

## Лекція 5

### ЕЛЕКТРОННІ ВОЛЬТМЕТРИ

Електронні вольтметри складають найбільш численну групу серед радіовимірювальних приладів і порівняно з електромеханічними приладами характеризуються рядом переваг, а саме: придатні для вимірювання безперервних напруг змінного струму в широкому діапазоні частот (від напруги постійного струму до 1 ГГц) та імпульсних сигналів тривалістю від наносекунд; відзначаються високою чутливістю, що дає змогу вимірювати напругу від часток мікрвольт до 300 і більше вольт; мають великий вхідний опір як на низьких, так і на високих частотах; споживають малу енергію від вимірювального кола; здатні витримувати перевантаження.

Електронні вольтметри за родом вимірюваної напруги поділяють на види: В2 – вольтметри постійного струму; В3 – вольтметри змінного струму; В4 – вольтметри імпульсної напруги; В6 – селективні вольтметри; В7 – універсальні вольтметри; В8 – вимірювачі відношення напруг та їх різниці.

У більшості випадків електронні вольтметри поступаються точністю вимірювань електромеханічним приладам. Похибки їх значною мірою залежать від частоти вимірюваної напруги і можуть досягати шести і більше відсотків. Стандарти передбачають надання електронним вольтметрам класів точності, проте, як правило, в технічній документації вказується не клас точності, а межі основної похибки, вираженої у відсотках від нормуючого значення, показань вольтметра або у вигляді дво- чи тричленної формули.

Недоліками електронних вольтметрів є їх порівняно висока вартість та необхідність застосування допоміжного джерела електроживлення, але попит на них великий.

#### 5.1 Електронні вольтметри постійного струму

Електронні вольтметри постійного струму призначаються для вимірювань у високоомних колах і виконуються за структурною схемою, наведеною на рис. 5.1, а, б. Основними елементами структурної схеми є вхідний пристрій, підсилювач постійного струму та вимірювальний прилад магнітоелектричної системи.

Вхідний пристрій містить вхідні затискачі та подільник напруги, можливі схеми якого наведені на рис. 5.2, а, б, в. Вхідний подільник на резисторах призначається для розширення межі вимірювань. Підсилювач постійного струму забезпечує високу чутливість вольтметра і є підсилювачем потужності вимірюваної напруги до значення, необхідного для створення достатнього обертового моменту у вимірювальному приладі. Підсилювач повинен мати високу лінійність амплітудної характеристики, сталий коефіцієнт підсилювання та малий температурний і часовий дрейф нуля. Нестабільність коефіцієнта підсилювання та дрейф нуля істотно впливають на метрологічні характеристики вольтметра. Причинами дрейфу нуля є нестабільність напруги блока живлення, змінювання параметрів транзисторів та інших елементів схеми.

