

Тема 8. Цифрові вимірювальні прилади

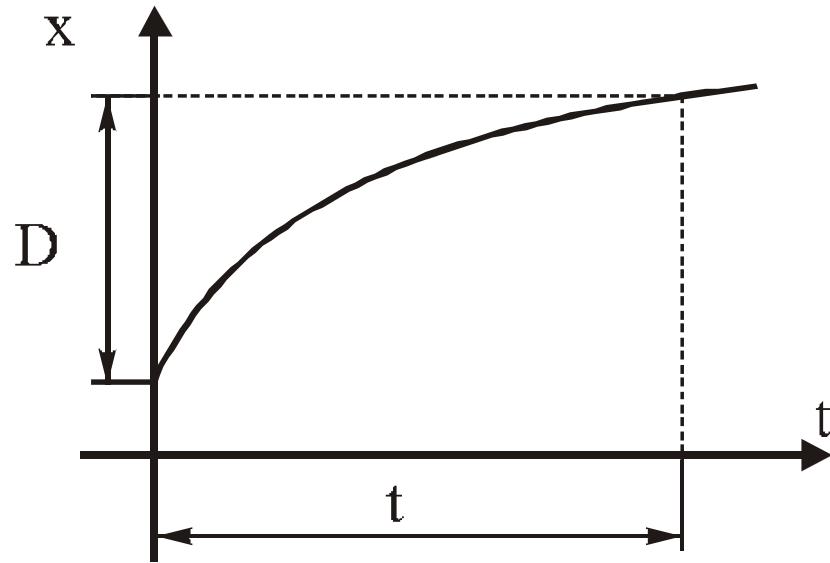
Цифровими називаються такі **вимірювальні прилади**, в яких вимірювана величина автоматично в результаті квантування, дискретизації, порівняння, цифрового кодування і відповідних обчислень постає у вигляді коду.

Принцип роботи цифрових вимірювальних приладів (ЦВП) засновано на дискретному відображенні неперервних величин.

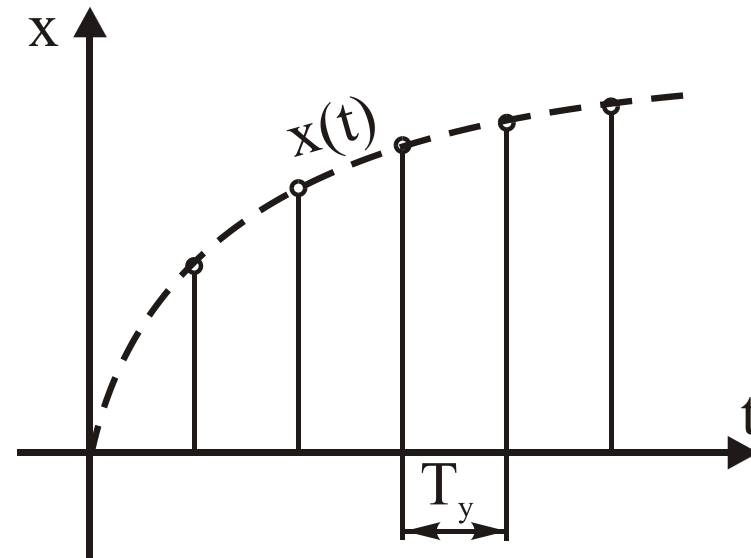
Неперервна величина $X(t)$ - це величина, яка може мати в заданому діапазоні D нескінченно велике число значень в інтервалі часу t при нескінченно великому числі моментів часу. Величина може бути неперервною або за значенням, або у часі.

Величина, неперервна за значенням і перервна у часі, називається **дискретизованою**

Кроком дискретизації називається проміжок часу між двома сусідніми миттєвими значеннями сигналу.



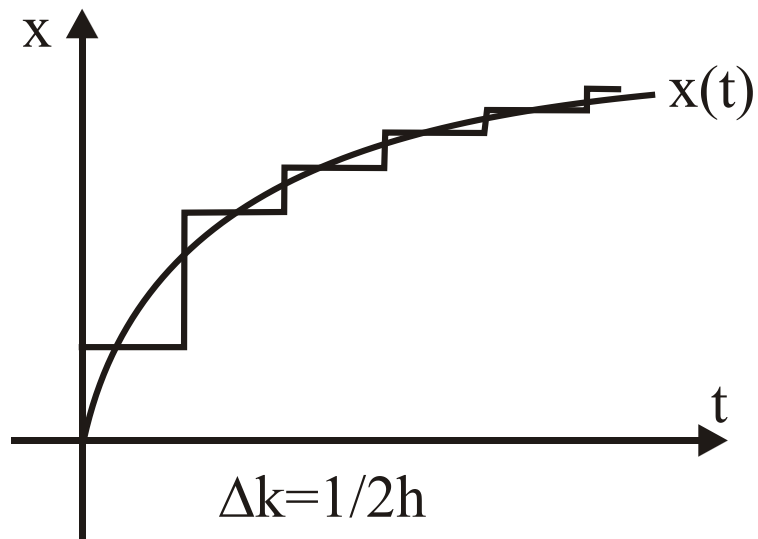
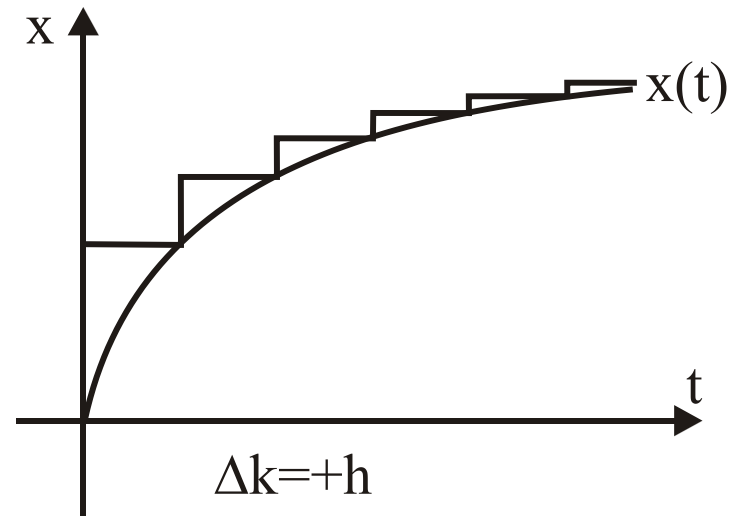
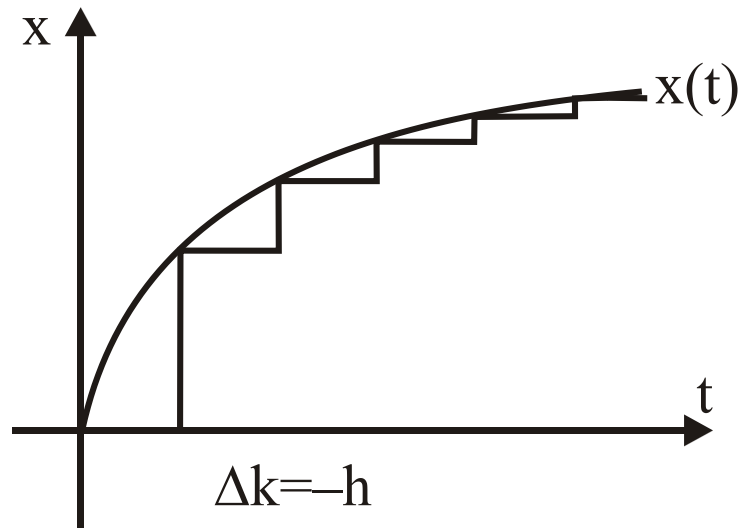
Неперервна величина



Дискретизована величина

Процес перетворення неперервної у часі величини в дискретизовану шляхом збереження її миттєвих значень тільки в детерміновані моменти часу t_1, t_2, \dots, t_n називається **дискретизацією**.

Величина, неперервна в часі і перервна за значенням, називається **квантованою**



Квантована величина

Вимірювальне перетворення аналогової величини у ступінчасто-змінювану із заданими розмірами квантів називається квантуванням.

