

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ

Литвиненко В.М., Дощенко Г.Г., Самойлов М.О.

Доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій електроніки та інженерії, к.т.н. Литвиненко Віктор Миколайович  
Херсонський національний технічний університет  
Бериславське шосе, 24, тел. 32-69-44, [viktor\\_719160@mail.ru](mailto:viktor_719160@mail.ru)

Доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматизації, к.т.н. Дощенко Галина Геннадіївна  
Херсонська державна морська академія, пр. Ушакова, 20,  
тел. 26-22-59, [herson@yandex.ru](mailto:herson@yandex.ru)

Ведучий інженер лабораторії №23 Самойлов Микола Олександрович  
Інститут фізики напівпровідників НАН України (Херсонський філіал),  
вул. Заводська, 76, тел. 51-54-57, [mas\\_50@mail.ru](mailto:mas_50@mail.ru)

Вибір методу вимірювання частоти визначається її діапазоном, необхідною точністю вимірювання та деякими іншими факторами. Для вимірювання низьких та високих частот застосовують частотоміри, принцип дії яких оснований на методах заряду і розряду конденсатора, мостовому, порівняння вимірюваної частоти із зразковою, резонансному. Найбільш широкополосними і точними є цифрові частотоміри, побудовані по методу дискретного підрахунку.

Розглянемо основні методи вимірювання частоти.

### 1. Резонансний метод вимірювання частоти

Резонансний метод вимірювання частоти базується на порівнянні вимірюваної частоти з частотою власних коливань коливальної ланки [1, 2]. Застосовується для вимірювання частот від 100 кГц до 100 ГГц.

Сигнал з частотою  $\omega_x$  (рис.1), яку необхідно виміряти, через взаємно індуктивні елементи подається на коливальний контур LC.

За допомогою індикатора резонансу контур налаштовується у резонанс із вимірюваною частотою  $f_x=f_p$ . Індуктивність L заздалегідь відома із заданою точністю, а тому шкала конденсатора градується безпосередньо в одиницях частоти. На високих і надвисоких частотах коливальний контур частотоміра виготовляється у вигляді відрізка коаксіальної лінії або об'ємного резонатора.

Для шкали до 200 МГц застосовується LC і RC контури. Вище 200 МГц застосовуються контури з розподіленими резонаторами. Погрішність в цьому випадку досягає 0,01 %.

Резонансну частоту контуру можна змінювати, змінюючи ємність конденсатора  $C_x$ :

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_x}}$$

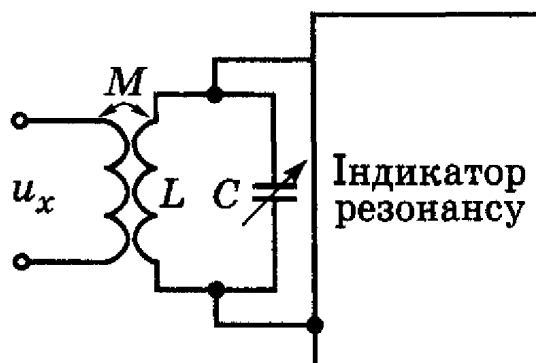


Рис.1. Принцип вимірювання частоти резонансним методом

## 2. Цифровий метод вимірювання частоти

Цей метод заснований на підрахунку числа періодів вимірюваної невідомої частоти за точно відомий відрізок часу [1]. Структурно-функціональну схему такого цифрового частотоміра зображено на рис. 2, а. Епюри напруг, що відповідають позначеним літерами ділянкам наведеної схеми частотоміра, показано на рис. 2, б.

На схемі позначено:  $U_{fx}$  - напруга невідомої вимірюваної частоти, Ф2 - формувач імпульсів вимірюваної частоти, К - електронний ключ, КГ - кварцовий генератор точно відомої високої частоти, Ф1 - формувач прямокутних імпульсів частоти, генерованої кварцовим генератором КГ, ПЧ - подільник частоти, ФГЧ - формувач імпульсів точного часу, Л - декадний лічильник, ДШ - дешифратор, ПІ - пристрій індикації.

Головним вузлом, що забезпечує точність виміру частоти в цьому приладі, є кварцовий генератор високої частоти. Власне висока частота тут не потрібна, але кварцові генератори саме на високій частоті здатні працювати з високою точністю і за прийнятних розмірів кварцової пластини. Щоб запобігти впливу температури середовища на частоту кварцового генератора, всі його частини вміщено в термостат обмеженого об'єму з власним нагрівачем та автоматичним регулятором температури. Це забезпечує стабілізацію температури всередині термостата на рівні  $50\dots 60^\circ\text{C}$  незалежно від температури довкілля, що змінюється у нормальних межах, тобто не перевищує  $40^\circ\text{C}$ .

Для більш чіткої роботи інших елементів схеми синусоїдальна напруга кварцового генератора перетворюється формувачем Ф1 на послідовність імпульсів напруги майже прямокутної форми. Ця послідовність імпульсів, потрапляючи в подільник частоти ПЧ, після багаторазового поділення

перетворюється на прямокутні імпульси малої частоти з суворо витриманим часом  $T$  кожного періоду (рис. 2, б, еюра  $\epsilon$ ).

Ці імпульси, попадаючи у формувач імпульсів часу ФІЧ, формуються у прямокутні імпульси напруги (еюра  $\epsilon$ ), які надходять у коло керування електронним ключем  $K$ , примушують його відмикатися на точно дозовані проміжки часу (наприклад, на 1 с), протягом яких цей ключ пропускає через себе у лічильник  $L$  сформовані формувачем Ф2 пакети імпульсів (еюра  $\delta$ ).

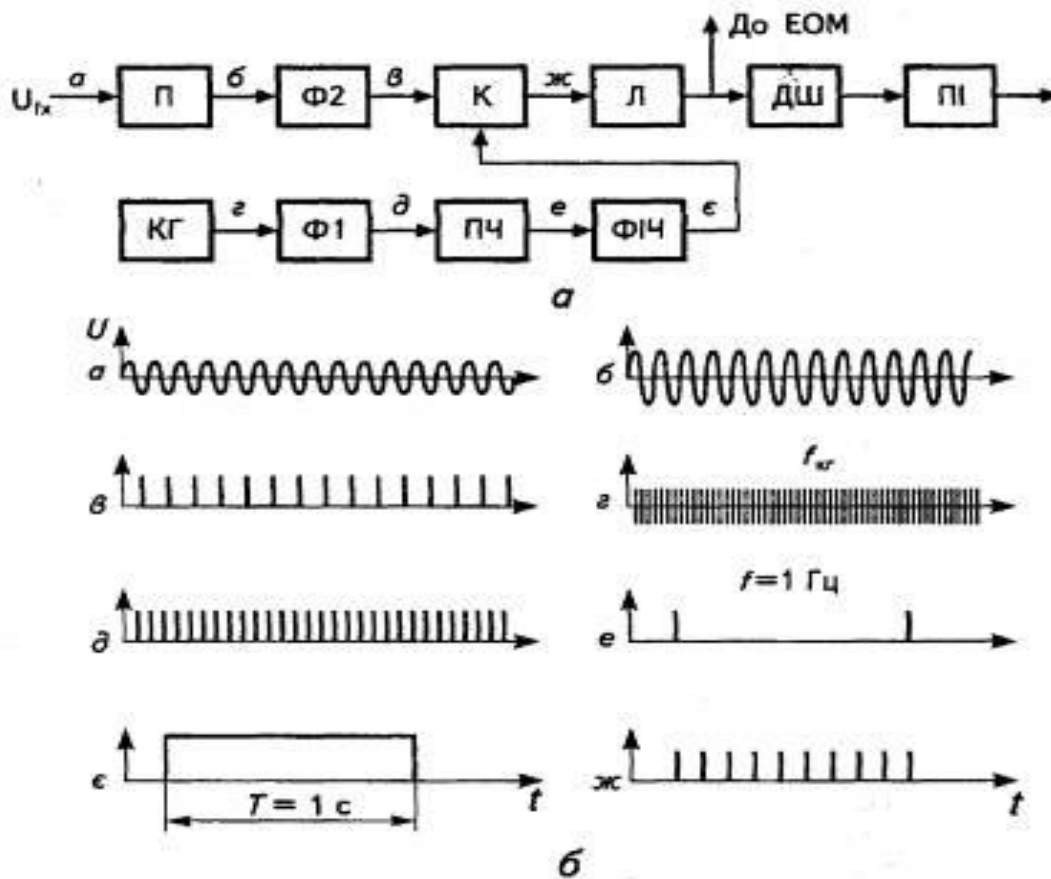


Рис. 2. Структурно-функціональна схема цифрового частотоміра:  
а - схема, б - епюри напруг

