

МОЩНАЯ ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА. СОЗДАНИЕ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ.

1.1. Генерирование мощных импульсов.

Быстрое развитие исследований в области управляемого термоядерного синтеза, а также в ряде других областей науки, поставило перед импульсной техникой задачу формирования мощных импульсов напряжения ($U \approx 10^4 - 10^7 V$) и тока ($I \approx 10^3 - 10^7 A$), а иногда того и другого одновременно. В любом случае эта задача решается с помощью трансформатора рис.1.

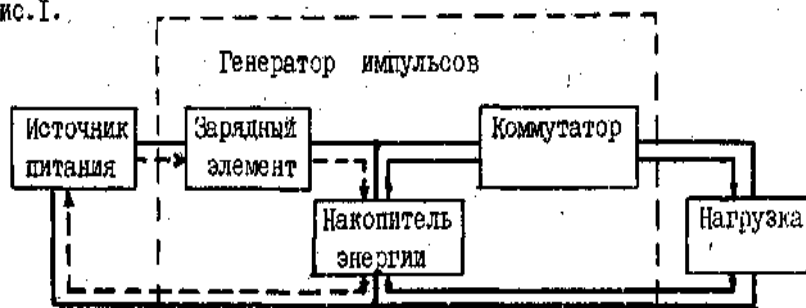


Рис.1. Блок-схема генератора импульсов.

Простейшая схема трансформатора мощности, позволяющая генерировать мощные импульсы как тока, так и напряжения, приведена на рис.1.

Мощность,

потребляемая от источника питания, равна

$$P_0 = \frac{W}{\eta_3 T} \quad (1.1)$$

где W - энергия, запасаемая накопителем, η_3 - КПД цепи заряда накопителя, T - период следования импульсов. Мощность, потребляемая нагрузкой за время импульса τ равна

$$P = \eta_p \frac{W}{\tau} \quad (1.2)$$

где η_p - КПД цепи разряда накопителя энергии. Из (1.1) и (1.2) имеем

$$P = \eta_3 \eta_p \frac{T}{\tau} P_0 = \eta_3 \eta_p Q P_0 \quad (1.3)$$

где Q - скважность импульсов. Видно, что вследствие применения в генераторе накопителя энергии мощность потребляемая нагрузкой, больше мощности источника питания в $\eta_3 \eta_p Q$ раз.

Обычно $\eta_3 \eta_p$ бывает порядка 0,7-0,9, а Q - порядка 10^5 и выше. Это дает возможность применять источники питания сравнительно малой мощности.

Энергия в накопителях может запасаться либо в виде энергии электрического поля в емкости

$$W_c = \frac{1}{2} CU^2 \quad (1.4)$$

либо в виде энергии магнитного поля в индуктивности

$$W_L = \frac{1}{2} LI_0^2 \quad (1.5)$$

В соответствии с этим генераторы импульсов можно разделить на два класса -генераторы с емкостными накопителями энергии и генераторы с индуктивными накопителями энергии. Благодаря простоте технического исполнения наибольшее распространение получили генераторы импульсов с емкостными накопителями энергии.

1.2. Генераторы и мпульсов напряжения (ГИНы)

В технике формирования мощных наносекундных импульсов с амплитудой напряжения от единиц до сотен киловольт в качестве накопителя энергии используются коаксиальные и полосковые линии передачи. При генерировании импульсов напряжения до 10^6 В и более используются коаксиальные линии с жидкой изоляцией (трансформаторное масло, глицерин, вода). При генерировании импульсов напряжения с большим током (до 10^5 - 10^6 А), когда волновое сопротивление генератора должно быть малым, применяются полосковые линии передачи.

Основными параметрами, характеризующими линию передачи, являются скорость распространения волн и волновое сопротивление. Электромагнитные волны распространяются в линии со скоростью

$$v = \frac{I}{\sqrt{L_0 C_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (1.6)$$

где C_0 и L_0 - погонные емкость и индуктивность линии. Ее волновое сопротивление определяется из соотношения

$$\rho = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (1.7)$$

и зависит от размеров и диэлектрической проницаемости изоляции

$$\rho = \left(\frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \right) \ln \frac{D}{d} \quad (1.8)$$

где D и d - диаметры внешнего и внутреннего проводников. Для полосковой линии, состоящей из двух параллельных полос,

$$\rho = \frac{377a}{b} \sqrt{\epsilon} \quad (1.9)$$

где b - ширина полосы, a – расстояние между полосами.

Простейший генератор с накопительной линией приведен на рис.2. Если линию зарядить до напряжения U_0 через сопротивление $R \gg \rho$, а затем замкнуть, с помощью коммутатора на сопротивление $R = \rho$, то на последнем появится прямоугольный импульс напряжения $U = U_0 / 2$.