Кроком квантування h називається різниця між двома сусідніми заданими значеннями квантованої величини. Крок квантування може бути змінним або постійним.

Неперервна величина може бути дискретизованою в часі і квантованою за значенням. Аналогова величина $X(t)$ після квантування за рівнем і дискретизацією у часі в ЦВП обмежується кількістю значень цифрового відлікового пристрою. Як наслідок, **у результаті квантування і дискретизації втрачається інформація, що є причиною виникнення похибок квантування і дискретизації.**

Основні похибки цифрових вимірювальних приладів складаються з **похибки квантування ΔX_k , дискретизації ΔX_d і інструментальної ΔX_i :**

$$\Delta X_{\text{ЦВП}} = f(\Delta X_k, \Delta X_d, \Delta X_i)$$

Похибка квантування ΔX_k - це методична похибка, що виникає через обмежене число рівнів квантування h внаслідок заміни неперервної величини квантованою:

$$\Delta X_k = \frac{1}{2} h$$

Похибка ΔX_k належить до статичних.

Динамічна похибка – це похибка, що виникає внаслідок зміни вимірюваної величини під час вимірювань:

$$\Delta X_d = \frac{1}{2} T_d \frac{dX}{dt}$$

T_d - крок дискретизації;

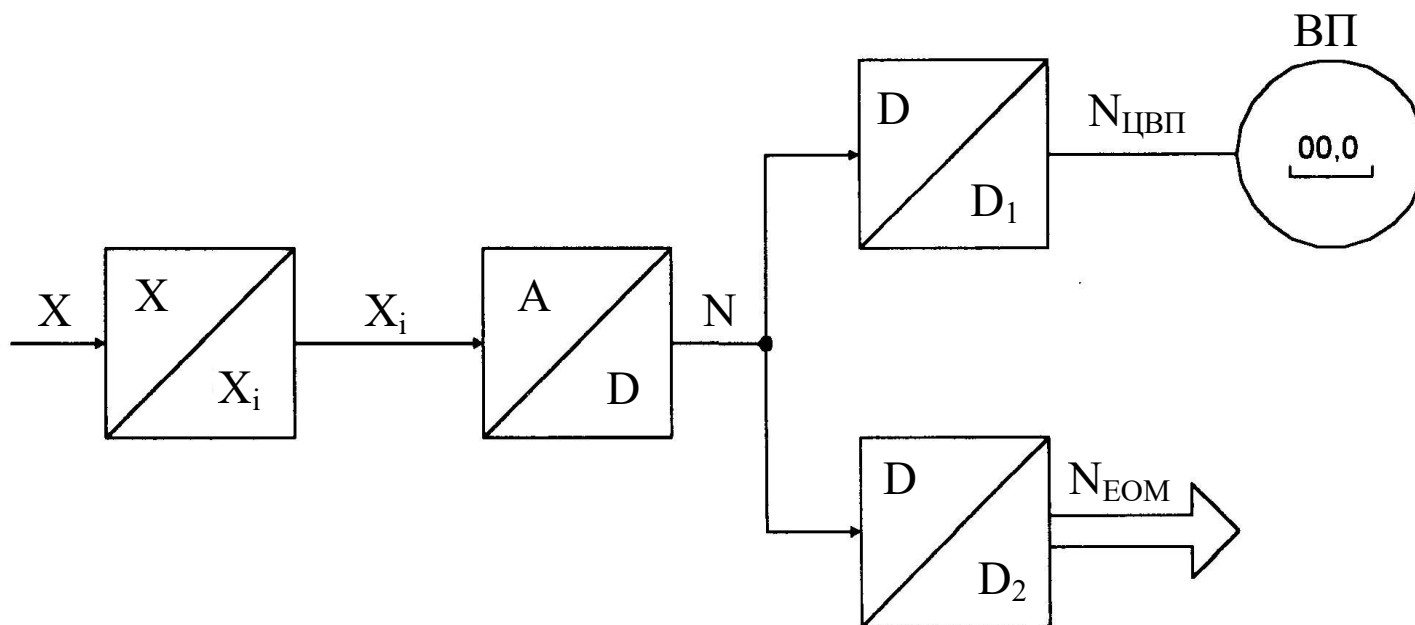
$\frac{dX}{dt}$ - швидкість зміни вихідної величини.

Динамічна похибка зумовлена обмеженим часом вимірювання $T_{\text{вим}} = T_d$, протягом якого вимірювана величина може значно змінюватися.

Динамічна похибка обмежує швидкість зміни вимірюваної величини.

Похибки, пов'язані або викликані порогом чутливості пристрою порівняння або його нестабільністю, похибки від впливу завад на елементи цифрових вимірювальних приладів складають **інструментальні похибки ΔX_i**

Класифікація цифрових вимірювальних приладів



Узагальнена структурна схема ЦВП складається з **вимірювального перетворювача** вхідної електричної величини X у вихідну електричну величину X_i , достатню для надійної роботи **анало-цифрового перетворювача** A/D , **перетворювачів код-код** D/D і **цифрового відлікового пристрою** ВП .

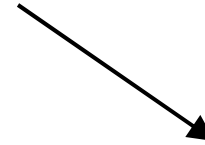
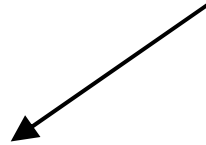
Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) перетворює аналогову (вимірювану) величину в цифровий двійковий код, а ВП відображає це значення в десятковій системі числення.

Крім АЦП до цифрових перетворювачів відносяться **цифро-аналогові перетворювачі** ЦАП, які призначені для перетворення двійкового коду в аналогову квантовану величину.

Необхідність **перетворювачів код-код D/D** пояснюється тим, що код, потрібний для роботи цифрового відлікового пристрою, може не відповідати вихідному коду A/D. На виході A/D найчастіше формується двійковий код, а оператору для сприйняття найбільш зручний десятковий.

Другий перетворювач код-код D/D2 необхідний для уніфікації коду і подальшого спряження з персональними комп'ютерами.

Цифрові вимірювальні прилади



Прилади зрівноважування

(Структурна схема замкнена)

Прилади зіставлення

(Структурна схема розімкнена)

Прилади слідкувального зрівноважування.

Прилади розгортального зрівноважування.

алгоритми послідовного наближення

алгоритми порозрядного зрівноваження

Прилади зіставлення (розімкненого типу) містять ряд послідовно ввімкнених вимірювальних перетворювачів.

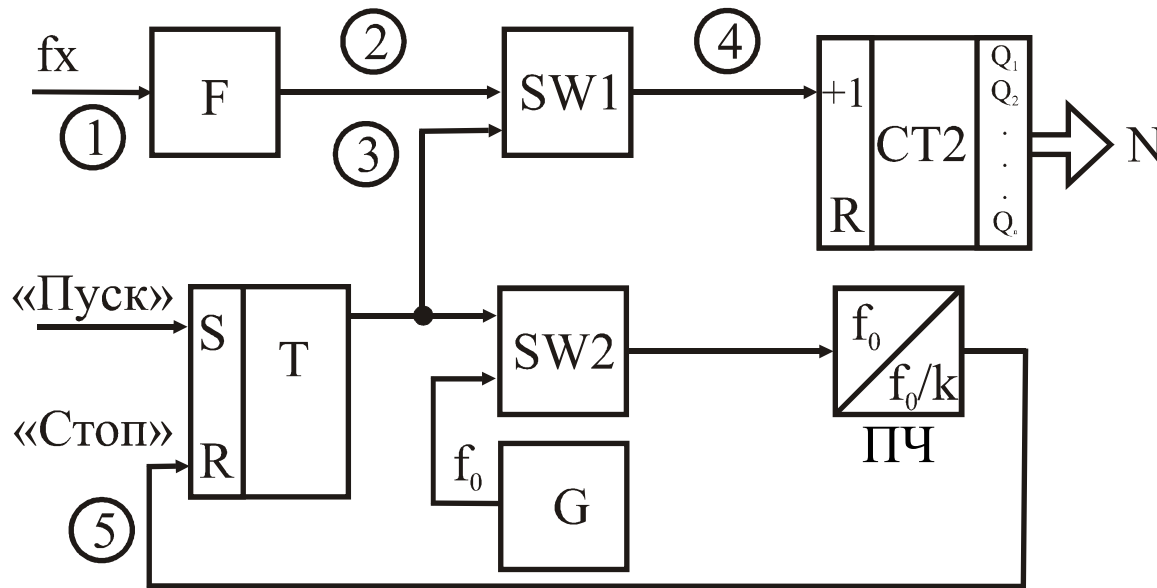
Характерною особливістю структури таких вимірювальних пристроїв є відсутність загального зворотного зв'язку з виходу на вхід. **Засоби вимірювання цього типу характеризуються більш високою швидкістю і більшою похибкою порівняно з ЦВП зрівноважування.**

У **цифрових слідкувальних приладах** компенсувальна величина постійно слідкує за змінами вхідної величини.

