



Теория информации

(теоретические основы информатики)

Шумы в каналах связи, усилителях, устройствах обработки информации.

МОСКВА, 2012

Содержание

1. Основные понятия
2. Отношение сигнал/шум
3. Единицы измерения шумов
4. Типы шумов
5. Дробовые шумы
6. Тепловые шумы
7. Фликкер шумы
8. Шумы лавинного пробоя
9. Цвет шума
10. Белый шум
11. Розовый шум
12. Красный и коричневый шум
13. Контрольные вопросы
14. Литература

Основные понятия.

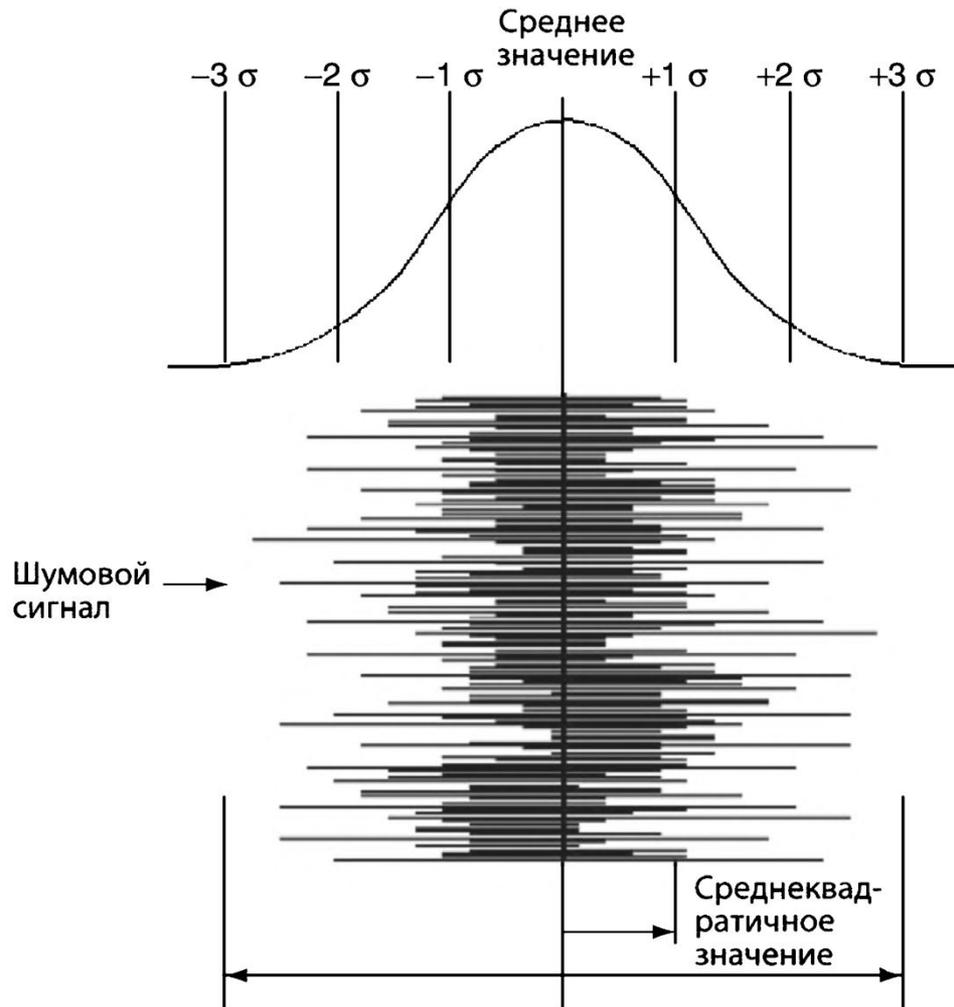
Шумы — это чисто случайные сигналы, мгновенное значение которых или фазу невозможно предсказать во времени. Шумы могут генерироваться внутри ОУ или связанными с ним пассивными элементами, или попадать в схему из внешних источников. Обычно доминируют шумы из внешних источников

Когда все источники входных сигналов отключены, а выход нагружен на соответствующую нагрузку, уровень шумов, называемый уровнем собственных шумов, определяет минимальный сигнал, при котором можно использовать схему. Целью разработчика является создать такую схему, в которой обрабатываемые сигналы находятся выше уровня собственных шумов, но ниже уровня, при котором они ограничиваются схемой.

