Тема 6. Електронні вимірювальні прилади

В **електронних аналогових приладах** вхідна (вимірювана) величина перетворюється у вихідну аналоговими електронними перетворювачами. У кожного з таких перетворювачів вихідна величина є безперервною функцією вхідної.

Основними перевагами електронних приладів є великий вхідний опір та широкий частотний діапазон. Великий вхідний опір обумовлює малу споживану від об'єкта вимірювання потужність, що не порушує режиму його роботи.

Крім того, **багато електронних приладів мають більш високу чутливість (і поріг чутливості) у порівнянні з електромеханічними приладами**. **Наприклад, вольтметри для вимірювання постійної напруги, в яких використовується перетворення постійної напруги у змінну, мають нижній поріг чутливості в декілька мікровольт.**

Електронні вольтметри

В електронних вольтметрах **вимірювана напруга** (постійна чи змінна) **перетворюється в постійний струм і вимірюється магнітоелектричним вимірювальним механізмом** із шкалою, яка відградуйована в одиницях напруги.

Застосування магнітоелектричного вимірювального механізму зумовлено його високою чутливістю та рівномірністю шкали. Електронні вольтметри охоплюють широкий діапазон вимірюваних напруг від десятків нановольт на постійному струмі до десятків кіловольт); мають вхідний опір, як правило, не нижчий 1 МОм, можуть працювати в широкому діапазоні частот – від постійного струму до частот порядку сотень мегагерц.

Електронні вольтметри поділяються на вольтметри постійного струму та змінного струму.

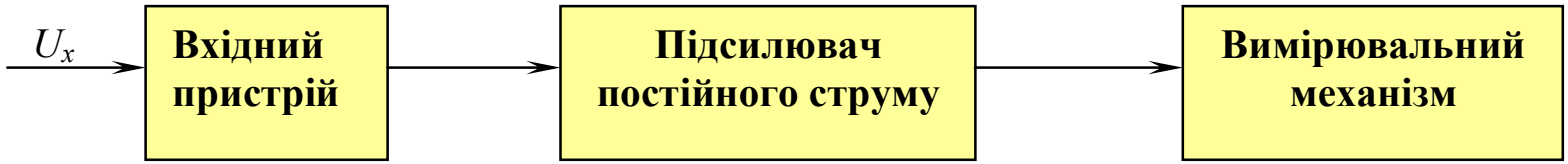


Схема вольтметру постійного струму

Вхідний пристрій призначений для формування високого вхідного опору. Підсилювач постійного струму послаблює або підсилює напругу до значень, необхідних для надійної роботи вимірювального механізму. Одночасно підсилювач забезпечує узгодження високого опору вхідного пристрою з низьким опором вимірювального механізму.

Суттєвим недоліком є наявність "дрейфу" нуля у підсилювача постійного струму.

Вхідний опір електронного вольтметра складає декілька десятків МОм. Діапазон вимірюваних напруг постійного струму – від десятків мілівольт до декількох кіловольт.

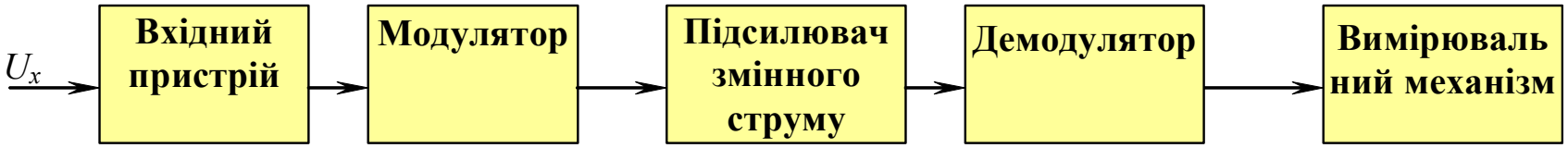


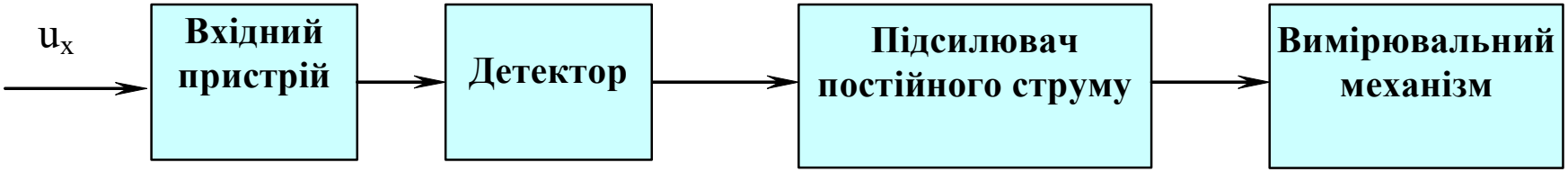
Схема високочутливого вольтметру для вимірювання малих напруг