У **цифрових приладах розгортального зрівноважування** компенсувальна величина змінюється примусово циклами, які повторюються за раніше заданою програмою в бік збільшення чи зменшення керувальним автоматом і мірою.

За видом вхідної (вимірюваної) величини ЦВП поділяються на цифрові частотоміри, фазометри, вольтметри та вимірювачі параметрів електричних кіл.

Цифровий частотомір середніх значень



F – формувач імпульсів

T – RS-тригер

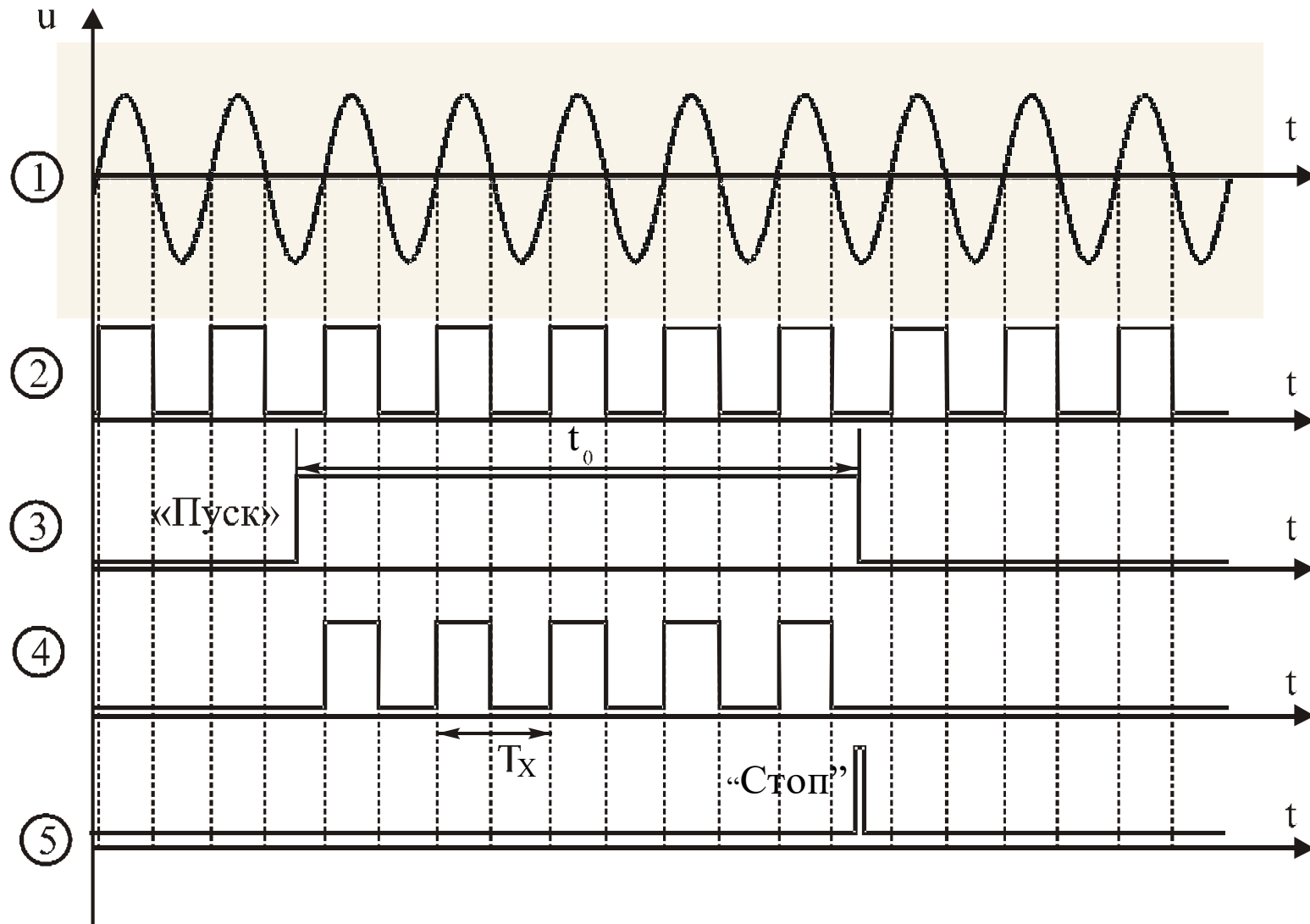
SW – схема збігу

G – генератор
зразкової частоти

ПЧ – подільник частоти

CT2 – двійковий
лічильник

Принцип дії цифрового частотоміра середніх значень засновано на підрахунку кількості імпульсів невідомої частоти f_x за зразковий часовий інтервал t_0 , який формується зразковою мірою часу.



Часові діаграми роботи цифрового частотоміра середніх значень

Робота цифрового частотоміра середніх значень

За командою "Пуск" тригер **T** приймає стан логічної одиниці і таким чином відкриває схеми збігу **SW1** і **SW2**.

Імпульси, які проходять із частотою f_x через формувач **F** і відкриту схему **SW1**, надходять на вхід двійкового лічильника **CT2**, який здійснює їх підрахунок. В цей самий момент часу через відкриту схему **SW2** імпульси f_0 із виходу генератора **G** зразкової частоти надходять на вхід подільника частоти, коефіцієнт ділення якого розраховують з урахуванням забезпечення потрібного часового інтервалу t_0 .

Після закінчення зразкового часового інтервалу заднім фронтом імпульсу t_0 тригер **T** встановлюється у стан логічного нуля, схеми збігу **SW1** і **SW2** закриваються і в лічильнику **CT2** фіксується код **N**.

Кількість імпульсів, які підраховує двійковий лічильник за час t_0 :

$$N_i = \int_{t_1}^{t_2} T_x dt = \frac{t_0}{T_x} = t_0 f_x$$

Зразковий часовий інтервал формується в подільнику частоти

$$t_0 = k T_0$$

Тоді рівняння перетворення цифрового частотоміра середніх значень матиме вигляд:

$$N_F = k T_0 f_x = \frac{k f_x}{f_0}$$

Статична характеристика цифрового частотоміра середніх значень лінійна

За умови постійної абсолютної похибки в діапазоні зміни вимірюваної величини межа допуску основної похибки нормується у вигляді максимальної зведеної похибки

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_H} 100\% = \frac{1}{N} 100\%$$

Похибка квантування цифрового частотоміра середніх значень

$$\delta_{kF} = \frac{1}{N_F} 100\% = \frac{f_0}{k f_x} 100\%$$

Похибка квантування зменшується при збільшенні зразкового часового інтервалу t_0 . Однак, збільшення t_0 приводить до зростання часу вимірювання, а, отже, до зниження швидкодії.

Другою складовою похибки вимірювання частоти є **похибка зразкової міри часу** $\delta_{\text{змч}}$, яка зумовлена неточністю первинного встановлення значення t_0 і його наступними часовими та температурними змінами.

