

Лекція 12

ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ

Розвиток багатьох напрямків науки і техніки визначається точністю вимірювання часових інтервалів і частоти. Одиниця вимірювання часу (секунда) і одиниця вимірювання частоти (герц) сьогодні відтворюються з відносною похибкою, яка не перевищує $\pm 10^{-13}$.

У практиці електрорадіовимірювань в більшості випадків вимірюють частоту змінної напруги, рідше вимірюють період, а в діапазоні НВЧ вимірюють довжину хвилі.

Спектр частот електромагнітних коливань, які використовуються в радіотехніці, сягає від часток герц до десятків гігагерц. Цей спектр спочатку розділяють на два діапазони – низьких і високих частот. До низьких частот відносять інфразвукові (нижче 20 Гц), звукові (20...20 000 Гц) і ультразвукові (20...200 кГц). Високочастотний діапазон, в свою чергу, розділяють на високі (20 кГц...30 МГц), ультрависокі (30...300 МГц) і надвисокі (вище 300 МГц) частоти. Верхня границя надвисоких частот безперервно підвищується і сьогодні досягає 80 ГГц (без урахування оптичного діапазону).

Вимірювання частоти виконується з найбільшою точністю порівняно з іншими видами радіовимірювань, тому багато фізичних величин, які підлягають вимірюванню, спочатку перетворюються в часовий інтервал або частоту.

Залежно від ділянки спектра і потрібної точності застосовують різні методи вимірювання частоти: метод безпосередньої оцінки, метод заряджання і розряджання конденсатора, осцилографічний метод, генераторний та резонансний методи.

12.1 Метод безпосередньої оцінки

Метод реалізується за допомогою аналогових частотомірів і використовується для вимірювань в досить вузькому діапазоні частот.

Електродинамічні частотоміри є недорогими ЗВТ і використовуються при вимірюваннях з обмеженими вимогами до точності.

Частотомір створюється на базі електродинамічного логометра. Його електрична схема наведена на рис. 12.1, а. Нерухома котушка A_3 логометра з'єднується послідовно з однією з рухомих котушок A_2 . В коло цих котушок включається частотно-залежний ланцюг $L_2C_2R_2$. Значення індуктивності L_2 і ємності C_2 вибирають такими, щоб при центральній частоті робочого діапазону (наприклад, 50 Гц) в колі котушок A_2 і A_3 спостерігався резонанс напруг, а отже, струм I_2 збігався б за фазою з напругою U . Послідовно з другою рухомою котушкою A_1 включається конденсатор C_1 , ємність якого така, що струм I_1 цієї котушки випереджає напругу U на 90° (рис. 12.1, б). Крім того, повні опори кіл вибирають такими, щоб сили струмів I_1 і I_2 були рівними за модулем. Оскільки при резонансній частоті струми I_1 і I_2 зсунуті один відносно одного на 90° , то обертальний момент M_1 , який діє на рухомих котушку A_1 , дорівнює нулю.

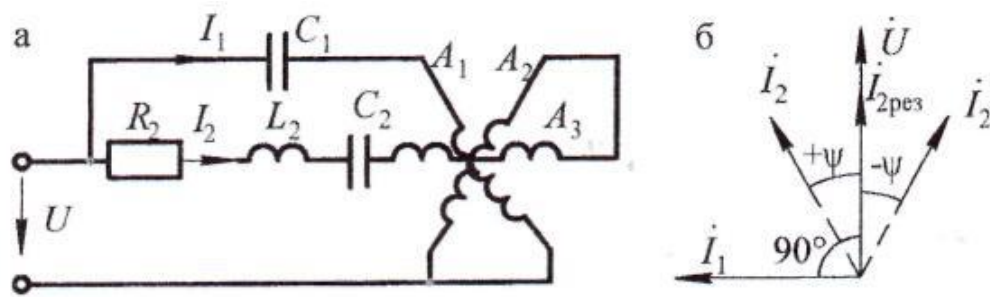


Рисунок 12.1 – Схема електродинамічного частотоміра

Під дією обертального моменту M_2 рухома котушка A_2 переміщується до тих пір, поки не займе положення, в якому її площина буде збігатися з площиною нерухомої котушки A_3 , а момент M_2 буде дорівнювати нулю. Це положення рухомих котушок приймається за початкове, а покажчик частотоміра розташовують над середньою позначкою шкали (наприклад, над позначкою «50 Гц»). При відхиленні вимірюваної частоти від резонансної кут між векторами сил струмів I_1 і I_2 стає більшим або меншим 90° , а момент M_1 не буде дорівнювати нулю. Під дією цього моменту рухомі котушки будуть переміщуватися, доки обертальні моменти M_1 і M_2 не стануть однаковими і протилежно направленними. При цьому напрямок переміщення рухомих котушок визначається знаком відхилення значення вимірюваної частоти відносно резонансної (рис. 12.1, б).

