

УДК 621.317

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ДИСПЕРСІЇ ШУМОВИХ СИГНАЛІВ

В.Ю. Санніков, Ю.О. Скрипник

Київський національний університет технологій та дизайну

Розглянуто спосіб підвищення точності вимірювання дисперсії шумових сигналів, який дозволяє оцінювати рівень шумів в малошумливих підсилювачах і активних елементах, вимірювати коефіцієнт шуму і температуру шуму на вході різних електронних пристроїв та визначати шумові параметри активних і пасивних чотириполюсників при різних видах навантаження за рахунок виключення впливу власних шумів як активних, так і пасивних елементів вимірювальної схеми, що забезпечить підвищення точності виміру дисперсії шумових сигналів.

Ключові слова: шумовий сигнал, дисперсія, температура, підсилювач, перемножувач, інтегратор.

Тепловий шум – наслідок теплового хаотичного (броунівського) руху носіїв струму, що знаходяться в тепловій рівновазі з молекулами (іонами) речовини провідника. Такими носіями струму можуть бути електрони, іони і дірки в напівпровідниках. Тому джерелом теплового шуму може бути кожний по хімічному складу, фізичній структурі провідник і навіть діелектрик із втратами, у якого тепловий шум обумовлений появою термозбуджених поляризованих молекул, що утворюють елементарні флюктуючі диполі [1].

Дисперсія шумового сигналу характеризує його інтенсивність і функціонально пов'язана з параметрами фізико-хімічних процесів, такими як температура, активний опір в електропровідних середовищах, електричні втрати в діелектричних матеріалах і тому подібне. Вимір дисперсії шумових сигналів здійснюється шляхом квадратування миттєвих значень знакозмінної напруги шумового сигналу, подальшого усереднювання і виміру постійної складової усередненої напруги [2]. Проте вимір шумових сигналів низького рівня пов'язаний з рядом технічних труднощів, особливо впливом власних шумів вимірювального приладу на зовнішній шум, що вимірюється.

В пристрої для виміру дисперсії шумових сигналів [3] для зменшення впливу власних шумів підсилювача пристрій додатково включає зразкову міру шумової напруги, атенюатор і компаратор. При вимірюванні шумових сигналів низького рівня (менше 2-3 мкВ) виникають великі похибки від теплових шумів атенюатора, яким масштабується вихідна напруга зразкової міри, а також власні шуми підсилювача. Для зменшення впливу власних шумів елементів схеми в прилад [4] додатково введені

інвертор, зашунтований автоматичним ключем, повторювач напруги і квадратичний детектор. Для зменшення впливу власних шумів диференціального підсилювача на результат виміру здійснюють періодичне інвертування вимірюваного шумового сигналу. Проте, при цьому додатково до вимірювальних шумів вносяться власні шуми інвертора. Шуми вхідного повторювача, що виконаний на активних елементах (транзисторах), також великі, що визначається дробовими шумами активних елементів. Останні значно перевищують вимірюваний тепловий шум.

Постановка завдання

Основною задачею дослідження є повне виключення впливу власних шумів як активних, так і пасивних елементів вимірювальної схеми, що забезпечить підвищення точності виміру дисперсії низькоінтенсивних шумових сигналів. Вирішення поставленої задачі підвищення точності вимірів дисперсії шумових сигналів дозволить створити теоретичний апарат реалізації шумових вимірювачів температури або електричного опору, як електропровідних так і діелектричних матеріалів.

Об'єкти та методи дослідження

Об'єктом дослідження є методи вимірювання дисперсії шумових сигналів, що використовуються в електронних приладах оцінки температури та електричного опору матеріалів. Основним методом дослідження є теорія виміру шумів, аналіз та синтез електронних схем.

Результати та їх обговорення

Вирішення поставленої задачі досягається введенням в схему пристрою для вимірювання дисперсії шумових сигналів додаткового диференціального підсилювача, блоку множення і двох автоматичних перемикачів, включених відповідним чином, що дозволяє отримати квадрат миттєвих значень шумової напруги певного знаку у вигляді інформативного приросту постійної складової напруги на виході блоку множення. Неінформативна постійна напруга на виході блоку множення виникає, як від наявності корельованих шумів в двох підсилювачах так і від зміщення (дрейфу) нуля самого блоку множення. Але завдяки зміні полярності одного з сигналів, що перемножуються, відносно іншого за допомогою переключення автоматичних перемикачів змінюється і знак приросту від результату множення складових вимірюваного шуму. При безперервній роботі автоматичних перемикачів інформативний знакозмінний приріст постійної напруги перетворюється в змінну напругу, яка виділяється вибірково підсилювачем, налаштованим на частоту перемикачів. Оскільки зміна полярності

шумової напруги здійснюється на вході вимірювальної схеми, то всі внутрішні шуми (теплові, дробові та ін.) не створюють знакозмінний приріст напруги і тому не впливають на результат виміру, що забезпечує підвищення точності виміру дисперсії низькоінтенсивних шумових сигналів.

