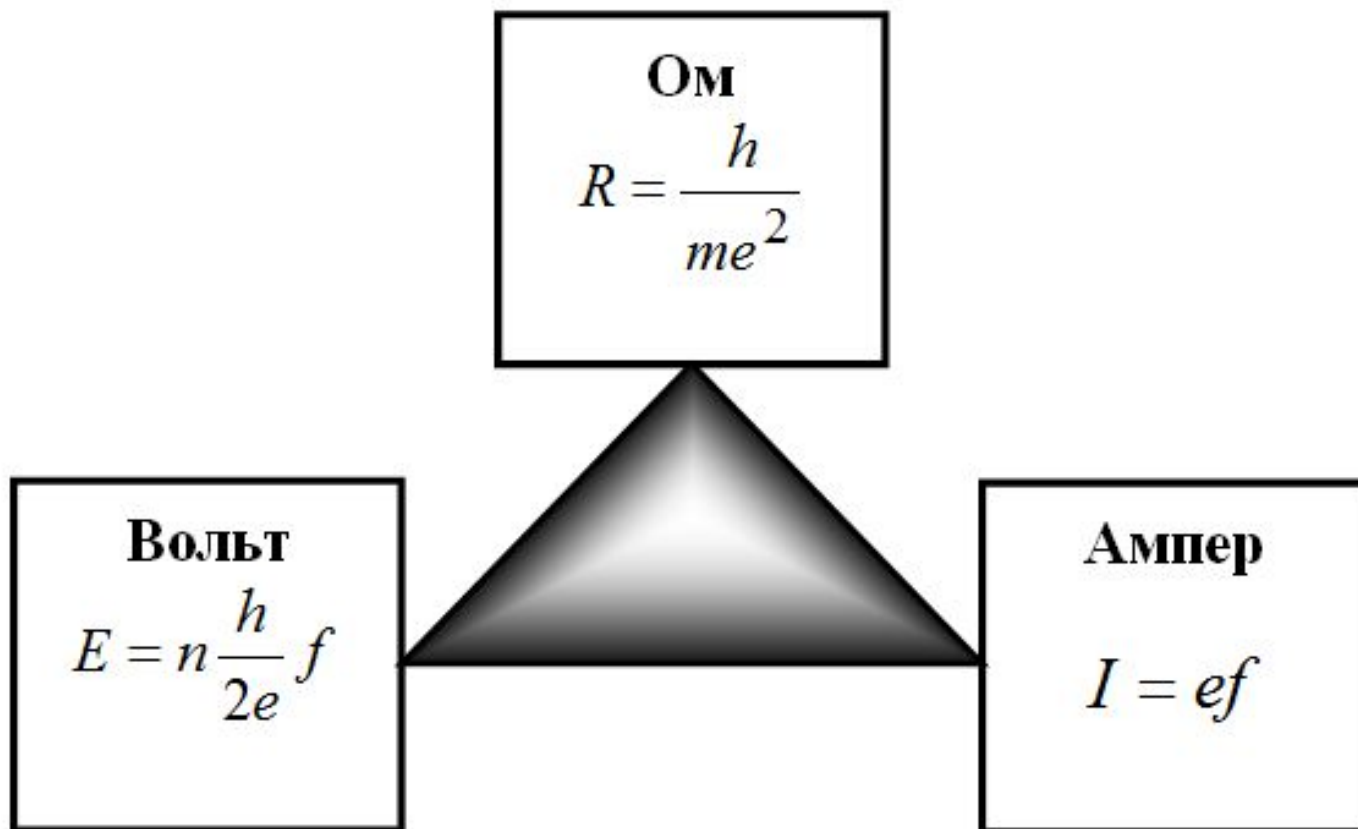
Державний первинний еталон одиниці електричного опору (ВНИИМ)



