

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В. ЛОМОНОСОВА**

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра физики колебаний

Описание задачи спецпрактикума

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ШУМЫ

СТЕПАНОВ А.В.

МОСКВА 2003 г.

ВВЕДЕНИЕ

Случайным процессом, шумом, флуктуациями называют такое изменение наблюдаемой величины во времени, когда по значению этой величины в текущий и в предыдущие моменты времени нельзя точно предсказать ее будущее поведение. На практике шумом можно считать любое достаточно сложное нерегулярное, хаотическое изменение, пусть даже оно и осуществляется по некоторому определенному правилу. В той или иной степени флуктуации присущи всем природным объектам.

Случайное поведение системы может быть вызвано различными причинами. Классическим примером являются системы, состоящие из большого числа частиц (например макроскопические тела), и поэтому обладающие сильно запутанным внутренним движением. Хаотическое движение броуновской частицы под действием ударов молекул жидкости является примером, когда флуктуации обусловлены случайным внешним воздействием на систему. Сложное хаотическое движение могут иметь нелинейные системы даже с небольшим числом степеней свободы. Примером детерминированного шума являются псевдослучайные числовые последовательности, генерируемые по определенным алгоритмам вычислительными системами.

С практической точки зрения наиболее важным фактором являются флуктуации в электрических системах. Электронные приборы повсеместно используются в разнообразных измерительных, управляющих, коммуникационных системах, и шумы определяют точность и надежность работы этих систем.

В задаче рассматриваются флуктуации тока и напряжения (электрические шумы), типичные для электронных систем, - равновесные флуктуации, дробовой и фликкерный шумы, а также способы описания и измерения шумов усилителей.

СЛУЧАЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Описание случайных процессов основано на понятии **статистического ансамбля**. Пусть $x(t)$ - зависимость от времени некоторой случайной величины в наблюдаемой системе, например, запись напряжения электрической батареи, - так называемая реализация случайного процесса. Постулируется, что существует множество различных реализаций, соответствующих допустимым движениям системы, и предполагается, что в распоряжении наблюдателя сразу имеются все возможные реализации – статистический ансамбль реализаций $\{x(t)\}$. Вероятность некоторого события, связанного с данным случайным процессом, определяется как отношение

числа реализаций, в которых данное событие происходит, к общему числу реализаций в ансамбле, или как предел этого отношения, если число реализаций в ансамбле бесконечно. Ансамбль полностью определяет статистические свойства флуктуаций в системе, так как с его помощью можно рассчитать вероятность любого события.

Наиболее важными для практических приложений вероятностными характеристиками случайного процесса $x(t)$ являются одновременная $w_1(x, t)$ и двухвременная $w_2(x_1, t_1; x_2, t_2)$ **плотности вероятности**:

$w_1(x, t)dx$ - вероятность того, что в момент времени t случайный процесс принимает значение, лежащее в интервале dx вокруг значения x ,

$w_2(x_1, t_1; x_2, t_2)dx_1dx_2$ - вероятность того, что в момент времени t_1 случайный процесс принимает значение, лежащее в интервале dx_1 вокруг значения x_1 , и в момент времени t_2 случайный процесс принимает значение, лежащее в интервале dx_2 вокруг значения x_2 .

В случае, когда параметры рассматриваемой системы и свойства ее окружения постоянны во времени, вероятностные характеристики шума, генерируемого в системе, не зависят от начала отсчета времени. Такие процессы называются **стационарными**. Для стационарных процессов одномерная плотность вероятности w_1 не зависит от времени, а двумерная плотность вероятности w_2 зависит лишь от разности моментов времени $\tau = t_2 - t_1$. Многие природные флуктуации являются стационарными. В дальнейшем будут рассматриваться только стационарные процессы.

Вероятностные характеристики дают наиболее полное описание случайного процесса. При решении задач, связанных с шумами, в большинстве случаев не требуется такой детальной информации и достаточно знания параметров, характеризующих шум в среднем. В первую очередь это **среднее значение** случайного процесса:

$$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} xw_1(x)dx, \quad (1)$$

и **дисперсия**, характеризующая средний размах флуктуаций около среднего значения, называемая также **интенсивностью** или **мощностью** шума:

$$\sigma^2 = \langle (x(t) - \langle x \rangle)^2 \rangle. \quad (2)$$

Для стационарного шума среднее и дисперсия не зависят от времени.

Когда имеют дело со случайными процессами, прежде всего, интересуются переменной во времени составляющей процесса - отклонением флуктуирующей величины от среднего значения. Поэтому общепринято, если это не оговаривается отдельно, флуктуациями и шумом называть отклонение от среднего и считать среднее значение шума равным нулю.

В реальных системах изменение флуктуирующей величины не может происходить бесконечно быстро, поэтому значения случайного процесса в разные моменты времени оказываются взаимосвязанными - шум обладает определенной памятью. Характеристикой шума, которая отражает связь между значениями случайного процесса в два момента времени, разделенные некоторым интервалом τ , является **автокорреляционная функция**:

$$K(\tau) = \langle x(t)x(t+\tau) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x_1 x_2 w_2(x_1, t; x_2, t+\tau) dx_1 dx_2 . \quad (3)$$

Если величина интервала τ стремится к нулю, значения шума становятся одинаковыми, и, следовательно, корреляционная функция равна дисперсии шума: $K(0) = \sigma^2 = \langle x^2 \rangle$.

В противоположном случае, когда интервал τ неограниченно возрастает, значения флуктуаций становятся взаимно независимыми, и, следовательно, корреляционная функция стремится к нулю. Величина временного интервала, на котором значение корреляционной функции существенно отличается от нуля, то есть время, в течение которого сохраняется информация о начальном значении процесса, называется **временем корреляции** шума τ_K .

Наряду с корреляционной функцией для описания динамических свойств шума используется спектральное представление. Если стационарный шум $x(t)$ пропустить через узкополосный фильтр, и тем самым выделить спектральные составляющие в некоторой полосе частот df около частоты f , интенсивность флуктуаций на выходе фильтра σ_f^2 будет пропорциональна полосе частот фильтра:

$$\sigma_f^2 = S(f)df, \quad df \rightarrow 0. \quad (4)$$

Функция частоты $S(f)$ называется **спектральной плотностью** шума и характеризует распределение интенсивности флуктуаций по частоте. Мощность исходного процесса $x(t)$ может быть представлена в виде суммы интенсивностей всех его спектральных составляющих:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} S(f)df . \quad (5)$$

Реальные процессы имеют конечную мощность, поэтому их спектральная плотность стремится к нулю при неограниченном увеличении частоты. Интервал частот Δf , который занимает спектральная плотность, называется **полосой частот** шума.

При прохождении шума через линейную систему с коэффициентом передачи $G(f)$ спектральные плотности на входе $S_X(f)$ и выходе $S_Y(f)$ системы связаны простым соотношением:

$$S_Y(f) = |G(f)|^2 S_X(f). \quad (6)$$

Этим объясняется удобство использования спектрального представления при анализе флуктуаций в линейных системах.

Согласно **теореме Винера-Хинчина** автокорреляционная функция и спектральная плотность стационарного случайного процесса взаимно однозначно связаны преобразованием Фурье:

$$K(\tau) = \int_0^{\infty} S(f) \cos(2\pi f\tau) df, \\ S(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau. \quad (7)$$

Поэтому автокорреляционная функция и спектральная плотность в равной мере описывают изменчивость случайного процесса во времени. Чем шире полоса частот шума, тем быстрее изменяется значение флуктуирующей переменной, и тем быстрее процесс забывает свое начальное состояние - с увеличением полосы частот шума Δf время корреляции τ_K уменьшается. Для всех процессов с одинаковой формой спектра и, следовательно, с корреляционной функцией одного вида произведение $\Delta f \tau_K$ является некоторой константой.