Модулятор перетворює постійну напругу в змінну, яка підсилюється підсилювачем змінного струму і демодулятором знову перетворюється в постійну.

Така схема дозволяє одержати вольтметри з більш високими метрологічними характеристиками, оскільки у підсилювача змінного струму відсутній дрейф нуля. Робочий діапазон таких мікровольтметрів постійного струму – 10^{-8}–1 В.

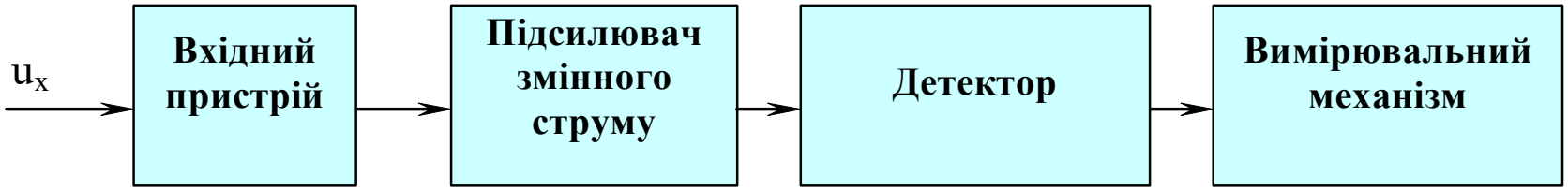
Також існують ще **вольтметри з фотогальванометричними підсилювачами**, що являють собою поєднання магнітоелектричного гальванометра з фотоперетворювачами та підсилювачами постійного струму. Вольтметри цього типу мають найвищу чутливість.

Електронні вольтметри змінного струму виконуються за двома структурними схемами



В першій схемі вимірювана змінна напруга спочатку перетворюється детектором у постійну, потім підсилюється підсилювачем постійного струму (ППС).

За першою схемою вольтметри мають дуже широкий частотний діапазон (10 Гц–1000 МГц), але не можуть вимірювати малі напруги (менші декількох десятих вольта), оскільки детектор не може випрямити малі напруги з високою точністю. Другий недолік – дрейф нуля ППС.



У другій схемі підсилення проводиться на змінному струмі.

За другою схемою будуються вольтметри з нижньою межею в одиниці мікровольт. Однак у них менший частотний діапазон, оскільки підсилювач змінного струму не може підсилювати напруги в широкому діапазоні частот.

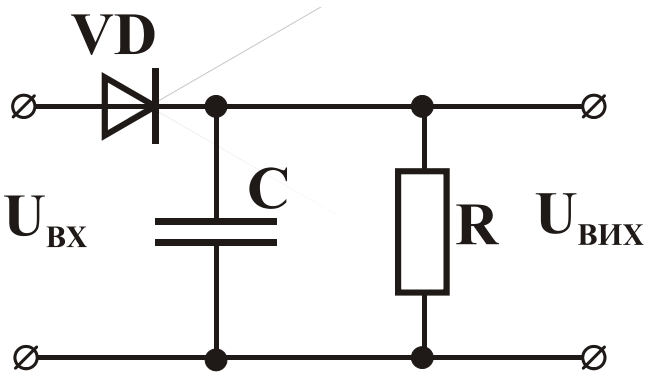
Детектори в електронних вольтметрах змінного струму **можуть на виході формувати значення, пропорційні амплітудному, середньому або середньому квадратичному** (діючому) **значенню вхідної напруги**. Відповідно цьому вони мають і назви.

Детектори середнього (або середнього випрямленого) **значення** являють собою випрямлячі на діодах, такі самі, як у випрямних електромеханічних приладах.