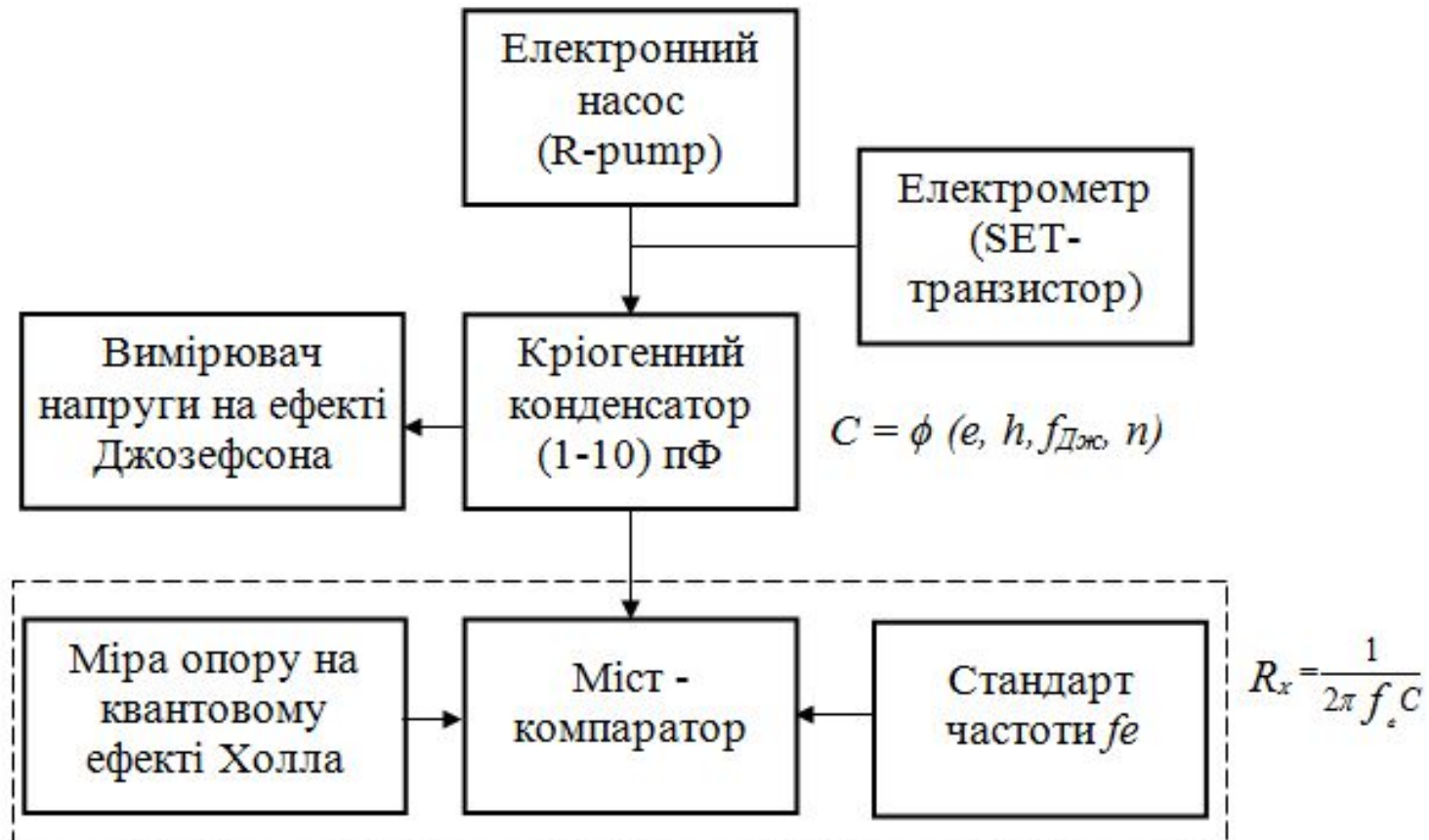
Структурна схема еталона ампера з використанням квантових ефектів Джозефсона і Холла