Лічильник, порахувавши число імпульсів, вміщених у пакеті (тобто ту кількість, що пройшла через ключ  $K$  протягом фіксованого часу), і перетворивши це число у десяткову форму, надсилає це число до дешифратора ДШ, де воно перетворюється на код, сприйнятний для цифрового пристрою індикації, на якому і висвітлюється вимірюване значення частоти напруги. Разом з тим сигнал про величину вимірюваної частоти після лічильника  $L$  (а іноді й після дешифратора) може спрямовуватись до ЕОМ для зберігання чи подальших розрахунків.

За допомогою цифрового частотоміра можна вимірювати частоту зі значно більшою точністю, ніж частотомірами інших систем (можна вести виміри з похибкою, що не перевищує 0,01%). Підвищення точності цифрових частотомірів можна досягти, підвищуючи стабільність кварцового генератора і збільшуючи величину часу  $T$ .

Завдяки високій точності й можливості передавання результату вимірювань безпосередньо до ЕОМ нині широко застосовують саме цифрові частотоміри. Із застосуванням перетворювачів неелектричних величин (наприклад, швидкості обертання) у напругу змінного струму, частота якої однозначно пов'язана з контрольованою величиною, можливості цих частотомірів ще більш поширюються.

## 2. Вимірювання частоти методом заряду і розряду конденсатора

Сутність цього методу полягає у вимірюванні струму розряду  $I_{сер}$  конденсатора, який періодично перзаряджається в такт із вимірюваною частотою  $f_x$  (рис. 3) [2].

Якщо конденсатор  $C$  за допомогою перемикача  $\Pi$  заряджати від джерела  $E.P.C. E$  до напруги  $U_1$ , а потім розряджати через мікроамперметр магніто-електричної системи до напруги  $U_2$ , то кількість електрики, отримана при заряді, буде рівна кількості електрики, яка віддається мікроамперметру, тобто  $q=C \cdot (U_1-U_2)$ .

Якщо перемикач  $\Pi$  перемикає  $f_x$  раз в секунду, де  $f_x$  – вимірювана частота, то кількість електрики, яка протікає через мікроамперметр в секунду, являє собою середнє значення розрядного струму за період, тобто  $I_{сер}=q \cdot f_x=C \cdot (U_1-U_2) \cdot f_x$ .

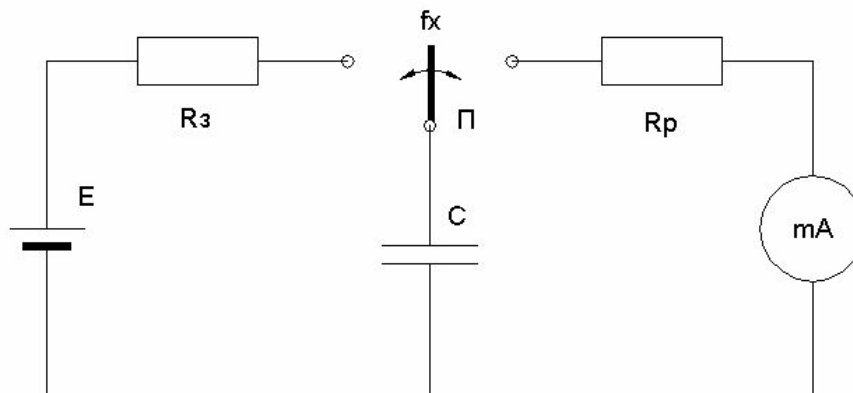


Рис. 3. Схема конденсаторного частотоміра

З даного виразу випливає, що струм який протікає через прилад лінійно зв'язаний з вимірюваною частотою і звідси частота виражається формулою:

$$f_x = \frac{I_{сер}}{C(U_1 - U_2)}$$

Якщо ємність  $C$  і напругу  $U=U_1-U_2$  підтримувати постійними, то шкалу мікроамперметра можна проградувати в одиницях частоти. На цьому принципі працюють конденсаторні частотоміри, в яких перемикання

конденсатора із заряду на розряд здійснюється електронним комутатором з частотою перемикання  $f_x$  при подачі на його вхід напруги вимірюваної частоти. Лінійна залежність між струмом  $I_{\text{ср}}$  та частотою  $f_x$  можлива при виконанні умови  $C \cdot (U_1 - U_2) = \text{const}$ . Тому в схемі частотоміра передбачено обмежувач, який підтримує постійною напругу  $U_1$  – при заряді і  $U_2$  при розряді конденсатора у всьому робочому діапазоні частот. Піддіапазон вимірювальних частот регулюють включенням конденсаторів різної ємності, а також шунтуванням мікроамперметра. Конденсаторні частотоміри застосовують для вимірювання частот 10 Гц, 500 кГц з основною похибкою 2%, при рівні вхідної напруги 0,5, 200 В.

#### 4. Вимірювання частоти за допомогою електродинамічних, феродинамічних та випрямних частотомірів

Електродинамічні частотоміри - це прилади зі стрілочним показником, виконані на основі електродинамічного логометра [3]. Вони вирізняються відносно високим класом точності, зручністю в користуванні, бо дають можливість робити відлік за положенням стрілки на шкалі, градуйованій безпосередньо у герцах. Схему одного з переносних частотомірів, що виробляються в Україні, зображено на рис. 4.

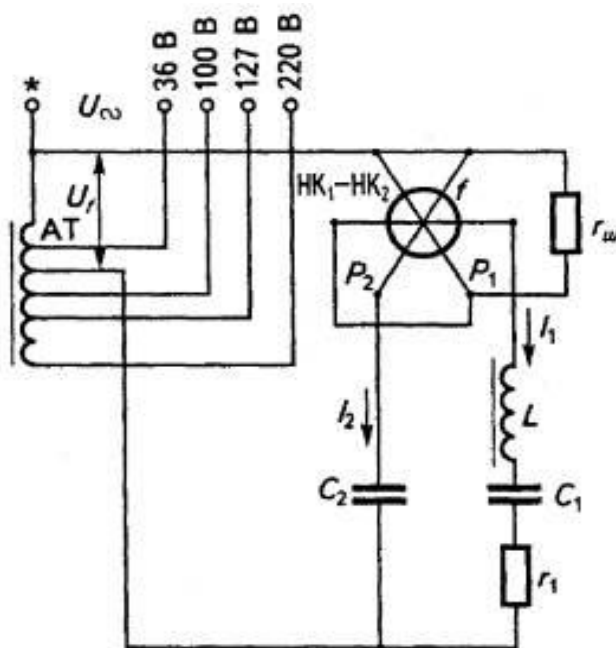


Рис. 4. Схема електродинамічного частотоміра

На схемі позначено:  $P_1$  і  $P_2$  - обмотки рухомих рамок приладу, жорстко закріплених на осі рухомої системи під прямим кутом одна до одної;  $HK_1$  і  $HK_2$  - обмотки нерухомих котушок;  $L$  - котушка індуктивності з феромагнітним осердям, що має невеликий повітряний проміжок;  $C_1$  - конденсатор, який створює резонансний контур з котушкою  $L$ ;  $r_1$  -