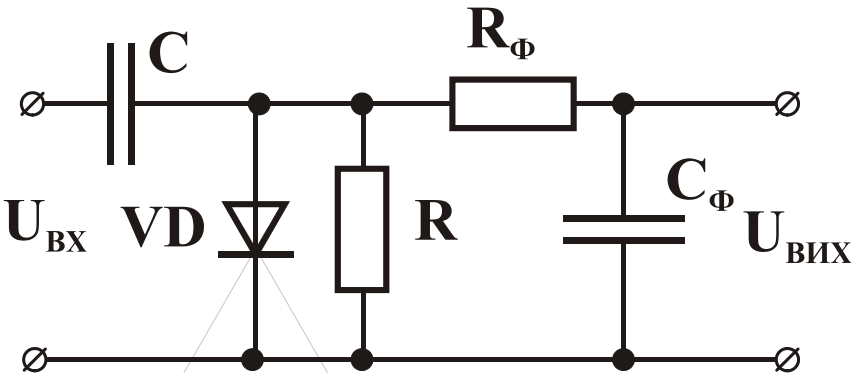
Амплітудні детектори мають діод та конденсатор, який заряджається до амплітудного значення напруги, що пропорційна вхідній. На виході детектора повинно бути навантаження з дуже великим опором (50-100 МОм), тому амплітудні вольтметри будують за першою схемою детектор-підсилювач, оскільки підсилювач постійного струму має великий вхідний опір.

В детекторах середньоквадратичного значення використовуються діоди з квадратичною ділянкою вольт-амперної характеристики або термоперетворювачі.

Розрізняють детектори з відкритим та закритим входами



Детектор з відкритим входом



Детектор з закритим входом

В детекторах із відкритим входом постійна складова вимірюваної напруги проходить через діод на вихід детектора, а в детекторах із закритим входом – не проходить.

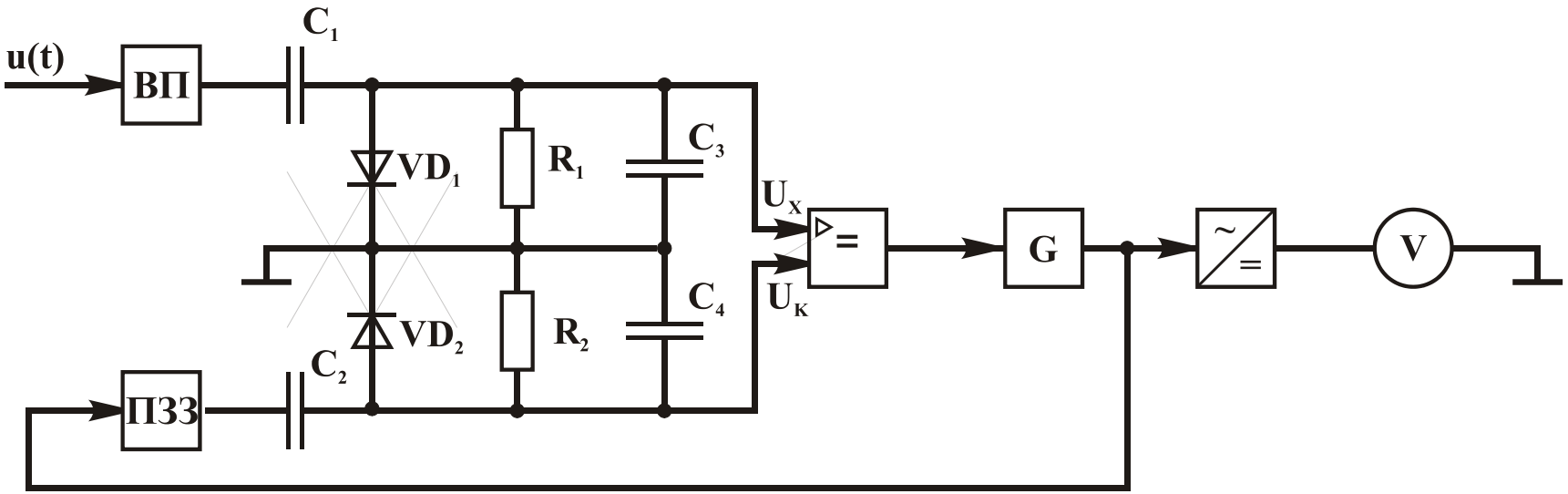
У відповідності з тим, який детектор застосовується, вольтметри мають такі ж назви: **вольтметри амплітудного, середнього та середнього квадратичного значення**.