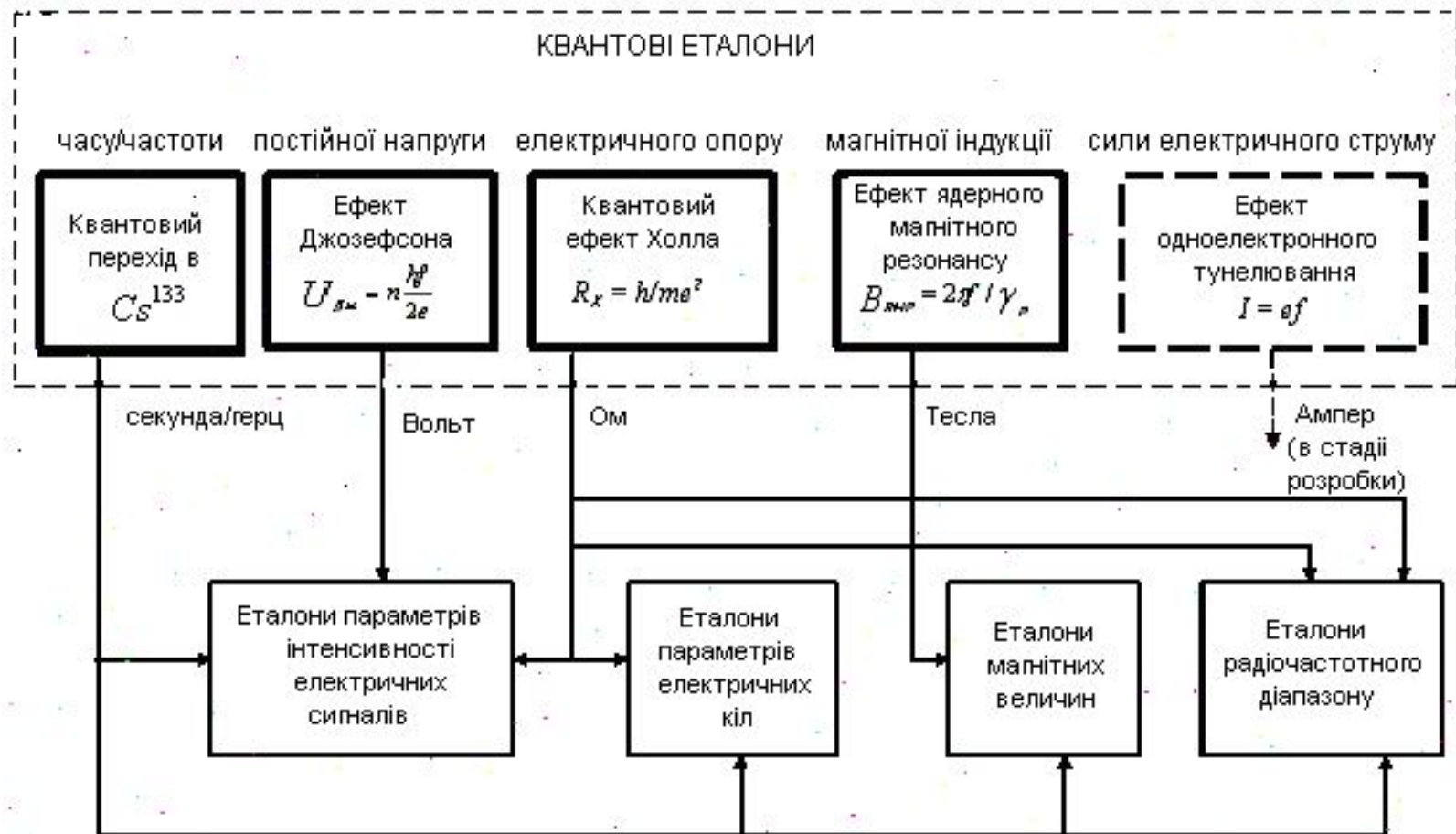
«Трикутник» квантових еталонів



Варіант реалізації трикутника квантової метрології