додатковий опір,  $r_{ш}$  - підгінний опір;  $C_2$  - конденсатор, реактивний опір якого обмежує величину струму, що проходить через обмотку рамки  $P_2$ ; АТ - автотрансформатор, що дає можливість при величинах номінальних напругах контрольованої частотоміром мережі 36, 100, 127 або 220 В подавати на вимірювальний механізм певну величину напруги, на якій проводилось градування приладу. Зауважимо, що відхилення величини напруги мережі у межах  $\pm 10\%$  від її номінальної величини викликає лише невелику додаткову похибку у показаннях, яка не виходить за межі, допустимі для класу точності приладу. Частотоміри за наведеною схемою виготовляють у декількох модифікаціях. Всі ці прилади здатні вимірювати частоти від 45 до 1650 Гц. Діапазон вимірювань частоти кожним з цих приладів відповідає  $\pm 10\%$  від значення середньої частоти, вимірюваної даним приладом, тобто від 45...55 до 1350...1650 Гц.

Клас точності цих приладів - 0,2, тобто їхня основна похибка не перевищує  $\pm 0,2\%$  від середньої частоти, вимірюваної приладом.

У цих приладах зі зміною величини частоти змінюються також величина і фаза струму у нерухомих котушках НК<sub>1</sub> і НК<sub>2</sub> і у рухомій котушці - рамці  $P_1$ . Так, якщо при частоті, що відповідає показанню посередині шкали приладу, величина реактивного індуктивного опору вітки, по якій проходить струм  $I_1$ , дорівнюватиме величині ємнісного реактивного опору конденсатора  $C_1$ , тоді через наявність резонансу напруг струм  $I_1$  буде найбільшим і перебуватиме у фазі з напругою  $U_f$ .

Рамка  $P_1$  під дією обертового моменту, створеного взаємодією струму в рамці з магнітним потоком нерухомих котушок НК<sub>1</sub> і НК<sub>2</sub>, перебуватиме у положенні, де площини цієї рамки і нерухомих котушок збігатимуться. Дією рамки  $P_2$  можна знехтувати, бо через неї проходить струм  $I_2$ , зрушений відносно напруги  $U_f$  майже на  $90^\circ$ . Якщо ж величина частоти напруги  $U_f$  буде відмінна від частоти резонансу  $f_p$ , то фаза струму  $I_1$  відносно напруги  $U_f$  вже не збігатиметься з напругою, і кут зсуву по фазі струму  $I_1$ , відносно струму  $I_2$  буде відмінним від  $90^\circ$ . Тоді магнітний потік нерухомих котушок, взаємодіючи зі струмом  $I_2$ , створить обертовий момент, що буде врівноважений моментом, створюваним рамкою  $P_1$  при повороті рухомої частини приладу на кут, відповідний вимірюваній частоті напруги  $U_f$ . Зі схеми видно, що величина напруги  $U_f$  не впливає на кут відхилення рухомої частини, бо зміна величини напруги однаково вплине як на величину струму  $I_1$ , так і на величину струму  $I_2$ . Це призведе до однакової зміни величин обертових моментів, створюваних рамками  $P_1$  і  $P_2$ , котрі протидіють один одному, тобто не змінить рівноваги між ними за даного положення рухомої частини приладу.

У цьому приладі, як і у всякому логометрі, відсутні спіральні пружини, а струм підводиться до рамок за допомогою трьох тонких "безмоментних" струмопідводів.

Феродинамічні частотоміри, побудовані на основі феродинамічних логометрів, можуть бути виконані на основі електричних схем, аналогічних схемам електродинамічних частотомірів. Різниця між ними лише в тому, що

споживана потужність у феродинамічного приладу може бути суттєво меншою, ніж у електродинамічного. Часто феродинамічні частотоміри виконують на основі найпростіших однорамочних логометрів, у котрих як діючий, так і протидіючий моменти створюються однією рамкою, через яку водночас проходять два струми: один (що створює момент протидії) викликаний ЕРС взаємоіндукції від дії струму, що є у обмотці нерухої котушки, другий (той, що створює діючий момент) викликаний напругою мережі, частота якої вимірюється. Ця напруга прикладена до ємнісно-індуктивного кола приладу. Як і у частотоміра електродинамічної системи, так і у феродинамічного для підводу струму до рамки використано "безмоментні" струмопідводи, але їх всього два. Електромагнітний частотомір виконано на основі двокотушкового електромагнітного логометра, котрий має на своїй рухомій частині два феромагнітних осердя, кожне з яких взаємодіє з одною із нерухомих котушок. Обертіві моменти електромагнітних систем, до яких входять згадані котушки і осердя, спрямовані зустрічно. Кожну з обмоток котушок ввімкнено послідовно з дроселем і конденсатором, які налаштовано в резонанс на відмінні величини частот. Одна - нижче за найменшу вимірювану частоту, друга - вище за найбільшу вимірювану частоту. Завдяки цьому рівність обертівих моментів, що діють протилежно, в згаданих раніше системах буде одержано при різних величинах вимірюваної частоти у певних положеннях покажчика приладу на шкалі. Рухома частина цього приладу не має ні моментних пружин, ні безмоментних струмопідводів.

Випрямні частотоміри, створені на основі магнітоелектричних логометрів, діють аналогічно тому, як діє електромагнітний частотомір. Тобто вони мають два резонансні контури: резонансна частота одного нижча за найменшу вимірювану, а іншого - вище за найбільшу вимірювану. Але змінні струми, що протікають у вказаних контурах, випрямлюються двопівперіодними випрямлячами і надсилаються до рамок рухої частини магнітоелектричного логометра, кут повороту якої залежить від відношення цих струмів. Згідно з цим, положення стрілки на шкалі логометра визначатиме величину частоти напруги. У електронного частотоміра приладом, що показує частоту, є магнітоелектричний міліамперметр, увімкнений у коло вихідного каскаду електронного підсилювача. Вхідне коло підсилювача приєднане до частотно залежного ланцюга, струм якого мало залежить від величини напруги, частота котрої вимірюється. Завдяки наявності електронного підсилювача, потужність, споживана з вимірювального кола, у електронного частотоміра значно менша, ніж у всіх розглянутих вище частотомірів.

## 5. Мостовий метод вимірювання частоти

Цей метод оснований на використанні частотно залежних мостів змінного струму, які живляться напругою вимірюваної частоти [4].

Найбільш поширеною мостовою схемою для вимірювання частоти являється ємнісний міст, зображений на рис. 5.