На рисунку 1 представлена електрична функціональна схема реалізації метода вимірювання дисперсії шумових сигналів [5]. Розглянемо принцип роботи запропонованої схеми.

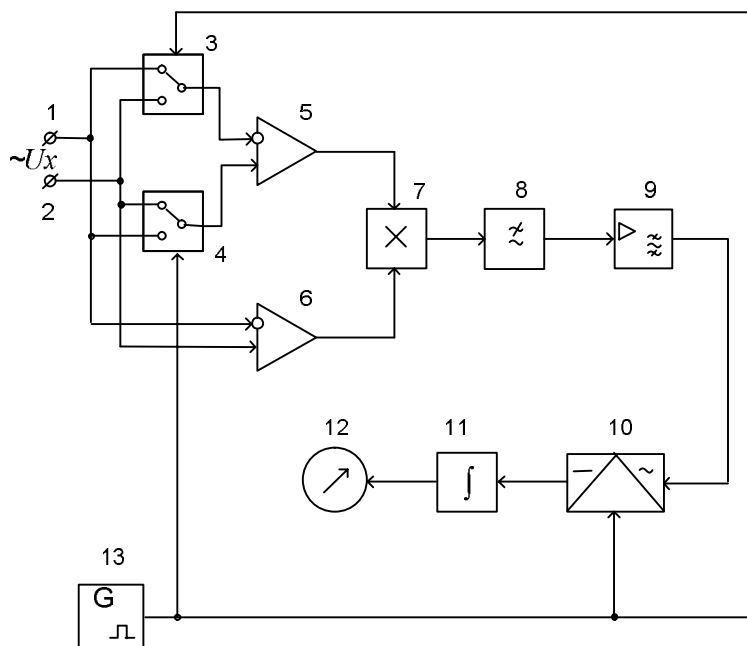


Рис. 1 . Пристрій для вимірювання дисперсії шумового сигналу
1,2 – входні клеми, 3,4 – перемикачі, 5,6 – диференціальні підсилювачі, 7 – перемножувач, 8 – фільтр нижніх частот, 9 – вибіркового підсилювач, 10 – фазочутливий випрямляч, 11 – інтегратор, 12 – вимірювальний прилад

Шумовий сигнал $U_x(t)$ підключається до входних клем 1 і 2, на яких розділяється на два однакові сигнали $U_1(t)$ і $U_2(t)$. Один з них $U_1(t)$ впливає через автоматичні перемикачі 3 і 4 на входи диференціального підсилювача 5. Інший сигнал $U_2(t)$ безпосередньо впливає на входи додаткового диференціального підсилювача 6. При одному положенні автоматичних перемикачів 3 і 4 полярність сигналів $U_1(t)$ і $U_2(t)$ однакова. Якщо шумовий сигнал $U_x(t)$ представити в комплексному вигляді - $\dot{U}_x(t)$, то підсилена напруга прийме значення:

$$\dot{U}_x(t) = \dot{U}_1(t) = \dot{U}_2(t). \quad (1)$$

Підсилена напруга на виходах диференціальних підсилювачів 5 та 6 з врахуванням наявності в них власних шумів буде:

$$\dot{U}_3 = \dot{K}_1(\omega)\dot{U}_1 + \dot{U}_{n1}, \quad (2)$$

$$\dot{U}_4 = \dot{K}_2(\omega)\dot{U}_2 + \dot{U}_{n2}, \quad (3)$$

де $\dot{K}_1(\omega)$ і $\dot{K}_2(\omega)$ - комплексні коефіцієнти підсилення диференціальних підсилювачів 5 та 6; \dot{U}_{n1} и \dot{U}_{n2} - комплексні напруги власних шумів підсилювачів.

Згідно статистичному зв'язку шуми диференціальних підсилювачів 5, 6 можна розділити на корельовані і некорельовані. Корельовані шуми є наслідком паразитних зв'язків між двома диференціальними підсилювачами і обумовлені неідентичністю їх частотних характеристик. Тому напруги (2) і (3) представляють у вигляді:

$$\dot{U}_3 = \dot{K}_1(\omega)\dot{U}_1 + \overset{/}{\dot{U}}_{n1} + \overset{//}{\dot{U}}_{n1}, \quad (4)$$

$$\dot{U}_4 = \dot{K}_2(\omega)\dot{U}_2 + \overset{/}{\dot{U}}_{n2} + \overset{//}{\dot{U}}_{n2}, \quad (5)$$

де один штрих означає корельованість шумових процесів, а два штрихи - некорельованість.