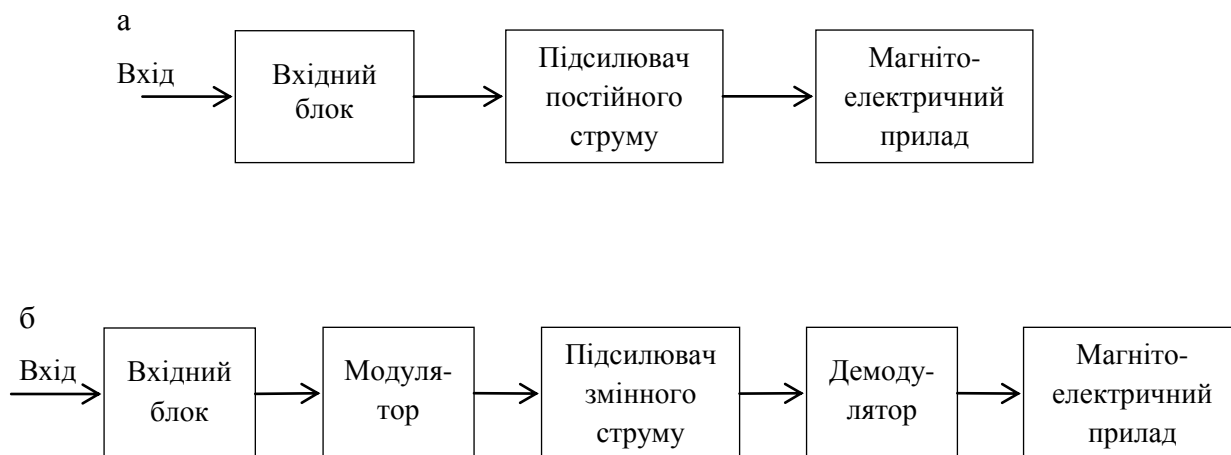


Рисунок 5.1 – Структурні схеми електронних вольтметрів постійного струму

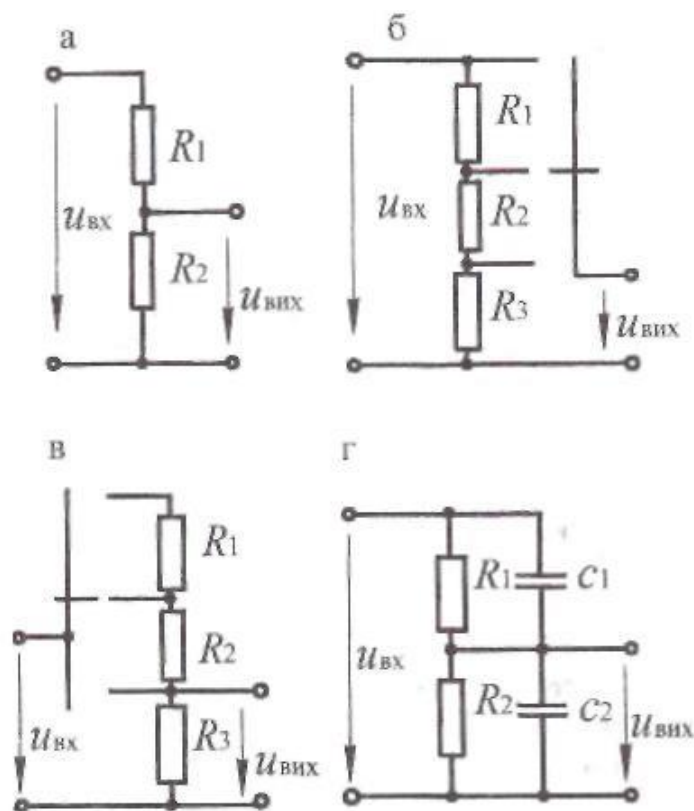


Рисунок 5.2 – Схеми подільників напруги електронних вольтметрів

У сучасних вольтметрах використовують підсилювачі постійного струму, побудовані за схемою «модулятор - підсилювач змінного струму - демодулятор» (рис. 5.1, б). Вимірювана напруга постійного струму, яка подається на вхід приладу, перетворюється модулятором в напругу змінного струму, підсилюється підсилювачем змінного струму, випрямляється демодулятором і вимірюється магнітоелектричним приладом. Підсилювач охоплюється негативним зворотним зв'язком. Такий тип підсилювача практично виключає дрейф нуля і дозволяє стабілізувати коефіцієнт підсилення.

## 5.2 Загальна характеристика електронних вольтметрів змінного струму

Структурно електронний вольтметр змінного струму відрізняється від вольтметра постійного струму наявністю перетворювача напругу змінного струму в пропорційну напругу постійного струму. Залежно від місця вмикання перетворювача (до або після підсилювача) відрізняють вольтметри типу «перетворювач-підсилювач» і типу «підсилювач-перетворювач» (рис. 5.3, а, б). У першому випадку вимірювана напруга спочатку перетворюється в напругу постійного струму, а потім підсилюється підсилювачем постійного струму та вимірюється магнітоелектричним приладом. У другому випадку вимірювана напруга підсилюється підсилювачем змінного струму, а після цього перетворюється в напругу постійного струму. Вольтметр типу «перетворювач-підсилювач» характеризується широким частотним діапазоном (20 Гц...1000 МГц), але обмеженою чутливістю; вольтметри типу «підсилювач-перетворювач» є найбільш чутливими і дозволяють вимірювати напругу від 3 мкВ до 300 В, але в обмеженій смузі частот (від 20 Гц до 100 МГц).