Нехтуючи опором  $R_d$ , який складає 1–2 % величини опору  $R_1$ , отримуємо умову рівноваги для цієї схеми:

$$R_1 \frac{1}{1/R_4 + j\omega_x C_4} = R_2 \left( R_3 + \frac{1}{j\omega_x C_3} \right).$$

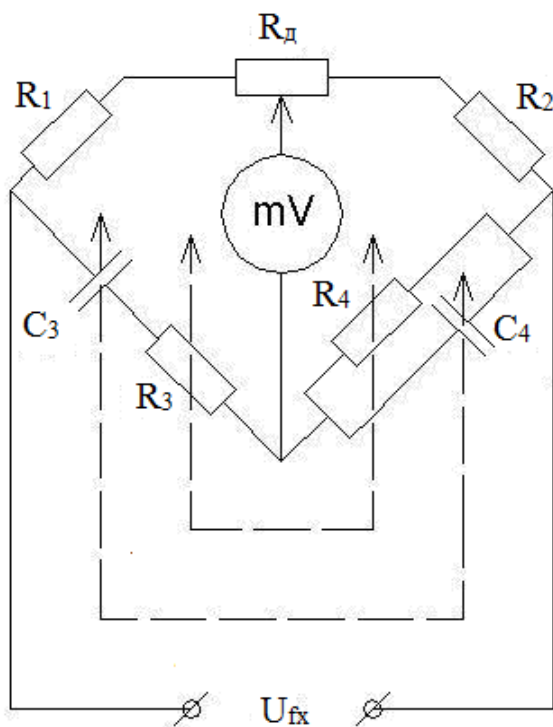


Рис. 5. Схема моста для вимірювання частоти

З даної умови можна записати два рівняння :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} + \frac{C_4}{C_3},$$

$$R_3 \omega_x C_4 = \frac{1}{\omega_x C_3 R_4}.$$

Невідома частота, при якій міст буде зрівноважений :

$$f_x = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_3 R_4 C_3 C_4}}.$$

Якщо  $C_3 = C_4 = C$ ;  $R_3 = R_4 = R$  і  $R_1 = 2R_2$ , тоді значення частоти визначається виразом  $f_x = 1/(2\pi RC)$ . Частоту зрівноваження можна змінювати конденсаторами або резисторами. Найчастіше встановлюють



одинакові ємності і змінюють величину ( $R_3, R_4$ ) змінних здвоєних резисторів, шкалу яких можна відградувати в одиницях частоти. Розширення діапазону вимірювання здійснюють переключенням конденсаторів  $C_3, C_4$ . Мостовий метод вимірювання частоти застосовують для вимірювання низьких частот в межах  $20 \text{ Гц} \div 20 \text{ кГц}$  при похибці вимірювань  $0,5 - 1\%$ . В якості індикатора рівноваги використовують електронний мілівольтметр, а при вимірюванні частот  $200 \text{ Гц} \div 5 \text{ кГц}$  – телефон. Несинусоїдність напруги вимірюваної частоти утруднює процес зрівноваження, міст залишається незрівноваженим за рахунок наявності гармонік і зростає похибка вимірювань.

## 6. Вимірювання частоти за допомогою вібраційних частотомірів

В енергетиці чи не найбільшого поширення набули електромагнітні вібраційні частотоміри. Їхня дія базується на явищі механічного резонансу коливань пружних пластин під дією збуджувальних коливань, створюваних силами тяжіння електромагніта, котушка котрого живиться під джерела змінного струму, частоту якого бажано виміряти [3]. Такі частотоміри можуть бути виконані з безпосереднім (рис. 6, а) чи посереднім (рис. 6, б) збудженням. У обох різновидах частотомірів елементами, чутливими до частоти, є пружні пластини 3 з загнутими кінцями 4, розташовані в ряд проти прорізів, зроблених у шкалі 5 (у частотоміра з безпосереднім збудженням може бути і два ряди таких пластин, як видно з рис. 6, а). У обох видозмінах таких частотомірів електромагніт 2 з обмоткою 7 створює змінне магнітне поле, яке у частотоміра з безпосереднім збудженням викликає притягання сталевих пластин 3 до полюса електромагніта, а у частотоміра з посереднім збудженням - притягання якоря 6, жорстко пов'язаного з основою 7, на якій закріплено кінці всіх пластин 3. Ці пластини можуть бути виконані як зі сталі, так і з якогось іншого пружного матеріалу (наприклад, бронзи). Якір 6 з основою 7 закріплено на двох пружинах 8 до цоколя приладу 9.

Таким чином, у частотомірів обох видозмін всі пружні пластини 3 вібрують з частотою, вдвоє більшою, ніж частота напруги живлення обмотки 1. А вдвоє більшою тому, що за один період напруги живлення і сталеві пластини 3, і якір 6 притягуються до полюсів електромагніта 2 й відпускаються від нього двічі, незалежно від полярності полюсів цього електромагніта. Але амплітуда вібрації кінців 4 цих пластин буде різною: найбільшою у тієї пластини, власна частота коливань якої дорівнює частоті сили збудження (тобто вдвоє більша за частоту напруги живлення). Менші амплітуди коливань будуть у сусідніх пластин, власна частота коливань яких трохи більша і трохи менша від подвоєної частоти напруги. І чим більш відмінною будуть власні частоти коливань пластин від цієї подвоєної частоти напруги, тим меншим буде розмах коливань кінців 4 цих пластин 3. Частоту коливань напруги знаходять за тією позначкою частотоміра, проти якої видимий розмах коливань кінця пластини 3 є найбільшим. На рис. 7, в, де

зображено шкалу частотоміра, показано, як виглядає показання розглянутих частотомірів, коли частота напруги мережі становить 49,5 Гц.

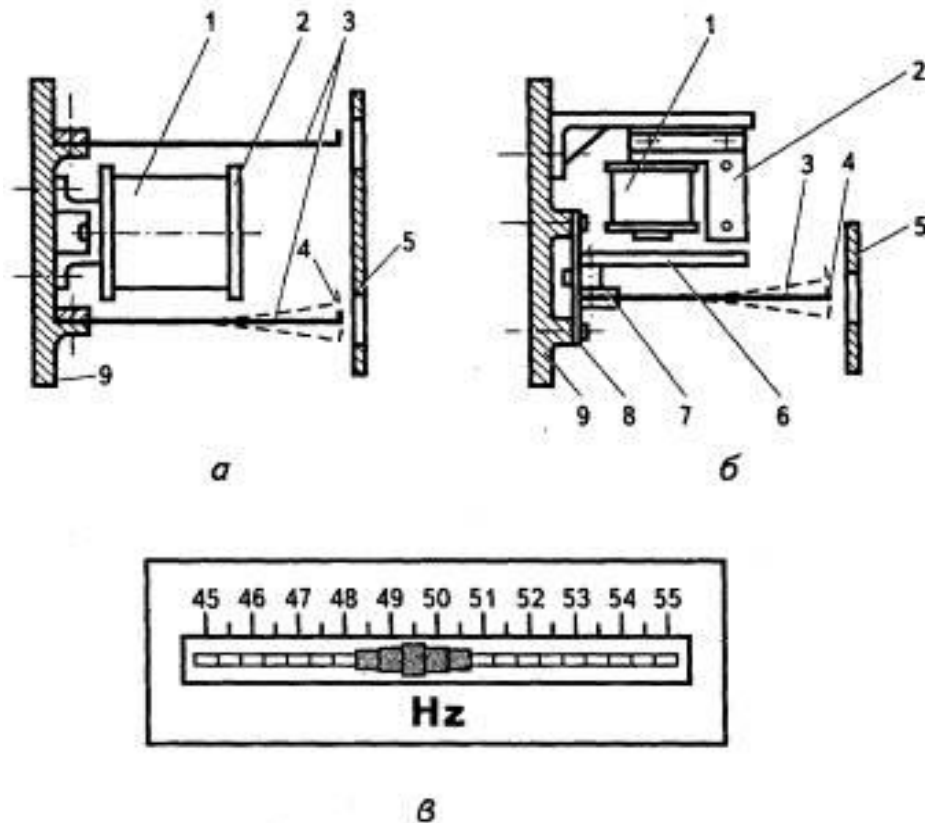


Рис. 6. Будова вібраційних частотомірів

## 7. Вимірювання частоти за допомогою осциллографа

Метод лінійної розгортки. У режимі лінійної розгортки сигнал із частотою, яку необхідно виміряти, подається на вхід каналу вертикального відхилення [5]. За допомогою синхронізації досягають стійкого зображення на екрані осциллографа. Частоту вимірюють, підраховуючи візуально кількість повних коливань за одиницю часу. Період коливань вимірюють також візуально за допомогою шкали, нанесеної на екрані осциллографа. Якщо осцилограф двоканальний або двопроточний, то можна виміряти зсув фаз між двома коливаннями однакової частоти, подаючи їх на входи каналів вертикального відхилення.