Так как источники шума создают напряжение, изменяющееся во времени случайным образом, шумы могут быть описаны только функцией плотности вероятности. Наиболее широко для описания плотности вероятности шумов используется функция Гаусса.

Основные понятия. Гауссовское распределение амплитуды шумов

В функции вероятности Гаусса имеется среднее значение амплитуды, вероятность которой наиболее велика. При амплитуде шума выше или ниже среднего значения вероятность спадает, образуя график колоколообразной формы, симметричный относительно центрального значения



Символом σ обозначается стандартное отклонение в гауссовском распределении, которое равно среднеквадратичному значению напряжения или тока шума. Мгновенное значение напряжения шума находится в пределах $\pm\sigma$ в течение 68% времени наблюдения. Если требуется большая или меньшая точность, для $\pm 2\sigma$ эта вероятность равна 95.4%, а для $\pm 3\sigma$ — 99.94%. Символ σ^2 обозначает среднеквадратичное отклонение от среднего значения. Применительно к току и напряжению шумов их среднеквадратичное отклонение обозначается как i^2 и e^2 .

Отношение сигнал/шум

Когда все источники входных сигналов отключены, а выход нагружен на соответствующую нагрузку, уровень шумов, называемый уровнем собственных шумов, определяет минимальный сигнал, при котором можно использовать схему. Целью разработчика является создать такую схему, в которой обрабатываемые сигналы находятся выше уровня собственных шумов, но ниже уровня, при котором они ограничиваются схемой.

Отношение сигнал/шум является важнейшей шумовой характеристикой. Это отношение определяется выражением $S_{(f)}/N_{(f)}$
Где $S(f)$ - среднеквадратичное напряжение сигнала, $N(f)$ среднеквадратичное напряжение шума

Когда в схеме присутствует несколько источников шума, суммарное среднеквадратичное напряжение шума равно квадратному корню из суммы квадратов среднеквадратичных значений напряжений всех источников шума:

$$E_{\text{TOTALrms}} = \sqrt{e_{1\text{rms}}^2 + e_{2\text{rms}}^2 + \dots + e_{n\text{rms}}^2}$$

Таким образом, шумовое напряжение от двух источников с одинаковым среднеквадратичным напряжением при суммировании увеличивается на $20 \lg(2.83/2) = 3.01$ дБ

Единицы измерения шумов

Шум обычно указывается в виде спектральной плотности, имеющей размерность среднеквадратичного значения в вольтах или амперах, делённого на корень квадратный из герц: В/л/Гц или А/л/Гц. Таким образом, для определения напряжения шумов необходимо знать, в каком частотном диапазоне

они должны учитываться.

Например, для усилителя, имеющего спектральную плотность шумов $2.5 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$, используемого в звуковом диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц с коэффициентом усиления 40 дБ, выходное напряжение равно 1 В (0 дБВ). Квадратный корень из полосы частот (20000 Гц ... 20 Гц) равен $141.35 \text{ Гц}^{1/2}$. Умножение этого числа на спектральную плотность даёт эквивалентное шумовое напряжение на входе 353.38 нВ. На выходе напряжение шумов на 40 дБ

(т. е. в 100 раз) больше, т. е. 35.3 мкВ. Отношение сигнал/шум в этом случае равно $20 \lg(1 \text{ В}/35.3 \text{ мкВ}) = 20 \lg(28329) = 89 \text{ дБ}$. Таким образом, данный усилитель обладает прекрасными шумовыми характеристиками для применения в звуковом диапазоне частот. Однако следует помнить, что шумы пассивных компонентов и внешних источников могут ухудшить шумы системы в целом.

