

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЗАРЯДА НА ЕЛЕКТРОНА

Шумовете в електрическите схеми се дължат на два фактора:

- външни въздействия, които индуцират в схемите нежелани сигнали (които се наричат шумове); това могат да бъдат радиосигнали, сигнали от GSM, 50 Hz от мрежата и т.н.
- собствени шумове на самата електрическа схема, свързани със собствените шумове на отделните елементи в схемата (т.н. „фундаментални”, неотстраними шумове); напр. в краищата на всеки резистор се създава напрежителен шум, свързан с топлинните флуктуации на електроните в резистора и този шум може да се намали само с намаляване на температурата.

Собствените шумове могат да имат различен произход. Т.н. топлинен шум (джонсонов шум, шум на Найквист) е свързан с това, че вследствие на хаотичното топлинно движение на свободните електрони тяхната концентрация в различните участъци на проводника се изменя с времето, а свързаните с това колебания на възникващата е.д.с. и ток са пропорционални на температурата T :

$$\langle U^2 \rangle = 4kTR\Delta f,$$

където k е константата на Болцман, T – температурата, R – съпротивлението, а Δf - наблюдаваната честотна лента.

„Съчменият” шум (дробовый шум, шум на Шотки) е предизвикан от колебанията в броя на електроните, преминаващи през отделните елементи. Тези колебания са свързани с флуктуациите на концентрацията на носителите в тези области от прибора, които определят стойността на силата на тока. В този случай

$$\Delta I^2 = 2qI\Delta f,$$

където q е заряда на електрона. Шум от такъв тип може да се обуславя от случайния характер на процесите на генериране, рекомбинация и дифузия на електроните и дупките в изследвания обект.

Изследването на шумовете в радиолампите полага началото на статистическата радиотехника: през 1918 г. У. Шотки (W. Schottky) обяснява произхода на „сърчания“ шум в радиолампите, работещи в режим на насищане, а десет години по-късно американският учен Х. Найквист (Harry Nyquist) публикува своята прочута формула за спектралната плътност на случайното напрежение, което се появява на изводите на всяко съпротивление. Същата година тази формула получава експериментално потвърждение в работите на друг американец – Дж. Джонсън (J. B. Johnson).

Наблюдаването на термичен шум в резистори е един от най-добрите методи за определяне на Болцмановата константа. Изследването на другият фундаментален шум, описан през 1918 от Шотки се използва в настоящето упражнение за измерване на заряда на електрона.

Опитната постановка включва проста верига от три нискошумови усилватели и един умножител. Генерираният шум се подава последователно на трите нискошумови усилватели, реализирани на базата на операционни усилватели ADA4898, всеки от които има коефициент на усиление $k = 101$ (виж фиг.1).

С помощта на потенциометър се регулира силата на тока, протичащ през светлинния източник 1, а оттам и интензивността на светлинния поток, попадащ върху фотодиода BPW34. Когато източникът на светлина е изключен фотодиодът е силно запушен и през веригата *батерия (B1) – фотодиод (BPW34) – резистор (R1)* ток не тече. В този случай схемата измерва топлинния шум на R1 и собствените шумове на последващите усилвателни стъпала. Когато източникът на светлина е включен излъчените фотони попадат върху силно запушения фотодиод, създават се допълнителни носители на заряд, те се ускоряват от приложеното на диода електрично поле – протича електричен ток (фототок). Тъй като ток не протича във входа на първото усилвателно стъпало, целият фототок преминава през веригата *батерия (B1) – фотодиод (BPW34) – резистор (R1)*. Измерването на фототока се извършва посредством измерването на пада на напрежение, създаден върху съпротивлението R1. Първото усилвателно стъпало усилюва това напрежение 101 пъти и го измерваме с помощта на волтметър от изход 1. Показанието на волтметъра дава средната стойност на напрежението върху резистора R1.