Зсув фаз можна виміряти також і за допомогою одноканального осциллографа, якщо один сигнал подати на вхід вертикального відхилення, а другий - на вхід зовнішньої синхронізації.

Синусоїдна розгортка. Якщо сигнал з вимірюваною частотою подати на вхід каналу вертикального відхилення осциллографа, а сигнал із відомою зразковою частотою подати на вхід каналу горизонтальної розгортки, то на екрані осциллографа можна отримати так звані фігури Лісажу - складні

траєкторії руху електронного променя, вигляд яких залежить від співвідношення частот  $f_x/f_0$  і від кута зсуву фаз (рис.7).

Циклічна розгортка. У цьому режимі на вхід горизонтального й вертикального каналів подаються сигнали однієї і тієї самої зразкової частоти, відомої із заданою точністю, і зсунуті один відносно одного на  $\pi/2$ .

На екрані осцилографа електронний промінь рухатиметься вздовж кола, причому тривалість одного оберту дорівнює періоду зразкового сигналу.

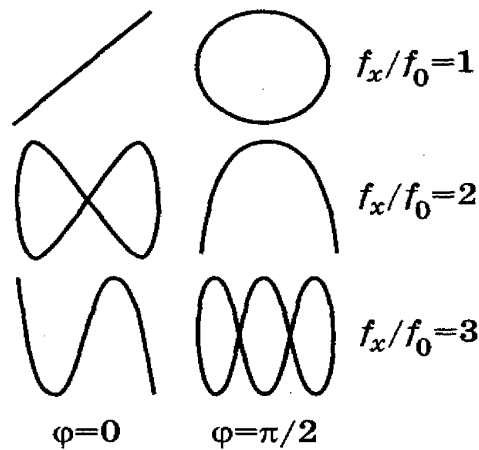


Рис.7. фігури Лісажу

Сигнал із вимірюваною частотою  $f_x$  подається на модулятор електронно-променевої трубки і таким чином модулюється яскравість зображення - у позитивний півперіод зображення яскравіше, а у від'ємний - менш яскраве. Якщо  $f_x > f_0$ , то у зображенні кола на екрані осцилографа з'являються світлі і темні ділянки. Кількість світлих або темних ділянок дорівнює кратності  $n$  вимірюваної  $f_x$  і зразкової  $f_0$  частот  $n=f_x/f_0$ , звідки  $f_x=nf_0$ . Пунктирне зображення кола на екрані нерухоме тільки за умови кратності  $f_x/f_0$ , тому візуально домагаються кратності, змінюючи зразкову частоту  $f_0$ .

Метод кругової розгортки [5, 6]. Якщо напругу однієї частоти (зразкової  $f_0$ ) використовувати для отримання кругової розгортки на екрані осцилографа, а напругу іншої (більшої частоти  $f_x$ ) подати на електрод (модулятор), який керує яскравістю світіння трубки (рис. 8, а), то в позитивний півперіод цієї напруги яскравість розгортки буде збільшуватись, а у від'ємний зменшуватись.

В результаті коло буде складатися з  $n$  темних та  $n$  світлих штрихів. При чому  $n = f_x/f_0$ . При цілому значенні  $n$  осцилограма буде нерухомою. Схема досліду і зображення на екрані осцилографа для співвідношення частот  $f_x/f_0 = 6$  подано на рис. 8, б.

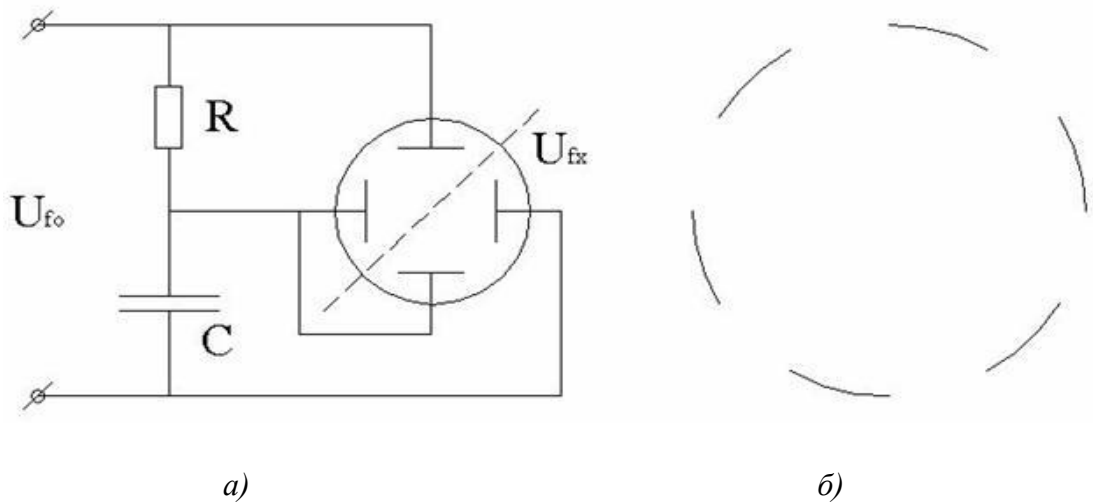


Рис. 8. Метод кругової розгортки

## 8. Вимірювання частоти електричної напруги

На підприємствах енергетичного профілю частоту найчастіше вимірюють за допомогою частотомірів, використання яких не викликає ніяких труднощів. Більшість частотомірів приєднують безпосередньо до мережі, частоту котрої необхідно виміряти, або до окремого джерела живлення змінного струму, частоту напруги якого слід контролювати. Необхідно лише впевнитись, що номінальна величина напруги мережі чи окремого джерела збігається з номінальною величиною напруги частотоміра, а також у тому, чи довіряти показанням частотоміра зразу ж після вмикання під напругу, чи лише після певного часу його роботи. Цей час може бути необхідний, щоб частини частотоміра, що містяться всередині його корпуса, нагрілися власним теплом, яке виникає в обмотках та осердях частотоміра, до належної температури.

Крім того, ще до встановлення і приєднання частотоміра необхідно впевнитись у відповідності умов у помешканні, де намічено встановити частотомір, тим умовам, які передбачені технічним описом приладу. Більшість частотомірів, що застосовуються на електричних станціях та в енергосистемах, мають обмежену точність (клас їхньої точності 1,5; 1,0; 0,5; 0,2).

Разом з тим ці частотоміри потребують періодичної повірки, перш за все відомчої, яку з дозволу Державних метрологічних органів проводять метрологічні підрозділи підприємств і організацій, де експлуатують прилади. Повірка необхідна також після ремонту приладів.

При таких повірках необхідно забезпечити клас точності зразкового засобу вимірювання у 4,5 разів вищий за клас приладу, що повіряється. Якщо зразкових приладів необхідного класу точності немає, то використовують метод порівняння частот зразкового високоточного вимірювального генератора і джерела напруги змінної частоти, від якого живиться

частотомір, що проходить повірку. Використовують ще і метод вимірювання частоти за допомогою частотомірного мосту.

Безпосереднє вмикання частотоміра на генератор зразкових частот часто буває неможливим через малу потужність таких генераторів.

Досить надійним методом порівняння двох частот є метод биття, реалізація якого можлива згідно зі схемою рис. 9 [5, 7].

Для чіткої роботи схеми необхідно, щоб підсилювачі П1 і П2 були однотипними, а величини напруг на їхніх виходах - однаковими (щоб досягти цього, у схемі є потенціометр П, за допомогою якого на вході до підсилювача П2 можна встановити яку завгодно величину напруги).