Нижня межа вимірювання:

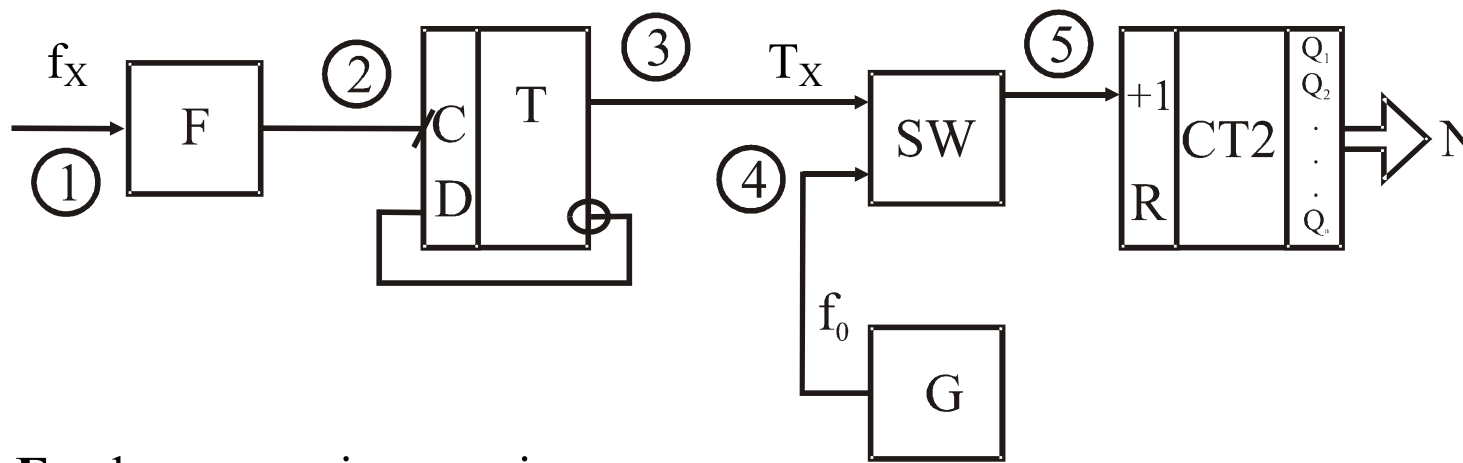
$$f_{x \min} = \frac{f_0}{k \delta_{\text{кн}}} 100\%$$

Верхня межа вимірювання:

$$f_{x \max} = \frac{2^n f_0}{k}$$

Під час вимірювання низьких частот похибка велика, і тому область застосування таких частотомірів – вимірювання середніх частот (>1000 Гц).

Цифровий періодомір (частотомір миттєвих значень)



F – формувач імпульсів

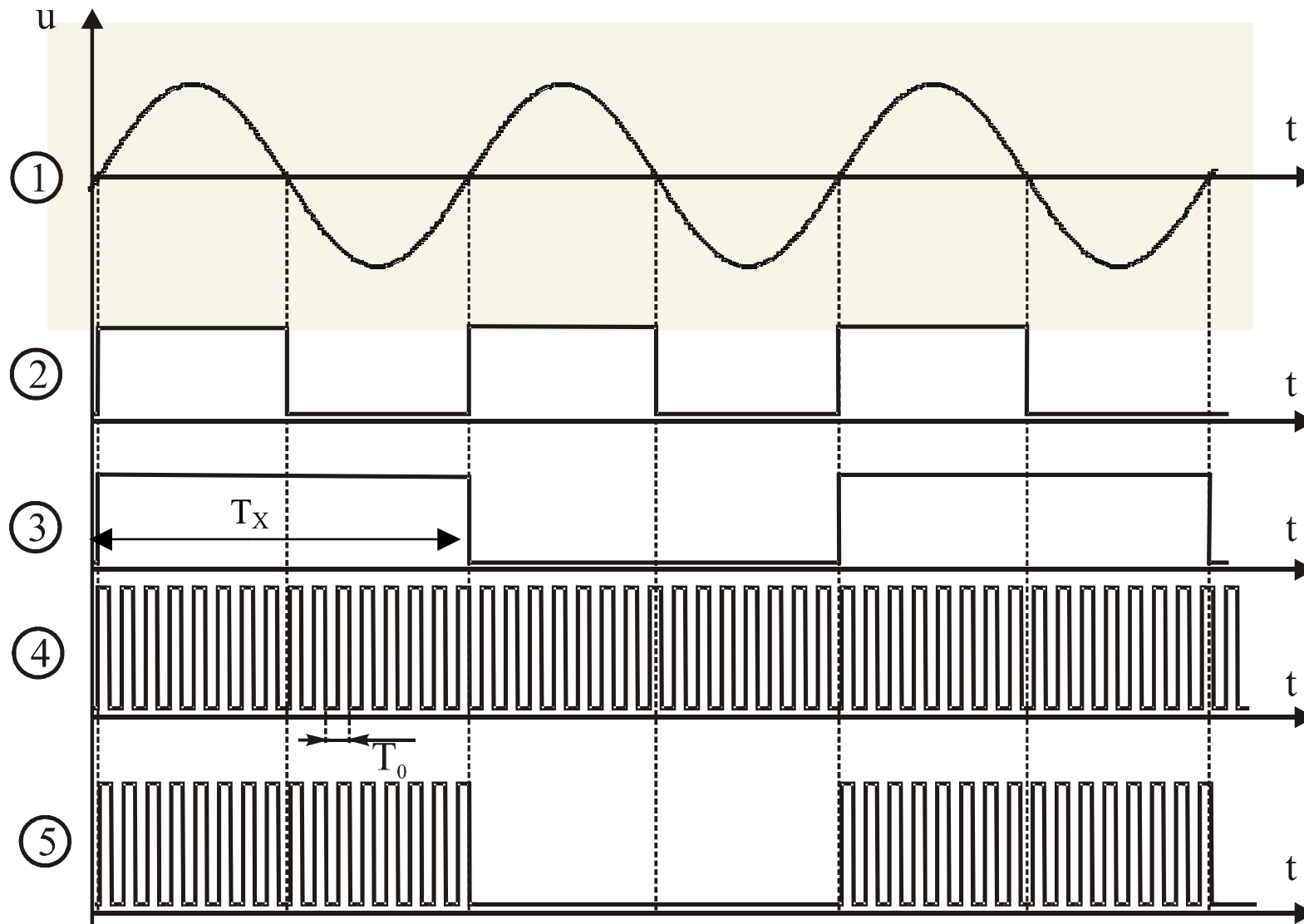
T – D-тригер

SW – схема збігу

G – генератор зразкової частоти

$CT2$ – двійковий лічильник

Принцип дії цифрового періодоміра заснований на квантуванні невідомого періоду сигналу T_x імпульсами зразкової частоти f_0 , що їх формує зразкова міра частоти (ЗМЧ)



Часові діаграми роботи цифрового частотоміра миттєвих значень

Калібровані за амплітудою і тривалістю імпульси з виходу формувача **F** надходять на вхід **пристрою виділення періоду** (ПВП). **ПВП** являє собою **лічильний тригер T**, на прямому виході якого з імпульсів із частотою **f_x** формується період **T_x**, що вимірюється.

Період **T_x** у схемі збігу **SW** квантується імпульсами зразкової частоти **f₀**. Протягом кожного періоду **T_x** схема **SW** відкрита. Імпульси **f₀** із виходу генератора **G** через відкриту схему **SW** надходять на вхід лічильника **СТ2**. У лічильнику після закінчення кожного періоду **T_x** формується код

$$N_T = \int_{t_1}^{t_2} T_0 dt = \frac{T_x}{T_0} = T_x f_0 = \frac{f_0}{f_x}$$

Значення **похибки квантування** цифрового періодоміра

$$\delta_{кТ} = \frac{1}{N} 100\% = \frac{1}{T_x f_0} 100\% = \frac{f_x}{f_0} 100\%$$

Аналіз рівняння **похибки квантування** показує, що можливим шляхом її зменшення є **збільшення частоти квантування f_0 і вимірюваної величини T_x** .

Збільшення частоти f_0 обмежене швидкістю елементної бази, на якій реалізується частотомір. Тому для зменшення цієї складової похибки для фіксованих T_0 і T_x квантують не один, а декілька періодів невідомої частоти.

Крім похибки квантування в частотомірі миттєвих значень виникає **похибка зразкової міри часу $\delta_{змч}$** , яка зумовлена неточністю первинного встановлення частоти генератора G , її часовою і температурною нестабільностями, а також похибкою виділення періоду.