Сумарні напруги (4) і (5) перемножуються в блоці множення 7, а результат перемножування усереднюється фільтром нижніх частот 8. Усереднену напругу можна представити як:

$$\overline{U}_5 = K_3 \overline{S} \left\{ \left[-\dot{K}_1(\omega)\dot{U}_1 + \overset{/}{\dot{U}}_{n1} + \overset{//}{\dot{U}}_{n1} \right] \left[\dot{K}_2(\omega)\dot{U}_2 + \overset{/}{\dot{U}}_{n2} + \overset{//}{\dot{U}}_{n2} \right] \right\} + \Delta\overline{U}, \quad (6)$$

де риска зверху відображає процес усереднювання, а $\Delta\overline{U}$ - зміщення (дрейф) нуля блоку множення 7; \overline{S} - крутизна перетворення блоку множення 7; K_3 - коефіцієнт передачі фільтру нижніх частот 8.

При обчисленні перемножених значень у виразі (6) слід мати на увазі, що усереднений добуток двох некорельованих процесів має нульове значення. Тому

$$\overline{\overset{//}{\dot{U}}_{n1}\overset{//}{\dot{U}}_{n2}} = \overline{\dot{K}_1\dot{U}_1\overset{//}{\dot{U}}_{n2}} = \overline{\dot{K}_2\dot{U}_2\overset{//}{\dot{U}}_{n1}} = 0. \quad (7)$$

З врахуванням виразу (7) результат виразу (6) прийме вигляд:

$$\overline{U}_6 = K_3 \overline{S} \left[\overline{\dot{K}_1\dot{K}_2\dot{U}_1\dot{U}_2} + \overset{/}{\dot{U}}_{n1}\overset{/}{\dot{U}}_{n2} \right] + \Delta\overline{U}. \quad (8)$$

Відповідно до виразу (1) добуток співмножників

$$\overline{\dot{K}_1 \dot{K}_2 \dot{U}_1 \dot{U}_2} = \overline{\dot{K}_1 \dot{K}_2 \dot{U}_x^2} = \overline{\dot{K}_1 \dot{K}_2 \dot{U}_x^2}, \quad (9)$$

де $\overline{\dot{U}_x^2}$ – дисперсія (середній квадрат) шумового сигналу, що вимірюється.

При протилежному положенні автоматичних перемикачів 3 і 4 змінюється полярність шумової напруги U_1 , яка впливає на входи диференціального підсилювача 5. Перемножуванні шумові процеси стають протифазними. Усереднена напруга на виході фільтру нижніх частот 8 отримує вигляд:

$$\overline{U}_7 = K_3 \overline{\dot{S} \left\{ \left[-\dot{K}_1(\omega) \dot{U}_1 + \dot{U}'_{n1} + \dot{U}''_{n1} \right] \left[\dot{K}_2(\omega) \dot{U}_2 + \dot{U}'_{n2} + \dot{U}''_{n2} \right] \right\} + \Delta \overline{U}}. \quad (10)$$

В результаті зміни полярності шумової напруги U_1 змінюється знак лише першого доданку у виразі (8). Усереднена напруга на виході фільтру нижніх частот 8 набуває значення:

$$\overline{U}_8 = K_3 \overline{\dot{S} \left[-\dot{K}_1 \dot{K}_2 \dot{U}_x^2 + \dot{U}'_{n1} \dot{U}'_{n2} \right] + \Delta \overline{U}}. \quad (11)$$

При безперервній роботі автоматичних перемикачів 3 і 4 вихідна напруга фільтру нижніх частот 8 періодично змінюється від значення (8) до значення (11). В результаті у вихідній напрузі фільтру нижніх частот 8 з'являється змінна складова напруги частоти перемикачів полярності однієї з шумових напруг, що перемножуються:

$$U_9(t) = \frac{\overline{U}_6 - \overline{U}_8}{2} \text{sign} \sin(2\pi Ft), \quad (12)$$

де $\text{sign} \sin(2\pi Ft)$ - прямокутна огибаюча знакозмінної складової напруги; F - частота зміни полярності шумової напруги.