Індикаторний прилад І - це прилад для вимірювання постійного струму з нульовою позначкою посередині шкали. Він має бути здатним витримувати величину напруги змінного струму, яка виникає на виході підсилювача П3 при появі на його вході складених напруг, створених підсилювачами П1 і П2.

Порядок повірки частотоміра на подібній вимірювальній схемі може бути таким. Генератором зразкової частоти ЗГ встановлюють значення однієї з частот, вимірюваних частотоміром ЧМ. Генератором ГЧ встановлюють приблизно таку саму частоту (за показаннями частотоміра ЧМ), після чого звертають увагу на показання індикатора І. Якщо величини обох частот мало відрізняються між собою, то між напругами, що є на виходах підсилювачів П1 і П2, виникає биття - тобто почергове складання і віднімання миттєвих значень цих напруг.

Змінюючи величину частоти генератора ГЧ, досягають такого стану, при якому частота биття напруги стане зовсім малою (десь одне коливання за 5...10 с). У цьому разі можна вважати, що частоти напруг генераторів ЗГ і ГЧ зрівнюються.

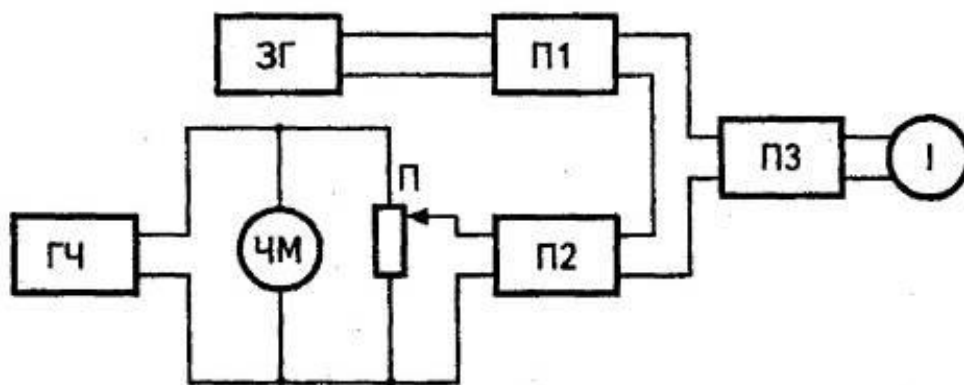


Рис.1. Точне вимірювання частоти методом биття:

ЗГ - генератор зразкової частоти;

ГЧ - генератор змінної частоти живлення приладу;

ЧМ - частотомір, що повіряється;

П1, П2, П3 - підсилювачі;

І - індикатор наявності коливань напруги;

П - потенціометр

Якщо в цей час показання покажчика частотоміра, що проходить перевірку, відрізняється від частоти, генерованої генератором ЗГ, то, віднявши від показу частотоміра ЧМ (у герцах) дійсну частоту, з якою працює генератор ЗГ, можна визначити величину похибки частотоміра.

Метод биття можна застосовувати у виробничих лабораторіях при повірках частотомірів завдяки нескладності потрібного обладнання та достатньо високої точності вимірювань. Застосовуючи зразковий кварцовий генератор з багатоступінчастим подільником частоти, можна отримати зразкову частоту з похибкою близько 0,000001 %.

Використовуючи термостатовані камертонні генератори, можна досягти точності, на порядок чи два меншої. Їх можна використовувати й без подільників частоти.

Іноді для визначення рівності вимірюваної і зразкової частот як нуль-індикатор використовують телефонну трубку. Це зовсім простий метод, який не вимагає додаткової апаратури, треба лише, щоб величини напруг зразкової і контрольованої частот були достатніми (і безпечними) для телефонної трубки. Але користуватись цим методом доцільно тільки при порівнянні підвищених і високих частот, бо людське вухо нездатне сприймати звуки з частотою, нижчою за 12...15 Гц. Наявність такої "мертвої" зони при порівнянні частот порядку 1000...5000 Гц і вище майже не впливає на точність вимірювань, але при порівнянні частот порядку 40...60 Гц вона зовсім недоречна, бо суттєво зменшує точність порівняння.

## 9. Вимірювання відношення двох частот

В універсальних цифрових частотомірах передбачена можливість вимірювання відношення двох частот:  $f_x$  і  $f_y$  [2, 5, 8]. Сигнали вимірюваних частот подаються на формувачі імпульсів (рис.10), які формують імпульси з крутими фронтами для зменшення похибки від дрейфу рівнів спрацювання. Якщо одна з частот набагато більша за іншу ( $f_x \gg f_y$ ), то імпульс тривалістю  $T_y$  з виходу формувача (рис.10, а) відкриває ключ і імпульси тривалістю  $T_x$  надходять на вхід лічильника імпульсів упродовж часу  $T_y$ . Числовий відлік лічильника імпульсів дорівнюватиме:

$$N_x = \frac{T_y}{T_x} = \frac{f_x}{f_y}.$$

Якщо ж частоти  $f_x$  і  $f_y$  близькі за значенням, то імпульси з частотою  $f_y$  після формувача (рис.10, б) подаються на подільник частоти з коефіцієнтом ділення  $n$ . Числовий відлік лічильника імпульсів у такому випадку дорівнюватиме:

$$N_x = \frac{n \cdot T_y}{T_x} = \frac{n \cdot f_x}{f_y}.$$

Відсотковий частотомір. Сигнал частотою  $f_x$  надходить на формувач імпульсів (рис.11), який формує імпульси нормованої амплітуди з крутими фронтами. Сформовані імпульси подаються на подільник частоти з коефіцієнтом ділення  $n_1$ . З вихідного сигналу подільника частоти формується імпульс тривалістю  $T_1 = n_1 T_x = n_1 / f_x$ , Генератор стабільної частоти  $f_0$  і другий подільник частоти з коефіцієнтом ділення  $n_2$  формують другий імпульс тривалістю  $T_2 = n_2 T_0 = n_2 / f_0$ .

Обидва імпульси подаються на ключ, який влаштований так, що він відкритий упродовж часу  $\Delta T = T_2 - T_1$ . За час  $\Delta T$  на вхід лічильника імпульсів через ключ проходять імпульси з періодом  $T_0$ . Покази лічильника в кінці вимірювання становлять:

$$N_x = \frac{\Delta T}{T_0} = \frac{T_2 - T_1}{T_0} = \frac{n_2 T_0 - n_1 T_x}{T_0}.$$