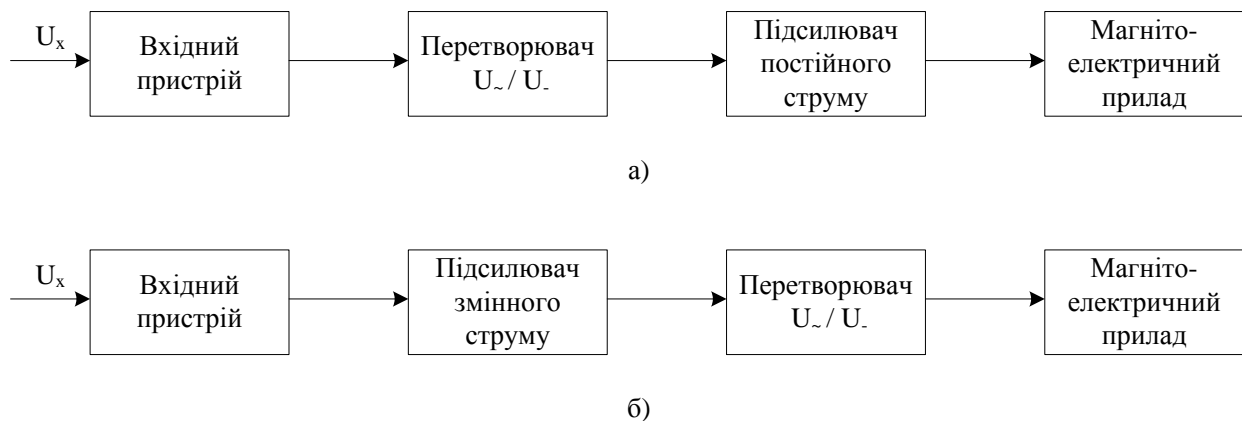


Рисунок 5.3 – Структури електронних вольтметрів змінного струму

Перетворювач є важливим елементом вольтметра і значною мірою визначає метрологічні характеристики приладу. Вихідна напруга перетворювача може бути пропорційною максимальному, середньовипрямленому або діючому значенню вимірюваної напруги. Згідно з цим розрізняють вольтметри максимальних, середньовипрямлених та діючих значень.

## 5.3 Електронні вольтметри максимальних значень

Електронні вольтметри максимальних значень виконуються за схемою «перетворювач-підсилювач» (рис. 5.4, а). У структурі цих вольтметрів як перетворювачі напруги змінного струму в напругу постійного струму широко використовуються амплітудні (пікові) детектори з відкритим входом, закритим входом та їх комбінація.

На рис. 5.4, б наведена схема детектора з відкритим входом, а на рис. 5.4, в – графік, який пояснює його роботу. Якщо до входу детектора прикладена напруга  $u = U_m \sin \omega t$ , то в сталому режимі на відрізках часу  $t_2 - t_1, t_4 - t_3$  і т.ін. конденсатор  $C$  заряджується від напруги  $U_{\min}$  до  $U_{\max}$ , дуже близької до максимального значення  $U_m$  вимірюваної напруги ( $U_{\max} \approx U_m$ ). На відрізках часу  $t_3 - t_2$  і т. ін., коли діод  $VD$  закритий, конденсатор  $C$  повільно розряджається до значення  $U_{\min}$ . Ємність конденсатора  $C$  та опір резистора  $R$  вибирають такими, щоб за час відкритого стану діода на найнижчій частоті вхідного сигналу конденсатор не встигав би помітно розрядитися. При малому значенні сталої часу заряджання  $\tau_3 = (R_i + R_d)RC / (R_i + R_d + R)$  і великому значенні сталої розряджання  $\tau_p = RC$  пульсація напруги на конденсаторі мала, тобто напруга майже незмінна.