Електродинамічні частотоміри випускають з такими діапазонами вимірювання: 45...55 Гц; 350...450 Гц; 450...550 Гц; 900...1100 Гц; 1350...1650 Гц. Частотоміри типів Д126, Д126/1 мають клас точності 0,5, а частотоміри типів Д146, Д1506, Д1606 – клас точності 2,5.

Вібраційні частотоміри застосовуються для вимірювання промислової частоти при помірних вимогах до точності (межа допустимої похибки вимірювання на рівні $\pm 1\%$). Дія цих частотомірів заснована на використанні явища механічного резонансу коливань сталевих пластинок у змінному магнітному полі, яке змінюється з частотою, що підлягає вимірюванню.

На рис. 12.2 показана схема будови вібраційного частотоміра. Подовжений електромагніт 1 закріплюється на феромагнітній основі 5. По обидві сторони електромагніту установлені тонкі сталеві пластинки 2 із загнутими під прямим кутом вільними кінцями. Інші кінці пластинок прикріплені до профілю 3 з кутовою формою перерізу. Обмотка електромагніту (котушка 6) живиться від джерела напруги вимірюваної частоти.

Виникаюче магнітне поле котушки 6 замикається по сталевим пластинкам і намагнічує їх. Внаслідок цього усі пластинки двічі за період притягуються до сердечника електромагніту, здійснюючи коливання. Проте амплітуди коливань пластинок неоднакові. Кожна з пластинок має власну резонансну частоту, підгонка якої здійснюється напаяванням невеликої кількості олова під загнутий кінець 4. Найбільша амплітуда коливань буде у тієї пластинки, резонансна частота якої в два рази більше вимірюваної частоти. Візуально явище резонансу тієї чи іншої пластинки спостерігається у вигляді «розмивання» контурів її

загнутого кінця 4. На шкалі частотоміра напроти загнутих кінців 4 кожної з пластинок наносять позначки, які відповідають резонансним частотам.

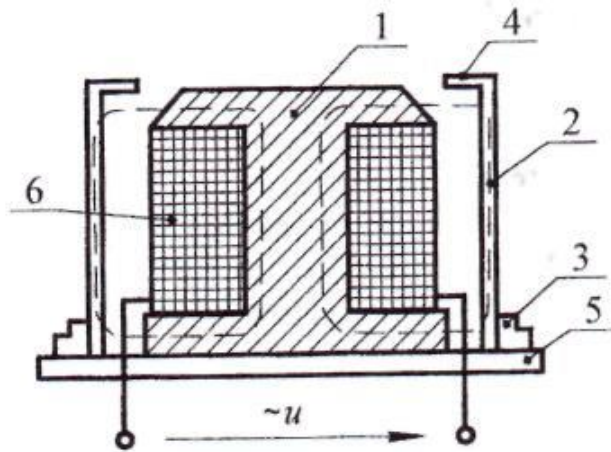


Рисунок 12.2 – Схема будови вібраційного частотоміра: 1 – електромагніт; 2 – сталеві пластинки; 3 – профіль; 4 – загнутий кінець пластинки; 5 – феромагнітна основа; 6 – обмотка електромагніту

В експлуатації перебувають частотоміри типів В81 з діапазоном вимірювання 45...55 Гц і В80 з діапазоном вимірювання 48...52 Гц. Клас точності частотомірів – 1,0. Прилади є віброміцними і можуть використовуватися в рухомих установках.

12.2 Метод зарядження і розрядження конденсатора

Частотомір, побудований за цим методом, називають конденсаторним і застосовують на частотах від 10 Гц до 1 МГц. Верхня границя діапазону вимірювання обмежена тривалістю перехідних процесів, а нижня – частотою сигналу, при якій виникають механічні коливання покажчика електромеханічного мікроамперметра.

Принцип дії частотоміра оснований на використанні перетворювача «частота-струм». Спрощена схема частотоміра показана на рис. 12.3, а. До складу частотоміра входять емітерний повторювач, підсилювач-обмежувач, перетворювач «частота-струм», магнітоелектричний мікроамперметр та калібратор.

Напруга, частоту якої треба виміряти, підсилюється і після обмеження зверху і знизу приймає форму меандру. Вихідна напруга підсилювача-обмежувача керує ключовою схемою, зібраною на транзисторі. Під дією позитивної півхвилі досліджуваної напруги транзистор закривається і конденсатор C через діод VD_2 і мікроамперметр заряджається від джерела напруги постійного струму U . Сила струму заряду конденсатора описується рівнянням

$$i_3 = \frac{U}{R + R_0} e^{-\frac{t}{(R+R_0)C}},$$

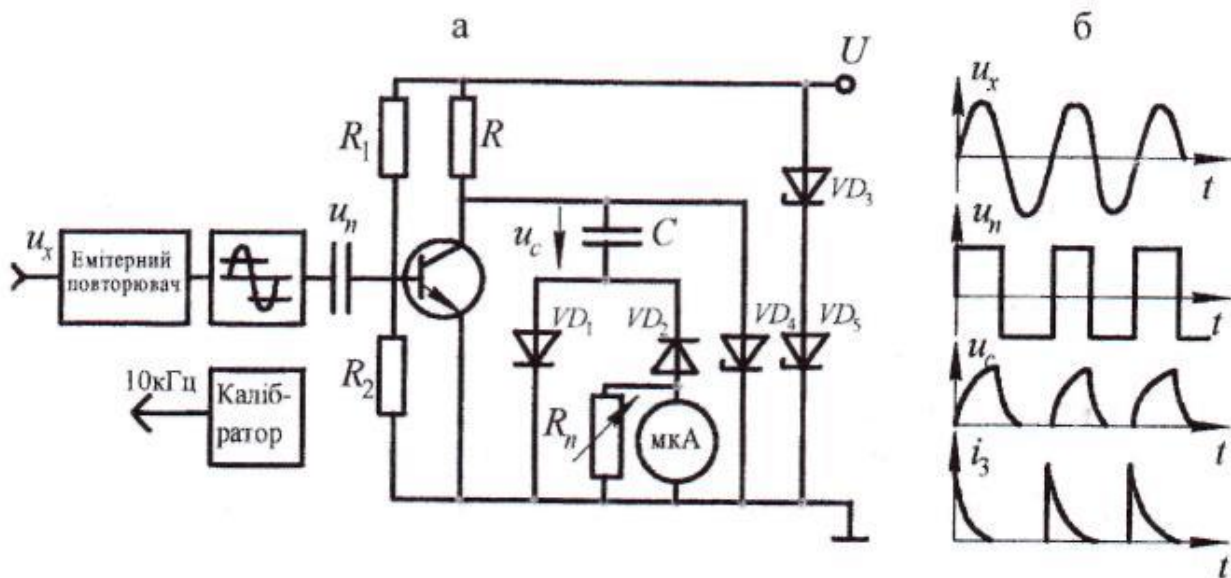


Рисунок 12.3 – Схема конденсаторного частотоміра

де R і R_0 – опори резистора в колі заряду конденсатора і мікроамперметра відповідно.

Мікроамперметр вимірює середнє значення сили струму заряджання за період

$$I_{\text{сеп}} = \frac{1}{T_x} \int_0^{T_x} i_3 dt = \frac{UC}{T_x} \left(1 - e^{-\frac{T_x}{(R+R_0)C}} \right)$$

Сталу часу кола заряджання $(R + R_0)C$ вибирають такою, щоб вона була значно менше періоду T_x вимірюваної напруги $(R + R_0)C \ll T_x$. Тому другою складовою в дужках можна знехтувати порівняно з одиницею. І тоді середнє значення струму заряджання

$$I_{\text{сеп}} = \frac{UC}{T_x} = UCf_x$$

при незмінних значеннях U і C є пропорційним вимірюваній частоті.

Під дією негативної півхвилі вимірюваної напруги транзистор відкривається і конденсатор C через діод VD_1 і транзистор, що відкрився, швидко розряджається. Потім процес періодично повторюється.

Оскільки точність вимірювання частотоміром залежить від стабільності напруги U джерела, її стабілізують за допомогою стабілітронів $VD_3 \dots VD_5$. Перед вимірюванням виконується калібрування шкали частотоміра. Для цього на вхід приладу подають напругу, частота якої відома (наприклад, 10 кГц), і зміною опору підстроювального резистора R_n показчик приладу установлюють на потрібну позначку шкали.