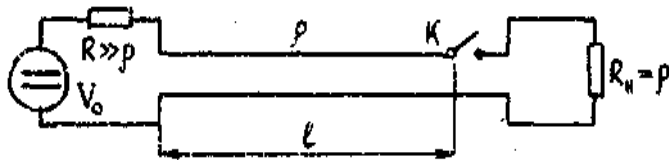


Рис.2. Схема генератора импульсов с накопительной линией.

Ток нагрузки составит $I_H = U_0 / 2\rho$.

При рассогласовании сопротивлений нагрузки и

волнового сопротивления линии импульс напряжения имеет ступенчатую форму. Эти ступени длительностью t_u имеют один и тот же знак, если $R_H > \rho$. Выражение для k -й ступени в общем случае

$$U_k = U_0 \frac{R_H}{R_H + \rho} \left(\frac{R_H - \rho}{R_H + \rho} \right)^{k-1}, k = 1, 2, 3, \dots \quad (1.10)$$

При $k = 1$ и $R_H = \rho$ величина $U_k = U_0 / 2$ равняется амплитуде импульса. Допустимое отношение R_H / ρ определяется по относительной высоте второго импульса. Если, например, задано, что второй импульс должен составлять не более 5% от амплитуды, то R_H / ρ принимает значения 0,9 или 1,1. Длительность импульса t_u определяется временем двойного пробега волны разрядного тока вдоль линии

$$t_u = \frac{2l}{v} = \frac{2l\sqrt{\epsilon\mu}}{c} \quad (1.11)$$

где l - длина линии, v - скорость распространения волн в ней, c - скорость распространения волн в вакууме.

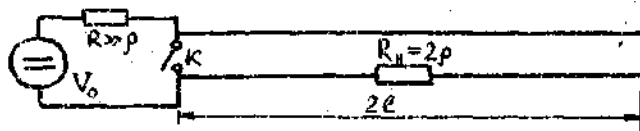


Рис.3. Схема генератора импульсов с ДФЛ.

Для получения амплитуды импульса, равной величине зарядного напряжения, используют генератор с

двойной формирующей линией (ДФЛ), получившей название линии Блюмляйна (рис.3). Две одинаковые линии с волновым сопротивлением ρ и длиной $2l$ заряжаются до напряжения U_0 . Через время T после замыкания ключа K на сопротивлении $R_H = 2\rho$ образуется импульс напряжения с амплитудой $U = U_0$ и длительностью $t_u = 2Tl$. При этом вся энергия,

накопленная в линиях, передается в нагрузку. Если $R_H \neq 2\rho$, то в нагрузке возникает серия отраженных импульсов, амплитуда и полярность этих импульсов определяются из соотношения

$$U_k = -2U_0 \frac{R_H}{R_H + 2\rho} \left(\frac{R_H - 2\rho}{R_H + 2\rho} \right)^{k-1}, k = 1, 2, 3, \dots \quad (1.12)$$

Для формирования импульсов микросекундной длительности используют искусственные линии цепочечного типа (рис.4) и из последовательного соединения параллельных контуров (рис.5).

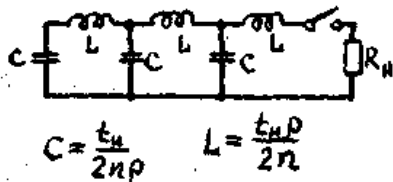


Рис.4. Искусственная линия цепочечного типа, n

Искусственные линии из последовательного соединения параллельных контуров позволяет получить

несколько лучшую форму импульсов, чем цепочечные искусственные линии. Напряжения на конденсаторах линия на последовательного соединения параллельных контуров различны; при

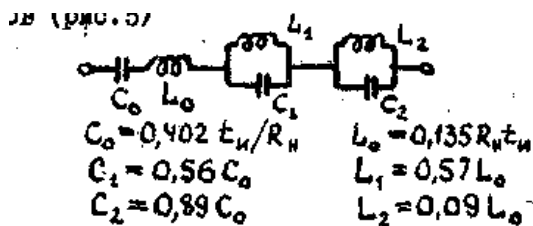


Рис.5. Искусственная линия из последовательного соединения параллельных контуров.

заряде только на одном конденсаторе C_0 напряжение заряда равно U_0 , в остальных - практически равно нулю. Во время разряда на этих конденсаторах напряжения тоже сравнительно небольшие, что является достоинством линии. Однако существенным

недостатком такой линии является различие в величинах ее элементов, что затрудняет ее изготовление в настройку. Требуемое число ячеек линии выбирается, исходя из необходимой длительности фронта импульса.