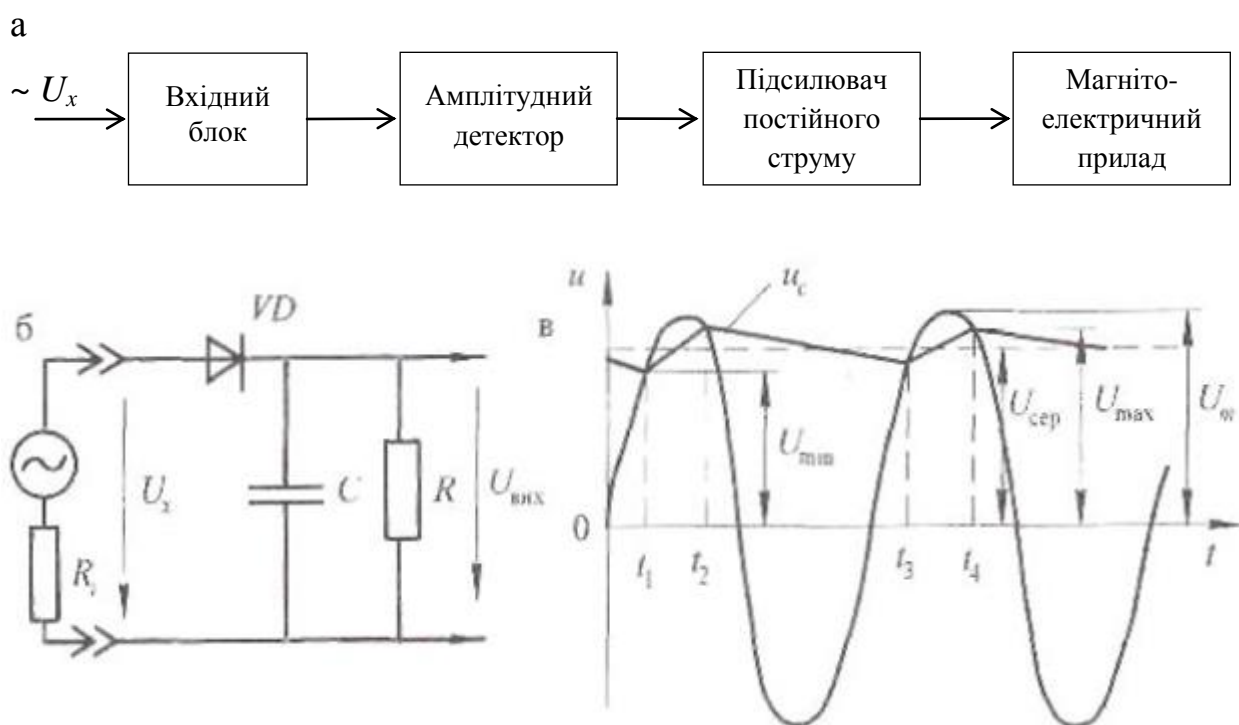


Рисунок 5.4 – Електронний вольтметр максимальних значень та детектор з відкритим входом

На рис. 5.5, а показана схема детектора із закритим входом. В цій схемі діод включається паралельно резистору  $R$ . Під час дії позитивного півперіоду діод відкривається і конденсатор заряджається. Стала часу кола зарядження досить мала, і конденсатор заряджається майже до значення  $U_c = U_m$  (рис. 5.5, б). Неважко переконатися, що вихідна напруга детектора із закритим входом  $U_{\text{вих}} = -U_c + U_m \sin \omega t$  (рис. 5.5, в) пульсуюча. Середнє значення вихідної напруги детектора практично дорівнює максимальному значенню вхідної напруги. Щоб виділити це значення напруги, між детектором і підсилювачем постійного струму вмикається фільтр нижніх частот  $R_\phi C_\phi$ , вихідна напруга якого після підсилення вимірюється вихідним магнітоелектричним приладом.