Кроме того, на низких частотах проявляется так называемый фликкер-эффект, сопровождающийся увеличением шума при снижении частоты

Типы шумов

Существует пять основных типов шумов:

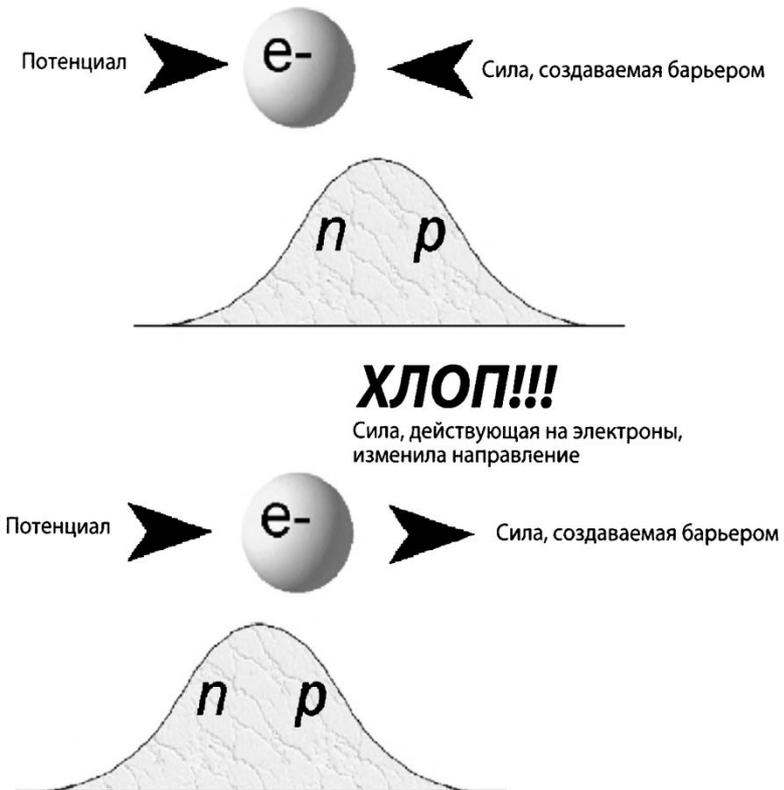
1. Дробовые шумы.
2. Тепловые шумы.
3. Шумы, вызываемые фликкер-эффектом (мерцательные шумы).
4. Импульсные шумы (телеграфный шум).

В большинстве случаев разделить их влияние не представляется возможным. Но знание основных причин их возникновения может помочь разработчику оптимизировать конструкцию и минимизировать шумы в требуемом диапазоне частот. Разработка малошумящих схем требует также поиска определённого баланса между внутренними и внешними источниками шума.

Дробовые шумы

Дробовые шумы, также (иногда называемые квантовыми), вызываются случайными флуктуациями в движении носителей зарядов в проводниках. Другими словами, течение электрического тока является неоднородным.

Электрический ток создаётся электронами, движущимися под воздействием разности потенциалов. Когда на пути своего движения электроны встречают барьеры. Пересечение электронами барьера определяется вероятностными законами, т. е. лишь какая-то их часть в тот или иной период времени пересекает барьер. По этой причине число электронов, пересекающих барьер за единицу времени, оказывается непостоянным. На схеме примерно показано влияние барьера на скорость движения электрона (т.е. ток). Совокупный эффект от неравномерного во времени пересечения барьера электронами и создаёт дробовой шум. Усиленный дробовой шум в диапазоне звуковых частот напоминает звук дроба, сыплющейся на бетонный пол.



Дробовые шумы (особенности)

Дробовой шум имеет следующие особенности:

- Он возникает только при протекании тока. Если нет тока, нет и этого вида шума.
- Ток дробового шума не зависит от температуры.
- Спектральная плотность дробового шума не зависит от частоты, т. е. его среднеквадратичное значение в фиксированной полосе частот одинаково на любом частотном отрезке.
- Дробовой шум проявляется при протекании тока через любой проводник (а не только полупроводник). В проводниках барьеры образуются за счёт любых примесей и неоднородностей. Уровень дробового шума в металлах мал из-за малой относительной величины барьеров. В полупроводниках дробовой шум выражен намного сильнее.