Для формирования импульсов на шитжения с амплитудой $U > U_0$ применяют

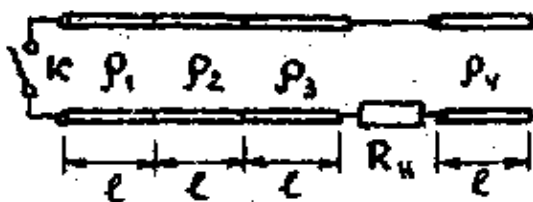


Рис.6. Схема учетверенной линии.

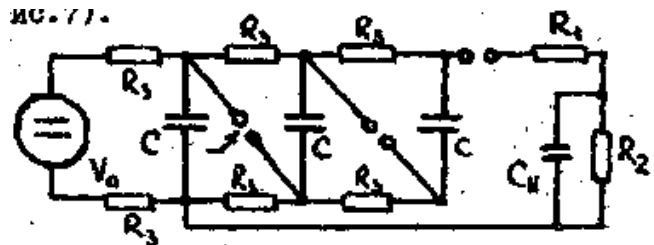


Рис.7. Схема умножения импульсного напряжения.

генераторы с учетверенной линией (рис.6) или с каскадным умножением импульсного напряжения (рис.7).

Учетверенная линия обеспечивает формирование на нагрузки прямоугольных импульсов с амплитудой в два раза выше напряжения ее заряда, т.е. в четыре раза выше, чем одинарная

линия. Для формирования прямоугольного импульса при разряде такой линии, волновые сопротивления линий должны быть равными: $\rho_1 = \frac{1}{8}R_H, \rho_2 = 3\rho_1, \rho_3 = 6\rho_1, \rho_4 = 2\rho_1$. Длины линий должны быть одинаковыми.

Схема умножения импульсного напряжения, широко известная как схема Маркса, позволяет формировать импульсы напряжения амплитудой значительно превышающей U_0 (до 10^6 - 10^7 В). В этой схеме конденсаторы одинаковой емкости и напряжения заряжаются параллельно через сопротивления и разряжаются последовательно через искровые разрядники. Причем для запуска схемы достаточно подать запускающий импульс на первый искровой разрядник, так как при его пробое первый конденсатор подключается последовательно со вторым и следует моментальный пробой остальных разрядников. Напряжение на нагрузке быстро возрастает до $U_H = nU_0$, n - число каскадов. Емкость конденсатора нагрузки C_H должна быть малой по сравнению с общей емкостью последовательно включенных конденсаторов импульсного напряжения. Длительность нарастания напряжения на нагрузке $t_{\phi} = 3R_1C_H$, а длительность спада напряжения $t_{cn} = 3R_2C_H$. Зарядные сопротивления выбирают из условия чтобы время заряда накопителя $t_3 = 3R_3C_0$, где C_0 - общая емкость накопителя, R_3 - суммарное сопротивление зарядного устройства. Сформированные таким генератором импульсы высокого напряжения используются как для получения мощных импульсов рентгеновского излучения, так и для получения сильноточных релятивистских электронных пучков. В последнем случае они служат источником питания для зарядки коаксиальных или полосковых линий наносекундного диапазона.

1.3. Генераторы импульсов тока (ГИТ).

Генератор импульсных токов представляет собой батарею параллельно заряженных конденсаторов, число, напряжение и емкость которых определяют его энергию. Энергия в батарее накапливается за счет заряда конденсаторов в относительно большой интервал времени от источника напряжения и выделяется в короткий промежуток времени в нагрузке - объекте испытания.

При расчете и конструировании ГИТ исходят из требований эксперимента. Обычно они сводятся к получению определенной (максимальной) величины тока (I_M) . скорости его нарастания в нагрузке (t_M), если известны ее параметры (L, R). При расчете и конструировании ГИТ определяют его энергию (емкость батареи), рабочее напряжение,

выбирают принципиальную схему, включая коммутацию, и производят электрический и электродинамический расчет всех элементов установки.

Успешное решение задачи расчета и конструирования ГИТ зависит от правильного выбора типа отдельных элементов генератора и от точности оценки их параметров. Эквивалентная схема генератора импульсных токов (рис.8) показывает, что в параметры контура входят индуктивности и сопротивления конденсаторов (L_0, R_0), разрядников (L_p, R_p), присоединения конденсаторов к центральным шинам ($L_{ш}, R_{ш}$), к разрядникам ($L_{кр}, R_{кр}$), индуктивности и сопротивления центральных шин ($L_{ши}, R_{ши}$), нагрузки (L_H, R_H) и вспомогательных устройств (L_3, R_3). Каждый из перечисленных параметров может оказать существенное, а иногда решающее влияние на величину и форму тока и на долю полезной энергии ГИТ, расходуемой в нагрузке, и предварительно должен быть оценен или рассчитан.

