

Лекція 11

АНАЛІЗАТОРИ СПЕКТРА

В техніці зв'язку, радіо- та телевізійного мовлення широко застосовуються електричні сигнали складної форми, які є носіями інформації. При експлуатації такої техніки виникає потреба у встановленні смуги частот, яку займає досліджуваний сигнал, відносного розподілу енергії між складовими спектра тощо. Вирішення таких задач зводиться до визначення амплітуд, частот, а інколи – і початкових фаз окремих гармонічних складових сигналу. У більшості випадків функція, що описує досліджуваний сигнал, є невідомою або настільки складною, що аналітичне вирішення задач є неможливим, тому найчастіше удаються до апаратного спектрального аналізу, який реалізується аналізаторами спектра.

Для передачі інформації на велику відстань використовують системи провідникового зв'язку та радіозв'язку. Необхідність одночасної передачі великих потоків інформації потребує ущільнення даних в лініях зв'язку, підвищення їх багатоканальності. В цих умовах величезного значення набуває боротьба з паразитними випромінюваннями різних радіотехнічних засобів, індустриальними завадами, а також взаємними радіозавадами у лініях зв'язку. Для того, щоб встановити джерело завад та їх характер, часто необхідне проведення спектрального аналізу, який дозволяє з потрібною точністю визначити частоти і амплітуди паразитних випромінювань, а за цими результатами – і випромінювач та рівень створених завад.

В основі спектрального аналізу лежить розкладання в ряд Фур'є періодичного сигналу, який описується функцією $f(t)$, що відповідає умовам Діріхле

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_{mk} \sin(k\omega t + \psi_k),$$

де A_0 – постійна складова; A_{mk} – амплітуда k -ї гармоніки; k – номер гармоніки; $k\omega$ і ψ_k – частота і початкова фаза k -ї гармоніки.

Сукупність значень A_{mk} називають спектром амплітуд. Спектр періодичного сигналу – лінійчатий, а неперіодичного – безперервний (суцільний).

ЗВТ, що призначені для дослідження спектрів сигналів, називаються аналізаторами спектра. Відомі декілька принципів побудови аналогових аналізаторів спектра, які ґрунтуються на різних методах спектрального аналізу. Найбільш широко застосовуються методи фільтрації та дисперсійний.

Відомі два основних способи аналізу методом фільтрації: одночасний (паралельний) і послідовний. Відповідно відрізняють аналізатори паралельної дії та аналізатори послідовної дії. Переважне розповсюдження одержали аналізатори послідовної дії. При дослідженні коротких імпульсних сигналів та сигналів високої частоти застосовують аналізатори реального часу з дисперсійними лініями затримки.

Аналізатори спектра дозволяють визначити відносні значення амплітуд гармонік A_{mk} і смугу частот, яку займає спектр. Вони використовуються в діапазонах низьких, високих і надвисоких частот.

11.1 Аналізатори спектра паралельної дії

Сутність паралельного частотного аналізу полягає в тому, що всі частотні складові сигналу в певній смузі огляду виділяються одночасно. Паралельний частотний аналіз здійснюється за допомогою великої кількості фільтрів зі зсунутими резонансними частотами.

Структурна схема аналізатора спектра показана на рис. 11.1. Вхідним пристроєм є атенюатор A та широкосмуговий підсилювач ШП. В ШП відбувається підсилення складових спектра до рівня, необхідного для нормальної роботи наступних елементів аналізатора. У змішувачі $Зм$ спектр перетворюється в складові більш низьких (зазвичай проміжних) частот. При цьому частотні інтервали між складовими спектра і співвідношення їхніх амплітуд не порушуються, таким чином загальний вигляд досліджуваного спектра внаслідок перетворення зберігається.