Осцилограма на шума, снета на изхода
на усилвателно стъпало U3



Осцилограма на повдигнатия на квадрат шум,
снета на изхода на умножаващото стъпало U4

Измерването на заряда на електрона се извършва чрез измерването на средния квадрат на флуктуациите на пада на напрежението $\langle U^2 \rangle$ върху съпротивлението R1.

Схемно повдигането на квадрат на моментните стойности на напрежението се реализира посредством стъпалото U4, а усредняването – посредством усредняваща верига U5. Стъпалото U4 с така реализираните външни елементи има коефициант на усилване 1,1, което трябва да се вземе в предвид при обработка на резултатите. Усредняващата верига U5 се реализира чрез нискочестотен филтър с времеконстанта $\tau = R_A \cdot C_A \approx 5 \text{ s}$, което трябва да се има предвид при измерването на $\langle U^2 \rangle$ (при отчитането на показанието на прибора да се изчаква поне 5-6 τ).

Измерването на величината $\langle U^2 \rangle$ се осъществява с помощта на волтметър, закачен към изхода на усредняващата верига U5. $\langle U^2 \rangle$ е сума от три компоненти:

1. Собствения шум на усилвателите, използвани за усилване на шумовия сигнал (S);
2. Собственият топлинен шум на съпротивлението $R1$;
3. Шумът на Шотки, създаван от квантови преходи в p-n областта на фотодиода.

$$\langle U^2 \rangle = (S + 4kTR + 2q\langle I \rangle R^2) \Delta f$$

където k е константата на Болцман, q – заряда на електрона, T – температурата, R – съпротивлението, Δf - наблюдаваната честотна лента, а $\langle I \rangle$ - средният ток, който протича през съпротивлението R .

Като се отчете, че $\langle U \rangle = \langle I \rangle R$, то горната зависимост придобива вида:

$$\langle U^2 \rangle = (S + 4kTR + 2q\langle U \rangle R) \Delta f$$

или

$$\langle U^2 \rangle = a' + d\langle U \rangle \quad \text{където } d = 2qR\Delta f$$

Окончателно за заряда на електрона получаваме

$$q = \frac{d}{2R\Delta f}$$

В горната формула коефициентът d можем да получим от експериментално определената зависимост на $\langle U^2 \rangle$ от $\langle U \rangle$, а Δf - да изчислим, ако знаем параметрите на използваната схема.

Реализираната по горния начин схема има ширина на ивицата на пропускане, която има аналитична формула и не се налага експериментално да изследваме честотните характеристики. При идеални операционни усилватели Δf зависи само от C_L R_L на филтъра, поставен непосредствено след изхода на третия усилвател:

$$\Delta f = \frac{1}{4R_L C_L}$$

При реални усилватели честотната лента се определя от честотните ленти на трите усилвателя и свързаните на изходите им филтри:

$$\Delta f = \int_0^\infty |k_{A_1}|^2 |k_{A_2}|^2 |k_{A_3}|^2 |k_{H_1}|^2 |k_{H_2}|^2 |k_L|^2 df$$

Където k_{Ai} са честотните функции на предаване, k_{Hi} - амплитудно-честотната характеристика на високочестотните филтри, амплитудно-честотната характеристика на нискочестотния филтър k_L .

*Настоящата оригинална методика за
ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЗАРЯДА НА ЕЛЕКТРОНА
бе представена за първи път
от проф. дфзн Тодор Мишонов и д-р Васил Йорданов
на факултетен семинар през юни 2012 г.*



Софийски университет „Св. Климент Охридски“
Физически факултет

МЕТОДИЧЕН СЕМИНАР
понеделник, 18 юни 2012 г., 16:15 часа, зала А315

проф. дфзн Тодор Мишонов

$$q_e \& k_B < \hbar c / e^2$$

Методичен семинар – измерване на заряда на електрона и константата на Болцман с
бюджет по-малък от 137 долара.

$$q_e \& k_B < \hbar c / e^2$$



Васил Йорданов
+
5 студенти
+
Тодор Мишонов