Широко используемым модельным представлением является шум с постоянной, не зависящей от частоты спектральной плотностью – так называемый **белый шум**. Время корреляции белого шума равно нулю, и в любые различные моменты времени значения процесса между собой не связаны. Автокорреляционная функция шума представляет собой δ -функцию, поэтому по-другому этот шум называется δ -коррелированным шумом.

Среднее, дисперсия и автокорреляционная функция (или спектральная плотность) являются основными характеристиками шума, обычно используемыми на практике. Они относительно просто измеряются, и их знания достаточно для решения

многих задач, связанных с шумами. С другой стороны, важность этих параметров заключается в том, что они полностью определяют вероятностные характеристики широчайшего класса случайных процессов – **гауссовского шума**.

Согласно **центральной предельной теореме** сумма большого числа независимых случайных процессов является гауссовским случайным процессом. Суперпозиция множества случайных возмущений лежит в основе механизмов возникновения шума в подавляющем числе природных систем, поэтому реальные шумы как правило являются гауссовскими. Плотность вероятности гауссовского (нормального) распределения имеет вид:

$$w(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad x - \text{отклонение от среднего значения.} \quad (8)$$

ШУМЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Флуктуации тока и напряжения называют электрическим шумом. Электрические цепи и электронные приборы демонстрируют большое разнообразие флуктуационных явлений. Некоторые виды электрических шумов имеют фундаментальное происхождение и присущи всем системам, другие возникают лишь при определенных условиях и/или характерны лишь для некоторых приборов и элементов электрических цепей. Шум может быть обусловлено как самим механизмом протекания электрического тока, так и флуктуациями других неэлектрических величин, которые преобразуются во флуктуации тока или напряжения. Причины возникновения ряда шумов до конца не выяснены. Ниже рассматриваются некоторые типичные примеры электрических флуктуаций.

Равновесные флуктуации. Другими названиями этого шума являются тепловой шум, шум Найквиста, шум Джонсона. Джонсон первый экспериментально обнаружил эти флуктуации, а Найквист получил выражение для мощности шума. Тепловой шум представляет собой флуктуации, имеющие место в любой термодинамически равновесной системе, а формула Найквиста является частным случаем флуктуационно-диссипационной теоремы.

Система с постоянным числом частиц находится в термодинамическом равновесии со своим окружением (термостатом), если средний поток энергии между ними равен нулю. Равновесие подразумевает взаимодействие системы и термостата посредством некоторого физического механизма, который в среднем уравнивает

противоположно направленные потоки энергии: от системы к термостату и обратный потоки. Это взаимодействие происходит на микроскопическом уровне и носит случайный характер. Флуктуации возникают уже в силу того, что термостат состоит из огромного числа частиц и поэтому имеет исключительно сложную траекторию движения в фазовом пространстве.

Когда на систему действует внешняя сила, равновесие нарушается, и возникает средний поток энергии от системы к термостату - диссипация энергии, сообщаемой системе за счет действия силы. Если внешняя сила достаточно мала, отклонение состояния системы от равновесного также невелико, и, в первом приближении, механизм, контролирующий потоки энергии между системой и термостатом, остается прежним. Таким образом, один и тот же механизм взаимодействия системы и термостата отвечает и за флуктуации и за рассеяние энергии. Отсюда возникает связь между величиной равновесных флуктуаций в системе и макроскопическими параметрами, отвечающими за диссипацию энергии при действии внешней силы (диссипативными параметрами, коэффициентами трения). Флуктуационно-диссипационная теорема дает количественное выражение этой связи.

В электрических системах диссипативным параметром является активное сопротивление. Для того, чтобы учесть флуктуационное взаимодействие системы и термостата, с сопротивлением R связывают так называемый случайный (шумовой) источник – генератор случайной э.д.с. $e(t)$, включенный последовательно с сопротивлением, или генератор шумового тока $i(t)$, включенный параллельно сопротивлению (Рис.1). Оба представления эквивалентны, и шумовые источники $e(t)$ и $i(t)$ подчиняются соотношению $e(t) = R \cdot i(t)$.

На микроскопическом уровне причиной флуктуаций напряжения и тока в проводнике является хаотическое движение носителей заряда. Так, в металле оно обусловлено случайным рассеянием электронов на колебаниях кристаллической решетки, которая играет роль термостата для электронной системы. Время корреляции флуктуаций определяется характерным временем свободного пробега носителей, поскольку в ходе столкновений теряется информация о первоначальной скорости носителя. В большинстве практических случаев время корреляции, обусловленное конечным временем пробега носителей (например, порядка 10^{-14} с. в чистых металлах при комнатной температуре), пренебрежимо мало по сравнению с инерционностью

электрической цепи, в которую включено сопротивление. Этим оправдывается предположение о том, что случайные источники $e(t)$ и $i(t)$ являются белым шумом.

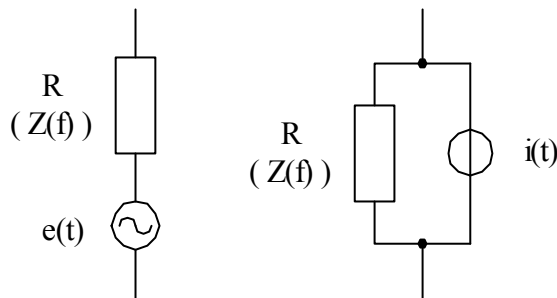


Рис.1. Схемы двухполюсника с источниками теплового шума.

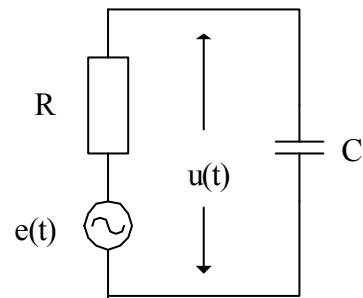


Рис.2. Схема RC-цепочки с источником теплового шума.

Величина спектральной плотности источников определяется общими термодинамическими соотношениями. Рассмотрим, например, цепь на Рис.2, состоящую из параллельно включенных сопротивления R и конденсатора емкостью C . Считая $e(t)$ гармоническим сигналом, с помощью обобщенного закона Ома можно рассчитать коэффициент передачи э.д.с. $e(t)$ в напряжение на конденсаторе $u(t)$. Тогда из соотношения (6) следует выражение для спектральной плотности флуктуаций напряжения на конденсаторе $S_U(f)$:

$$S_U(f) = \frac{1}{1 + (2\pi f\tau)^2} S_E, \quad (9)$$

где S_E - спектральная плотность э.д.с. $e(t)$, $\tau = RC$ - постоянная времени цепи.

В состоянии термодинамического равновесия при температуре T средняя энергия, запасенная в конденсаторе, определяется равенством:

$$\frac{C \langle u^2(t) \rangle}{2} = \frac{k_B T}{2}, \quad k_B - \text{постоянная Больцмана } (1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}). \quad (10)$$

Интегрирование спектральной плотности напряжения $S_U(f)$ по всем частотам и подстановка полученной величины мощности шумового напряжения $\langle u^2 \rangle$ в предыдущее соотношение дает выражения для спектральной плотности шумовой э.д.с. и, следовательно, шумового тока, связанных с сопротивлением, - формулу Найквиста:

$$S_E = 4k_B TR, \quad S_I = 4k_B T / R. \quad (11)$$

Можно показать, и это является основным содержанием теоремы Найквиста, что такое представление шумовой э.д.с. активного сопротивления описывает равновесные флуктуации в произвольной электрической цепи.

