

Лит.: Цидильковский И. М., Зонная структура полупроводников, М., 1978; Аскеров Б. М., Электронные явления переноса в полупроводниках, М., 1985. И. П. Крылов.

**ШУМ**—беспорядочные колебания (*флуктуации*) разл. физ. природы, отличающиеся сложной временной и спектральной структурой. В радиоэлектронике под Ш. принято понимать любые нежелательные возмущения, как правило, аддитивно накладывающиеся на полезный сигнал и искажающие его передачу, приём или индикацию. В зависимости от физ. природы Ш. подразделяются на акустические и электрические.

**Акустический шум.** Источником акустич. Ш. могут быть любые нежелательные механич. колебания в твёрдых, жидких и газообразных средах. Различают механич. Ш., вызываемый вибрацией, соударениями твёрдых тел (Ш. станков, машин и т. п.); аэро- или гидродинамич. Ш., возникающий в турбулентных потоках газов или жидкостей в результате флуктуаций давления (напр., Ш. в струе реактивного двигателя); термодинамич. Ш., обусловленный флуктуациями плотности газа (напр., в процессе горения), а также резким повышением давления (напр., при взрыве, электрич. разряде); кавитац. Ш., связанный с захлопыванием газовых полостей и пузырьков в жидкостях (*кавитация*). Акустич. Ш. (напр., авиац. и ракетных двигателей)—источник НЧ-помех в работе радиоэлектронных устройств и одна из причин нарушения их работоспособности. В ряде случаев акустич. Ш. служит источником информации, т. е. выполняет роль сигнала. Так, по Ш. подводных лодок и надводных судов осуществляют их пеленгацию; шумоподобные сигналы используются в радиоэлектронике для разл. измерений.

**Электрический шум.** К электрич. Ш. относятся нежелательные возмущения токов, напряжений или напряжённости эл.-магн. полей в радиоэлектронных устройствах. Различают Ш. регулярные (т. е. детерминированные, предсказуемые) и флуктуационные (случайные, непредсказуемые). Примеры регулярных Ш.—фон перем. тока цепей питания радиоэлектронных устройств, посторонние по отношению к рассматриваемому устройству ВЧ-помехи. Примеры флуктуац. Ш.—электрич. Ш., обусловленные неравномерной эмиссией электронов в эл.-вакуумных приборах (дробовой Ш.), неравномерностью процессов генерации и рекомбинации носителей заряда в полупроводниковых приборах, тепловым движением носителей заряда в проводниках (тепловой Ш.), тепловым излучением Земли, земной атмосферы, Солнца и т. д.

По положению источника Ш. относительно рассматриваемого устройства электрич. Ш. подразделяются на внешние и внутренние (собственные). По происхождению Ш. подразделяются на естественные и технические. Естеств. Ш. обусловлены дискретным строением вещества и статистич. характером протекающих в нём явлений. К таким явлениям относятся тепловые движения носителей заряда, процессы рекомбинации, ионизации, прохождение частиц через потенц. барьер и т. п. Примеры естеств. Ш.: собственные тепловые флуктуации тока в проводниках; тепловые флуктуации внеш. эл.-магн. излучения, поступающего в антенну радиоприёмного устройства; дробовой Ш. в электровакуумных приборах (ЭВП). В силу статистич. характера процессов, порождающих естеств. Ш., такие Ш. принципиально неустраняемы. Техн. Ш.—следствие конструктивно-технол. несовершенства радиоэлектронных устройств. К таким Ш. относятся, напр., Ш. токораспределения в ЭВП, фон перем. тока цепей питания, Ш. вторичной электронной эмиссии, контактные, вибрац. Ш. Вредное влияние техн. Ш. на качество работы устройства может быть устранено или значительно ослаблено конструктивными и технол. приёмами.