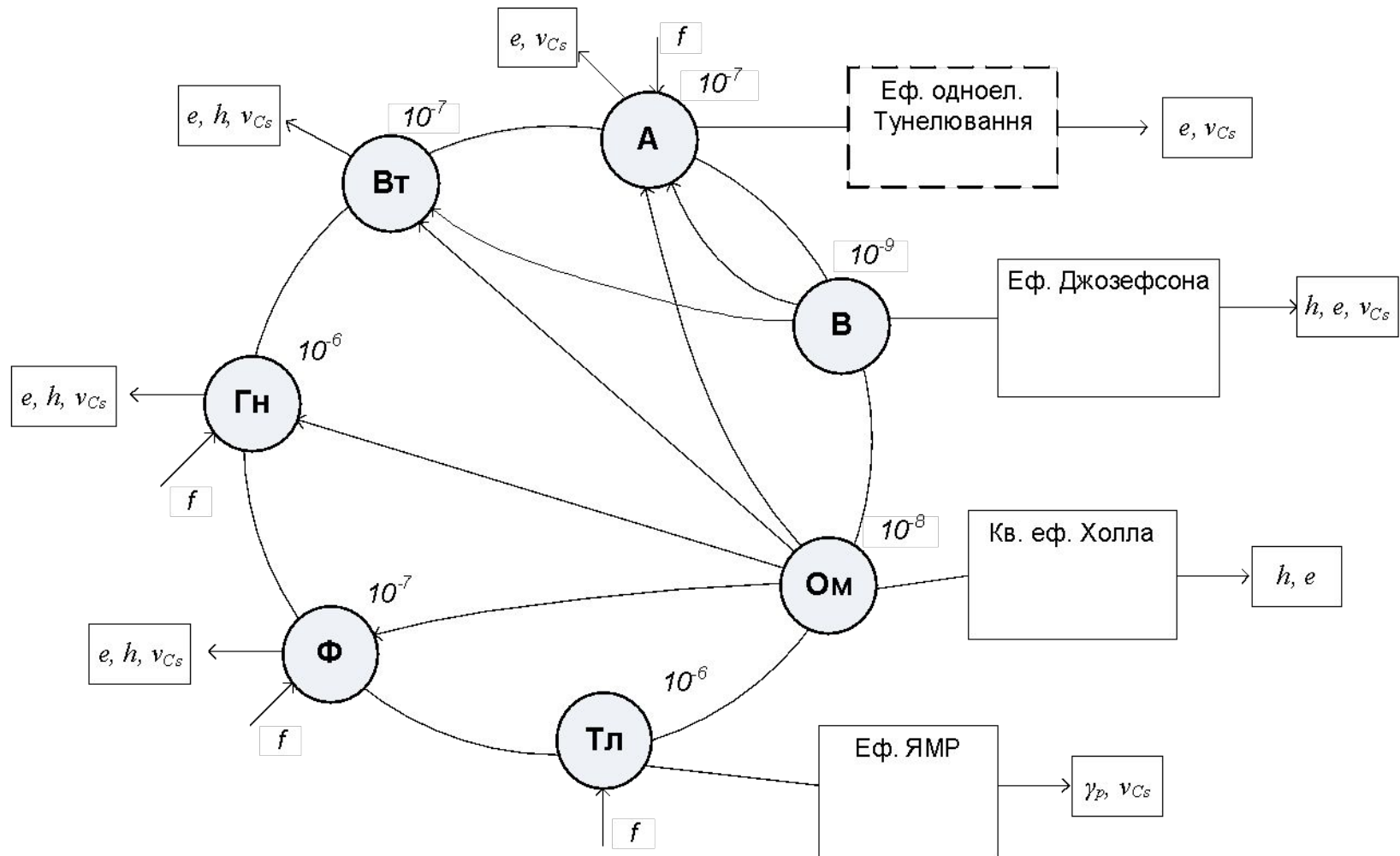
Нова (практична) система еталонів електричних одиниць