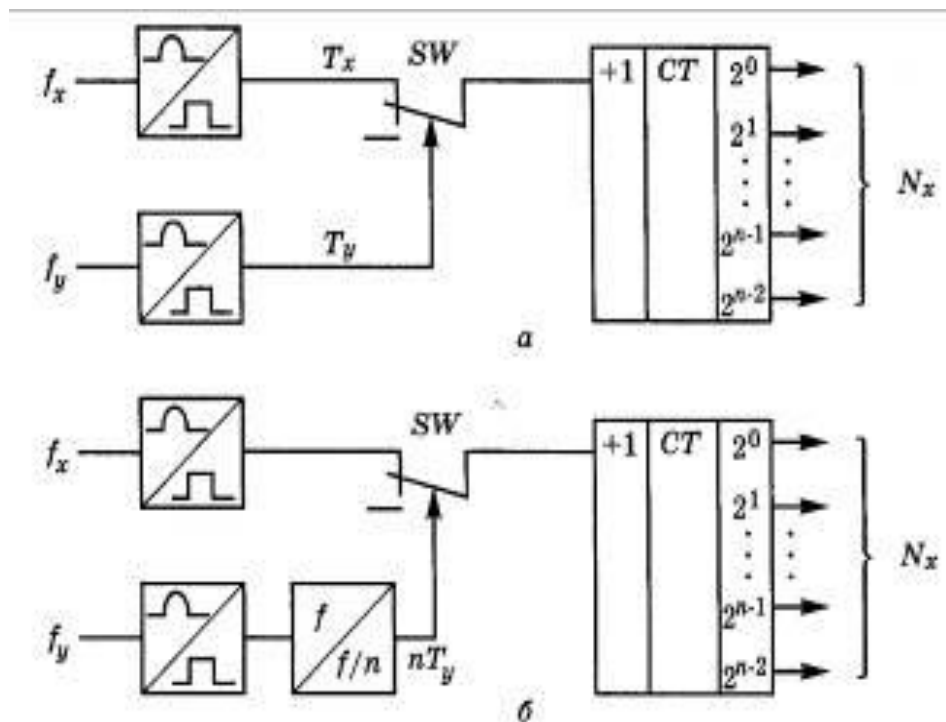


Рис.10. Принцип вимірювання відношення двох частот

Якщо виконати умову

$$n_1 = n_2 \frac{T_0}{T_{xном}} = n_2 T_0 f_{xном},$$

де  $f_{\text{хном}}$  - номінальне значення частоти, то

$$N_x = \frac{n_2 T_0 - n_1 T_x}{T_0} = \frac{n_2 T_0 - n_2 T_0 f_{\text{хном}} T_x}{T_0} =$$

$$= n_2 \left( 1 - \frac{f_{\text{хном}}}{f_x} \right) = n_2 \frac{\Delta f_x}{f_x} \cong n_2 \frac{\Delta f_x}{f_{\text{хном}}}.$$

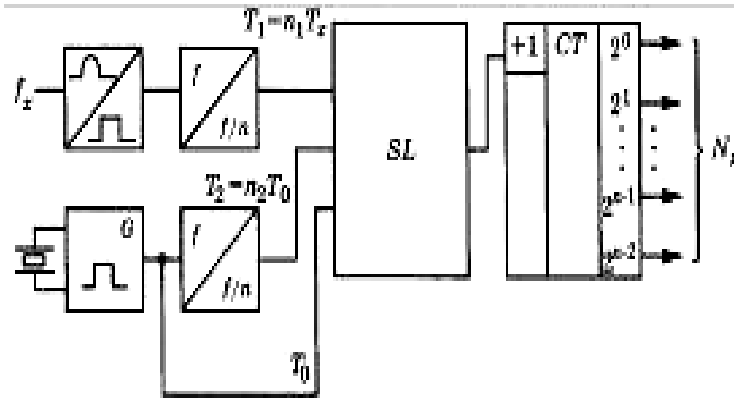


Рис.11. Схема формувача імпульсів

Якщо  $f_x$  близька до  $f_{\text{хном}}$  і  $n_2=100$ , то  $N_x$  виражатиме наближено відхилення частоти від номінального значення у відсотках.

## 9. Похибки вимірювання частоти і інтервалів часу

Вимірювання частоти і інтервалів часу супроводжується такими складовими похибок вимірювання: похибка квантування; похибка, зумовлена нестабільністю частоти генератора квантувальних імпульсів; похибка від нестабільності порогів спрацювання формувачів імпульсів [9].

Похибка квантування. Якщо генератор квантувальних імпульсів синхронізований з початком вимірюваного інтервалу часу (рис.12, а), то похибка квантування  $\Delta t$  виникає в кінці вимірюваного інтервалу як різниця між результатом вимірювання  $N_x T_0$  і вимірюваним інтервалом  $T_x$ :

$$\Delta t = N_x T_0 - T_x.$$

Оскільки вимірювана величина до вимірювання невідома, то кінець інтервалу  $T_x$  може з однаковою ймовірністю припасти на будь-який момент між сусідніми квантувальними імпульсами, тому похибку квантування  $\Delta t$  вважають випадковою і розподіленою за рівномірним несиметричним законом з граничним значенням  $T_0$  (рис.12, б). Математичне сподівання похибки квантування дорівнює  $T_0/2$ , а середнє квадратичне відхилення  $\sigma = T_0/\sqrt{12}$ . Синхронізувати генератор квантувальних імпульсів з початком вимірюваного інтервалу  $T_x$  часто не вдається, тому похибка квантування



виникає на початку  $\Delta t_1$  і в кінці  $\Delta t_2$  вимірюваного інтервалу часу  $T_x$  (рис.13). Похибки  $\Delta t_1$  і  $\Delta t_2$  розподілені за рівномірними несиметричними законами з граничним значенням  $T_0$ . Сумарна похибка квантування  $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$  розподілена за трикутним законом (законом Сімпсона) з граничним значенням  $T_0$ . Математичне сподівання сумарної похибки квантування дорівнює нулю, а середнє квадратичне відхилення  $\sigma = T_0/\sqrt{6}$ .

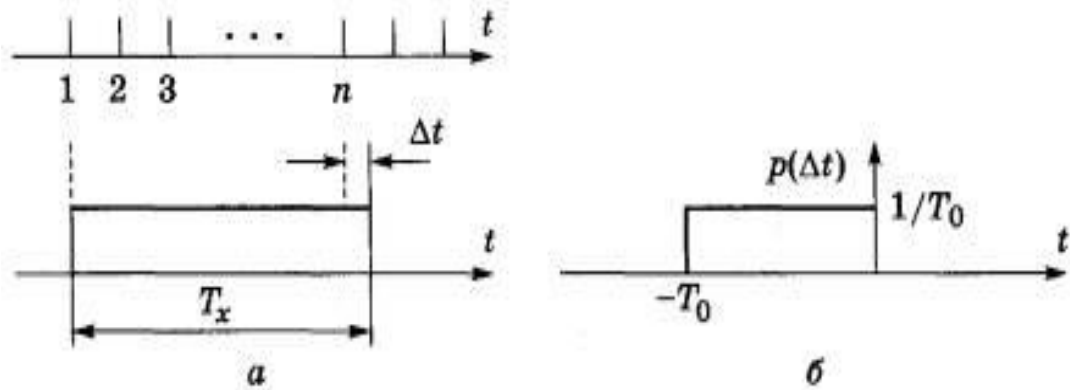


Рис.12. Схема, яка пояснює виникнення похибки квантування

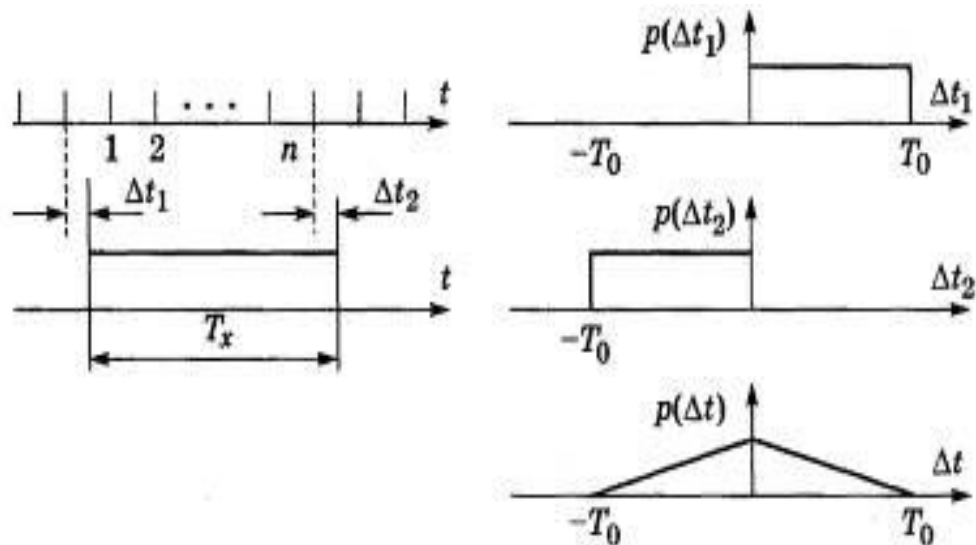


Рис.13. Схема, яка пояснює сутність похибки квантування

Відносна гранична похибка квантування під час вимірювання частоти за визначений інтервал часу  $T_N$  дорівнює:

$$\delta = \frac{T_x}{T_N} = \frac{T_x}{N \cdot T_0} = \frac{T_x}{N \cdot T_0 \cdot f_x}.$$