Формула Найквиста обобщается на случай любого двухполюсника с некоторым комплексным сопротивлением $Z(f)$. Тепловой шум двухполюсника представляется так же, как в случае активного сопротивления (Рис.1). Спектральные плотности шумовой э.д.с. и шумового тока соответственно равны:

$$\begin{aligned} S_E(f) &= 4k_B T \cdot \operatorname{Re}\{Z(f)\}, \\ S_I(f) &= 4k_B T \cdot \operatorname{Re}\{Z(f)\} / |Z(f)|^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Вид этих соотношений показывает, что тепловые флуктуации связаны с активным сопротивлением цепи. Реактивные элементы лишь преобразуют спектр флуктуаций.

Численный пример для RC-цепочки, показанной на Рис.2: при комнатной температуре, сопротивлении 1 кОм и емкости 10 пФ шумовое напряжение $u(t)$ имеет полосу частот $(1/2\pi\tau)$ 16 МГц, спектральную плотность в этой полосе $17 \cdot 10^{-18} \text{ В}^2/\text{Гц}$, мощность шума $4 \cdot 10^{-10} \text{ В}^2$ (среднеквадратичное отклонение 20 мкВ).

Приведенные выражения для теплового шума справедливы в классической области, когда средняя энергия тепловых колебаний намного больше энергии кванта электромагнитного излучения:

$$k_B T \gg hf, \quad h - \text{постоянная Планка } (6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{сек}).$$

При комнатной температуре (300К) равенству этих энергий соответствует частота $6 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$. Учет квантовых эффектов приводит к частотной зависимости спектральной плотности шумовой э.д.с. активного сопротивления.

Дробовой шум. Дробовой шум возникает, когда носители заряда случайно пересекают некоторый потенциальный барьер. При этом каждый носитель генерирует в цепи импульс тока, и суперпозиция этих импульсов образует флуктуирующий ток. Примерами являются флуктуации тока электронной лампы, обусловленные случайным выходом электронов из катода вследствие термоэлектронной эмиссии; флуктуации тока фотодиода из-за случайной генерации носителей под действием падающего излучения; флуктуации тока, протекающего через p-n переход, также имеют характер дробового шума. Термин «дробовой шум» происходит из-за аналогии этого явления шуму сыплющихся дробин.

Дробовой шум наряду со многими другими флуктуационными явлениями описывается с помощью модели импульсного случайного процесса. Протекающий в цепи ток $I(t)$ представляется в виде суперпозиции отдельных импульсов:

$$I(t) = \sum_K I_K(t - t_K), \quad (13)$$

где $I_K(t)$ - форма K -го случайного импульса тока, t_K - случайный момент его появления. Обычно предполагается, что все импульсы тока одинаковы: $I_K(t) = I_0(t)$. По крайней мере, в первом приближении это справедливо для примеров, рассмотренных выше.

Число импульсов N , возникающих на некотором интервале времени, случайно. Во многих реальных ситуациях (импульсы возникают равновероятно во времени, независимо друг от друга, и вероятность одновременного появления нескольких импульсов равна нулю) это число импульсов подчиняется распределению вероятности Пуассона:

$$P(N) = \frac{\langle N \rangle^N \exp(-\langle N \rangle)}{N!}. \quad (14)$$

Распределение Пуассона содержит единственный параметр – среднее число импульсов $\langle N \rangle$. Особенностью этого распределения является то, что дисперсия числа импульсов равна среднему числу импульсов:

$$\langle (N - \langle N \rangle)^2 \rangle = \langle N \rangle. \quad (15)$$

Среднее значение, дисперсия и спектральная плотность таких пуассоновских импульсных процессов определяются выражениями:

$$\langle I \rangle = \nu \int_{-\infty}^{\infty} I_0(t) dt, \quad \sigma_I^2 = \nu \int_{-\infty}^{\infty} I_0^2(t) dt, \quad S_I(f) = 2\nu |F(f)|^2, \quad (16)$$

где ν - средняя частота следования импульсов (среднее число импульсов, возникающих за единицу времени), $F(f)$ - Фурье-образ (спектр) импульса:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} I_0(t) \exp(-j2\pi f \cdot t) dt. \quad (17)$$

Эти выражения показывают, что вид спектральной плотности определяется спектром одиночного импульса. На частотах, много меньших ширины спектра импульса, спектральная плотность практически постоянна (шум является белым), и ее значение, как это следует из (16) и (17), равно

$$S_I(f) \cong S_I(0) = 2\nu |F(0)|^2 = 2 \langle I \rangle \int_{-\infty}^{\infty} I_0(t) dt. \quad (18)$$

Поскольку интеграл от тока по времени является зарядом q , прошедшим в цепи в результате действия одного импульса, последнее выражение принимает вид:

$$S_I(f) = 2q \langle I \rangle . \quad (19)$$

Это соотношение носит название формула Шотки.

Длительность импульсов тока и, тем самым, ширину спектра шума можно оценить как сумму характерного времени электронного процесса, вызывающего дробовой шум, (например, времени пролета электрона от катода к аноду в электронной лампе) и постоянной времени электрической цепи, в которую включен данный прибор. Для экспоненциально спадающего импульса с постоянной времени τ ширина спектра по уровню -3 дБ определяется соотношением $\Delta f = 1/2\pi\tau$.

Если длительность импульса намного превышает средний интервал между импульсами, величина тока в каждый момент времени является результатом действия большого числа независимых импульсов тока. Следовательно, справедлива центральная предельная теорема, и флуктуации тока $i(t) = I(t) - \langle I \rangle$ имеют гауссовское распределение вероятности (8).

Например, току 1 мА ($6 \cdot 10^{15}$ электронов/с) соответствует средний интервал между импульсами, вызванными прохождением отдельных электронов, равный $1.6 \cdot 10^{-16}$ с. При длительности импульса тока $1 \text{ нс} = 10^{-9}$ с, что соответствует полосе частот $1/2\pi\tau = 160 \text{ МГц}$, в среднем вклад в ток дают одновременно $6 \cdot 10^7$ электронов. В результате дробовой шум будет иметь белый спектр в полосе порядка 100 МГц и гауссовское распределение вероятности независимо от формы импульса тока. С другой стороны, при той же длительности импульсов и, следовательно, при той же полосе частот шума току 0.1 пА ($6 \cdot 10^8$ электронов/с) соответствует одновременное наложение всего 6 импульсов. Спектр шума останется прежним, а распределение вероятности уже будет зависеть от формы импульса тока.

Влияние дробового шума в электронных схемах зависит не только от тока, протекающего через прибор, но и от нагрузки, подключенной к прибору. Как правило, приборы и системы, генерирующие дробовой шум (электровакuumные приборы, фотодиоды, коллекторные переходы транзисторов) имеют внутреннее сопротивление, намного превышающее сопротивление нагрузки. На электрической схеме дробовой шум прибора (например, фотодиода) обычно представляют в виде источника тока, включенного параллельно внутреннему сопротивлению прибора (Рис.3).

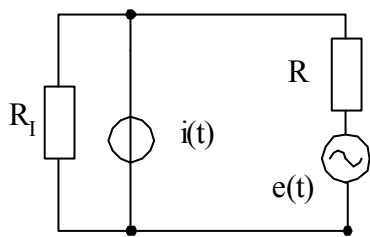


Рис.3. Схема с источником дробового шума, подключенным к нагрузке. Внутреннее сопротивление источника дробового шума R_1 намного больше сопротивления нагрузки R , поэтому тепловой шум источника не учитывается.

Шумовой ток $i(t)$ протекает через сопротивление нагрузки R и создает на ней флуктуирующее напряжение $Ri(t)$. Дробовой шум необходимо учитывать, если это напряжение по порядку равно или превышает тепловой шум нагрузки $e(t)$. Используя соотношения (11), (19) и считая, что дробовой шум создается потоком электронов ($q=1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл), можно получить, что при комнатной температуре (300 К) дробовой шум превышает тепловой, если средний ток прибора, протекая по сопротивлению нагрузки, создает на ней постоянное напряжение, превышающее 50 мВ.

Избыточные шумы. Тепловой и дробовой шумы, рассматривавшиеся выше, относят к фундаментальным типам флуктуаций. Механизм их возникновения хорошо изучен, и уровень флуктуаций предсказуем. В большинстве систем они определяют минимальную величину флуктуаций, которая может быть получена. Однако реальные системы часто генерируют шум, мощность которого превышает величину, ожидаемую для теплового и дробового шума. Эти добавочные флуктуации и называют избыточными. Из-за разнообразия механизмов возникновения, статистических свойств и условий проявления избыточных флуктуаций нет какой-то единой классификации этих шумов. Тем не менее, выделяют определенные типы шума, например, генерационно-рекомбинационный шум, шум токораспределения, взрывной шум, фликкерный шум и другие.

При рассмотрении избыточных шумов широко используется понятие о флуктуациях параметров системы. Например, в силу некоторых причин могут случайным образом изменяться емкость конденсатора или сопротивление резистора, высота потенциального барьера р-п перехода полупроводникового прибора. Если к электрической цепи, содержащей такие элементы, приложить напряжение, в цепи возникнут избыточные флуктуации тока.

Наиболее простой является модель равновесных флуктуаций сопротивления. Термин равновесные означает, что флуктуации сопротивления существуют вне зависимости от того, протекает ли по сопротивлению ток или нет, и что свойства этих

флуктуаций не зависят от тока. Если через такое флуктуирующее сопротивление пропустить постоянный электрический ток I_0 , на сопротивлении возникнут флуктуации напряжения

$$u(t) = I_0 \cdot r(t) , \quad (20)$$

где $r(t)$ - флуктуирующая составляющая полного сопротивления. Отсюда следует, что спектральная плотность избыточного шума определяется спектральной плотностью флуктуаций сопротивления:

$$S_U(f) = I_0^2 \cdot S_R(f) . \quad (21)$$

Мощность избыточного шума, вызванного флуктуациями сопротивления, пропорциональна квадрату протекающего тока, и это отличает его от дробового шума, имеющего линейную зависимость мощности от тока.

Физическими причинами флуктуаций сопротивления могут быть, например, флуктуации числа подвижных носителей в полупроводниковом материале из-за случайного характера процессов генерации/рекомбинации; флуктуации подвижности носителей из-за случайного рождения/уничтожения дефектов кристаллической решетки проводника, на которых происходит рассеяние носителей; случайный захват/освобождение носителей заряда ловушками, расположенными в обедненном слое p-n перехода, и другие.

Избыточный шум, вызванный флуктуациями параметров, в нелинейных элементах часто имеет другие зависимости мощности флуктуаций напряжения от тока. В качестве примера рассмотрим полупроводниковый диод, вольт-амперная характеристика которого описывается выражением:

$$I = I_0(\exp(\alpha U) - 1) , \quad (22)$$

I_0 - обратный ток насыщения диода, U - напряжение на p-n переходе, α - некоторая постоянная. Если чисто формально предположить, что параметры p-n перехода I_0 и α флуктуируют, и что ток диода I поддерживается постоянным, соответствующее шумовое напряжение δU при условии $I \gg I_0$ имеет вид:

$$\delta U = -[\ln(I / I_0) \cdot \delta \alpha / \alpha + \delta I_0 / I_0] / \alpha . \quad (23)$$

Сравнение с выражением (20) показывает, что шум, создаваемый флуктуациями δI_0 и $\delta \alpha$, имеет более слабую зависимость от тока, чем шум, создаваемый флуктуациями сопротивления. Этот пример демонстрирует, что зависимость избыточного шума от

тока может быть достаточно сложной. Детальное обсуждение избыточного шума в полупроводниковых диодах выходит за рамки данного описания.

Спектральные свойства избыточных шумов могут быть различными. Так, процессы генерации/рекомбинации, характеризуемые некоторой постоянной времени τ , дают частотную зависимость спектральной плотности, аналогичную выражению (9) для теплового шума RC-цепочки. Спектр такого вида называется спектром Лоренца и характеризует шум в релаксационной системе, имеющей одну постоянную времени.

Особое место занимает фликкерный шум или шум $1/f$. Частотная зависимость спектра этого шума имеет вид:

$$S(f) \propto 1 / f^\gamma \quad (24)$$

с показателем спектра γ , близким к единице. Такой вид спектральной плотности означает, что шум $1/f$ проявляется, главным образом на низких частотах. Необычность спектра заключается в том, что его интеграл по частоте (5) расходится, и, следовательно, мощность флуктуаций должна быть бесконечной. Реальным фактором, ограничивающим рост мощности шума на низких частотах, является конечная длительность измерения шума. В полупроводниковых усилителях зависимость типа $1/f$ прослежена вплоть до частот порядка 10^{-6} Гц.

Шум $1/f$ при тех или иных условиях наблюдается практически во всех электронных приборах и компонентах. Флуктуации этого типа также присутствуют в биологических, экономических, геофизических, астрофизических и других системах. Столь универсальный характер этого явления в настоящее время не объяснен. В электрических системах шум $1/f$ обычно связан с флуктуациями сопротивления. Физическими процессами, наиболее подходящими для объяснения шума на инфранизких частотах, являются захват носителей медленными ловушками в полупроводниках и рождение/уничтожение дефектов решетки в металлах. Модели, описывающие этот шум, в большинстве случаев основаны на предположении о суперпозиции шумовых релаксационных процессов, имеющих различные постоянные времени. Главная трудность таких теорий состоит в физическом обосновании распределения весовых коэффициентов, согласно которым должны складываться отдельные релаксационные процессы для получения спектра $1/f$.

Шумы усилителей. Усилители электрических сигналов, как и любые другие электронные устройства, содержат внутренние источники флуктуаций. Шумы действуют наряду с полезным сигналом и ухудшают его распознавание. Это особенно

существенно, когда величина сигнала мала, поэтому в первую очередь важны шумы, присутствующие во входной цепи усилителя.

Шумовые характеристики усилителей определяются многими факторами: конфигурацией усилителя, расположением и свойствами внутренних источников шума, режимом работы активных элементов, импедансом источника сигнала и т.д. Влияние этих факторов на шум, создаваемый усилителем, можно точно установить лишь для конкретной схемы усилителя. Однако на практике достаточно полное описание шумов усилителей дает упрощенная схема, показанная на Рис.4.