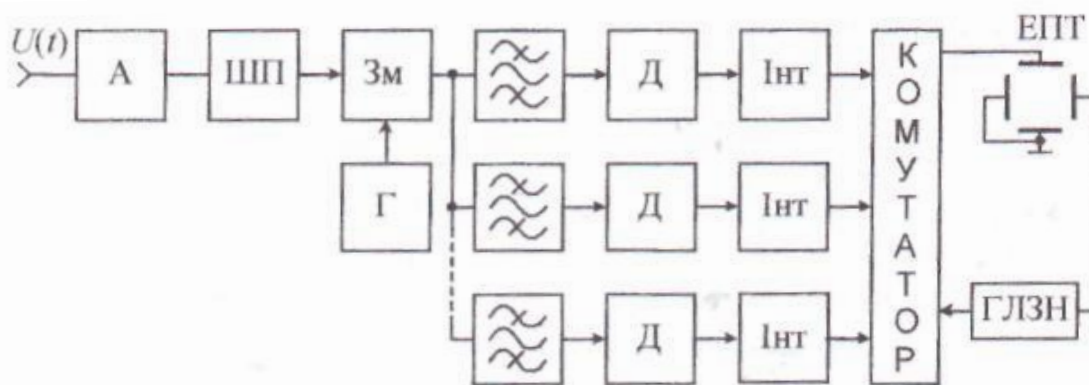


Рисунок 11.1 – Структурна схема аналізатора спектра паралельної дії

Навантаженням змішувача є набір вузькосмугових фільтрів (30...80 шт.), резонансні частоти яких рівномірно розташовані вздовж шкали частот. Кожний фільтр відгукується на дію частотної складової, яка знаходиться в його смузі огляду. Точно визначити частоту будь-якої складової неможливо, можна лише стверджувати, що вона знаходиться в межах смуги пропускання даного фільтра. За допомогою детекторів $Д$ та інтеграторів $Інт$ кожна із складових сигналу перетворюється в напругу постійного струму, пропорційну амплітуді відповідної гармоніки.

Індикація картини спектра досліджуваного сигналу може здійснюватися за допомогою електронно-променевої трубки ЕПТ з попередньою комутацією виходів фільтрів. Комутатор, роботою якого керує генератор лінійно змінюваної напруги ГЛЗН (або генератор ступінчастої напруги), по черзі підключає до блоку ЕПТ вихід кожного каналу на дуже короткий час. Внаслідок цього на екрані

ЕПТ по черзі виникають короткі імпульси, амплітуди яких пропорційні амплітудам відповідних гармонік. Завдяки післясвітінню ЕПТ на екрані спостерігаються усі спектральні складові сигналу, що опиняються в смузі пропускання фільтрів. ГЛЗН використовується також для розгортки променя уздовж горизонтальної осі трубки.

Аналізатори паралельної дії забезпечують високу швидкість аналізу. Проте апаратура, необхідна для реалізації паралельного аналізу, складна.

11.2 Аналізатори спектра послідовної дії

Аналізатори спектра послідовної дії у своєму складі мають лише один фільтр з вузькою смугою пропускання Δf . Можливі два варіанти реалізації аналізатора спектра послідовної дії. Перший варіант пов'язаний з використанням смугового фільтра, частоту настроювання якого можна змінювати вручну, послідовно настроюючи його на частоти різних гармонік сигналу. Спрощена схема такого аналізатора наведена на рис. 11.2, а. Основними блоками її є атенюатор А, широкосмуговий підсилювач ШП, смуговий фільтр і електронний вольтметр. Такий метод аналізу покладено в основу побудови аналізаторів гармонік перших випусків.

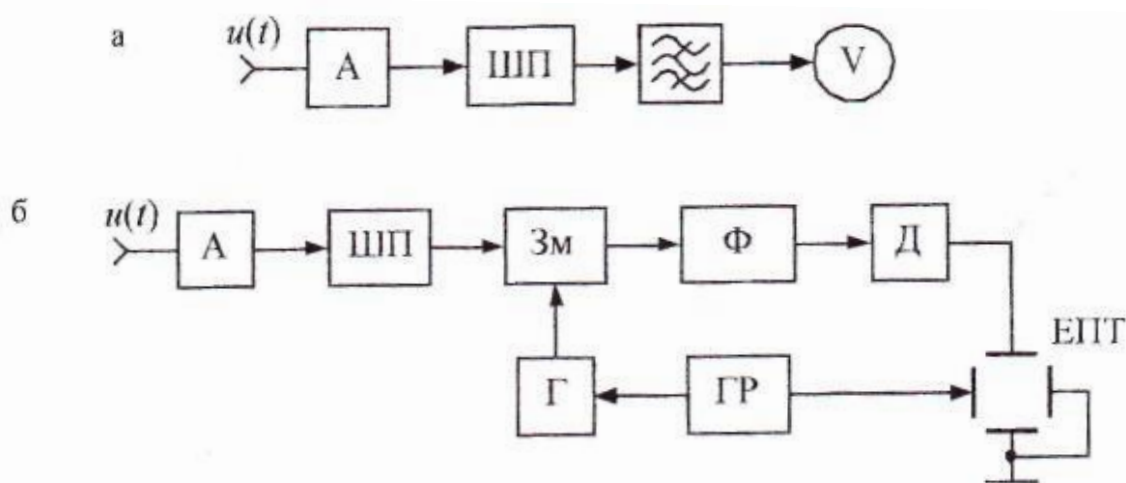


Рисунок 11.2 – Структурні схеми аналізаторів спектра послідовної дії

Другий варіант аналізатора послідовної дії (рис. 11.2, б) передбачає застосування смугового фільтра Ф (або підсилювача проміжної частоти) з незмінною смугою пропускання та гетеродинного перетворювача частоти. Досліджуваний сигнал $u(t)$ через вхідний атенюатор А, широкосмуговий підсилювач ШП потрапляє на змішувач Зм гетеродинного перетворювача частоти. На другий вхід змішувача подається напруга гетеродина Г, частота якого періодично лінійно змінюється (коливається) в межах від f_{\min} до f_{\max} протягом періоду коливання T . При зміні частоти гетеродина за законом

$$f_{\Gamma} = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})t/T, \quad (0 \leq t \leq T)$$

переміщується спектр сигналу відносно центральної частоти настройки смугового фільтра f_0 зі смугою пропускання Δf і на виході останнього послідовно виділяються складові спектра сигналу при виконанні умови $f_0 = f_r \pm n f_{U_n}$, де $n = 1, 2, 3, \dots$ – номери гармонік, $n f_{U_n}$ – частота n -ї гармоніки досліджуваного сигналу. Спектральні складові потрапляють на детектор Д, а потім – на вертикально відхиляючі пластини ЕПТ (індикатора). Відхилення променя по горизонталі здійснюється генератором розгортки ГР синхронно з коливанням частоти гетеродина Г, завдяки чому лінія розгортки точно відповідає осі частот спектрограми.

Діаграма (рис. 11.3) пояснює процес виділення спектральних складових сигналу. На діаграмі показано: Δf – смуга пропускання смугового фільтра; f_1 і f_2 – частоти першої і другої гармонік сигналу, які з часом не змінюються; f_r , $f_r - f_1$, $f_r - f_2$ – змінювані з часом частота гетеродина та різниці частоти.

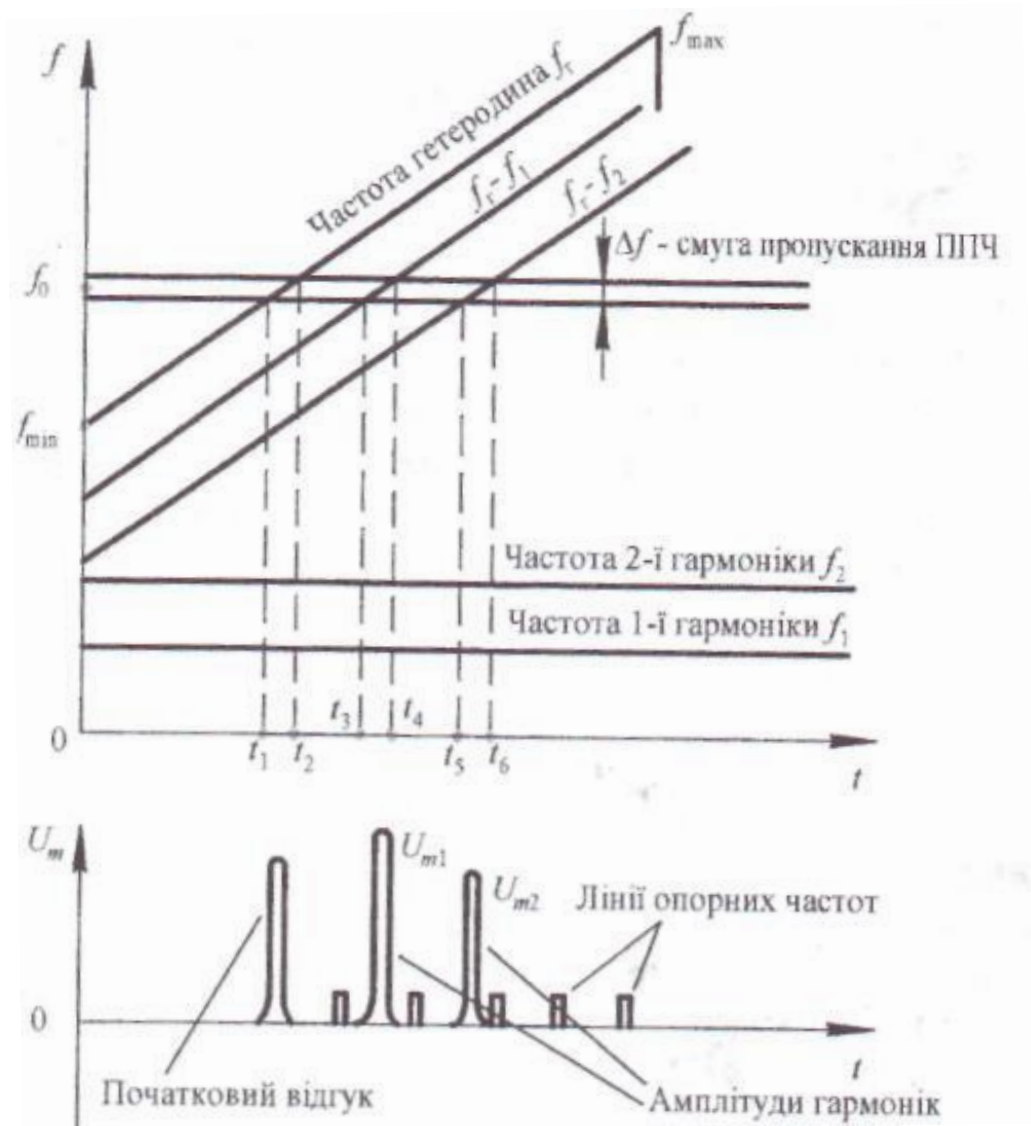


Рисунок 11.3 – Діаграма процесу виділення спектральних складових сигналу

В той час, як частота гетеродина перестроюється, змінюються і різниці частоти $f_r - f_1$, $f_r - f_2$, і в якийсь момент часу вони дорівнюватимуть частоті настроювання смугового фільтра ($f_0 = f_r - f_1$; $f_0 = f_r - f_2$ і т. ін.). Так, протягом часу $t_2 - t_1$ значення частоти гетеродина опиняється в смузі пропускання смугового фільтра, і на його виході з являється сигнал частоти f_0 , який після детектування у вигляді короткого імпульсу потрапляє на горизонтально відхиляючі пластини ЕПТ. На екрані ЕПТ спостерігається так званий початковий відгук (рис. 11.3). Протягом часу $t_4 - t_3$ різницева частота $f_r - f_1$ досягає рівня f_0 і на екрані ЕПТ виникає короткий імпульс, амплітуда U_{m1} якого пропорційна амплітуді першої гармоніки, а протягом часу $t_6 - t_5$ – короткий імпульс, амплітуда U_{m2} якого пропорційна амплітуді другої гармоніки. За один цикл колювання частоти гетеродина виділяються усі частотні складові спектра в межах смуги огляду. Цикл колювання багаторазово повторюється, і на екрані ЕПТ спостерігається зображення спектра досліджуваного сигналу, яке складається із сукупності вертикальних ліній.

Значення амплітуд гармонік визначають у відносних одиницях (наприклад, в процентах від амплітуди першої гармоніки) за допомогою масштабної сітки, яка наноситься на екран ЕПТ. Для визначення частот гармонік досліджуваного сигналу застосовують генератор опорних частот. При його включенні на екрані трубки окрім ліній досліджуваного спектра з'являються лінії опорних частот. Внаслідок цього на горизонтальній осі ЕПТ виникають опорні точки відомих частот (наприклад 1, 2, 3, ... МГц).

Основними характеристиками аналізаторів спектра є діапазон частот, роздільна здатність, динамічний діапазон, швидкість аналізу та похибки вимірювання частоти і амплітуд.

Діапазон частот (смуга огляду) – частотний інтервал, в якому аналізуються спектри сигналів. Діапазон частот визначається різницею граничних частот гетеродина $f_{\max} - f_{\min}$. Більшість аналізаторів спектра мають змінну смугу огляду. При цьому в більш широкій смузі ведеться грубий аналіз (з невеликою роздільною здатністю), а у вузькій смузі – точний аналіз. В першому випадку проглядається увесь спектр досліджуваного сигналу, а в другому випадку – окремі його ділянки.

