

## ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОНТРОЛЯ В СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Ю.А. Осокин, М.В. Халин, Г.А. Литвиненко

В измерительных каналах устройств температурного контроля важное значение приобретает реальная оценка величины порога чувствительности, которая в зависимости от технологии изготовления элементной базы электронных приборов ограничивается наличием шумов и помех. Все устройства электронной аппаратуры преобразуют потребляемую электрическую энергию в тепловую. Кроме того, источниками тепла могут явиться радиация от внешней среды (в том числе, солнечная), конвективный и теплопроводный теплообмен с внешними и внутренними элементами устройств.

При этом перенос тепла происходит за счет теплопроводности, конвекции и теплового излучения.

Определенный вклад в создание шумов в цепях приборов привносят тепловые, дробовые и контактные шумы из-за наличия в устройствах действующих резисторных элементов, всех видов полупроводниковых элементов: диодов, транзисторов, интегральных микросхем многих других элементов (электролитических конденсаторов, трансформаторов, проводниковых цепей, навесных элементов РЭА и т.п.).

При стабильности основных конструктивных параметров, определяющих полосу пропускания сигнала, величина тепловых шумов (шумы Дж.Б.Джонсона) характеризуется действующим значением напряжения шумов в цепи (рисунок 1), которое зависит от температуры электронных изделий:

$$U_T = (4kTBR)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $k$  - постоянная Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);  $T$  - абсолютная температура, К;  $B$  - полоса пропускания шумов;  $R$  - сопротивление

цепи, Ом.

При этом, на уровне "минус" 3дБ эквивалентная шумовая полоса в 1,57 раз больше ширины полосы  $f_o$ :

$$B = \pi f_o / 2, \quad (2)$$

где  $f_o$  - резонансная частота эквивалентной RC -цепи:

$$f_o = 1 / (2\pi RC). \quad (3)$$

Дробовые шумы связаны с прохождением тока через потенциальный полупроводниковый барьер. Возникают при генерации и рекомбинации основных носителей (электронов, дырок) и имеют случайный характер. Анализ шумов, проведенный У. Шоттки, показал, что эффективное значение тока дробовых шумов определяется следующим соотношением:

$$I_{dp} = (2q I_n B)^{1/2}, \quad (4)$$

где  $q$  - заряд электрона ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл),

$I_n$  - среднее значение постоянного тока, А;

$B$  - полоса пропускания, Гц.

На основе этого эффекта полупроводниковые диоды практически интересны как источники белого шума.

Если преобладающим источником шумов в диоде является дробовой шум, то эффективное значение тока шумов можно определить измерением постоянного тока, протекающего через него.

Контактные шумы возникают при флуктуации проводимости контактного соединения. Кроме переключателей, различного рода коммутационных элементов источниками контактных шумов могут быть транзисторы и диоды из-за несовершенства контактов, а также композиционные элементы (резисторы, микрофоны, и др.).

Ток контактных шумов обратно-пропор-

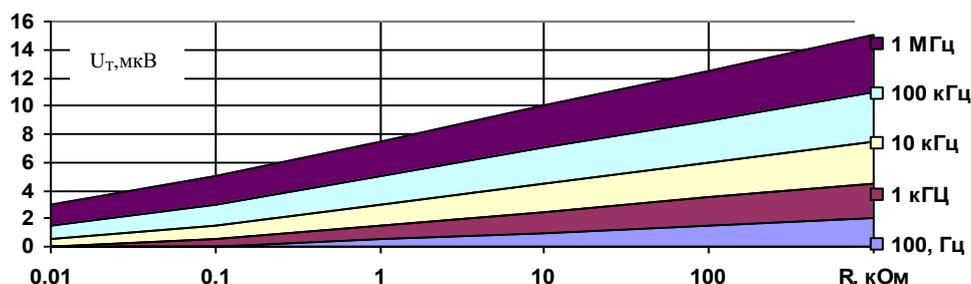


Рисунок 1 – График зависимости тепловых шумов от R и полосы пропускания B

ционален частоте и наибольшее значение имеет на малых и низких частотах.

Особенности разработки эффективных приборов температурного контроля заключаются в выполнении жестких требований по критериям точности и динамичности их работы. К приборам, применяемым для контроля динамических процессов, предъявляются следующие требования:

1. Малая инерционность, позволяющая измерять быстро изменяющиеся параметры информации, в том числе при разных условиях работы во внешней среде.

2. Высокая чувствительность с минимальными уровнями электронных шумов.

3. Широкий диапазон одного прибора, преобразователя, датчика, исключающий необходимость использования других датчиков.

4. Достаточный функциональный диапазон одного прибора, преобразователя, датчика, исключающий необходимость использования устройств с другими, дополняющими функциональными характеристиками.

5. Малая энергетическая масса, например, механическая или термическая, при измерениях динамических и температурных параметров.

6. Высокая надежность и стабильность, поскольку затраты на ремонт превышают стоимость самих приборов.

7. Взаимозаменяемость, то есть разброс параметров отдельных однотипных приборов и узлов находится в строго установленном стандартном диапазоне, а новая калибровка преобразователей требует значительных дополнительных затрат.

8. Универсальность, то есть обеспечение спроса за счет малого количества типов.

9. Доступная широкому кругу потребителей цена.

Учитывая, что размеры микроструктур элементной базы современных приборов составляют 10 мкм и менее, этим требованиям удовлетворяют электронные устройства, выполненные на основе микроэлектроники и микромеханики с использованием благородных материалов и тонкопленочной технологии (Pt, Ir., и др.). Доминирующее место в микромеханике занимает кремний, хотя проводятся исследования по применению арсенида галлия, кварца, сапфира и др. При этом используются высококачественные технологии микроэлектроники - фотолитографические, с переносом изображения с маски на поверхность кремния, техника химического травления: анизотропного, изотропного, се-

лективного, с проведением нескольких процессов маскирования и др.

Особенностью полупроводниковых терморезисторов является большой отрицательный температурный коэффициент омического сопротивления, при котором сопротивление терморезистора уменьшается при повышении температуры. При этом сопротивление терморезистора в зависимости от температуры  $T$  и энергетического коэффициента  $b$  определяется:

$$R = a \cdot e^{b/T}, \quad (5)$$

где  $a$  - значение сопротивления, зависящее от величины и концентрации носителей зарядов полупроводникового материала.

Энергетический коэффициент рассчитывается по результатам двух измерений сопротивлений и соответствующих температур:

$$R_1 / R_2 = e^{b(1/T_1 - 1/T_2)}, \quad (6)$$

$$\text{где } b = \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{1/T_1 - 1/T_2}.$$

Для систем температурного контроля характерно большое удельное сопротивление полупроводниковых терморезистивных чувствительных элементов, имеющих малые габариты и аккумулирующих сравнительно небольшое количество тепла. Таким образом, имея малую массу и незначительную инерционность, они применимы для измерения и контроля динамически изменяющихся тепловых процессов, температурных полей с координатным измерением температуры.

При контактной теплопередаче следует учитывать тепловую проводимость  $\lambda S/\delta$ , которая определяет тепловой поток:

$$\Phi = \frac{\lambda S}{\delta} \cdot \Delta\theta, \quad (7)$$

где  $\delta$  - толщина материала,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $\Delta\theta$  - разность температур.

При этом у металлов величина коэффициента теплопроводности значительно выше, чем у многих композиционных материалов.

Таким образом, выполненный анализ организации температурного контроля позволяет учесть основные факторы при проектировании систем автоматического управления сложными технологическими процессами, в том числе, с использованием многоэлектродных композиционных электрообогатителей МКЭ.

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова*