

УДК 621.31.4

## ЦИФРОВИЙ ВОЛЬТМЕТР З АЛГОРИТМІЧНО-ПАРАМЕТРИЧНОЮ КОРЕКЦІЄЮ ПОХИБОК

© Микола Грибок, Степан Романюк, 2000

Державний університет "Львівська політехніка", кафедра "Інформаційно-вимірювальна техніка",  
вул. С.Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Описується структурна схема, особливості побудови окремих вузлів і подаються метрологічні характеристики вольтметра В7-21А з комутаційним інвертуванням.*

*Описывается структурная схема, особенности построения отдельных узлов и приводятся метрологические характеристики вольтметра В7-21А с коммутационным инвертированием.*

*The В7-21А voltmeter with inverse commutation ristics and it's main units designing specialities are described in this paper.*

До вимірювальних приладів, відомих широкому колу спеціалістів, належить вольтметр універсальний В7-21А, який є модернізацію вольтметра В7-21. Під час виконання робіт із вдосконалення експлуатаційних та метрологічних характеристик приладу постало ряд завдань підвищення точності вимірювань. Один із варіантів розв'язання цього завдання наводиться нижче в порівняльному аналізі

схемотехнічних рішень, прийнятих в приладах В7-21, В7-21А, в основу яких покладено метод комутаційного інвертування.

Аналого-цифрове перетворення здійснюється за допомогою диференціальних частотних давачів. Структурна схема аналого-цифрового перетворювача (АЦП) показана на рис.1.

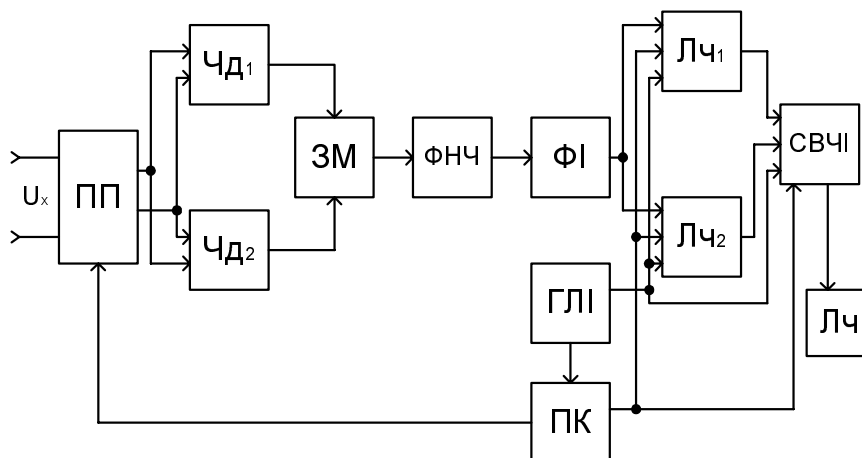


Рис.1. Структурна схема комутаційного аналого-цифрового перетворювача

Вхідна напруга  $U_X$  через перемикач полярності ПП надходить на входи частотних давачів  $\text{Чд}_1$  і  $\text{Чд}_2$ , які призначені для перетворення напруги  $U_X$  в зміну частоти гармонічних коливань  $\Delta f_X$ . З виходів давачів сигнали надходять на вхід змішувача ЗМ фільтра нижніх частот ФНЧ і на формувач імпульсів ФІ, який забезпечує узгодження між аналоговою і цифровою частиною АЦП. Пе-

ретворення приросту  $\Delta f_X$  в інтервал часу  $\Delta f_X \div T_X$  здійснюється за допомогою лічильників  $\text{Лч}_1$ ,  $\text{Лч}_2$ , генератора лічильних імпульсів ГЛІ, схеми виділення СВЧІ  $T_X \div U_X$ . Підрахунок кількості  $N = T_X = U_X$  відбувається в лічильнику Лч. Синхронізація роботи здійснюється пристроєм керування ПК.

Напруга в цифровий код перетворюється у двох півциклах у такий спосіб. В перший вимі-

рювальний півцикл вимірювана напруга подається на входи частотних давачів так, що частота на виході першого давача ЧД<sub>1</sub> збільшується, а частота на виході другого давача ЧД<sub>2</sub> зменшується (при цьому початкова частота першого давача  $f_{Д1}$  вища від початкової частоти другого давача  $f_{Д2}$ ). На виході змішувача отримуємо

$$(f_{\partial_1} + \Delta f_{X_1}) - (f_{\partial_2} - \Delta f_{X_2}) = f_{\partial_1} - f_{\partial_2} + \Delta f_{X_1} + \Delta f_{X_2},$$

де  $f_{\partial_1} - f_{\partial_2} = f_0$  – нульова частота перетворювача,

$\Delta f_{X_1} = \Delta f_{X_2} = \Delta f_X$  – приріст частоти, пропорційний зміні вхідної напруги.

Звідси в перший півцикл, через ФНЧ, ФІ в лічильник надходить сигнал частотою

$$f_{\text{вих}_1} = f_0 + 2\Delta f_X.$$

У другий півцикл вимірювана напруга прикладається до давачів в зворотній полярності і на вхід Лч надходить сигнал частотою

$$\begin{aligned} f_{\text{вих}_2} &= (f_{\partial_1} - \Delta f_{X_1}) - (f_{\partial_2} + \Delta f_{X_2}) = \\ &= f_{\partial_1} - f_{\partial_2} - \Delta f_{X_1} - \Delta f_{X_2} \end{aligned}$$

З урахуванням прийнятих вище позначень

$$f_{\text{вих}_2} = f_0 - 2\Delta f_X.$$

За час  $T$  в Лч<sub>1</sub> запишеться  $N_1$  імпульсів

$$N_1 = f_{\text{вих}_1} \cdot T = (f_0 + 2\Delta f_X) \cdot T.$$

За той самий час в Лч<sub>2</sub> запишеться  $N_2$  імпульсів

$$N_2 = f_{\text{вих}_2} \cdot T = (f_0 - 2\Delta f_X) \cdot T.$$

Різниця між кількостями імпульсів, записаних в Лч<sub>1</sub> і Лч<sub>2</sub>, становить

$$N = N_1 - N_2 = (f_0 + 2\Delta f_X) \cdot T - (f_0 - 2\Delta f_X) \cdot T = 4\Delta f_X \cdot T.$$

Кількість імпульсів  $N$  виділяється схемою СВЧ і записується в Лч. Отже, результат аналого-цифрового перетворення пропорційний до приросту частоти давачів

$$N = 4\Delta f_X \cdot T.$$

Давачі виконані за схемою LC-генераторів з використанням варикапів, які мають при зворотному включенні відносно високу добротність, малий температурний коефіцієнт, низький рівень власних шумів. Схема контура показана на рис.2.

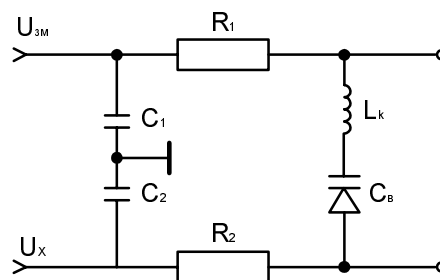


Рис.2. Принципова схема контура частотного давача:

$R_1, R_2$  – опори, через які подаються напруга зміщення  $U_{зм}$  і вхідна напруга,  
 $L_k$  – індуктивність контура,  $C_в$  – ємність варикапа,  $C_1, C_2$  – ємність фільтра

Частота давача

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_k C_в}},$$

де  $f_r$  – частота генератора,  $L_k$  – індуктивність контура,  $C_в$  – ємність контура; визначається параметрами LC-контура. Для усунення можливості зміщення р-п переходу в прямому напрямку вхідним сигналом  $U_X$  в схемі передбачено зміщення в зворотному напрямку напругою  $U_{зм}$  через резистор  $R_1$ . Залежність ємності варикапа від

напруги зміщення  $U_{зм}$  і вхідного сигналу  $U_X$  визначається за формулою

$$C_в = \frac{C_0}{\sqrt{U_{зм} + U_X}},$$

де  $C_0$  – ємність варикапа при вказаному у довідниках зміщенні.

При цьому вихідні частоти давачів становлять: – в перший півцикл

$$f_{\text{вих}_1} = f_{Д1} - f_{Д2} = \frac{\sqrt[4]{U_{зм1} + U_X}}{2\pi\sqrt{L_1 C_{01}}} - \frac{\sqrt[4]{U_{зм2} - U_X}}{2\pi\sqrt{L_2 C_{02}}};$$

– в другий півцикл

$$f_{вих2} = f_{Д1} - f_{Д2} = \frac{\sqrt[4]{U_{ЗМ1} - U_X}}{2\pi\sqrt{L_1C_{01}}} - \frac{\sqrt[4]{U_{ЗМ2} + U_X}}{2\pi\sqrt{L_2C_{02}}}$$

При однакових конструкціях і схемах давачів можна допустити, що

$$U_{ЗМ1} = U_{ЗМ2} = U_{ЗМ}; C_{01} = C_{02} = C_0;$$

$$L_1 = L_2 = L.$$

Тоді результат перетворення N за час T становитиме

$$N = (f_{вих1} - f_{вих2}) \cdot T = \frac{T}{\pi\sqrt{LC_0}} \left[ (U_{ЗМ} + U_X)^{\frac{1}{4}} - (U_{ЗМ} - U_X)^{\frac{1}{4}} \right],$$

або після перетворення

$$N = \frac{T}{2\pi\sqrt{LC_0}} \cdot \frac{U_X}{U_{ЗМ}} \left[ 1 + \frac{7}{32} \left( \frac{U_X}{U_{ЗМ}} \right)^2 + \frac{231}{512} \left( \frac{U_X}{U_{ЗМ}} \right)^4 + \dots \right].$$

Отже, результат перетворення напруги в цифровий код з використанням диференціальних частотних давачів, крім лінійної складової, має нелінійні, які роблять істотний внесок в похибку перетворення. При  $U_{ЗМ} = 2$  В і  $U_X = 100$  мВ відносна

$$\text{похибка тільки за рахунок складової } \frac{7}{32} \left( \frac{U_X}{U_{ЗМ}} \right)^2$$

становить  $\delta = 0.054\%$ .

У реальних умовах на основній межі вимірювання вольтметрів В7-21 і В7-21А були зняті покази, наведені в табл.1.

Таблиця 1

N <sub>пр.</sub>	U <sub>X</sub> тВ												
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	119
В7-21	00.0 0	10.0 0	20.0 0	30.0 0	40.0 0	50.0 0	60.0 0	70.0 1	80.0 2	90.0 3	100.04	110.0 5	119.08
В7-21А	0.00 0	10.0 0	20.0 0	30.0 0	40.0 0	50.0 0	60.0 0	70.0 0	80.0 0	90.0 0	100.01	110.0 2	119.02

В першому наближенні можна стверджувати, що розрахункові і експериментальні дані збігаються.

Способи підвищення лінійності функції перетворення частотних давачів розглядаються у роботах [2, 3]. В нашому випадку без зміни структурної схеми аналогової частини АЦП зменшення впливу нелінійних складових на похибку перетворення можна здійснити за рахунок:

– підвищення нульової частоти давачів. При цьому знижуються шумові характеристики через

зменшення добротності контура LC-генератора, яка, переважно, визначається добротністю варикапа. Наприклад, залежність добротності від частоти для варикапа Д902 показана на рис.3 [5].

– зменшення значення діапазону перетворювальних напруг, тобто використовувати вузький діапазон характеристики. При цьому погіршуються експлуатаційні характеристики приладу.

– проведення корекції нелінійності функції перетворення в цифровій частині АЦП [7].