Одним із найважливіших вузлів, які визначають основні метрологічні характеристики вольтметра, є підсилювач (або постійного, або змінного струму). Основним недоліком ППС є дрейф нуля.

Від підсилювачів змінного струму вимагається високий та стабільний коефіцієнт підсилення, малі нелінійні спотворення, нечутливість до зовнішніх факторів. Для цього в підсилювачі (як правило, багатокаскадні) вводиться зворотний зв'язок.

Вольтметри амплітудного та середнього значення мають похибки, які залежать від форми кривої вимірюваної напруги. Вольтметри середнього значення найчастіше градуюються в середніх квадратичних (діючих) значеннях напруги синусоїдної форми. Для визначення діючих значень напруг, форма яких відрізняється від синусоїди, потрібно знати коефіцієнт форми кривої. Якщо це не враховувати, то при вимірюваннях можуть виникати великі похибки.

Амплітудний (піковий) вольтметр



Покази амплітудного вольтметра прямо пропорційні амплітудному значенню змінної напруги незалежно від форми кривої напруги.
Такої властивості не має жодна із систем електромеханічних приладів.

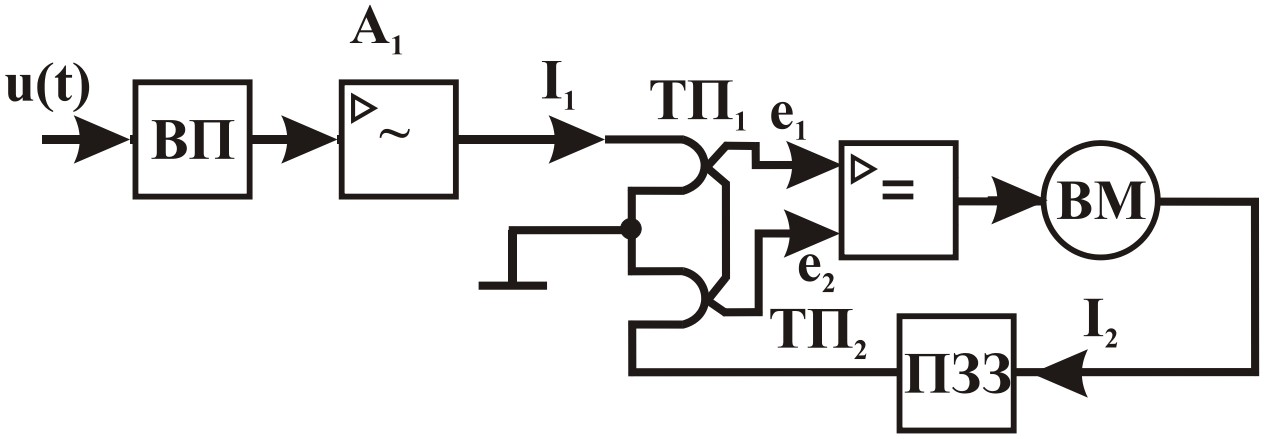
Амплітудні вольтметри будуються за схемою детектор-підсилювач і тому мають найширший частотний діапазон.

Вимірювана напруга **u(t)** подається через вхідний пристрій **ВП** на вхід пікового детектора із закритим входом VD_1, C_1. На ідентичний піковий детектор VD_2, C_2 подається компенсувальна напруга, сформована у колі зворотного зв'язку генератором-модулятором.

Постійні напруги, що дорівнюють амплітудним значенням вимірюваної **Ux** і компенсувальної **Uk** напруг, порівнюються на резисторах R_1, R_2. Різницева напруга **Ux – Uk** фільтрується конденсаторами C_3 і C_4 та подається на підсилювач постійного струму із високим коефіцієнтом підсилення. Якщо напруга на його виході має позитивну полярність **Ux – Uk > 0**, що свідчить про перевищення вимірюваної напруги **Ux** над компенсувальною **Uk**, або відсутність останньої, то запускається раніше закритий генератор-модулятор, і компенсувальна напруга надходить через подільник зворотного зв'язку **ПЗЗ** на детектор VD_2, C_2 і паралельно на перетворювач змінної напруги у постійну, яка вимірюється магнітоелектричним вольтметром **V**.

Перевищення **Uk** над **Ux** призводить до закривання генератора-модулятора **G**.