Межа допустимої похибки вимірювання частоти становить $\pm 2\%$.

12.3 Метод порівняння

Метод порівняння при вимірюванні частоти набув широкого розповсюдження завдяки його простоті, придатності для використання практично в будь-якому діапазоні частот і порівняно високій точності результатів вимірювання. Вимірювана частота визначається за її рівністю або кратністю зразковій частоті. Джерелом зразкової частоти є стандарти частоти або сигнали еталонної частоти, що передаються по радіо. Відносна похибка відтворення частоти такими джерелами становить $\pm (10^{-10} \dots 10^{-9})$. При менш жорстких вимогах до точності вимірювання джерелами зразкових частот можуть служити синтезатори з кварцовою стабілізацією частоти, відносна похибка відтворення частоти якими не перевищує $\pm (10^{-7} \dots 10^{-6})$. В окремих випадках (зокрема, на високих та надвисоких частотах) як джерела зразкових частот можуть застосовуватися звичайні генератори сигналів з порівняно невеликою відносною похибкою встановлення частоти або із задалегідь відградуваною шкалою встановлення частоти.

Індикатором рівності або кратності частот може бути електронний осцилограф або нелінійний перетворювач частоти, відповідно з цим метод порівняння при вимірюванні частоти реалізують двома способами: осцилографічним і гетеродинним.

12.3.1 Осцилографічний спосіб

Осцилографічний спосіб може застосовуватися для будь-яких частот в межах смуги пропускання електронно-променевої трубки. При цьому може використовуватися синусоїдна або кругова розгортка.

Якщо використовується синусоїдна розгортка, то напруга зразкової частоти подається на один вхід осцилографа (наприклад, вхід Y), а напруга вимірюваної частоти – на інший вхід (наприклад, вхід X). Частоту зразкового генератора підстроюють до одержання на екрані осцилографа стійкого зображення фігури Ліссажу. Фігура буде нерухомою, якщо невідома частота дорівнює зразковій, або якщо частоти, що порівнюються, відносяться як цілі числа. При порушенні цієї умови фігура буде обертатися, і тим швидше, чим більшою є ця нерівність. Через рівні проміжки часу (період) форма фігури повторюється.

Якщо на екрані осцилографа одержана нерухома складна фігура, то її перетинають (у думках) вертикальною та горизонтальною лініями (рис. 12.4). Відношення кількості n_T перетинів фігури горизонтальною лінією до кількості n_B перетинів фігури вертикальною лінією дорівнює відношенню частоти напруги, яка подана на вхід Y , до частоти напруги, що подана на вхід X осцилографа

$$\frac{n_T}{n_B} = \frac{f_Y}{f_X}.$$

Якщо зразковою частотою є частота напруги f_Y , що подана на вхід Y , то вимірювана частота f_X визначається виразом

$$f_{\text{вим}} = f_X = f_Y n_B / n_T.$$

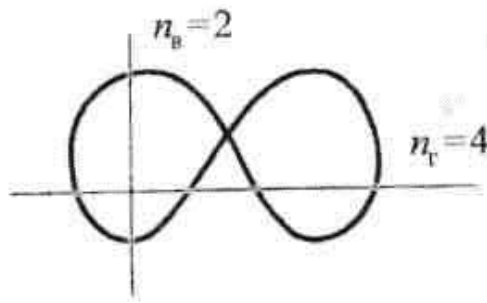


Рисунок 12.4 – Перетин фігури Ліссажу вертикальною та горизонтальною лініями

Синусоїдна розгортка застосовується при кратності частот не більше 10, бо при більшій кількості перетинів їх важко рахувати.

При кратності 8...10 і більше використовують кругову розгортку. Напругу зразкової частоти подають на входи Y і X осцилографа через фазорозщеплююче коло RC (рис. 12.5) у вигляді двох напруг однієї частоти, зсунутих за фазою на 90° . Підсилення обох каналів регулюють так, щоб на екрані осцилографа виникла лінія розгортки у вигляді кола. Напругу вимірюваної частоти підключають до входу каналу керування яскравістю променя (вхід Z). Частоту зразкового джерела перестроюють до одержання на екрані нерухомого зображення, яке складається з яскравих відрізків кола з однаковими темними проміжками між ними. Кількість N яскравих дуг або темних проміжків між дугами визначають відношенням

$$N = f_{\text{вим}} / f_{\text{зр}},$$

де $f_{\text{вим}}$ і $f_{\text{зр}}$ – вимірювана і зразкова частоти відповідно.