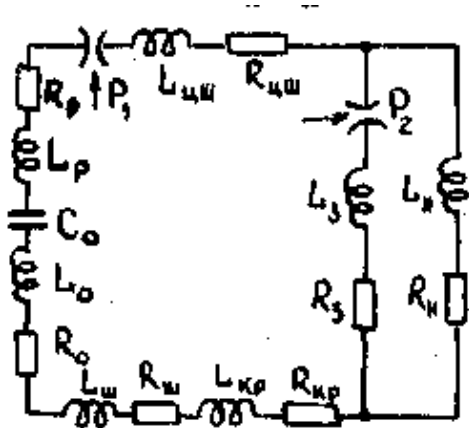


Рис.8. Эквивалентная схема ГИТ.

Проведем грубую оценку параметров, которые обеспечивают получение предельно возможных значений тока и скорости его нарастания в различных по величине индуктивных нагрузках. Оценку проведем на основе простейшей эквивалентной схемы генератора, в которой индуктивности и емкости приняты сосредоточенными. Схема представляет собой обычный колебательный контур, емкость которого C_0 равна емкости батареи, а индуктивность L_3 - сумме индуктивностей конденсаторов, всех соединительных элементов,

разрядника и нагрузки. Задаваясь $L_3, I_M, \frac{dI}{dt} |_{t=0}$, можно определить соответствующие значения рабочего напряжения батареи U_0 , величины ее емкости C_0 и запасенной энергии W по следующим соотношениям:

$$U = \left(\frac{dI}{dt} \right)_{t=0} \cdot L_3 = 2\pi f L_3 I_M; C_0 = \frac{I_M^2}{\left(\frac{dI}{dt} \right)_{t=0}^2} \cdot L_3 = \frac{4\pi f^2}{L_3}; W = \frac{L_3 I_M^2}{2} \tag{1.13}$$

Видно, что возможность получения той или иной амплитуды тока зависит в конечном счете не от L_3 и U (следовательно, и не от $\frac{dI}{dt} |_{t=0}$), а только от энергии батареи.

Существующие схемы ГИТ можно разделить на две группы: простейшие схемы, в которых вся энергия батареи конденсаторов разряжается на нагрузку через один разрядник, и схемы, содержащие несколько разрядников, каждый из которых осуществляет коммутацию соответствующей части батареи.

При заданном рабочем напряжении U_0 , емкости батареи C_0 или ее энергии W амплитуда тока генератора без учета активного сопротивления цепи равна

$$I_M = \frac{U}{\sqrt{\frac{L_{II} + L_H}{C_0}}} = \sqrt{\frac{2W}{L_{II} + L_H}} \quad (1.14)$$

Где $L_{II} = L_0 + L_{III} + L_{IIII} + L_P$, определяется суммарной индуктивностью $L_{II} + L_H$. Поэтому для эффективной работы генератора необходимо $L_{II} \ll L_H$.

В схеме с одним разрядником его пропускная способность ограничивает токи на уровне нескольких сот кило ампер. Для увеличения пропускной способности разрядника до нескольких МА используют разрядники под давлением. Пропускную способность коммутирующего устройства можно увеличить путем применения нескольких разрядников.

В некоторых случаях, например, при исследовании сжатия и удержания плазмы

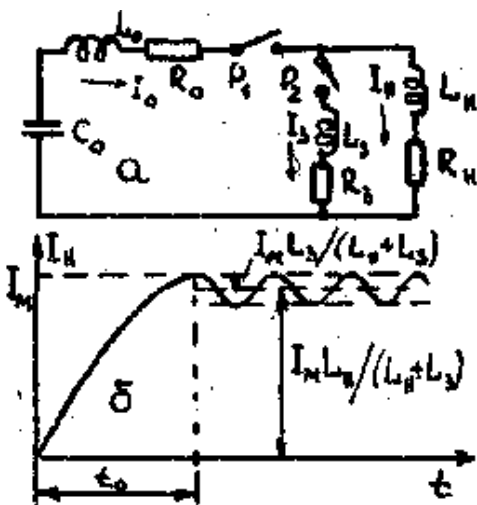


Рис. 9. Схема с замыкателем нагрузки (а) и форма тока в нагрузке при $R_H = R_S = 0$.