Вольтметр середніх квадратичних значень



Вимірювання середніх квадратичних значень (СКЗ) змінних напруг вимагає перетворювача змінної напруги в постійну, що має квадратичну характеристику. Якщо цю постійну напругу подати на магнітоелектричний вольтметр, то покази останнього будуть пропорційні квадрату СКЗ. Тому **під час градуювання шкали необхідно виконати операцію добування кореня**. Але в даному випадку шкала вольтметра буде нерівномірною.

У цьому вольтметрі діючих значень із рівномірною шкалою використовується два квадратичних перетворювачі **$Тп_1$** і **$Тп_2$**, один з яких ввімкнено в коло негативного зворотного зв'язку.

В якості таких перетворювачів використовуються термоперетворювачі з термо-ЕРС:

$$e_1 = k_1 I_1^2 \qquad e_2 = k_2 I_2^2$$

Вихідний струм **I_1** широкосмугового підсилювача **A_1** змінного струму пропорційний вимірюваній напрузі

$$I_1 = K_п U_x$$

$$e_1 = k_1 I_1^2 = k_1 K_п^2 U_x^2$$

Відхилення кута повороту рухомої частини магнітоелектричного вимірювального механізму

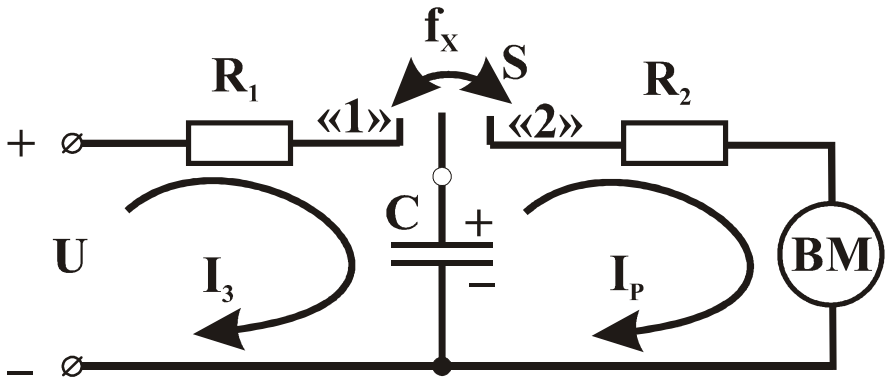
$$\alpha = S_V I_2 = S_V K_П \sqrt{k_1 / k_2}\, U_x = K_V U_x$$

Електронні частотоміри

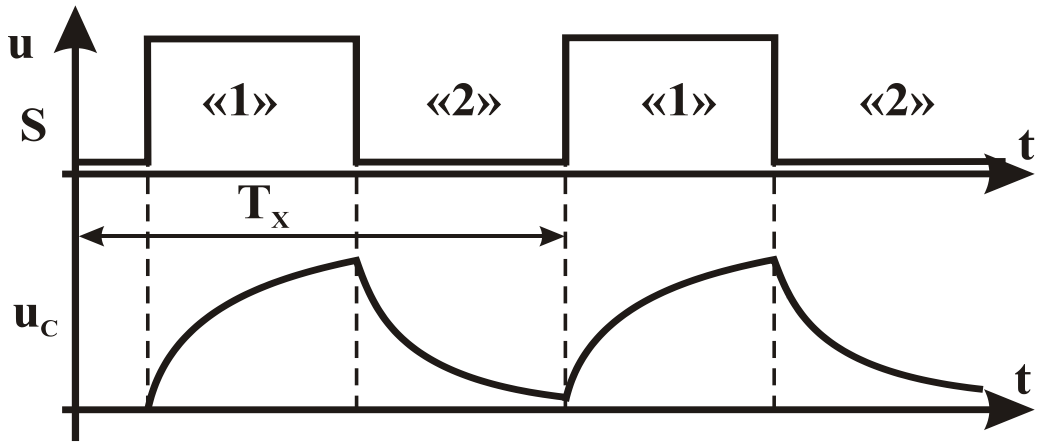
В основу побудови електронних частотомірів покладені такі методи вимірювання:

- заряду і розряду конденсатора;
- резонансний метод;
- дискретної лічби.

Методу заряду і розряду конденсатора грунтується на вимірюванні середнього струму розряду зразкового конденсатора, який перемикається із заряду на розряд з вимірюваною частотою fx.