В тих випадках, коли $f_{\text{вим}} < f_{\text{зр}}$, напругу невідомої частоти подають через фазорозщеплююче коло в канали Y і X осцилографа, а канал Z з'єднують з виходом джерела зразкової частоти. Невідому частоту визначають як

$$f_{\text{вим}} = f_{\text{зр}} / N.$$

Використовуючи кругову розгортку, можна порівнювати частоти кратністю до 50, а при фотографуванні осцилограми – і до декількох сотень.

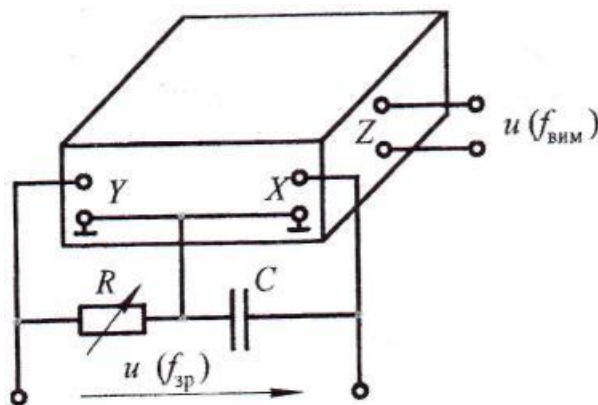


Рисунок 12.5 – Схема вимірювання частоти за допомогою кругової розгортки

12.3.2 Приймачі-компаратори частот

Державні служби часу і частоти деяких країн передають через свої радіо- та телевізійні станції сигнали точного часу і сигнали зразкових частот: 66,(6); 100; 200; 2500; 5000; 10000 і 15000 кГц. Приймачі сигналів точного часу і приймачі-компаратори забезпечують прийом сигналів зразкових частот і сигналів точного часу. За їх допомогою можна вимірювати (порівнювати зі зразковою) частоти різних джерел, в тому числі робочих еталонів частоти, стандартів і синтезаторів частоти тощо, за інтервал часу від десятків мікросекунд до декількох років, а також визначити розбіжність сигналів точного часу.

Прийом сигналів зразкової частоти виконується спеціальними приймачами-компараторами 47-7, 47-10, 47-39, ПК-66 та іншими. Нижче розглядається схема приймача-компаратора ПК-66.

Антенa (рис. 12.6) виконана у вигляді рамки, площа якої устанoвлюється в напрямку на передавальну радіостанцію. Антенa настроєна в резонанс на частоту 66,(6) кГц. Добротність антени дорівнює 55 ± 5 . Рамка має 60 витків. Для узгодження симетричної рамки з асиметричним входом приладу антенa навантажена на антенний трансформатор.