На рис. 5.5, г показана схема детектора, який являє собою послідовне включення детекторів із закритим і відкритим входами. Конденсатор  $C_2$  заряджається до напруги, яка дорівнює сумі позитивної і негативної амплітуд вхідного сигналу.

*Приклад.* При вимірюванні напруги  $U_x = U_0 + U_m \sin \omega t$  вихідна напруга детектора з відкритим входом дорівнює піковому значенню вимірюваної напруги  $U_0 + U_m$ , детектора із закритим входом  $-U_m$ , детектора двопівперіодного  $-2U_m$ .

Підсилювачі постійного струму вольтметрів максимальних значень не відрізняються від підсилювачів вольтметрів постійного струму, і до них ставляться такі самі вимоги: вони повинні мати стабільний коефіцієнт підсилення та малий дрейф нуля.

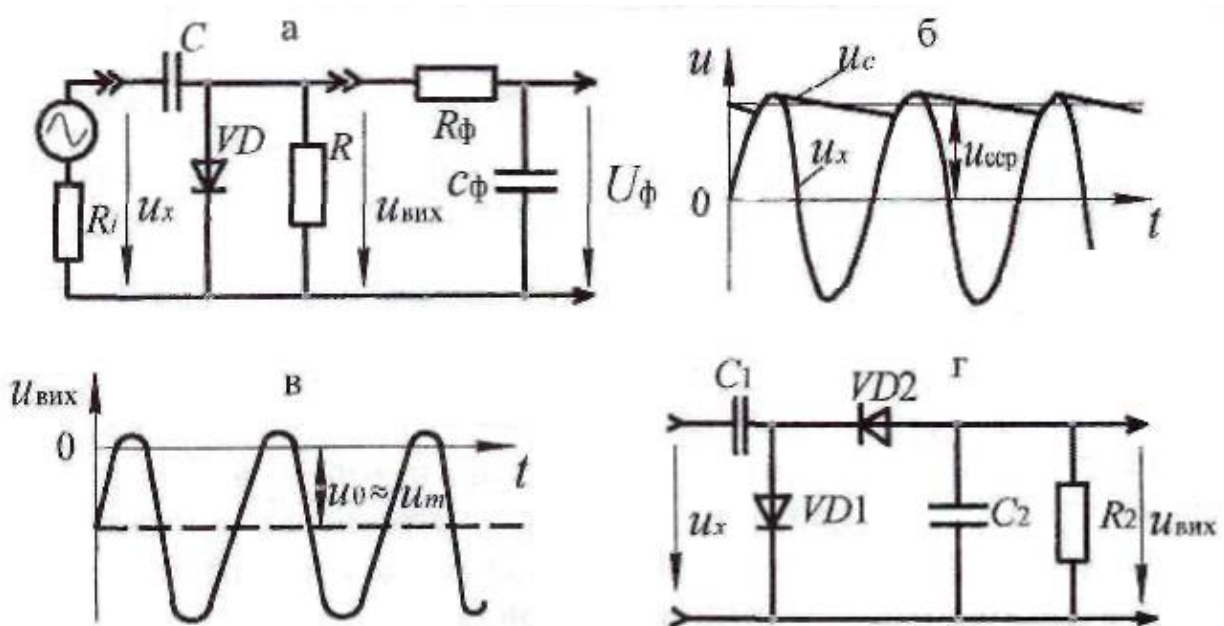


Рисунок 5.5 – Схеми детекторів із закритим входом

Електронні вольтметри випускаються переважно із декількома межами вимірювань. Зміна межі вимірювань здійснюється зміною коефіцієнта передачі подільника напруги. При коливаннях частоти сигналу змінюється опір паразитних ємностей резисторів подільника напруги, що призводить до появи похибки. Для усунення цієї похибки резистори подільника напруги шунтують конденсаторами (рис. 5.2, г). Ємності конденсаторів  $C_1$  і  $C_2$  обирають такими, щоб вдовольняти умови  $R_1 C_1 = R_2 C_2$ . Такий подільник напруги є частотно незалежним.