R_1, R_2 – струмообмежувальні резистори;
C – зразковий конденсатор;
S – перемикач;
ВМ – вимірювальний механізм магнітоелектричної системи;
Із – струм заряду конденсатора;
Ір – струм розряду конденсатора



В положенні “1” перемикача S конденсатор С заряджається. Струм заряду проходить такий шлях:

+U → R1 → S(1) → C → -U

В положенні “2” перемикача S конденсатор С розряджається. Струм розряду проходить такий шлях:

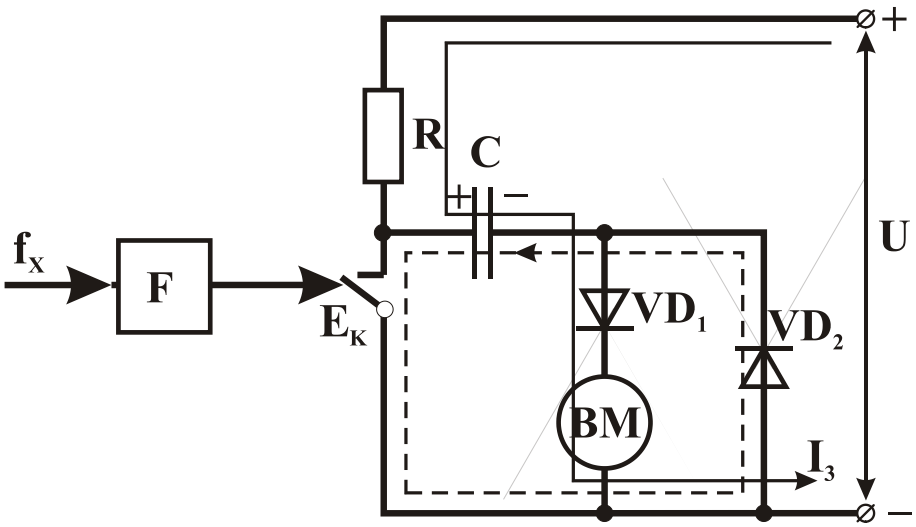
+C → R2 → ВМ → -C.

Таким чином, за один період Тх через ВМ проходить заряд $q = C\,U$

Середнє значення струму в його колі пропорційне вимірюваній частоті

$$I_{cp} = \frac{q}{T_x} = q\,f_x = C\,U \cdot f_x$$

Електронний конденсаторний частотомір



Напруга вимірюваної частоти f_x подається на вхід формувача **F**, вихідними прямокутними імпульсами якого керується схема електронного ключа E_K.

За один період вимірюваної частоти через рамку вимірювального механізму магнітоелектричної системи протікає струм, середнє значення якого становить

$$I_{ср} = \frac{q}{T_x} = q\, f_x = C\, U \cdot f_x$$

Рівняння перетворення конденсаторного частотоміра

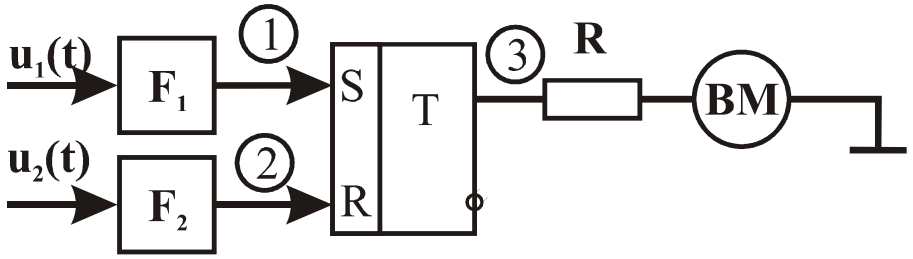
$$\alpha = S_{ВП} I_{ср} = S_{Вп}\, C\, U \cdot f_x = K_ч\, f_x$$