Отже, відносна гранична похибка квантування збільшується із зменшенням частоти. Для розширення частотного діапазону частотомірів у зону нижніх частот вдаються до таких заходів:

- на нижніх частотах похибку квантування можна зменшити, збільшуючи добуток  $N \cdot T_0$ , але це веде до збільшення тривалості вимірювання, тобто до зменшення швидкодії;
  - застосувати множення вимірюваної частоти, в результаті чого вимірювана частота переноситься у зону високих частот;
  - перетворити  $T_x \rightarrow U_x$ , а далі відбувається визначення числового значення  $1/U_x$ ;
  - виміряти відносне відхилення вимірюваної частоти за допомогою цифрового відсоткового частотоміра;
  - застосувати спеціальні пристрої для вимірювання похибок дискретності  $\Delta t_1$  і  $\Delta t_2$ ;
  - вимірювати період  $T_x$  з наступним перерахунком періоду в частоту  $f_x$ .
- Відносна гранична похибка квантування у вимірюванні періоду дорівнює:

$$\delta = \frac{T_0}{T_x} = \frac{f_x}{f_0} = \frac{1}{N_x}.$$

Таким чином, відносна гранична похибка квантування збільшується зі збільшенням вимірюваної частоти  $f_x$  і зменшується зі збільшенням частоти квантувальних імпульсів  $f_0$ .

Верхнє граничне значення частотного діапазону, якщо задано допустиме граничне значення похибки квантування, визначається швидкодією лічильника імпульсів, тобто максимальною частотою імпульсів  $f_0$ , яку лічильник здатен підраховувати

$$f_{\max} = \sigma \cdot f_0.$$

Похибка, зумовлена нестабільністю частоти генератора квантувальних імпульсів, виявляється, в основному, як повільний відхід частоти внаслідок старіння кварцового резонатора.

Похибка від нестабільності порогів спрацювання формувачів імпульсів зумовлена двома чинниками: зміщеннями рівнів формування в каналах і шумовими напругами, що діють на вхід формувача.

Похибка, зумовлена дрейфом порога спрацювання,

$$\Delta t = \frac{\Delta u}{v_x},$$

де  $\Delta u$  - дрейф порога спрацювання формувача імпульсів;  $v_x$  - швидкість зміни вимірюваного сигналу. Якщо сигнал синусоїдний з амплітудою  $U_m$  і

часто тою  $f_x$ , то максимальна швидкість зміни сигналу  $v_x = 2\pi f_x U_m$ , Якщо дрейф  $\Delta u$  виразити через швидкість дрейфу  $v_d$  і період  $T_x$ , тобто  $\Delta u = v_d \cdot T_x$ , то вираз можна записати у такому вигляді:

$$\Delta t = \frac{\Delta u}{v_x} = \frac{v_d T_x}{2\pi f_x U_m} = \frac{v_d T_x^2}{2\pi U_m}.$$

Відносна похибка

$$\delta = \frac{\Delta t}{T_x} = \frac{v_d T_x}{2\pi U_m}.$$

Похибка, зумовлена впливом шуму із середнім квадратичним відхиленням  $\sigma_N$  на вхід формувача імпульсів,

$$\Delta t_N = \frac{\sigma_N \sqrt{2}}{V_x} = \frac{\sigma_N \sqrt{2}}{2\pi f_x U_m} = \frac{1}{\sqrt{2\pi f_x (U_m / \sigma_N)}} = \frac{T_x}{\sqrt{2\pi (U_m / \sigma_N)}}.$$

Відносна похибка:

$$\delta t_N = \frac{\Delta t_N}{T_x} = \frac{1}{\sqrt{2\pi (U_m / \sigma_N)}}.$$

Отже, відносна похибка, зумовлена впливом шуму, не залежить від вимірюваної частоти, а визначається відношенням сигнал/шум.

### Висновки

Проведено огляд основних методів вимірювання частоти. Представлені схеми вимірювачів частоти та розглянуто їх принцип дії. Наведено переваги і недоліки методів вимірювання частоти, проаналізовано причини їх погрешностей.

### Література

1. *Поліщук Є.С.* Метрологія та вимірювальна техніка / *Є.С. Поліщук.* – Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2003. - 544с.
2. *Мирский Г.Я.* Радиоэлектронные измерения / *Г.Я. Мирский.* - М.: Энергия, 1975.- 600с.
3. *Шаповаленко О.Г.* Основи електричних вимірювань / *О.Г. Шаповаленко, В.М. Бондар.* - К.: Либідь, 2002. - 412с.
4. *Мейзда Ф.* Электронные измерительные приборы и методы измерений / *Ф. Мейзда.* - М: Мир, 1990.- 535с.

5. Кушнир Ф.В. Электрорадиоизмерения / Ф.В. Кушнир, В.Г. Савенко. - Л.: Энергия, 1975. - 368с.
6. Головка Д.Б. Основы метрології та вимірювань / Д.Б. Головка, К.Г.Рего, Ю.О. Скрипник. – К.: Либідь, 2001.-408с.
7. Электрические измерения/ Р.М. Демидов-Панферов, В.Н. Малиновский, В.С. Попов и др. – М.: Энергоиздат, 1983. - 392с.
8. Электрические измерения / Под ред. Е.Г. Шрамкова.- М.: Высшая школа, 1972.- 520с.
9. Рего К. Г. Метрологическая обработка результатов технических измерений: Справочное пособие / К. Г. Рего. – К.: Техника, 1987.

### Анотація

#### АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ

Проведено аналіз методів вимірювання частоти. Представлені схеми пристроїв вимірювання частоти, які характеризують різні методи вимірювання, розглянуто принцип дії вимірювачів частоти, наведені їх переваги та недоліки. Визначені фактори, які зумовлюють похибки вимірювання частоти.

### Annotation

#### ANALYSIS OF METHODS OF FREQUENCY MEASUREMENT

The analysis methods of frequency measurement. Are diagrams of devices of measurement of frequency, which characterize the different measurement methods, discussed the principle of the measure of the frequency, given their advantages and disadvantages. The factors which determine the error of measurement of frequency.

#### ANALYSIS OF METHODS OF FREQUENCY MEASUREMENT

Associate professor of department of informatively - calculable technologies of electronics and engineering, candidate of engineerings sciences Litvinenko Victor Nikolaevich

Kherson national technical university Berislavskoe of highway, 24, tel. 32-69-44, [viktor719160@mail.ru](mailto:viktor719160@mail.ru).

Associate professor of department of exploitation of ship electrical equipment and facilities of automation, candidate of engineerings sciences Doschenko Galina Gennadievna

Kherson state marine academy, boulevard of Ushakova, 20, tel. 26-22-59, [herson@yandex.ru](mailto:herson@yandex.ru).

Leading engineer of laboratory <sup>1</sup>23 Samoilov Nikolai Alexander

Institute of physics of semiconductors of National academy of sciences of Ukraine (Kherson branch), a street is Factory, 76, tel. 51-54-57, [nas-50@mail.ru](mailto:nas-50@mail.ru).

**Ключові слова:** частота, конденсатор, частотомір, імпульс, лічильник.

**Key words:** frequency, capacitor, frequency meter, pulse, counter.