Среднеквадратичное значение дробового шума:
$$I_{SH} = \sqrt{(2qI_{DC} + 4qI_0)B},$$

где q — заряд электрона (1.6×10^{-19} Кл), I_{DC} — средний прямой постоянный ток в амперах, I_0 — обратный ток насыщения в амперах, B — полоса частот в герцах. Если р-л-переход смещён в прямом направлении, I_0 равен нулю, и второй член исчезает. Можно рассчитать динамическое сопротивление р-л-перехода и среднеквадратичное напряжение дробовых шумов:

$$r_d = \frac{kT}{qI_{DC}}. \quad E_{SH} = kT \sqrt{\frac{2B}{qI_{DC}}},$$

где k — постоянная Больцмана ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/Кл), q — заряд электрона ($1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл),
 T — температура в Кельвинах, I_{DC} — средний прямой постоянный ток в амперах,
 B — полоса частот в герцах

Дробовые шумы (пример)

Например, если через р-л-переход при комнатной температуре течёт ток 1 мА, дробовой шум в звуковом диапазоне частот равен:

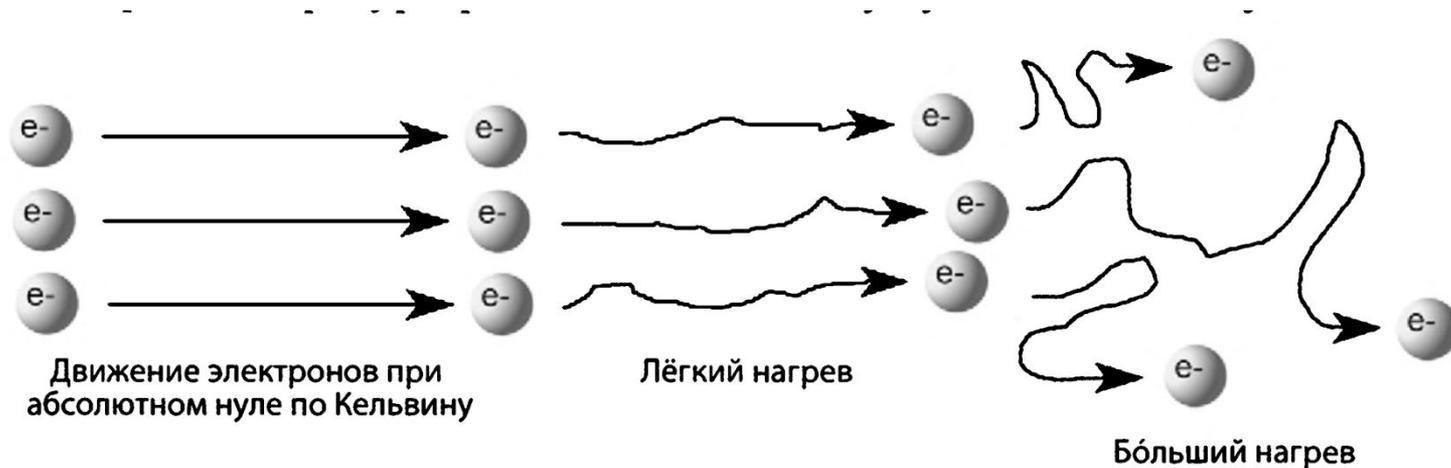
$$E_{SH} = 1.38 \times 10^{-23} \times 298 \sqrt{\frac{2(20000 - 20) B}{(1.6 \times 10^{-19}) \times (1 \times 10^{-3})}} = 65 \text{ нВ} = -144 \text{ дБВ.}$$