Доповнивши структуру періодоміра **перетворювачем N_T/N_f** , в якому виконується операція $1/T_x$, одержують схему цифрового частотоміра миттєвих значень.

Нижня межа вимірювань обмежена максимальною ємністю двійкового лічильника

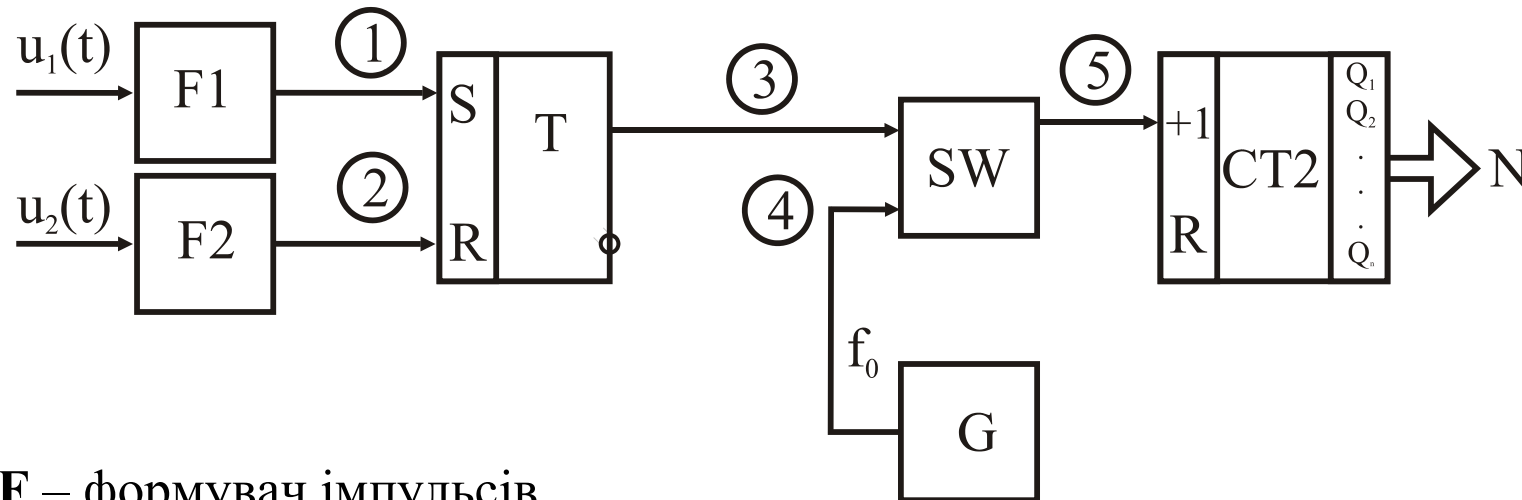
$$N_{\max} = \frac{f_0}{f_x} \Rightarrow 2^n = \frac{f_0}{f_{x\min}} \Rightarrow f_{x\min} = \frac{f_0}{2^n}$$

Верхня межа вимірювання визначається нормованим значенням похибки квантування

$$\delta_{\text{кн}} = \frac{f_{x\max}}{f_0} 100\% \Rightarrow f_{x\max} = \frac{\delta_{\text{кн}} f_0}{100\%}$$

Галузь застосування цифрового частотоміра миттєвих значень – вимірювання низьких та інфранизьких частот (до одиниць кілогерц).

Цифровий фазометр миттєвих значень



F – формувач імпульсів

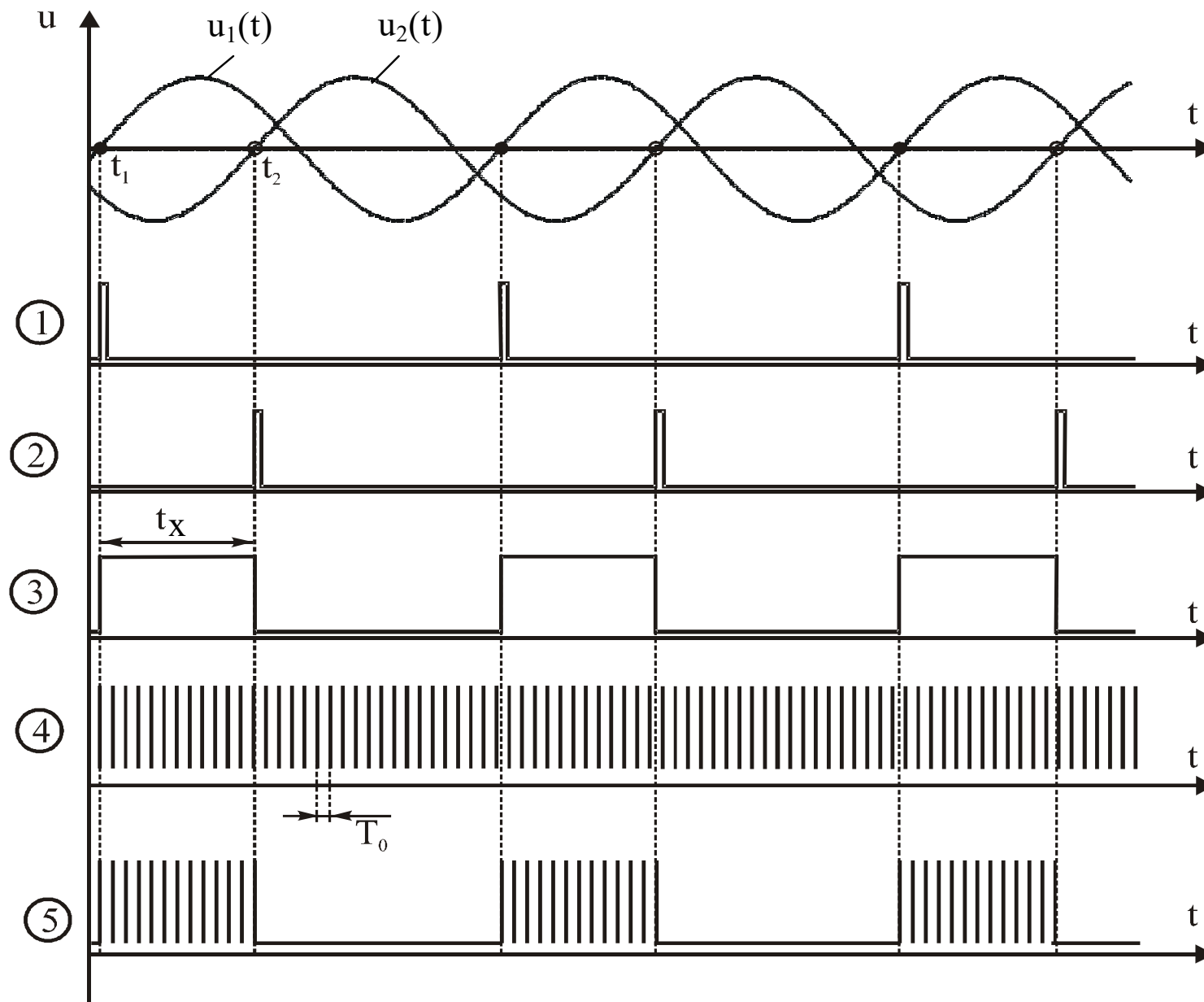
T – RS-тригер

SW – схема збігу

G – генератор
зразкової частоти

CT2 – двійковий
лічильник

Принцип дії цифрових фазометрів заснований на перетворенні різниці фаз двох електричних сигналів однакової частоти у часовий інтервал t_x із наступним його квантуванням імпульсами зразкової частоти f_0 .



Часові діаграми роботи цифрового фазометра миттєвих значень

У момент переходу напруги $u_1(t)$ через рівень нуля на виході формувача **F1** формується короткий імпульс, що встановлює тригер **T** в стан логічної одиниці. Цим рівнем відкривається схема **SW**, і імпульси зразкової частоти f_0 із виходу генератора **G** через відкриту схему **SW** надходять на **CT2**. У лічильнику **CT2** відбувається підрахунок імпульсів f_0 .