Порівняння двох систем еталонів

Показники	Еталони системи SI	Еталони нової (практичної) системи
Методологія побудови еталонів	Механічні вимірювання	Квантові ефекти
Технічні засоби первинних еталонів	Струмові ваги Міри ЕРС (нормальні елементи, твердотільні міри) Розрахунковий конденсатор Розрахункова магнітна котушка	Високотехнологічні квантові мікроструктури Надпровідникова техніка Кріогенна техніка
Розширена невизначеність вимірювання	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-9}$
Загальні експлуатаційні показники	Висока трудомісткість Складність забезпечення умов відтворення одиниць Значна залежність від факторів, що на них впливають	Висока стабільність та доступність Незначна залежність від факторів, що на них впливають
Система забезпечення єдності	Централізована (простежуваність до системи SI)	Можлива децентралізація (простежуваність до ФФС)

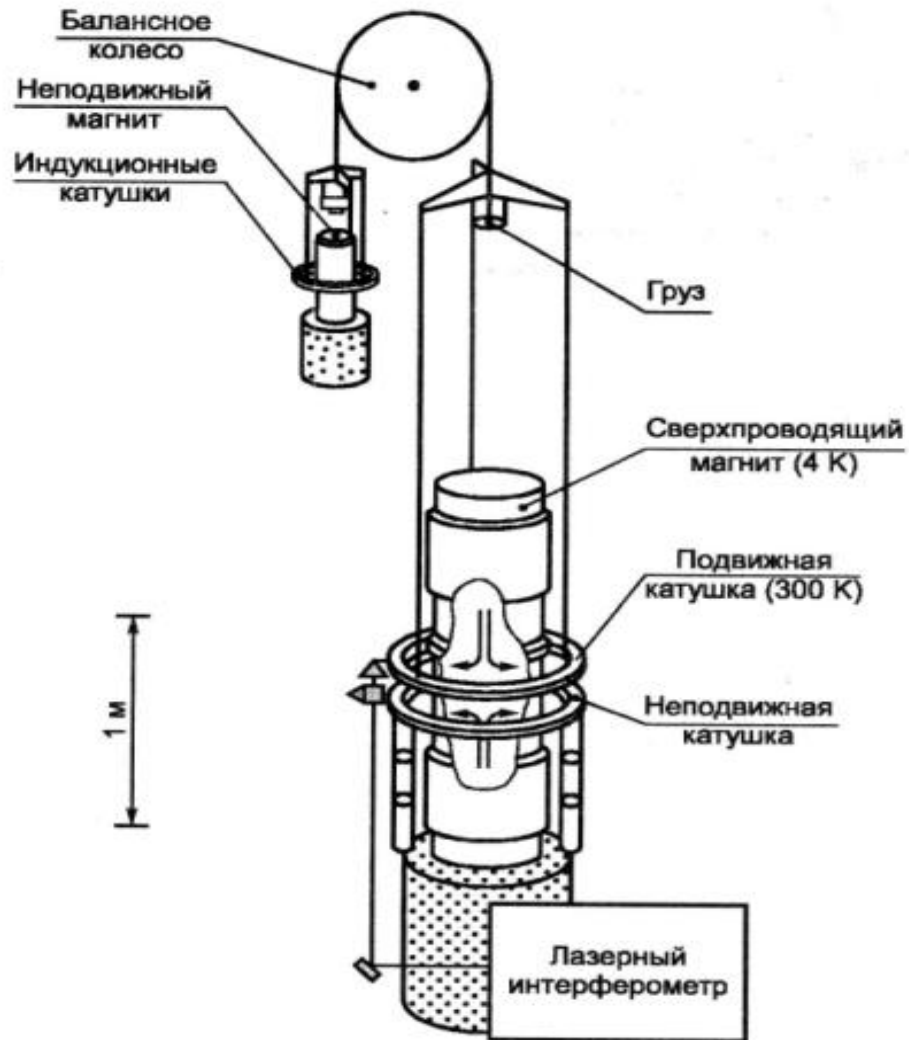
Зв'язок електричних одиниць з ФФС



Виготовлення кремнієвої кулі



Схема ват-вагов NIST (США)



Ват-ваги NIST (США)