Електронні фазометри

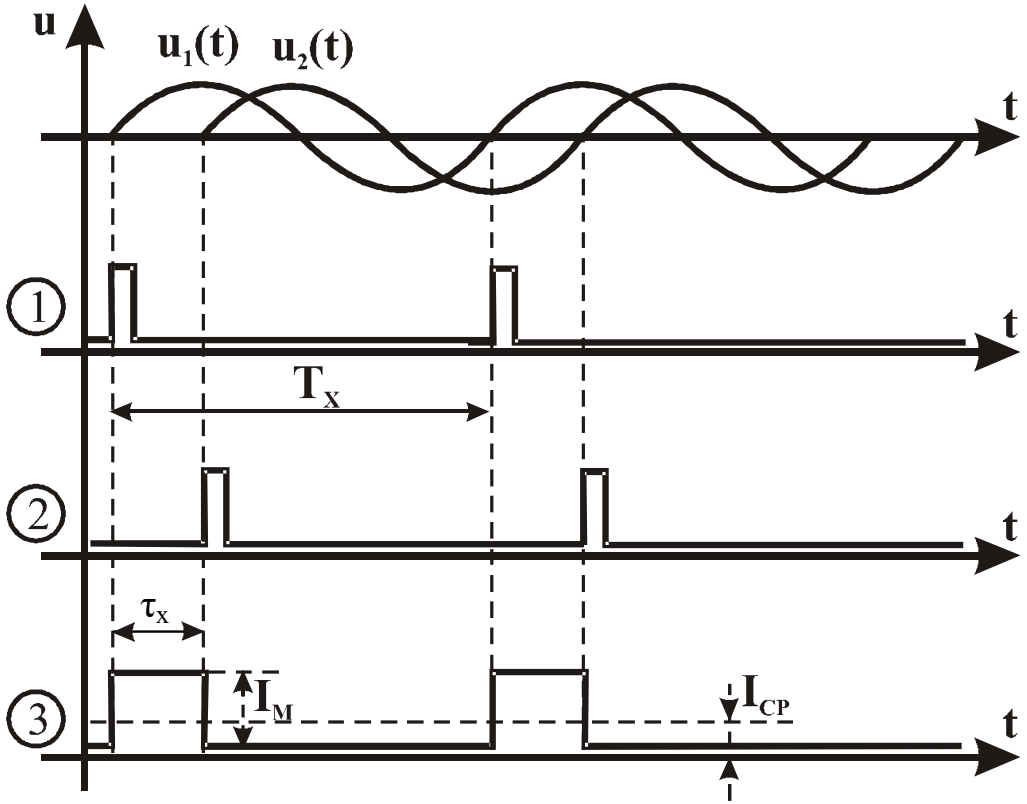
Залежно від способу перетворення різниці фаз в проміжну фізичну величину в основу побудови електронних фазометрів покладено такі методи:

- перетворення різниці фаз в часовий інтервал;
- вимірювання різниці фаз за допомогою осцилографа;
- вимірювання різниці фаз методом дискретної лічби.

Суть **методу часового перетворення** полягає в перетворенні двох синусоїдних напруг у часовий інтервал, що формується у моменти переходу цих напруг через рівні нуля з похідними однакового знаку.



Напруги $u_1(t)$ і $u_2(t)$, різницю фаз φx між якими необхідно виміряти, надходять на входи формувачів F_1 і F_2.



В моменти переходу синусоїдних напруг $u_1(t)$ і $u_2(t)$ через рівні нуля на виходах формувачів формуються короткі прямокутні імпульси, які надходять на **S** і **R**-входи тригера **T**. За допомогою **SR-тригера T** в кожному періоді **Tx** синусоїдних напруг $u_1(t)$ і $u_2(t)$ формується часовий інтервал τ_x, пропорційний різниці фаз φ_x.

Якщо цю послідовність імпульсів τ_x подати на магнітоелектричний вимірювальний перетворювач **ВМ**, то його покази будуть відповідати середньому значенню струму

$$I_{ср} = \frac{I_m \tau_x}{T_x} = I_m \tau_x f_x$$

Залежність між різницею фаз φ_x і часовим інтервалом τ_x:

$$\varphi_x = \varphi_2 - \varphi_1 = \omega t_2 - \omega t_1 = \omega \cdot (t_2 - t_1) = \omega \cdot \tau_x = 2\pi f_x \cdot \tau_x$$

$$\tau_x = \frac{\varphi_x}{2\pi f_x} \qquad I_{ср} = I_m \frac{\varphi_x}{2\pi f_x} f_x = \frac{I_m}{2\pi} \cdot \varphi_x$$

Рівняння перетворення фазометру

$$\alpha = S_{вп} I_{ср} = \frac{S_{вп} I_m}{2\pi} \cdot \varphi_x$$