Цей процес відбувається доти, поки напруга $u_2(t)$ не перейде рівень нуля. В момент переходу $u_2(t)$ через нульовий рівень на виході формувача **F2** формується короткий імпульс, що встановлює тригер **T** в стан логічного нуля. Цим рівнем закривається схема **SW**, і припиняється надходження імпульсів із частотою f_0 на вхід лічильника **CT2**. Кількість імпульсів із частотою f_0 , що надійшли до лічильника **CT2** за часовий інтервал t_x , визначається як

$$N_{\text{фм}} = \int_{t_1}^{t_2} T_0 dt = \frac{t_x}{T_0} = t_x f_0$$

Різниця фаз φ_x , що вимірюється, є різницею початкових фаз напруг $u_1(t)$ і $u_2(t)$

$$\varphi_x = \varphi_2 - \varphi_1 = \omega t_2 - \omega t_1 = \omega t_x = 2\pi f_x t_x$$

Рівняння перетворення цифрового фазометра миттєвих значень

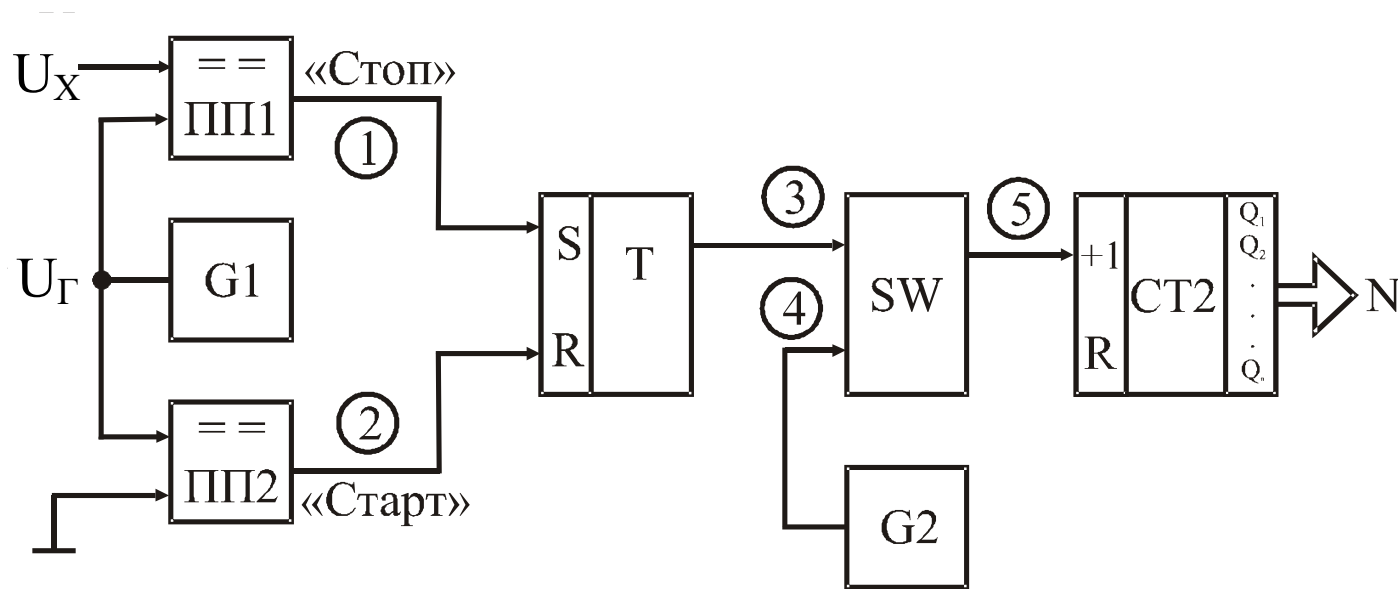
$$N_{\text{фм}} = t_x f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{f_0}{f_x} \varphi_x$$

Рівняння похибки квантування цифрового фазометра миттєвих значень

$$\delta_{\text{фм}} = \frac{1}{N_{\text{фм}}} 100\% = \frac{2\pi f_x}{\varphi_x f_0} 100\%$$

Результати вимірювань залежать від частоти вхідних сигналів f_x при постійних f_0 та φ_x . Для усунення цього недоліку застосовують усереднення вимірюваних інтервалів t_x протягом часу вимірювання t_v .

Цифровий вольтметр час-імпульсного перетворення



T – RS-тригер

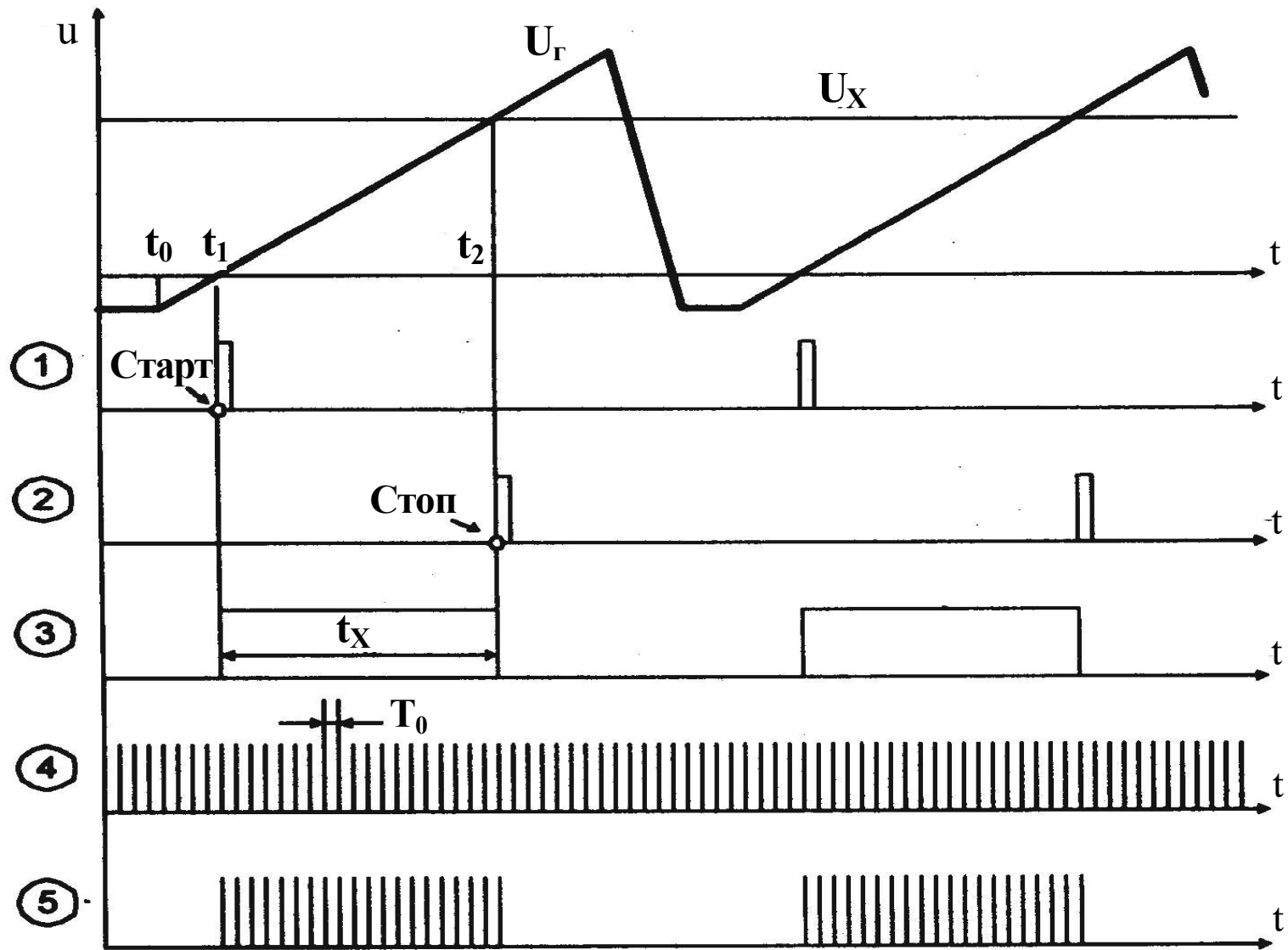
SW – схема збігу

ПП – компаратор

G – генератор
зразкової частоти

CT2 – двійковий
лічильник

Принцип дії заснований на перетворенні вимірюваної напруги U_x в часовий інтервал t_x , із наступним його квантуванням імпульсами зразкової частоти f_0 .