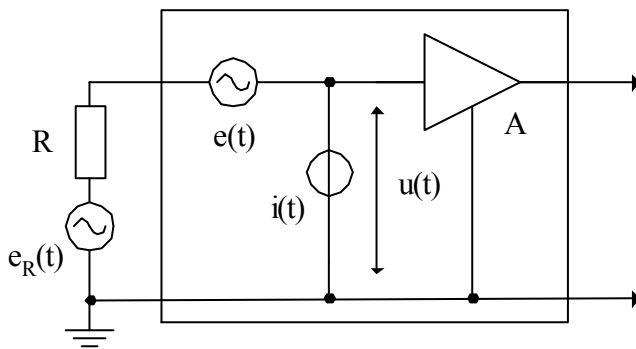


Рис.4. Схема входной цепи усилителя с источниками шумов. Пунктиром обведены элементы, относящиеся к усилителю. А - идеальный нешумящий усилитель с бесконечно большим входным сопротивлением.

Источник сигнала представлен генератором напряжения $e_R(t)$ и внутренним сопротивлением R , которое предполагается чисто активным. Реальный усилитель с входным сопротивлением, намного превышающим R , рассматривается в виде комбинации идеального, не шумящего усилителя и входных шумовых источников напряжения $e(t)$ и тока $i(t)$. Эти источники описывают реальные шумовые напряжения и токи, которые усилитель создает во входной цепи.

Всякий реальный источник сигнала помимо полезной составляющей производит некоторый шум. Идеальный источник с минимальным уровнем шума генерирует только тепловые флуктуации, определяемые величиной его внутреннего сопротивления. Качество усилителя с точки зрения его шумовой характеристики оценивается тем, насколько шум, вносимый усилителем, мал по сравнению с собственным шумом источника сигнала. Поэтому при рассмотрении шумов усилителя достаточно считать, что источник сигнала вырабатывает только тепловые флуктуации.

Напряжение $u(t)$, действующее на входе идеального усилителя, является суммой вкладов от всех генераторов схемы:

$$u(t) = e_R(t) + e(t) + Ri(t). \quad (25)$$

В предположении, что шумовые источники статистически независимы, спектральная плотность входного напряжения определяется суммой спектральных плотностей соответствующих слагаемых:

$$S_U(f) = 4k_B TR + S_E(f) + R^2 S_I(f) = 4k_B TR \cdot \left\{ 1 + \frac{S_E(f)}{4k_B TR} + \frac{RS_I(f)}{4k_B T} \right\}. \quad (26)$$

Фигурными скобками выделено выражение, показывающее, во сколько раз полный шум входной схемы превышает тепловой шум источника сигнала. Это отношение называется **коэффициентом шума усилителя**. Для идеального усилителя без внутренних шумов коэффициент шума равен единице.

Соотношение (26) показывает, что шум рассматриваемой схемы существенно зависит от сопротивления источника сигнала. Зависимости мощности шума и коэффициента шума от величины сопротивления схематически изображены на Рис.5.

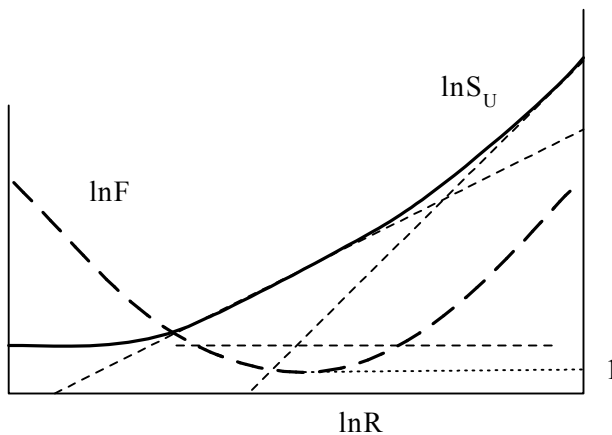


Рис.5. Качественные зависимости мощности шума на входе усилителя S_U и коэффициента шума усилителя F от сопротивления источника сигнала R . Пунктирными линиями обозначены асимптоты для участков с разной степенью зависимости мощности от сопротивления.

При малых значениях сопротивления доминирует шумовое напряжение усилителя $e(t)$. В этой области шум схемы практически не зависит от сопротивления источника сигнала и равен шуму усилителя с закороченным входом. При увеличении сопротивления, начиная со значения порядка $S_E(f)/4k_B T$, начинает преобладать тепловой шум источника сигнала, и мощность шума линейно растет вместе с сопротивлением. Шумы усилителя относительно невелики, и коэффициент шума усилителя близок к единице. При еще большем увеличении сопротивления, в области $R > 4k_B T/S_I(f)$ сказывается влияние шумового тока усилителя $i(t)$. Здесь мощность шума растет пропорционально квадрату сопротивления, и коэффициент шума ухудшается.

Область оптимальных сопротивлений – значений сопротивления, при которых коэффициент шума, близок к единице, определяется мощностью шумовых источников усилителя $e(t)$ и $i(t)$. Для усиления сигналов низкоомных датчиков предпочтительны усилители с малыми значениями шумового напряжения. Здесь более подходят

малошумящие усилители на биполярных транзисторах. При работе с высокоомными источниками необходимы усилители с минимальным шумовым током. В этом случае применяются усилители на полевых транзисторах.

Вследствие частотной зависимости спектральных плотностей шумовых источников $e(t)$ и $i(t)$ коэффициент шума и область оптимальных сопротивлений также зависят от частоты. В частности, на низких частотах коэффициент шума обычно ухудшается из-за фликкерных шумов. Для частот порядка нескольких килогерц типичные значения спектральных плотностей напряжения и тока малошумящих усилителей составляют: $1\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ и $0.1\text{пА}/\sqrt{\text{Гц}}$ - для усилителей на биполярных транзисторах, и $10\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ и $1\text{фА}/\sqrt{\text{Гц}}$ - для усилителей на полевых транзисторах. Приведены численные значения квадратного корня из спектральной плотности, что является общепринятой практикой.

Для сравнения шумовых напряжений и токов, действующих в системе, с уровнем равновесных флуктуаций системы удобно выражать шумовое напряжение или ток в виде **эквивалентного шумового сопротивления**. Величина шумового сопротивления определяется по формуле Найквиста (11) и равна сопротивлению, равновесное шумовое напряжение (ток) которого равен данному шумовому напряжению (току). Например, значение $1\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ соответствует равновесному напряжению сопротивления 60 Ом , а значение $1\text{фА}/\sqrt{\text{Гц}}$ - равновесному току сопротивления 17 ГОм .

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ШУМА

Измерение любой статистической характеристики шума включает операцию усреднения. При теоретическом анализе случайных процессов средние значения определяются путем усреднения по статистическому ансамблю реализаций: все допустимые значения усредняемой величины суммируются с весами, равными вероятности этих значений. Экспериментатор же располагает лишь одной реализацией $x(t)$, и определение средних значений производится путем усреднения по этой единственной реализации – **усреднения по времени**. Возможность такого усреднения основана на том, что случайный процесс обладает конечной памятью - временем корреляции. Поэтому одну реализацию в принципе можно разбить на отдельные независимые участки, и получить тем самым подобие статистического ансамбля. Процессы, для которых усреднение по времени (предполагается, что интервал

усреднения можно брать сколь угодно большим) эквивалентно усреднению по ансамблю, называются **эргодическими**.

Примером временного усреднения, важным для практики, служит определение мощности шума:

$$\overline{x^2} = \overline{x^2}(t, T) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} x^2(\theta) d\theta, \quad (27)$$

где t - начало интервала усреднения, T - длительность усреднения.

Если проводить эту процедуру для различных реализаций статистического ансамбля, получаемые значения средней по времени мощности будут отличаться друг от друга.

Среднее этих значений равно дисперсии шума σ^2 , вычисленной по ансамблю:

$\langle \overline{x^2} \rangle = \langle x^2 \rangle = \sigma^2$. Отклонение получаемых значений от величины дисперсии

σ^2 является **статистической ошибкой** измерения мощности $\Delta\sigma^2 = \overline{x^2} - \sigma^2$.

Величина ошибки зависит от соотношения длительности усреднения T и времени корреляции шума τ_k . Она будет небольшой по сравнению с величиной дисперсии σ^2 , если длительность усреднения намного превышает время корреляции. При выполнении этого условия среднеквадратичная относительная ошибка измерения мощности шума, имеющего постоянную спектральную плотность и полосу частот Δf , определяется выражением:

$$\Delta\sigma^2 / \sigma^2 = (1 / \Delta f T)^{1/2}, \quad (28)$$

Измерение спектральной плотности по существу является измерением мощности составляющих шума в достаточно узкой полосе частот, выделяемых с помощью фильтра, и последующем делением значения мощности на ширину полосы. Из выражения (28) видно, что улучшение спектрального разрешения (уменьшение ширины полосы частот) и уменьшение ошибки измерения спектральной плотности являются противоречивыми требованиями, и их соотношение выбирается из компромиссных соображений.

Операция усреднения по времени $\frac{1}{T} \int_t^{t+T} d\theta \dots$ в спектральном представлении является фильтром низких частот, который пропускает низкочастотные компоненты входного сигнала, включая постоянную составляющую, и подавляет высокочастотные, начиная с частоты порядка $1/T$. Для временного усреднения флуктуаций в принципе могут использоваться любые низкочастотные фильтры. В частности, при аналоговой

обработке сигналов часто применяются интегрирующие RC -цепочки. В этом случае выражение для относительной ошибки измерения мощности имеет вид:

$$\Delta\sigma^2 / \sigma^2 = (1/2\Delta f\tau)^{1/2}, \text{ где } \tau - \text{ постоянная времени цепочки.} \quad (29)$$

Функциональная схема измерения мощности шума показана на Рис.6. Она содержит: источник шумового сигнала, представленный генератором напряжения $e_R(t)$ и внутренним сопротивлением источника R , усилитель с регулируемым коэффициентом усиления K , фильтр, задающий полосу частот измерения шума Δf , квадратичный или линейный детектор, фильтр низких частот, выполняющий функцию усреднения, и выходной индикатор.

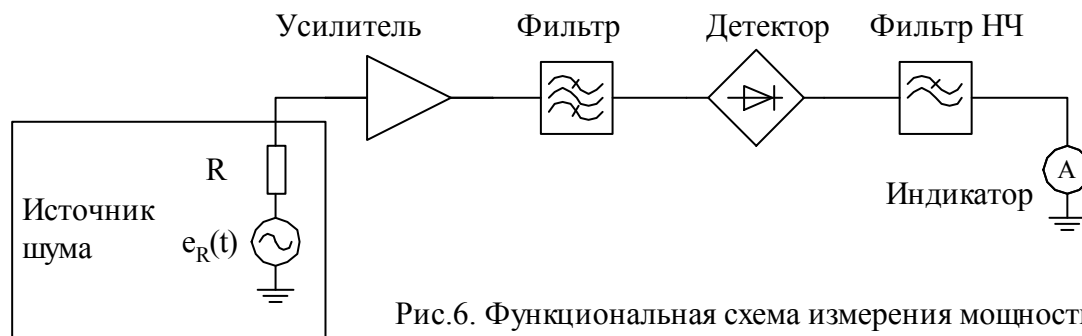


Рис.6. Функциональная схема измерения мощности шума.

Для квадратичного детектора (выходной сигнал детектора пропорционален квадрату входного сигнала) и в предположении, что спектральная плотность источника шума $S_R(f)$ постоянна в пределах полосы пропускания фильтра, показание индикатора A пропорционально спектральной плотности. В соответствии с (5), (6) его можно выразить в виде:

$$A = \alpha K^2 S_R(f) \Delta f = \beta K^2 S_R(f), \quad (30)$$

где α - постоянная, учитывающая нерегулируемые коэффициенты передачи фильтров, детектора и индикатора, $\beta = \alpha \Delta f$. Для линейного детектора (выходной сигнал детектора пропорционален модулю входного сигнала) и гауссовского шума показание A пропорционально квадратному корню из спектральной плотности:

$$A = \beta K \sqrt{S_R(f)}, \quad (31)$$

где β также является некоторой постоянной.

Значение постоянной β в выражении (30) или (31) можно определить, если заведомо известна спектральная плотность источника шумового сигнала. Обычно для калибровки используются специальные генераторы шума или тепловой шум измеряемой системы.

Для сравнения шумов, генерируемых различными источниками или одним и тем же источником при различных условиях, удобно использовать относительное измерение. Если входной шум со спектральной плотностью S_0 вызывает показание индикатора A_0 при величине коэффициента усиления K_0 , а шум со спектральной плотностью S вызывает показание индикатора A при величине коэффициента усиления K , то отношение этих спектральных плотностей (для измерителя с линейным детектором) определяется выражением:

$$S_0/S = (K A_0 / K_0 A)^2 . \quad (32)$$

Если одна из спектральных плотностей известна, тем самым определяется величина другой.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка состоит из трех электронных блоков – источников электрических шумов различного типа, и измерительного блока, с помощью которого регистрируется спектральная плотность шума.

Измерительный блок представляет собой узкополосный усилитель с детектором выходного сигнала. Основные узлы измерительного блока и органы управления представлены на Рис.7.

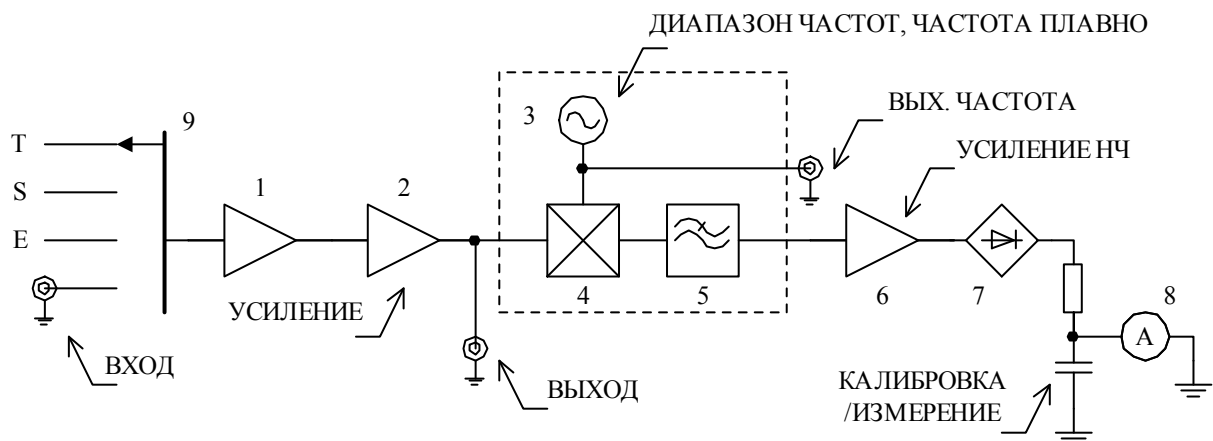


Рис.7. Схема измерительного блока. Пунктиром обведены элементы полосового фильтра. Стрелками указаны узлы схемы, к которым относятся соответствующие органы управления установкой.