Вибірковим підсилювачем 9, налаштованим на частоту F перемикачів мультівібратора 13, виділяється і посилюється основна гармоніка знакозмінної напруги (12). Посилена змінна напруга випрямляється фазочутливим випрямлячем 10 і згладжується інтегратором 11. Вихідна постійна напруга інтегратора 11 вимірюється вимірювальним приладом 12 і складає

$$U_{10} = \frac{1}{2} K_3 S K_4 K_5 K_6 (U_6 - U_8), \quad (13)$$

де K_4 - коефіцієнт підсилення вибіркового підсилювача; K_5 - коефіцієнт випрямлення фазочутливого випрямляча; K_6 - коефіцієнт передачі інтегратора.

Підставивши у вираз (13) значення напруги (8) і (11), остаточно отримаємо:

$$U_{11} = K_1 K_2 K_3 S K_4 K_5 K_6 \overline{U_x^2}. \quad (14)$$

Вираз (14) можна представити в узагальненому вигляді:

$$U_{12} = S_p \overline{U_x^2}, \quad (15)$$

де $S_p = K_1 K_2 K_3 S K_4 K_5 K_6$ - результуюча крутизна перетворення дисперсії шумового сигналу в постійну напругу.

З остаточних виразів (14) і (15) видно, що результат виміру пропорційний дисперсії (середньому квадрату) шумового сигналу $U_x(t)$, і не залежить від рівня власних шумів підсилювачів 5 і 6 та зміщення (дрейфу) нуля блоку множення 7.

Висновки

Використання запропонованого методу в інформаційно-вимірювальній техніці дозволяє значно (у 5 – 10 разів), залежно від рівня шумового сигналу, підвищити точність виміру низькоінтенсивних шумових сигналів і розширити діапазон виміру його дисперсії в області надмалих значень напруги шумового сигналу ($10^{-15} - 10^{-17}$) В²/Гц. Крім того даний підхід до вимірювання дисперсії шумового сигналу дозволить:

- оцінювати рівень шумів в малошумливих підсилювачах і активних елементах (транзисторах, діодах і ін.);
- вимірювати коефіцієнт шуму і температуру шуму на вході різних електронних пристроїв;
- визначати шумові параметри активних і пасивних чотиріполюсників при різних видах навантаження;
- калібрувати генератори шуму, переважно низькотемпературні схеми з узгодженим навантаженням; здійснювати вимірювання неврівноважених шумів, що виникають в процесах механічної обробки деталей і при опроміненні матеріалів енергетичними потоками.

Реалізація запропонованого методу у вимірювальних пристроях не вимагає використання малошумливих мікросхем і криогенних температур для термостабілізації напруг, а також зниження рівня власних шумів елементів.

ЛІТЕРАТУРА.

1. Саватеев А.В. Шумовая термометрия. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1987. – 132с. ил.

2. Кукуш В. Д. Электрорадиоизмерения: учебное пособие для ВУЗов. – М.: Радио и связь, 1985. – С.286-287.
3. Цветков Э.И. Основы теории статистических измерений – Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1979. - С. 63-64.
4. Патент України № 11031, МКВ G01R19/02. Пристрій для вимірювання дисперсії шумових сигналів // Ю.О.Скрипник, В.М. Холоденко, Бюл.пром.влас. №12, 2005.
5. Патент України № 58536, МКВ G01R19/02. Пристрій для вимірювання дисперсії шумових сигналів // Ю.О. Скрипник, В.Ю. Санніков, А.В. Агафонов, Бюл.пром.влас. №7, 2011.

В.Ю.Санников, Ю.А.Скрипник

Повышение точности измерения дисперсии шумовых сигналов

Рассмотрен способ повышения точности измерения дисперсии шумовых сигналов, который позволяет оценивать уровень шумов в малошумящих усилителях и активных элементах, измерять коэффициент шума и температуру шума на входе разных электронных устройств и определять шумовые параметры активных и пассивных четырехполюсников при разных видах нагрузки за счет исключения влияния собственных шумов как активных, так и пассивных элементов измерительной схемы, которая обеспечит повышение точности измерения дисперсии шумовых сигналов.

Ключевые слова: шумовой сигнал, дисперсия, температура, усилитель, перемножитель, интегратор.

V.Yu.Sannikov, Yu.A.Skripnik

Increase of measuring exactness of noise signals dispersion

The method of increase of exactness of measuring of dispersion of noise signals is considered, that allows to estimate the level of noises in low-noise strengtheners and active elements, to measure the coefficient of noise and temperature of noise on the entrance of different electronic devices and determine the noise parameters of active and passive quadripoles at the different types of loading due to the exception of influence of own noises of both active and passive elements of measuring chart that will provide the increase of exactness of measuring of dispersion of noise signals.

Keywords: noise signal, dispersion, temperature, strengthener, integrator.