Роздільна здатність – властивість аналізатора спектра розмежовувати дві найближчі за частотою гармоніки сигналу, коли на екрані ЕПТ можуть бути виділені окремі лінії та виміряні їх рівні. Роздільна здатність визначається властивостями смугового фільтра: коефіцієнтом прямокутності та смугою пропускання. Якщо інтервал частот між двома гармонічними складовими спектра більше смуги пропускання фільтра, то на екрані ЕПТ можна спостерігати кожен з цих гармонічних складових окремо. Якщо ж смуга пропускання фільтра ширше інтервалу частот між двома (або декількома) спектральними складовими, то фільтр буде збуджуватися одразу декількома гармонічними складовими, і рівень напруги на виході фільтра буде визначатися їх сумарним спектром. При цьому на екрані буде спостерігатися плавна крива з

декількома локальними максимумами (за кількістю спектральних складових).

Інколи доводиться аналізувати спектр послідовності імпульсів з великою шпаруватістю. Чим більша шпаруватість імпульсів, тим меншим є частотний інтервал між двома гармонічними складовими. В таких випадках виділити окремі спектральні складові неможливо, і тому виділяють лише обвідну спектра.

Динамічний діапазон. Спектр сигналу може містити складові як великої, так і малої амплітуди. Підсилення сигналу з метою більш детального розглядання складових малої амплітуди призводить до перевантаження змішувача складовими з великими амплітудами. Через це прилад стає нелінійним приймачем і сам породжує помилкові сигнали на комбінаційних частотах. Якщо амплітуди помилкових сигналів не будуть перевищувати рівня шумів, то їх неможливо буде й розглядіти на фоні шумів. Тому як критерій допустимої амплітуди помилкових сигналів приймають рівень шумів. Вводиться поняття динамічного діапазону як відношення максимального допустимого рівня досліджуваного сигналу, при якому помилкові сигнали на комбінованих частотах не перевищують рівня шумів, до рівня власних шумів (в децибелах).

Швидкість аналізу характеризує, наскільки швидко здійснюється аналіз досліджуваного процесу в певному діапазоні частот. Швидкість аналізу залежить від діапазону частот і частоти розгортки.

Похибка відліку частоти дозволяє судити, з якою точністю можна виміряти частотний інтервал між спектральними складовими або значення частоти кожної з них. Точність відліку частоти залежить від форми та ширини позначок на екрані ЕПТ. Чим ширша позначка, що спостерігається на екрані ЕПТ, тим нижча точність відліку частоти. Іншими складовими похибки відліку частоти є неточність калібрування приладу, нестабільність частоти настроювання смугового фільтра, коливання частоти перестроювання гетеродина.

Похибка відліку амплітуди залежить від неточності калібрування чутливості, похибки шкали атенюатора, нерівномірності амплітудно-частотної характеристики тракту, впливу власних шумів.

11.3 Дисперсійні аналізатори спектра

Дисперсійні аналізатори застосовуються для дослідження спектрів високочастотних сигналів, коротких радіоімпульсів та поодиноких імпульсів. Суть дисперсійного методу полягає у використанні дисперсійної лінії затримки, в якій різні частотні складові розповсюджуються з різними швидкостями, і тому на виході лінії послідовно з'являються складові спектра, зсунуті за часом. Основними елементами дисперсійного аналізатора (рис. 11.4) є вхідний пристрій ВП, гетеродинний перетворювач частоти у складі змішувача Зм та підсилювача проміжної частоти ППЧ, генератор коливальної частоти ГКЧ, дисперсійна лінія затримки ДЛЗ та блок електронно-променевої трубки ЕПТ. На один вхід змішувача Зм подається досліджуваний сигнал, а на інший вхід – сигнал коливальної частоти. Вихідний сигнал змішувача підсилюється і потрапляє на дисперсійну лінію затримки. Вихідні сигнали лінії детектуються і подаються на

вертикально відхиляючі пластини ЕПТ. На горизонтально відхиляючі пластини ЕПТ для розгортки променя по горизонталі подається пилкоподібна напруга генератора розгортки ГР, який одночасно і синхронно модулює частоту ГКЧ. Завдяки цьому горизонтальна лінія розгортки є віссю частоти. При імпульсних сигналах запуск ГР і ГКЧ відбувається в момент надходження імпульсу.