Часові діаграми роботи цифрового вольтметра час-імпульсного перетворення

Двійковий лічильник **СТ2** підраховує кількість імпульсів f_0 за час t_x . У момент часу t_0 сигналом **«Пуск»** запускається генератор **G1** напруги $U_{г}$, яка змінюється лінійно. Напруга $U_{г}$ одночасно подається на входи компараторів **ПП1** і **ПП2**, які по черзі спрацьовують у моменти часу t_1 і t_2 .

При переході напруги $U_{г}$ через рівень нуля (момент часу t_1) спрацьовує компаратор **ПП2**, і на його виході формується імпульс **«Старт»**, що по S-входу встановлює в одиничний стан **тригер Т**. Рівнем логічної одиниці відкривається схема **SW**, і імпульси зразкової частоти f_0 із виходу генератора **G2** надходять на вхід лічильника **СТ2**. Напруга $U_{г}$ зростає, поки не стане рівною U_x . Момент рівності $U_{г} = U_x$ (момент часу t_2) фіксує компаратор **ПП1** і на своєму виході формує сигнал **«Стоп»**. Тригер **Т** встановлюється в нульовий стан і закриває схему **SW**. На цьому процес вимірювання U_x закінчується.

Таким чином, **на виході тригера Т формується часовий інтервал t_x , пропорційний вимірюваній напрузі U_x , який квантується імпульсами зразкової частоти f_0 з виходу G2.**

Кількість імпульсів із частотою f_0 , що надходять на лічильник СТ2 за час t_x , визначається так

$$N_v = \int_{t_1}^{t_2} t_x dt = \frac{t_x}{T_0} = t_x f_0$$

Рівняння перетворення цифрового вольтметра час-імпульсного перетворення

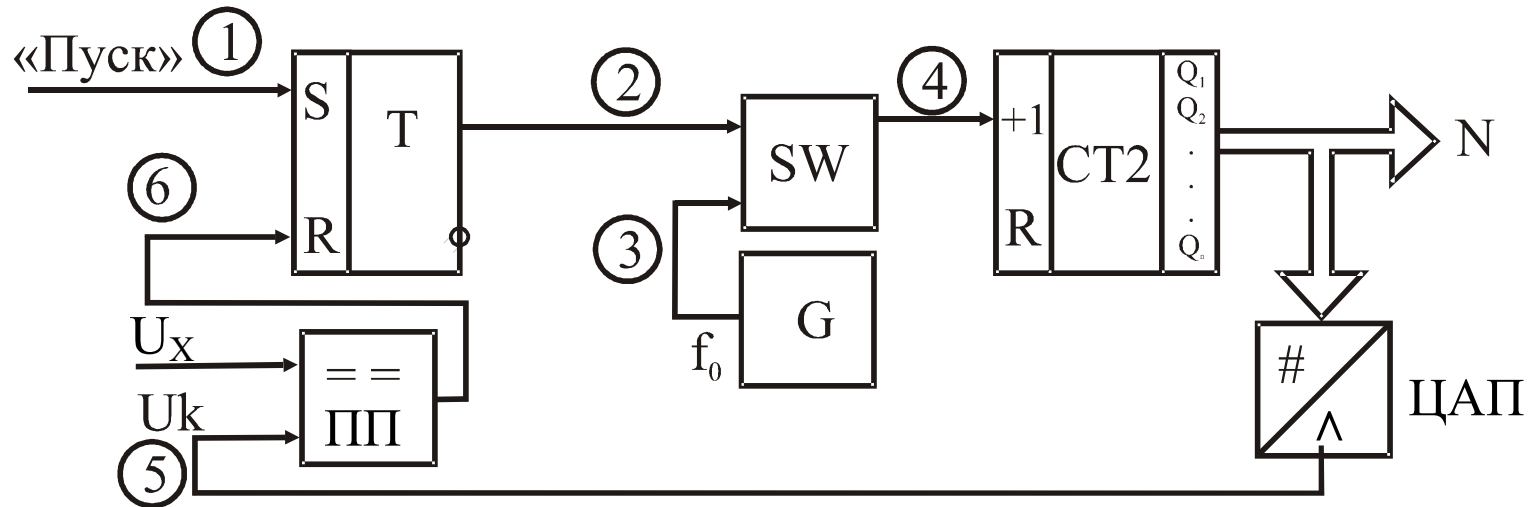
$$N_v = k U_x f_0$$

Рівняння похибки квантування подається співвідношенням

$$\delta_{kv} = \frac{1}{N_v} 100\% = \frac{1}{k U_x f_0} 100\%$$

Похибка в основному зумовлена нелінійністю та нестабільністю лінійно змінюваної напруги U_x , нестабільністю порогу чутливості компаратора і нестабільністю частоти зразкового генератора.

Цифровий вольтметр послідовного наближення



T – RS-тригер

III – компаратор

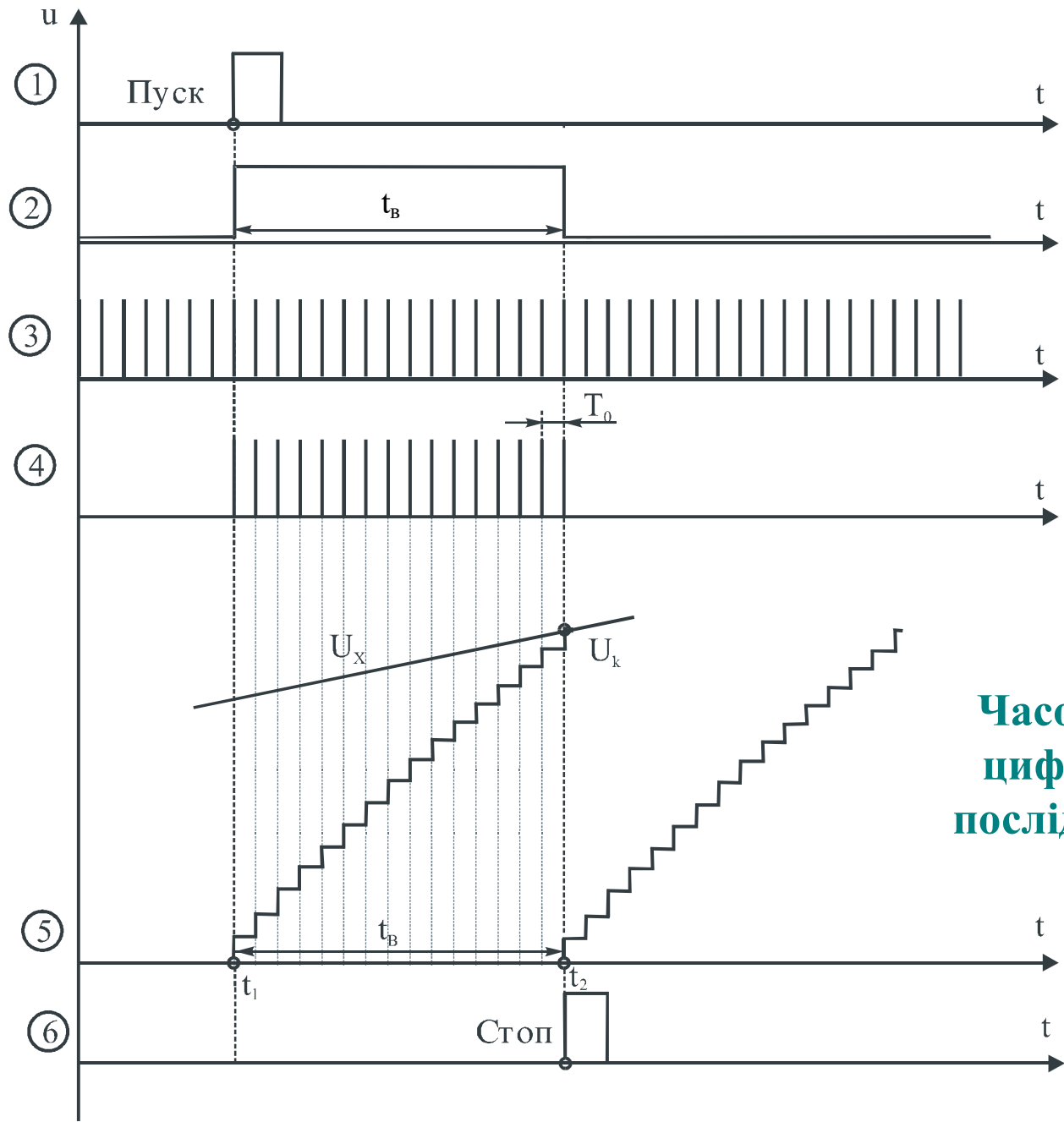
ЦАП – цифро-аналоговий
перетворювач

SW – схема збігу

G – генератор
зразкової частоти

CT2 – двійковий лічильник

Суть алгоритму послідовного наближення полягає у зрівноваженні вимірюваної напруги U_x компенсувальною напругою U_k , яка змінюється рівномірними ступенями. Даний алгоритм називають ще «молодшими розрядами вперед»