Т.е. шумы в этом примере малы и не представляют значительной проблемы. Напряжение дробовых шумов обратно пропорционально току, т.е. напряжение шумов уменьшается при увеличении тока и увеличивается при его уменьшении. В данном примере при уменьшении тока в 100 раз напряжение дробового шума увеличивается в 10 раз, т. е. на 20 дБ:

$$E_{SH} = 1.38 \times 10^{-23} \times 298 \sqrt{\frac{2(20000 - 20)}{(1.6 \times 10^{-19}) \times (1 \times 10^{-5})}} = 650 \text{ нВ} = -124 \text{ дБВ.}$$

Тепловые шумы

Тепловые шумы (шумы Джонсона) генерируются тепловым движением электронов в проводниках. Чем сильнее нагрет проводник, тем больше он шумит. Электроны никогда не бывают в покое. Они всегда движутся. Случайное тепловое движение электронов накладывается на их упорядоченное движение под воздействием разности потенциалов. Тепловой шум исчезает только при температуре, равной абсолютному нулю. Нижняя картинка иллюстрирует движение шумов под действием разности потенциалов и теплового воздействия.



Подобно дробовому шуму, спектральная плотность теплового шума не зависит от частоты (это называется белый шум), но к тому же не зависит от тока.

Тепловые шумы (расчетные соотношения)

При частотах ниже 100 МГц для напряжения и тока шума справедливы соотношения Найквиста:

$$E_{\text{ТН}} = \sqrt{4kTRB},$$

$$I_{\text{ТН}} = \sqrt{\frac{4kTRB}{R}}.$$

где $E_{\text{ТН}}$ — среднеквадратичное напряжение шума в вольтах, $I_{\text{ТН}}$ — среднеквадратичный ток шума в амперах, k — постоянная Больцмана ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), T — температура в Кельвинах, B — полоса частот в герцах, R — сопротивление в омах.

Тепловой шум резистора пропорционален его сопротивлению и температуре. По этой причине важно избегать использования во входных цепях усилителей с высоким коэффициентом усиления высокоомных резисторов и повышенной температуры этих цепей.

Тепловые шумы (пример)

Напряжение шума у резистора номиналом 100 кОм при 25°C в диапазоне звуковых частот равно:

$$E_{\text{ТН}} = \sqrt{4kTRB} = \sqrt{1.38 \times 10^{-23} \times 298 \times 100000 \times (20000 - 20)} = \\ = 5.73 \text{ мкВ} = -104.8 \text{ дБВ.}$$

Уменьшение температуры снижает шум не очень сильно (пока речь не идёт о криогенных температурах), а уменьшение сопротивления резистора, например, до 1 кОм (т. е. в 100 раз) снижает тепловой шум на 20 дБ. Увеличение сопротивления, например, до 10 МОм увеличивает тепловой шум до -84.8 дБ, т. е. до уровня, который может оказаться заметным в аудиосистеме с разрешением 16 бит. Шумы от нескольких резисторов суммируются в соответствии с законом, описанным в разделе 12.2.4 (как корень квадратный из суммы квадратов шумовых напряжений каждого источника). Поэтому следует остерегаться применения во входных цепях усилительных схем высокоомных резисторов. Особенно часто проблема теплового шума резисторов возникает в портативной переносной радиоаппаратуре, где из-за необходимости снижения потребляемой мощности приходится использовать довольно высокоомные резисторы.

Фликкер-шумы

Фликкер-шум также называют **шумом 1/f**. Его возникновение является одной из старейших из нерешённых проблем физики. Он проявляется во всех активных и многих пассивных электронных компонентах. Он связан с дефектами в кристаллической структуре полупроводников, и уменьшить его может совершенствование технологического процесса.

Фликкер-шум имеет следующие особенности:

- Он увеличивается при уменьшении частоты.
- Он связан с постоянным током, протекающим через электронный прибор.
- Мощность шумового сигнала остаётся постоянной для каждой декады (или октавы):

$$E_n = K_e \sqrt{\left(\ln \frac{F_{\text{MAX}}}{F_{\text{MIN}}}\right)}, \quad I_n = K_i \sqrt{\left(\ln \frac{F_{\text{MAX}}}{F_{\text{MIN}}}\right)},$$

где K_e и K_i — коэффициенты пропорциональности, представляющие собой фликкер-шум на частоте 1 Гц (в вольтах или амперах), F_{MAX} и F_{MIN} — максимальная и минимальная частоты в герцах.