На циферблати показуючих приладів зі складу електронних вольтметрів наносять дві шкали. Відношення кінцевих значень двох суміжних шкал дорівнює  $\sqrt{10}$ , що відповідає відношенню напруг 10 дБ. Наприклад, якщо прийняти напругу на першій межі 100 мВ, то на наступних межах одержимо 316 мВ; 1 В; 3,16 В; 10В; 31,6 В; 100 В; ..., тобто через одну межу дістанемо 10-кратну зміну межі вимірювань. Як правило, межі вимірювань обирають кратними

трьом та десяти. Тому довжина робочої частини шкали на межі, кратній 3, дещо менша, ніж на межі, кратній 10. Інколи вольтметри мають шкалу, градуйовану в децибелах. Основна похибка вольтметрів максимальних значень обумовлена неточністю коефіцієнтів передачі подільника напруги, детектора, неточністю та нестабільністю коефіцієнта підсилення підсилювача постійного струму, похибкою вихідного магнітоелектричного приладу.

Додаткові похибки є наслідком двох причин: змінювання температури навколишнього середовища та змінювання частоти вимірюваної напруги. Змінювання температури спричиняє змінювання параметрів транзисторів, резисторів, що призводить до зміни режиму роботи приладу. Частотна похибка вольтметрів в зоні низьких і високих частот визначається різними факторами. Так, джерелом похибки в зоні низьких частот є те, що в негативний півперіод напруги конденсатор  $C$  детектора помітно розряджається, вихідна напруга детектора стає пульсуючою, а її середнє значення відхиляється від амплітуди вхідної напруги.

У зоні високих частот вплив зміни частоти пояснюється так. Проводи або кабель, за допомогою яких вольтметр підключається до об'єкта, характеризуються індуктивністю  $L_{\text{пр}}$  і ємністю  $C_{\text{пр}}$ . Реакція підключення вольтметра до досліджуваного кола оцінюється його вхідним опором  $R_{\text{вх}}$  і вхідною ємністю  $C_{\text{вх}}$ . Еквівалентна схема з'єднувальних провідників та вхідного кола вольтметра показана на рис. 5.6, а. Індуктивність  $L_{\text{пр}}$  і ємність  $C = C_{\text{пр}} + C_{\text{вх}}$  створюють коливальний контур, резонансна частота якого  $f_p = 1/(2\pi\sqrt{L_{\text{пр}}C})$  і складає десятки і навіть сотні мегагерц. При добротності контуру більше одиниці напруга на ємності  $C$ , а отже, на вхідних затискачах приладу при частотах, близьких до резонансної частоти контуру, може істотно перевищувати вимірювану напругу.

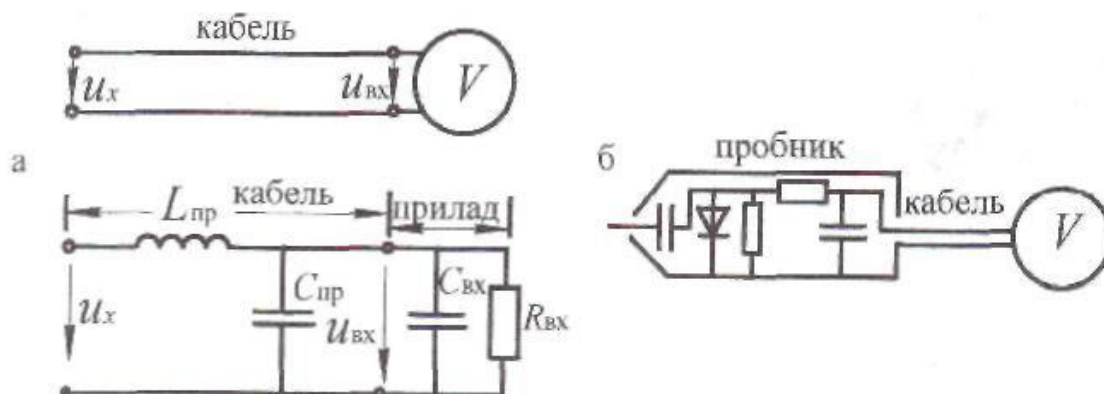


Рисунок 5.6 – Вхідні кола електронних вольтметрів максимальних значень

Для зменшення або усунення частотної похибки необхідно резонансну частоту змістити в зону більш високих частот так, щоб вона в 10...12 разів перевищувала верхню межу робочого діапазону частот приладу. Це досягається зменшенням  $L_{\text{пр}}$  і  $C_{\text{пр}}$ , тобто зменшенням довжини кабелю. З цією метою детектор