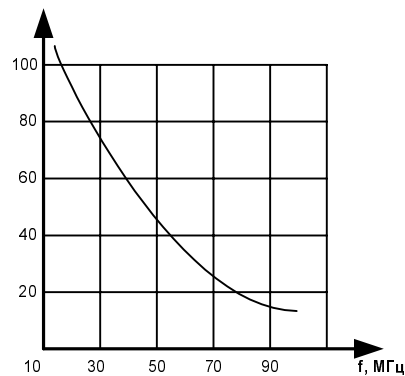


Рис.3. Залежність добротності від частоти для варикапа Д902

Враховуючи збіг розрахункових і експериментальних даних, а також їх повторюваність у процесі виробництва і експлуатації, при модернізації був використаний спосіб корекції нелінійності в цифровій частині АЦП. Його суть полягає у зміні загальної кількості імпульсів  $N$ , що є на виході перетворювача  $T = U_X$ . Тобто відповідно до наперед заданої кусково-лінійної апроксимації (за допомогою необхідних доповнень у структурній схемі) до кількості імпульсів  $N$  або додаються додаткові тактові імпульси, або частково забороняються основні  $N$ . Моменти часу і кількість додаткових (чи забороняючих) імпульсів визначаються додатковим пристроєм управління.

Розглянемо, як загалом здійснити програму лінеаризації. Знаючи верхню межу вимірювання  $U_X$  і значення  $N$ , яке йому відповідає, запишемо постійну  $K$ , котра визначає величину нахилу лінійної залежності, якою апроксимується нелінійна характеристика:

$$K = \frac{U_{X_{гр}}}{N_{гр}},$$

де  $U_{X_{гр}}$  – верхня межа вимірювання сигналу,  $N_{гр}$  – значення кількості імпульсів, що відповідають  $U_{X_{гр}}$ .

Після цього побудуємо функцію корекції  $E(U_X)$ , яка визначається за формулою:

$$E(U_X) = K \cdot U_X - U_X$$

Якщо тепер задатись похибками апроксимації, то можна здійснити кусково-лінійну апроксимацію залежності  $E(U_X)$ .

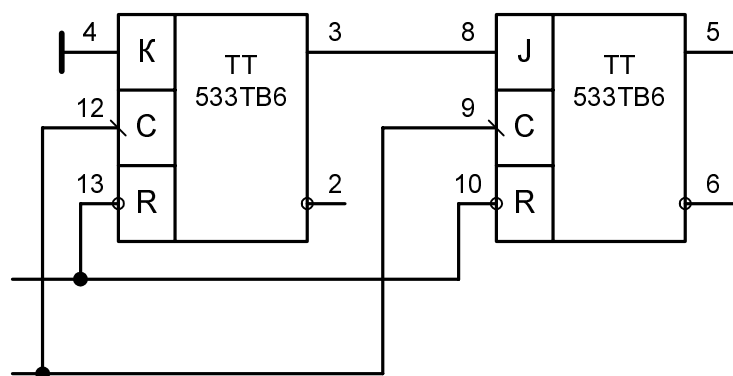


Рис. 5. Принципова схема віднімача

Додавання чи віднімання імпульсу визначається знаком похідної. Якщо на  $i$ -й ділянці апроксимації похідна від'ємна, то до основної кількості додається  $n$  додаткових імпульсів, а якщо додатна, то забороняється  $n$  імпульсів з  $N$  основних.

Значення кількості додаткових імпульсів визначається за таким співвідношенням

$$\frac{n}{N} = \frac{e_i}{N_i - e_i},$$

а заборонених – співвідношенням

$$\frac{n}{N} = \frac{e_i}{N_i + e_i}.$$

Відношення  $n/N$  означає, що на  $i$ -й ділянці апроксимації до кожних  $N$  імпульсів, які видаються тактовим генератором, додаються  $n$  додаткових імпульсів або забороняються  $n$  із  $N$  основних.

У приладі В7-21А як частковий випадок реалізації лінеаризації функція перетворення розбита на 4 ділянки. Зміна структурної схеми АЦП показана на рис.4.

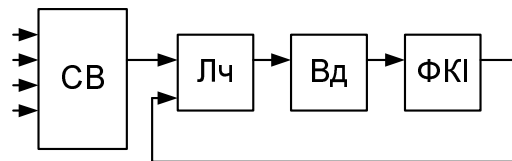


Рис. 4. Доповнення до структурної схеми АЦП:  
СВ – схема виділення  $T = U_X$ ; Лч – лічильник  $T = U_X$ ;  
Вд – віднімач;  
ФКІ – формувач керуючих імпульсів

В АЦП приладу В7-21А віднімач виконаний на двох  $j$ -к тригерах (рис.5) і працює так.