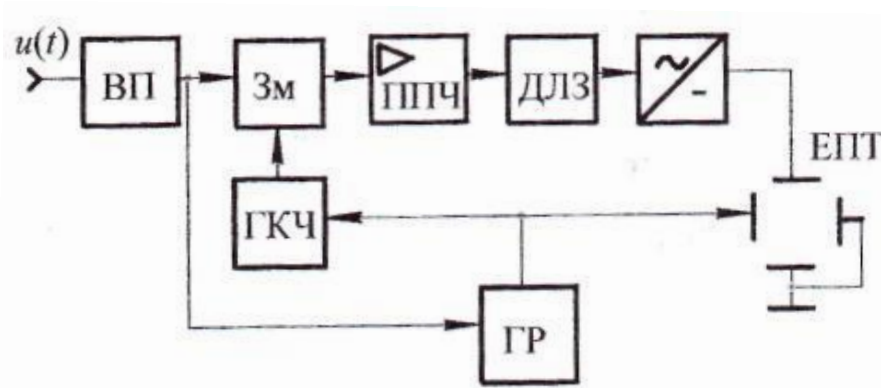


Рисунок 11.4 – Схема дисперсійного аналізатора спектра

11.4 Вимірювання коефіцієнта гармонік

У деяких випадках немає потреби визначати спектр сигналу, а досить знати лише ступінь спотворення синусоїдної форми сигналу (наприклад, при дослідженні високоякісних підсилювачів потужності звукового діапазону частот, звукозаписуючих і звуковідтворюючих пристроїв та ін.). Ступінь нелінійних спотворень гармонічного сигналу оцінюють коефіцієнтом гармонік (коефіцієнтом нелінійних спотворень), який дорівнює відношенню діючого значення напруги вищих гармонік, починаючи з другої, до діючого значення напруги першої гармоніки

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \cdot 100, \% \quad (11.1)$$

Можна реалізувати цю залежність апаратурно, проте простіше вимірювати не K_{Γ} , а його приблизне значення

$$K_{\Gamma.п.} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}} \cdot 100, \% \quad (11.2)$$

Між коефіцієнтами K_{Γ} і $K_{\Gamma.п.}$ існує співвідношення

$$K_{\Gamma.п.} = \frac{K_{\Gamma}}{\sqrt{1 + K_{\Gamma}^2}}, \quad (11.3)$$

звідки точне значення коефіцієнта гармонік

$$K_{\Gamma} = \frac{K_{\Gamma.п.}}{\sqrt{1 - K_{\Gamma.п.}^2}}. \quad (11.4)$$

Отже, знаючи $K_{\Gamma.п.}$, можна розрахувати K_{Γ} . Крім того, при невеликих спотвореннях (до 15 %) коефіцієнти K_{Γ} і $K_{\Gamma.п.}$ є близькими за значеннями. Наприклад, якщо $K_{\Gamma} < 10\%$, то значення K_{Γ} і $K_{\Gamma.п.}$ відрізняються одне від одного менше, ніж на 1 %.

Таким чином, вимірювання коефіцієнта гармонік може здійснюватися за допомогою приладу, в якому апаратурно реалізовано вираз (11.2).

Спрощена структурна схема вимірювача коефіцієнта гармонік (вимірювача нелінійних спотворень) наведена на рис. 11.5.



Рисунок 11.5 – Структурна схема вимірювача коефіцієнтів гармонік

Вимірювання виконуються таким чином. Перемикач S ставлять в положення «К» (калібрування). Досліджуваний сигнал з виходу попереднього підсилювача подається на електронний вольтметр. За допомогою входного потенціометра встановлюють вихідну напругу підсилювача такою, щоб показчик вольтметра встановився на кінцевій позначці його шкали (100 %). Така операція називається калібруванням. При цьому показання вольтметра будуть відповідати діючому значенню досліджуваного сигналу $U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}$. Після цього перемикач S переводиться в положення «В» (вимірювання) і здійснюється настройка загороджуючого фільтра на частоту основної (першої) гармоніки, про що судять за мінімальним показанням вольтметра. В цьому разі показання вольтметра відповідає діючому значенню напруги усіх вищих гармонік, починаючи з другої. Шкала вольтметра відградуйована в значеннях $K_{\Gamma.п.}$. За потреби (наприклад, якщо результат вимірювання перевищує 15 %) точне значення коефіцієнта гармонік K_{Γ} розраховують за формулою (11.4).