Импульсные шумы

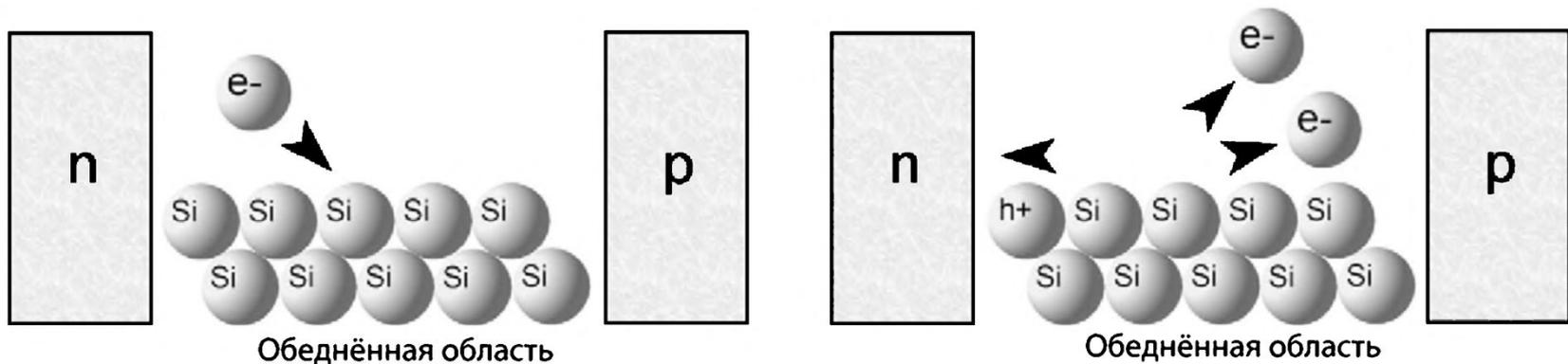
Возникновение импульсных шумов (иногда их называют телеграфными) может быть обусловлено разными причинами, например, несовершенством кристаллической структуры полупроводниковых материалов и влиянием ионов тяжелых металлов.

Они представляют собой отдельные высокочастотные помехи. Частота их следования может меняться, а амплитуда остаётся постоянной и в несколько раз превышает напряжение теплового шума. После усиления в звуковом диапазоне импульсные шумы создают в громкоговорителе звуки, напоминающие хлопки при приготовлении попкорна, поэтому (их иногда называют шумы попкорна).

Снижение импульсных шумов достигается путём совершенствования полупроводниковой технологии. Современные технологические процессы, как правило, исключают возникновение импульсных шумов.

Шумы лавинного пробоя

Шумы лавинного пробоя возникают в р-п-переходах при их обратном смещении, когда напряжение достигает уровня, соответствующего пробоем р-л-перехода. Под воздействием сильного электрического поля в обеднённой области перехода электроны приобретают кинетическую энергию, достаточную для порождения электронно-дырочных пар при столкновениях с атомами кристаллической решетки. Эти столкновения носят случайный характер и создают случайную последовательность импульсов тока, как в случае импульсных шумов, но намного более интенсивную. На рисунке показана схема генерации носителей при их лавинном умножении.



Амплитуду шумов лавинного пробоя предсказать трудно, так как она сильно зависит от полупроводникового материала и конструктивных особенностей р-л-перехода. Шумы, обусловленные лавинным пробоем р-л-переходов, исключают возможность использования в усилителя стабилитронов (принцип которых основан на использовании ветви лавинного пробоя).

Цвет шума

В реальных усилителях обычно проявляются шумы разных типов, и их трудно различить между собой. Поэтому для их описания часто используют цвета. Цвет шума связан по грубой аналогии с цветом света и имеет отношение к частотному распределению компонент шума.

Для описания шума используется много цветов, некоторые из которых имеют отношение к реальному миру, в то время как другие скорее связаны с областью психоакустики.