монтують в спеціальному виносному корпусі-пробнику (рис. 5.6, б). З рештою конструктивних елементів вольтметра пробник з'єднується гнучким кабелем, в якому тече тільки постійний струм.

При вимірюванні напруг, форма кривої яких відрізняється від синусоїдної, треба враховувати, що результат вимірювання може бути дуже викривленим. Це пояснюється тим, що вихідна напруга детектора є пропорційною максимальному значенню вимірюваної напруги, а шкалу вихідного приладу градуують в діючих значеннях синусоїдної напруги, тобто позначки шкали відповідають значенням  $U_m / \sqrt{2}$  ( $\sqrt{2}$  – коефіцієнт амплітуди синусоїди). Коефіцієнт амплітуди  $K_a$  несинусоїдних напруг відрізняється від  $\sqrt{2}$ , і похибка визначення діючого значення напруги по шкалі приладу може бути великою. Так, при вимірюванні напруги прямокутної форми, для  $K_a = 1$ , ця похибка складатиме 29 %.

#### 5.4 Електронні вольтметри максимальних значень з лінеаризованим детектором

Вольтметри максимальних значень застосовуються в широкій робочій смузі частот, але в той же час через низьку чутливість не забезпечують вимірювання напруг, менших за 0,3 В. При малих напругах амплітудний детектор має нелінійну характеристику, а його вихідна напруга не пропорційна вимірюваній. Тому для вимірювання малих значень напруг застосовують схеми лінеаризації. На рис. 5.7, а наведена така схема. Вона складається з вхідного нелінійного елемента, суматора, підсилювача постійного струму та зворотного нелінійного елемента. При певних умовах вихідна напруга  $U_{вих}$  схеми може бути пропорційною вимірюваній напрузі  $U_{вх}$ .