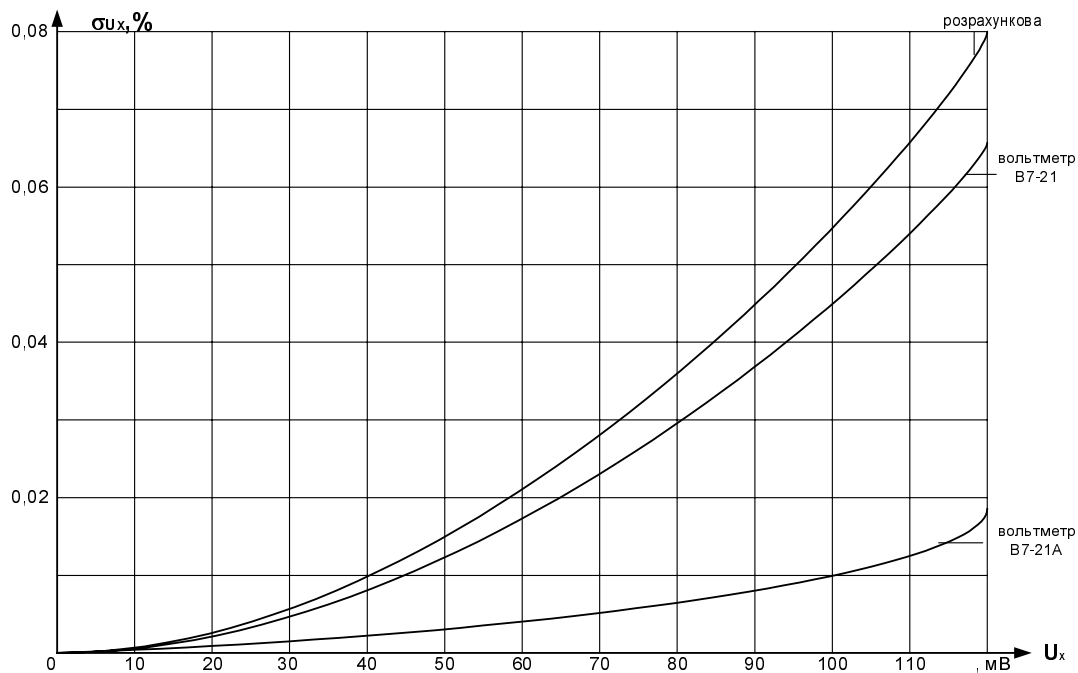


Рис.6. Порівняльні залежності похибок

При наявності імпульсу з виходу формувача тригери встановлюються в нульове положення. З надходженням першого імпульсу по рахунковому входу перекидається перший тригер, а другий підтверджує свій стан. Встановлений рівень логічної одиниці на виході першого тригера дозволяє роботу другого тригера в режимі ділення, починаючи з другого імпульсу.

Для порівняння в табл.1 наведені покази вольтметра В7-21А при вимірюванні постійної напруги на основній границі, а на рис.6 – порівняльні графіки відносної похибки.

Границі допустимої основної похибки вимірювання напруги постійного струму вольтметрами В7-21 і В7-21А подані у табл.2., де  $U_k$  – кінцеве значення встановленої границі вимірювання,  $U_x$  – покази вольтметра.