Часові діаграми роботи цифрового вольтметра послідовного наближення

За командою **«Пуск»** (момент часу t_1) тригер **T** встановлюється в одиничний стан і відкриває схему **SW**. Імпульси зразкової частоти f_0 із виходу генератора **G** через відкриту схему **SW** надходять на вхід двійкового лічильника **CT2**, змінюючи тим самим двійковий код на його виходах. З паралельних виходів **CT2** двійковий код надходить на входи **ЦАП** і перетворюється там в аналоговий сигнал **Uк**.

Прихід кожного імпульсу f_0 від генератора **G** формує нову сходинку компенсувальної напруги **Uк** на виході цифро-аналогового перетворювача. У момент часу t_2 , коли $U_x = U_k$, тригер **T** сигналом **«Стоп»**, який формується на виході компаратора, встановлюється в нульовий стан і закриває схему **SW**.

Таким чином, у лічильнику **CT2** сформується двійковий код

$$N_{vp} = \frac{U_x}{h} = \frac{U_x}{U_0} 2^n$$

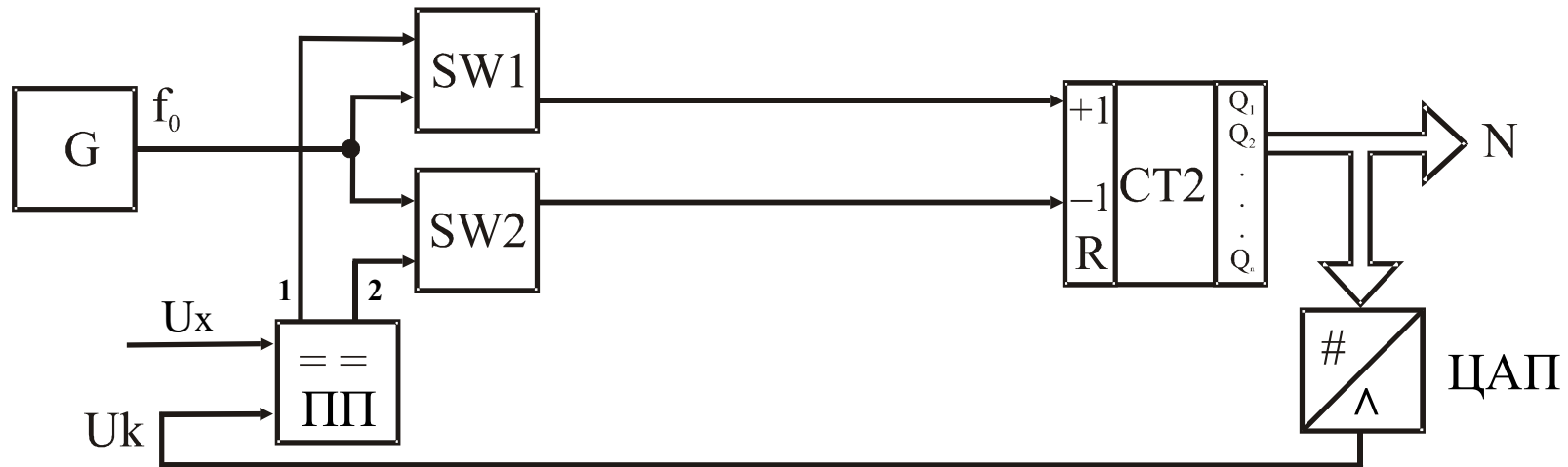
$$h = U_0 / 2^n \text{ - крок квантування}$$

Похибка квантування вольтметра послідовного наближення

$$\delta_{\text{kvp}} = \frac{1}{N_{\text{vp}}} 100\% = \frac{U_0}{U_x 2^n} 100\%$$

Час перетворення та похибка квантування вольтметрів послідовного наближення залежать від вимірюваної величини, а значення δ_{kvp} в основному визначається розрядністю ЦАП і зоною нечутливості компаратора.

Цифровий вольтметр слідкувального зрівноважування



SW – схема збігу

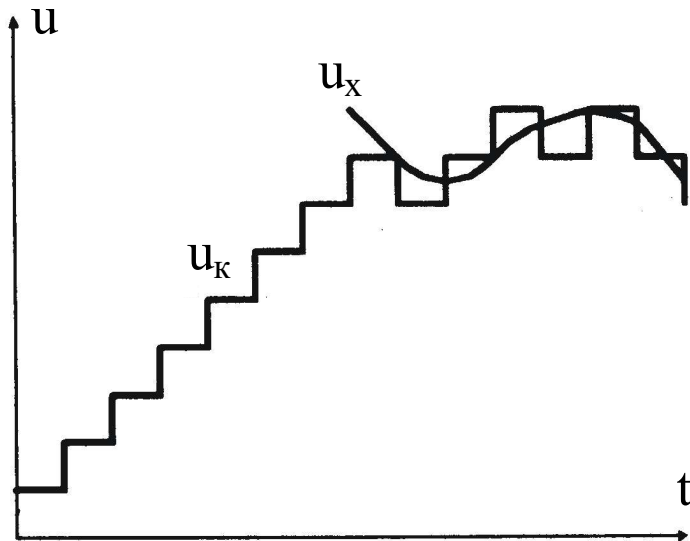
ПП – компаратор

ЦАП – цифро-аналоговий
перетворювач

G – генератор
зразкової частоти

CT2 – двійковий
лічильник

Алгоритм слідкувального зрівноваження полягає в постійному слідкуванні компенсувальної напруги за змінами вимірюваної (інформативного параметра).



Особливістю побудови структурної схеми цифрового вольтметра слідкувального зрівноважування є наявність реверсивного двійкового лічильника **СТ2** і двох схем збігу **SW1** і **SW2**, які керуються вихідними сигналами компаратора **ПП**. В залежності від співвідношення напруг u_x і u_k

Компаратор ПП може знаходитися в одному з трьох можливих станів, що визначаються різницею ($u_x - u_k$):

1. Напряга на обох виходах (1 і 2) компаратора дорівнює нулю при виконанні умови ($u_x = u_k$). У цьому стані обидві схеми збігу закриті і імпульси з виходу генератора G не надходять на входи лічильника

2. При виконанні умови $u_x > u_k$ на першому виході компаратора формується одиничний рівень, який відкриває схему збігу **SW1**, і імпульси зразкової частоти надходять на інкрементувальний вхід реверсивного лічильника **CT2**. Схема збігу **SW2** закрита нульовим рівнем.

3. Схема **SW2** відкрита одиничним рівнем з другого виходу компаратора при виконанні умови $u_x < u_k$. У цьому випадку працює декрементувальний вхід реверсивного лічильника, тому що схема **SW1** закрита.

При роботі реверсивного лічильника в режимі підсумовування або віднімання напруга на виході цифроаналогового перетворювача **ЦАП** відповідно збільшується або зменшується так, що різниця напруг ($u_x - u_k$) прямує до деякого мінімального значення, яке характеризується похибкою квантування Δk . Крок квантування вибирається відповідно до ширини зони нечутливості компаратора.