Входной усилитель /1/ имеет постоянный коэффициент усиления, равный 60. С его выхода шумовой сигнал подается на усилитель /2/ с регулируемым коэффициентом усиления. Регулировка производится с помощью переключателя УСИЛЕНИЕ, имеющего 10 рабочих положений (0,1,...,9). При переключении на одну позицию

коэффициент усиления изменяется в 2 раза. В положении 0 коэффициент усиления равен 2, в положении 9 – равен 1024. Выходной сигнал регулируемого усилителя выведен на разъем ВЫХОД для визуального контроля с помощью осциллографа. Полоса частот усиления составляет 20 Гц – 25 кГц.

Усиленный шумовой сигнал поступает на фильтр, который выделяет спектральные составляющие сигнала, лежащие вокруг центральной частоты фильтра в полосе частот, примерно равной 50 Гц. Работа фильтра основана на преобразовании частоты входного сигнала. Фильтруемый шум и синусоидальное опорное напряжение, которое вырабатывает специальный генератор /3/, называемый гетеродином, подаются на аналоговый умножитель сигналов /4/. В результате умножения происходит сдвиг спектра шума вверх и вниз по частоте на величину, равную частоте гетеродина. В окрестности нулевой частоты оказываются спектральные составляющие входного шума, расположенные в окрестности частоты гетеродина. Эти составляющие выделяются фильтром низких частот /5/, который включен на выходе умножителя. Все устройство действует как фильтр с полосой пропускания, равной полосе пропускания фильтра низких частот (50 Гц), и имеющий центральную частоту фильтрации, равную частоте гетеродина. Изменяя частоту гетеродина, можно изменять частоту настройки фильтра.

Центральная частота измерительного блока перестраивается в диапазоне 0.1 кГц – 11 кГц, который перекрывается четырьмя поддиапазонами: 0.1 – 0.4 кГц, 0.3 – 1.2 кГц, 1.0 – 3.6 кГц, 3.3 – 11 кГц. Требуемый поддиапазон устанавливается с помощью переключателя ДИАПАЗОН ЧАСТОТ. В пределах каждого поддиапазона центральная частота плавно перестраивается регулятором ЧАСТОТА ПЛАВНО. Значение частоты настройки определяется по шкале регулятора частоты с помощью калибровочных кривых, прилагаемых к установке, или с помощью частотомера, измеряющего частоту гетеродина. Сигнал гетеродина выведен на разъем ВЫХ. ЧАСТОТА на задней стенке корпуса установки.

В результате фильтрации шума мощность сигнала на выходе фильтра уменьшается по сравнению с мощностью на входе. Для компенсации этого ослабления на выходе фильтра установлен усилитель низкой частоты /6/ с регулируемым коэффициентом усиления. Регулировка производится с помощью переключателя УСИЛЕНИЕ НЧ, имеющего 10 рабочих положений (0,1,...,9). При переключении на одну позицию коэффициент усиления изменяется в 2 раза. В положении 0 коэффициент усиления равен 2, в положении 9 – равен 1024.

Средняя амплитуда выделенных спектральных составляющих шума измеряется с помощью двухполупериодного выпрямителя /7/ и интегрирующей RC-цепочки. К выходу цепочки подключен стрелочный индикатор /8/. Переключатель КАЛИБРОВКА/ИЗМЕРЕНИЕ служит для изменения постоянной времени RC-цепочки, значения которой соответственно равны 1 сек. и 5 сек.

С помощью переключателя /9/ на входе измерительного блока к нему могут быть подключены встроенные в установку источники шумовых сигналов (положения переключателя Т, S, E) или внешний генератор (положение ВХОД).

Источник теплового шума (Т) представляет собой усилитель на биполярных транзисторах с коэффициентом усиления, равным 13, к входу которого подключен резистор (Рис.8).

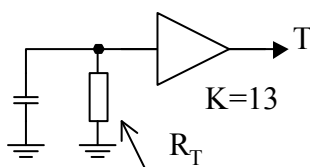


Рис.8. Упрощенная схема источника теплового шума. Используется операционный усилитель 140УД708, имеющий входной каскад на биполярных транзисторах.

Величина сопротивления изменяется с помощью переключателя R_T , имеющего 10 положений. Соответствующие значения сопротивлений приведены в таблице:

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_T , кОм	0	9.1	22	49	99	185	470	964	2360	5100

Входная емкость усилителя и паразитная емкость схемы, шунтирующие сопротивление, в сумме составляют порядка 10 пФ. При больших значениях сопротивления эта емкость заметно влияет на входной импеданс и, следовательно, на генерируемый шум в высокочастотном диапазоне установки.

Источник дробового шума (S) схематически показан на Рис.9.

Дробовой шум генерируется в коллекторном переходе транзистора. Для уменьшения влияния шумов, возникающих в области эмиттер-база, эмиттерный переход транзистора шунтирован конденсатором. Коллекторной нагрузкой транзистора является сопротивление величиной 47 кОм. Флуктуации коллекторного тока преобразуются на этом сопротивлении во флуктуации напряжения и затем усиливаются с коэффициентом 50.

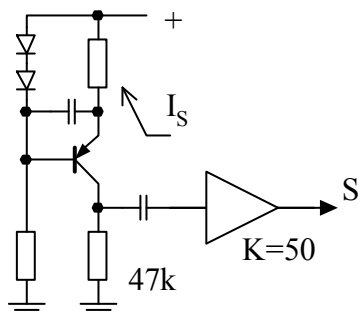


Рис.9. Упрощенная схема источника дробового шума. Используются транзистор КТ3107 и операционный усилитель 140УД17. С помощью диодов задается постоянное напряжение на базе транзистора. Коллекторный ток регулируется сопротивлением в цепи эмиттера..

Величина коллекторного тока изменяется с помощью переключателя I_S , имеющего 10 положений. Соответствующие значения тока приведены в таблице:

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I_S , мкА	1.3	2.5	5.2	7.4	13	25	47	100	175	225

Источник избыточного шума (E) представляет схема на Рис.10.

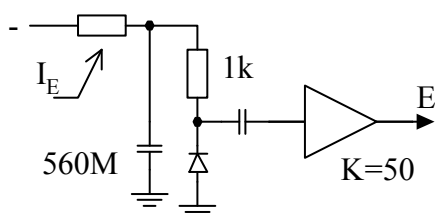


Рис.10. Упрощенная схема источника избыточного шума. Используются германиевый диод Д18 и операционный усилитель 140УД17.

Избыточный шум генерируется полупроводниковым диодом, смещенным в прямом направлении. Флуктуации напряжения на диоде усиливаются с коэффициентом 50. Ток, протекающий через диод, регулируется путем изменения величины сопротивления, включенного последовательно с диодом. Соответствующий переключатель I_E имеет 11 положений, значения напряжения на диоде и тока диода приведены в таблице:

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I_E , мкА	0	55	100	200	400	610	980	2000	3500	5800	9700
U , мВ	0	170	200	245	295	335	385	470	550	630	710

Конденсатор емкостью 560 мкФ, включенный в цепь питания диода, служит для подавления шума источника напряжения, от которого питается диод. В диапазоне частот установки емкостное сопротивление конденсатора мало, и поэтому можно считать, что нагрузкой диода по переменному току является постоянное сопротивление 1 кОм, соединенное последовательно с диодом.