Таблиця 2

**Границя допустимої основної похибки вимірювання напруги постійного струму, %**

<b>Вольтметр В7-21</b>	<b>Вольтметр В7-21А</b>
$\pm \left( 0.1 + 0.03 \frac{U_k}{U_x} \right)$	на границях 10 мВ, 100 мВ
	$\pm \left[ 0.06 + 0.03 \left( \frac{U_k}{U_x} - 1 \right) \right]$
	на границі 1 В
	$\pm \left[ 0.04 + 0.02 \left( \frac{U_k}{U_x} - 1 \right) \right]$
	на границях 10 В, 100 В, 1000 В
	$\pm \left[ 0.1 + 0.04 \left( \frac{U_k}{U_x} - 1 \right) \right]$

1. Вольтметр универсальный В7-21. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1984. 2. А.с. № 449309 (СССР). Измеритель электрических и неэлектрических величин / Л.К. Золотков, М.Ф. Марунчак, В.П. Пивоваров // Открытия. Изобрет. 1974. № 41. 3. Золотков Л.К. некоторые методы линеаризации характеристики преобразователей аналог-частота-цифровой код //

Вопросы радиоэлектроники. 1971. Вып. №2. 4. Вольтметр универсальный В7-21А. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1988. 5. Полупроводниковые приборы. Справочник // Под руководством А.В. Голомедова. М., 1989. 6. А.с. № 1478138 (СССР). Цифровой вольтметр / Н.И. Грибок и др. // Открытия. Изобрет. 1989. № 17.

УДК 621.382.01

## НЕСТАЦІОНАРНІСТЬ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ФЛУКТУАЦІЙ В ПРОВІДНИКАХ З РІЗНИМ ХАРАКТЕРОМ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ

© Зеновій Колодій, 2000

Державний університет «Львівська політехніка», кафедра «Теоретична радіотехніка і радіовимірювання», вул. С.Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Аналізуються результати експериментальних досліджень низькочастотних флуктуацій у провідниках з іонною та електронною провідностями. Встановлено, що флуктуації із спектральною густиною, пропорційною  $1/f^\alpha$ , належать до нестационарних процесів.*

*Анализируются результаты экспериментальных исследований низкочастотных флуктуаций в проводниках с ионной и электронной проводимостями. Установлено, что флуктуации, спектральная плотность которых пропорциональна  $1/f^\alpha$ , принадлежат к нестационарным процессам.*

*The results of experimental investigations of LF-fluctuations in the conductors with ion and electron conductivity are analyzed in this paper. It has been proved that fluctuations with spectra density proportional to  $1/f^\alpha$  belong to non-stationary processes.*

Вимірювання параметрів низькочастотних сигналів, значення яких є на межі чутливості радіоелектронної апаратури, пов'язані із певними труднощами. Однією із перешкод є низькочастотні флуктуації (НЧ-флуктуації) як самої апаратури, так і джерела сигналу. Експериментально встановлено [1], що інтенсивність флуктуацій зростає із зниженням частоти, проте єдиний механізм генерування НЧ-флуктуацій лишається невідомим. Є декілька гіпотез, які на підставі експериментальних результатів пояснюють причини зростання інтенсивності флуктуацій із зниженням частоти, проте жодна із них не може повністю пояснити всіх експериментальних результатів. Продовжуються також дискусії щодо стаціонарності чи нестационарності НЧ-флуктуацій. Метою нижчеописаних досліджень було з'ясування питання стаціонарності НЧ-флуктуацій у провідниках з електронною та іонною провідностями.

Для досліджень була використана експериментальна установка, описана у [2]. Замість окре-

мих блоків смугового фільтра, квадратичного детектора, інтегратора, аналізатора спектра і реєструвальної апаратури був використаний селективний нановольтметр типу «Unipan 233» (виробництво Польщі) із виносним широкосмуговим підсилювачем з коефіцієнтом підсилення 20 дБ, що дає змогу збільшити чутливість приладу до одиниць нановольт.

Спектральні густини НЧ-флуктуацій досліджували на зразках, виготовлених на основі розчинів NaCl і порівнювали із НЧ-флуктуаціями в резисторах типу МЛТ-0,25. Вибір для досліджень електrolітичних розчинів був зроблений для того, щоб виключити гіпотезу про вплив поверхневого ефекту на НЧ-флуктуації. Було виготовлено три дослідні зразки з 1%, 2% і 4% розчином NaCl, – скляні трубочки із зовнішнім діаметром 10 мм і завдовжки 60 мм, герметично закриті на кінцях металевими електродами з нержавіючої сталі. Перед проведенням експерименту та після його завершення були виміряні опори зразків на різних частотах. Результати вимірювань наведені в таблиці.