Белый шум находится в середине спектра, который простирается от пурпурного до коричневого. Эти цвета связаны с частотным распределением шумовой мощности, как это показано в таблице.

Цвет	Зависимость мощности от частоты
Пурпурный	f^2
Синий	f
Белый	1
Розовый	$1/f$
Красный/коричневый	$1/f^2$

Цвет шума (продолжение)

Между этими основными цветами шума имеется бесконечное число вариаций. Возможны также шумы в узкой полосе частот или даже на одной частоте. Такие шумы обычно связаны с воздействием на систему внешних источников помех.

Вообще-то шумов с чистыми цветами нет. На высоких частотах все шумы теряют мощность и становятся розоватыми. Шумы ОУ проявляются в зоне от белого до красно-коричневого цвета (см нижний рисунок)

	Белый	Розовый	Красный	Коричневый
Спектр частот	1	$1/f$ -3 дБ/окт		$1/f^2$ -6 дБ/окт
Тип шумов	Тепловой шум Джонсона	Фликкер-шум		Броуновский, лавинный*, импульсный*

* Приблизительно

Белый шум

Белый шум — это шум, у которого спектральная плотность тока или напряжения остаётся постоянной при изменении частоты.

Это название ведёт своё происхождение от белого света, в котором в равном количестве присутствуют все цвета.

График зависимости спектральной плотности белого шума от частоты представляет собой ровную горизонтальную линию.

Импульсный и тепловой шум почти белые. Почти, потому что по определению белый шум имеет бесконечную энергию при бесконечно широкой полосе частот.

На самом деле при повышении частоты белый шум становится розоватым. Примерами белого шума являются шум дождя и шум в громкоговорителе радиоприёмника, настроенного на неработающую радиостанцию.

Розовый шум

Розовый шум является шумом с зависимостью спектральной плотности от частоты вида $1/f$ исключая постоянный ток.

Для этого шума характерно постоянство энергии в пределах каждой октавы (или декады) изменения частоты. Это означает, что спектральная плотность уменьшается при увеличении частоты по логарифмическому закону.

Розовый шум широко распространён в природе, и множество случайных процессов подчиняются закону $1/f$.

Примером розового шума является фликкер-шум. Закон $1/f$ означает, что спад напряжения шума происходит при увеличении частоты со скоростью 3 дБ на октаву.

Красный и коричневый шумы

Красный шум — не очень распространённый термин для обозначения типа шума. Во многих литературных источниках используется термин «коричневый шум», которому и приписывают свойства красного. Но это скорее вопрос эстетики — если использовать термин «коричневый шум», то тогда розовый шум следовало бы называть бронзовым (жёлто-коричневым). А уж если принято название «розовый шум», то следующий по цветовому спектру оказывается красный. Хотя есть и объяснение термину коричневый шум — закономерность $1/f^2$ характерна для шумов, создаваемых броуновским движением, открытым Робертом Броуном (Robert Brown), фамилия которого переводится как «коричневый».

Спектральная плотность этого шума спадает с ростом частоты со скоростью -6 дБ на октаву. В природе красный/коричневый шум проявляется, например, в акустических характеристиках больших объёмов воды.

Импульсные шумы и шумы лавинного пробоя иногда аппроксимируют характеристикой красного/коричневого шума. Но корректнее всё же их представлять как розовые шумы.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные типы шумов и физические причины, приводящие к их возникновению
2. Как отличаются спектральные характеристики основных типов шумов
3. В каких единицах измеряется отношение сигнал/шум
4. Что характеризует, как измеряется и рассчитывается коэффициент шумов
5. Зависят ли шумы усилителя от его режима работы
6. Зависят ли шумы передатчика от его режима работы
7. Можно ли работать в каналах передачи информации, в которых отношения уровень шумов превышает уровень сигнала

Литература

1. Брюс Картер и Рон Манчини. Операционные усилители для всех. М. Изд. дом Додэка-XXI. 2011. 544 с.

КОНЕЦ ТЕМЫ