УПРАЖНЕНИЯ

1. Общие указания по работе.

- Для оптимальной работы измерительного блока необходимо установить переключатель УСИЛЕНИЕ в такое положение, чтобы полный размах шумового сигнала на выходе усилителя составлял в 3 ... 5.5 В. Сигнал контролируется с помощью осциллографа, подключенного к разъему ВЫХОД. Значения сигнала, лежащие вне диапазона -3 В ... +3 В, приводят к перегрузке измерительного блока и искажению результата измерения. После регулировки УСИЛЕНИЯ переключатель УСИЛЕНИЕ НЧ устанавливается в положение, при котором стрелка индикатора отклоняется более чем на треть шкалы. Следует избегать зашкаливания стрелочного индикатора.

- При проведении измерений необходимо учитывать инерционность измерительного блока. Когда переключатель постоянной времени установлен в положение ИЗМЕРЕНИЕ, отсчет результата измерения должен производиться через 20 ... 30 сек после любого изменения режима установки. Положение КОНТРОЛЬ используется для быстрой и грубой оценки результата измерения. Этот режим удобно использовать при регулировке коэффициентов усиления.

- Поскольку исследуемые в работе шумы имеют широкие и плавно изменяющиеся с частотой спектры, измерение частотной зависимости спектральной плотности шума достаточно проводить на частотах, отличающихся в два раза. Например, можно выбрать следующий ряд частот измерения: 125, 250, 500 Гц, 1, 2, 4, 8 кГц.

- В измерительном блоке используется линейное детектирование шума, поэтому показание индикатора A пропорционально квадратному корню из спектральной плотности шума на частоте настройки f . Общее усиление шума определяется коэффициентами усиления блоков шумовых источников (K) и усилением измерительного блока. Вследствие этого соотношения (31), (32) можно представить в виде:

$$A = \beta 2^{M+L} \sqrt{S(f)}, \quad S_0/S = (2^{M+L} A_0 K / 2^{M_0+L_0} A K_0)^2. \quad (33)$$

Здесь M , L – положения переключателей УСИЛЕНИЕ и УСИЛЕНИЕ НЧ, $S(f)$ – спектральная плотность шума на входе усилителя соответствующего шумового источника.

- При графическом представлении результатов измерений следует использовать логарифмический масштаб по обеим осям графиков.

2. Оценка точности измерений шума.

Подайте на вход измерительного блока сигнал источника теплового шума (входной переключатель в положении Т). Установите нулевое сопротивление источника (переключатель Т в положении 0) и частоту измерения порядка 1 кГц. С интервалом 20 ... 30 сек. в режиме ИЗМЕРЕНИЕ запишите 10 ... 15 показаний индикатора. Определите среднее значение, среднеквадратичное отклонение и относительную ошибку измерения спектра шума.

3. Изучение теплового шума и шумовых параметров усилителя.

Подайте на вход измерительного блока сигнал источника теплового шума (входной переключатель в положении Т).

Установите частоту измерения в районе 500 Гц. Измерьте зависимость мощности шума от величины сопротивления R_T и постройте соответствующий график.

По данным, полученным для трех различных значений сопротивления ($R_T = 0$, 185 кОм, 5.1 МОм), с помощью соотношений (26), (33) определите спектральные плотности источников шумового напряжения и тока усилителя, рассчитайте соответствующие шумовые сопротивления. Пояснения по расчету:

При $R_T = 0$ шум на входе усилителя создается только источником шумового напряжения усилителя $e(t)$, а при $R_T = 185$ кОм шум обусловлен суммарным действием шумового напряжения усилителя и теплового шума этого сопротивления (шумовым током усилителя можно пренебречь). Отношение спектральных плотностей напряжения, действующего на входе усилителя в этих двух случаях, рассчитывается с помощью (26) и определяется отношением неизвестной спектральной плотности шумового напряжения усилителя $S_E(f)$ и известной спектральной плотности теплового шума сопротивления $R_T = 185$ кОм (формула Найквиста). Отсюда по результатам измерений с помощью (33) находится $S_E(f)$. При $R_T = 5.1$ МОм шум на входе усилителя создается тепловым шумом этого

сопротивления и шумовым током усилителя $i(t)$, протекающим по сопротивлению (шумовым напряжением усилителя можно пренебречь). Неизвестной величиной является спектральная плотность шумового тока усилителя $S_I(f)$. Отношение спектральной плотности напряжения, действующего на входе усилителя в этом случае (соотношение (26) при $R = 5.1 \text{ МОм}$), к найденной ранее спектральной плотности напряжения на входе усилителя (при $R_T = 0$ или 185 кОм) определяется по данным измерений с помощью (33). Тем самым находится $S_I(f)$.

Постройте зависимость коэффициента шума усилителя от сопротивления источника сигнала. Учитывая усиление в блоке источника теплового шума, найдите значение постоянной измерительной установки β (соотношение (33)).

Для трех значений сопротивления, указанных выше, измерьте зависимости спектральной плотности шума усилителя от частоты. С помощью полученных данных определите качественно, как изменяется зависимость «коэффициент шума – сопротивление» с изменением частоты.

4. Изучение дробового шума.

Подайте на вход измерительного блока сигнал источника дробового шума (входной переключатель в положении S).

Установите частоту измерения примерно 1 кГц . Измерьте зависимость шума от тока I_S . Для тока в районе 100 мкА измерьте зависимость спектральной плотности шума от частоты. Убедитесь, что шум белый.

Рассчитайте ожидаемую величину шума и сравните с измеренной величиной. Флуктуирующий ток со спектральной плотностью S_I , определяемой формулой Шотки (соотношение (19), q – заряд электрона) протекающий по сопротивлению нагрузки R (47 кОм) должен создавать на входе усилителя флуктуации напряжения со спектральной плотностью $R^2 S_I$. Используя значение постоянной измерительной установки β , полученное в предыдущем упражнении, с помощью соотношений (33) определите по результатам измерений спектральную плотность напряжения на входе усилителя и сравните с расчетным значением. Для нахождения спектральной плотности можно также использовать относительное измерение. Для сравнения берутся результаты измерения теплового шума в предыдущем упражнении, для которых спектральная плотность входного шума уже найдена.

5. Изучение избыточного шума.

Подайте на вход измерительного блока сигнал источника избыточного шума (входной переключатель в положении Е).

Установите частоту измерения в районе 100...200 Гц. Измерьте зависимость шума от тока I_E . Для максимального тока I_E измерьте зависимость спектральной плотности шума от частоты.

Покажите, что наблюдаемые флуктуации нельзя объяснить тепловым и дробовым шумами. Для этого определите по результатам измерений величину спектральной плотности (аналогично предыдущему упражнению) и сравните ее с ожидаемыми значениями для теплового и дробового шумов. Сравните полученные токовые и частотные зависимости спектральной плотности шума с зависимостями, ожидаемыми для теплового и дробового шумов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. - М.: Наука, 1981.
2. Ван дер Зил. А. Шумы при измерениях. - М.: Мир, 1979.
3. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах. - М.: Мир, 1986.
4. Робинсон Ф.Н.Х. Шумы и флуктуации в электронных схемах и цепях. – М.: Атомиздат, 1980.