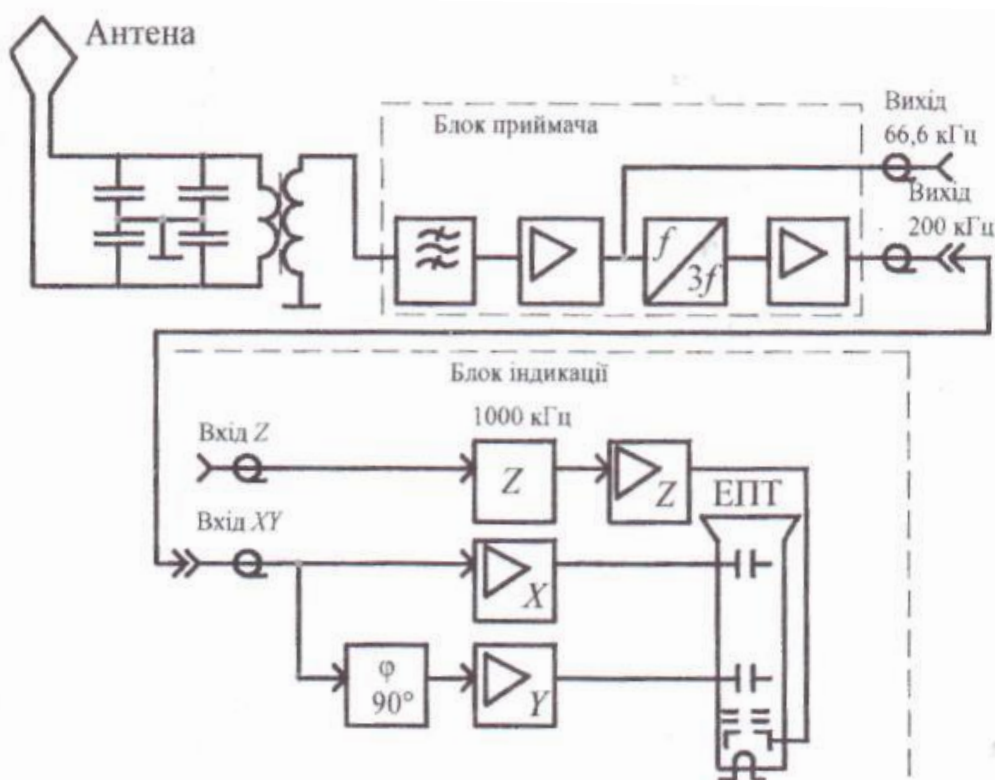


Рисунок 12.6 – Схема приймача-компаратора

Сигнал, прийнятий антеною, спочатку потрапляє на фільтр, а потім – на підсилювач. Фільтр і підсилювач настроюють на частоту 66,(6) кГц. Вони забезпечують високу вибірковість і підсилення сигналу зразкової частоти. З

виходу підсилювача зразкова частота потрапляє одночасно на вихід 66,(6) кГц та на вхід помножувача частоти, коефіцієнт множення якого дорівнює 3. В цьому блоці рівень прийнятого сигналу 66,(6) кГц обмежується зверху і знизу, а потім за допомогою фільтра виділяється гармоніка частотою 200 кГц. З підсилювача сигнал потрапляє на вихід 200 кГц.

Сигнал зразкової частоти з виходу 200 кГц блока приймача подається на вхід ХУ блока індикації, який складається із електронно-променевої трубки, підсилювачів каналів горизонтального і вертикального відхилення променя і фазозсувача ϕ . За допомогою останнього забезпечується отримання кругової розгортки променя на екрані електронно-променевої трубки.

Сигнал вимірюваної частоти подається на вхід Z блока індикації. Цей сигнал через формувач Z, який являє собою широкосмуговий підсилювач, і підсилювач Z потрапляє на керуючий електрод електронно-променевої трубки для модуляції променя за яскравістю. Якщо вимірювана частота в K разів більше зразкової частоти 200 кГц, то на екрані спостерігається K позначок. Якщо частоти неоднакові, спостерігається безперервний рух цих позначок. Швидкість переміщення позначок пропорційна частоті, яка дорівнює різниці зразкової і вимірюваної частот.

Слід відзначити, що з юридичної точки зору необхідною умовою користування еталонними сигналами частоти і часу є здійснення контролю за такими сигналами з боку Державної служби частоти і часу. На цей час з території України сигнали, які можуть прийматися розглянутими приймачами-компараторами та підлягають контролю з боку Державної служби частоти і часу, не транслюються.

12.3.3 Гетеродинний спосіб

Гетеродинний спосіб полягає в порівнянні частоти досліджуваної напруги з частотою напруги генератора сигналів (гетеродина), шкала встановлення частоти якого заздалегідь відградуєвана. Прилади, які реалізують цей спосіб, називають гетеродинними частотомірами. Їх застосовують в діапазонах високих і надвисоких частот, хоча сьогодні такі частотоміри як самостійні прилади не випускаються. В основному гетеродинний спосіб знаходить застосування в гетеродинних перетворювачах частоти, які служать для розширення діапазону вимірюваних частот, зокрема, в цифрових частотомірах.

Структурна схема гетеродинного частотоміра наведена на рис. 12.7. На змішувач надходять одночасно напруга вимірюваної частоти f_x і гетеродина f_T . На виході змішувача як нелінійного елемента під дією вимірюваної і зразкової частот виникають коливання комбінованих частот $\pm mf_x \pm nf_T$, де m і n – цілі числа. За допомогою фільтра нижніх частот виділяють гармоніку, частота якої дорівнює різниці частот вхідних сигналів $f_x - f_T$. Ця гармоніка підсилюється підсилювачем низької частоти ПНЧ і подається на індикатор нульового биття. Змінюючи частоту гетеродина, досягають рівності $f_x = f_T$. Рівність цих частот фіксують за індикатором нульового биття (магнітоелектричним міліамперметром, осцилографом або головними телефонами).