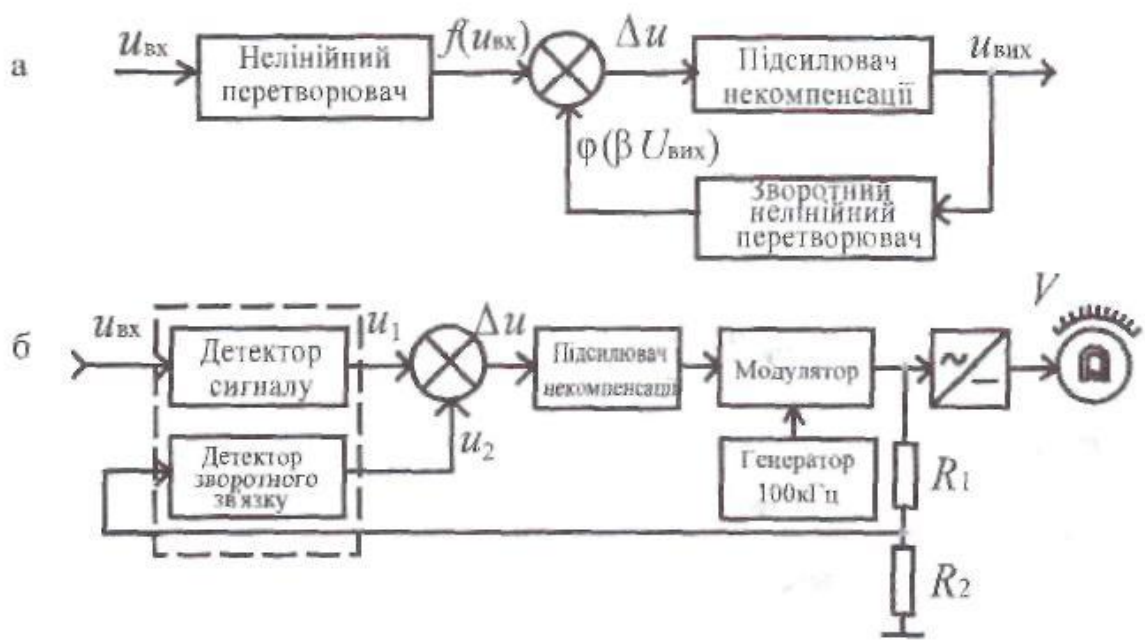


Рисунок 5.7 – Схеми вольтметрів максимальних значень з лінеаризованим детектором

Вихідну напругу вхідною нелінійного елемента, яка нелінійно залежить від вхідної напруги  $U_{\text{вх}}$ , позначимо функцією  $f(U_{\text{вх}})$ , а вихідну напругу зворотного нелінійного елемента – функцією  $\varphi(\beta U_{\text{вих}})$ . Суматор, на входи якого подаються вихідні напруги нелінійних елементів, виділяє різницю цих напруг  $\Delta U$ . Тоді для схеми (рис. 5.7, а) можна скласти рівняння

$$f(U_{\text{вх}}) - \varphi(\beta U_{\text{вих}}) = \Delta U, \quad (5.1)$$

$$U_{\text{вих}} = k\Delta U, \quad (5.2)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт пропорційності;

$k$  – коефіцієнт підсилення підсилювача.

Після підстановки значення  $\Delta U = U_{\text{вих}} / k$  рівняння (5.1) набуває вигляду

$$f(U_{\text{вх}}) = \varphi(\beta U_{\text{вих}}) + U_{\text{вих}} / k$$

або

$$f(U_{\text{вх}}) = \varphi(\beta U_{\text{вих}}) \left( 1 + \frac{U_{\text{вих}}}{k\varphi(\beta U_{\text{вих}})} \right).$$

Якщо виконати умову

$$\frac{U_{\text{вих}}}{k\varphi(\beta U_{\text{вих}})} \ll 1,$$

то маємо

$$f(U_{\text{вх}}) = \varphi(\beta U_{\text{вих}}). \quad (5.3)$$

Якщо значення функцій нелінійних елементів  $f$  і  $\varphi$  однакові, то однакові й величини під знаком цих функцій

$$U_{\text{вх}} = \beta U_{\text{вих}}, \quad (5.4)$$

що свідчить про можливість досягнення лінійного перетворення дуже малих значень змінних напруг.

Розглянута структурна схема реалізована у вольтметрах ВЗ-36 та ВЗ-43. Функціональна схема цих приладів (рис. 5.7, б) складаються з детектора сигналу із закритим входом, підсилювача некомпенсації, високочастотного модулятора, керованого генератором 100 кГц, подільника напруги  $R_1$ ,  $R_2$  та детектора зворотного зв'язку. Діоди детекторів підбирають парами, щоб їх характеристики якомога більше збігалися. Обидва детектори розміщують в одному корпусі для вирівнювання температурного поля навколо діодів.

Якщо вхідні сигнали детекторів однакові, то завдяки ідентичності передаточних характеристик детекторів вихідні сигнали їх також однакові. При нерівності вхідних сигналів на вхід підсилювача постійного струму буде подаватися різниця напруг  $\Delta U = U_1 - U_2$ . Підсилена різниця  $\Delta U$  використовується для керування модулятором-генератором. Під дією  $\Delta U$  напруга генератора змінюється так, що вхідні сигнали детекторів стають однаковими.



Генератор має лінійну модуляційну характеристику, яка проходить через початок координат. Тому при одержанні рівності вхідних напруг детекторів напруга на виході генератора стає прямо пропорційною вимірюваній напрузі. Ця напруга вимірюється магнітоелектричним вольтметром, шкала якого відграду- йована в діючих значеннях синусоїдної напруги і в децибелах. Завдяки взаємній компенсації похибок детекторів вдається знизити межу вимірювання до 10 мВ.