Наиб. важное значение в радиоэлектронике имеют собств. флуктуац. Ш., определяющие *шумовую температуру* или *шума коэффициент* активных и пассивных четырёхполюсников. При наличии таких Ш. разл. физ. величины (ток, разность потенциалов и др.) являются случайными процессами, т. е. такими ф-циями времени  $x(t)$ , значения к-рых при каждом  $t$  случайны (непредсказуемы). Неслучай-

ная составляющая  $\bar{x}(t)$  процесса  $x(t)$  получается статистич. усреднением  $x(t)$  по множеству возможных  $x$  при  $t = \text{const}$ . Разность  $\xi(t) = x(t) - \bar{x}(t)$  наз. флуктуацией величины  $x(t)$  или, если  $\bar{x}(t)$ —полезный сигнал, флуктуационным Ш. Важнейшей энергетич. характеристикой флуктуац. Ш., необходимой при их теоретич. и эксперим. описании, является спектральная плотность Ш., к-рая вводится след. образом. Пусть  $\xi(\omega)$ —случайная ф-ция частоты  $\omega$ , связанная с  $\xi(t)$  преобразованием Фурье

$$\xi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \xi(t) e^{i\omega t} dt,$$

$\xi^*(\omega)$ —ф-ция, комплексно сопряжённая с  $\xi(\omega)$ . Тогда спектральная плотность  $S_{\omega}(\xi)$  флуктуации  $\xi(t)$  на частоте  $\omega$  может быть определена из равенства

$$\overline{\xi(\omega)\xi^*(\omega')} = 2\pi S_{\omega}(\xi)\delta(\omega - \omega'),$$

где  $\delta(\omega - \omega')$ —дельта-функция Дирака; горизонтальная черта над произведением слева означает усреднение по множеству значений  $\xi(\omega)$ .

К наиб. распространённым разновидностям естеств. электрич. Ш. в радиоэлектронных устройствах относятся тепловой, дробовой и фликкерный Ш. Тепловой Ш. в электрич. цепях обусловлен хаотическим тепловым движением носителей заряда (электронов проводимости) в металлич. проводниках. Тепловой Ш. приводит к флуктуации напряжения  $U$  на зажимах проводника (двухполюсника). Эти флуктуации представляют собой стационарный случайный процесс, подчиняющийся *Гаусса распределению*. Спектральная плотность напряжения  $S_{\omega}(U)$  теплового Ш. связана с импедансом  $Z(\omega)$  двухполюсника и его темп-рой  $T$  след. соотношением (Найквиста формула):

$$S_{\omega}(U) = 2kT \operatorname{Re} Z(\omega),$$

где  $k$ —постоянная Больцмана,  $\operatorname{Re}$ —обозначение вещественной части комплексного импеданса двухполюсника (т. е. его активного сопротивления). Хотя тепловой Ш. возникает только в элементах, обладающих активным сопротивлением, наличие реактивных элементов в двухполюснике может изменить спектр флуктуаций. Ф-лу Найквиста можно применять к системам с распределёнными параметрами, если такую систему представить эквивалентной квазистационарной цепью. Так, при расчёте собственных тепловых Ш. в *антенне* (без учёта потерь) в ф-ле Найквиста под  $\operatorname{Re} Z(\omega)$  понимают сопротивление излучения, а под  $T$ —его эфф. темп-ру. На практике вообще широко используется представление любого шумящего двухполюсника в виде эквивалентного резистора с соответствующей ему шумовой эдс и шумовой темп-рой или мощностью Ш.

Дробовой Ш.—специфич. и наиб. важный вид внутр. естеств. Ш. в электронных приборах. В ЭВП он возникает на поверхности катода вследствие статистич. характера эмиссии электронов и дискретности их заряда. Спектральная плотность тока катода  $S_{\omega}(I)$  дробового Ш. при работе ЭВП в режиме насыщения определяется соотношением (Шоттки формула)  $S_{\omega}(I) = eI_0$ , где  $e$ —заряд электрона,  $I_0$ —постоянная составляющая тока. Спектр дробовых Ш. флуктуаций анодного тока, обусловленных дробовым Ш. тока катода, равен нулю до весьма высоких значений частот (на к-рых становится существенной конечность времени пролёта электрона от катода к аноду). В силу теплового разброса скоростей эмитируемых электронов дробовой Ш. всегда сопровождается флуктуациями не только тока, но и др. характеристик электронного потока. Электрич. Ш., родственные дробовому Ш. в ЭВП, наблюдаются и в *полупроводниковых приборах*. В последних различают Ш., вызванные дрейфом носителей заряда, и Ш., вызванные диффузией носителей заряда.

Фликкерный Ш. в ЭВП связан с неравномерным изменением эмиссионной способности отд. участков поверхности катода вследствие неравномерного изменения активности эмитирующего слоя (мерцания эффект), в полупроводниковых приборах—с процессами генерации