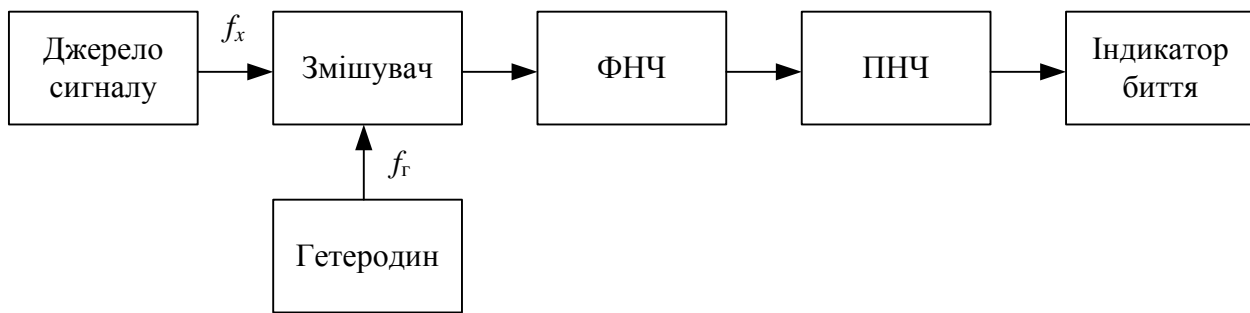


Рисунок 12.7 – Структурна схема гетеродинного частотоміра

Якщо за індикатор нульового биття використовують магнітоелектричний міліамперметр, то при частоті биття, яка менше 10 Гц, показчик міліамперметра починає коливатися. При зближенні частот f_x і $f_Г$ частота коливань зменшується, а при $f_x = f_Г$ коливання припиняються.

При застосуванні осцилографа напруга биття подається на вхід каналу вертикального відхилення. При рівності частот $f_x = f_Г$ промінь на екрані трубки описує пряму лінію.

Якщо за індикатор нульового биття використовують головні телефони, то про зближення частот f_x і $f_Г$ судять за зниженням звукового тону. Однак, оскільки людське вухо не реагує на частоти, менші 20 Гц, для фіксації рівності $f_x = f_Г$ застосовують виделковий відлік.

Оскільки на виході змішувача є гармоніки, частоти яких кратні частотам f_x і $f_Г$, тобто частоти mf_x і $nf_Г$, то нульове биття може виникнути між різними гармоніками напруги, наприклад між основною гармонікою гетеродина і m -ю гармонікою досліджуваного сигналу або між основною гармонікою досліджуваного сигналу і n -ю гармонікою напруги гетеродина. Оскільки номери n і m гармонік невідомі, то і результат вимірювання стає невизначеним. Для усунення невизначеності необхідно або знати приблизне значення вимірюваної частоти, або провести два вимірювання.

У першому випадку, знаючи приблизне значення f_x , установлюють близьке до нього значення першої гармоніки напруги гетеродина і досягають нульового биття.

У другому випадку дійсне значення частоти обчислюють за результатами двох вимірювань. Для цього після того, як одержане нульове биття, знімають показання за шкалою встановлення частоти гетеродина $f_{Г1}$, потім збільшують частоту напруги гетеродина до одержання наступного нульового биття і знов знімають показання за шкалою встановлення частоти гетеродина $f_{Г2}$. Перше биття одержане при складанні напруги вимірюваної частоти f_x і n -ї гармоніки частоти гетеродина, друге – при складанні напруги частоти f_x і $(n - 1)$ -ї гармоніки частоти гетеродина. Отже, має місце рівність

$$f_x - nf_{Г1} = f_x - (n - 1)f_{Г2},$$

звідки

$$n = \frac{f_{r2}}{f_{r2} - f_{r1}},$$

а шукана частота

$$f_x = nf_{r1} = (n-1)f_{r2}.$$

Похибка вимірювання гетеродинним частотоміром складається з похибки порівняння, похибки гетеродина (похибка відтворення частоти та її короткочасна нестабільність) і похибки індикатора нульового биття. Похибка порівняння визначається смугою пропускання каналу індикатора. Абсолютну похибку порівняння практично не вдається зробити меншою 10 Гц. Для зменшення похибки гетеродина його шкалу перед вимірюваннями калібрують (градуюють), наприклад, за гармоніками кварцового генератора або за допомогою частотоміра електронно-лічильного.