магнитным полем желательно в индуктивной, нагрузке получить импульс тока с малым временем нарастания и медленным спадом. Это достигается включением в момент максимума тока малоиндуктивного устройства, замыкающего нагрузку (рис.8 и 9). Энергия, запасенная к этому времени в магнитном поле последней, не переходит далее в энергию электрического поля конденсаторов батареи, а рассеивается в активном сопротивлении нагрузки и замыкающего устройства. При этом форма напряжения на конденсаторах батареи близка к аperiodической, что облегчает условия работы изоляции конденсаторов

и позволяет использовать более высокое напряжение по сравнению с колебательным режимом. Процесс разряда происходит следующим образом.

После пробоя разрядника P_1 , ток в нагрузке L_H нарастает примерно по синусоидальному закону

$$I = \frac{U_0}{\sqrt{\frac{L_0 + L_H}{C_0}}} \exp\left[-\frac{R_0 + R_H}{2(L_0 + L_H)} t\right] \sin\left(\frac{t}{\sqrt{(L_0 + L_H)C_0}}\right) \quad (1.15)$$

Основные процессы в колебательном контуре с замыкающим устройством можно рассматривать на упрощенной схеме, в которой активные сопротивления приняты равными нулю. В этом случае после включения разрядника P₂ в момент t₀ максимума тока I(t₀) = I_M токи в нагрузке, замыкающем устройстве и в конденсаторе определяются следующими выражениями

$$I_H = I_M \left[\frac{L_H}{L_H + L_3} + \frac{L_3}{L_H + L_3} \cos \omega(t - t_0) \right]; I_3 = I_M \frac{L_H}{L_H + L_3} [\cos \omega(t - t_0) - 1] \quad (1.16)$$

$$I_0 = I_M \cos \omega(t - t_0); \omega = \left[\left(L_0 + \frac{L_H L_3}{L_H + L_3} \right) C_0 \right]^{-\frac{1}{2}}$$

Видно, что ток в нагрузке при отсутствия затухания состоит из постоянной и колебательной составляющих. Причем амплитуда последней определяется только отношением $\frac{L_3}{L_3 + L_H}$ при условии $L_3 \ll L_H$. Из-за наличия затухания ток затухает с постоянными

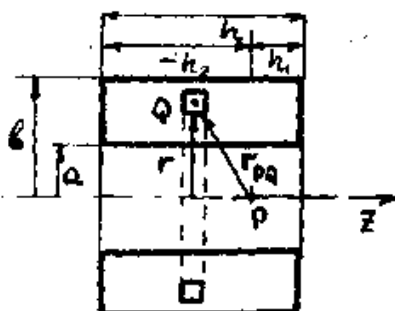
$$\frac{L_H + L_3}{R_3 + R_H} \quad \text{и} \quad \frac{L_0 + \frac{L_3 L_H}{L_3 + L_H}}{R_0 + \frac{R_3 R_H}{R_3 + R_H}}$$

причем периодическая составляющая тока в нагрузке затухает значительно быстрее аperiodической.

1.4. Получение магнитных полей.

1.4.1. Квазистационарные магнитные поля.

Наиболее, часто в экспериментальной практике для создания постоянных магнитных полей используются многослойные катушки. Расчет магнитного поля, создаваемого такой



катушкой, проводится на модели толстого цилиндрического соленоида, (рис.10) на основе даваемого электродинамикой соотношения

$$\vec{H}_p = \frac{1}{4\pi} \int \frac{j_Q \times r_Q}{r_{pQ}^3} dV_Q \quad (1.17)$$

Рис. 10. "Толстый соленоид".

где P - точка пространства, в которой определяется магнитное поле. Q - переменная точка интегрирования, находящаяся внутри проводника.

Считаем, что азимутальный ток в соленоиде характеризуется средней постоянной плотностью тока fj ; здесь j - плотность тока, каждого из N проводников, составляющих обмотку, и имеющего площадь поперечного сечения S_0 ; f - коэффициент заполнения, определяемый соотношением

$$f = \frac{NS_0}{h(b-a)} \quad (1.18)$$

Для аксиальной составляющей в точке P из уравнения (1.17) получим

$$H_z(P) = \frac{1}{4\pi} \int \frac{fj}{r^2} \sin \theta r d\varphi dr dz \quad (1.19)$$

Интегрируя по φ -и вводя $\sin \theta = \frac{r}{r_{PQ}}$, $r_{PQ} = \sqrt{r^2 + z^2}$, находим окончательное выражение для поля

$$H_z(P) = \frac{1}{2} \int \int fj \frac{r^2}{(r^2 + z^2)^{3/2}} dr dz \quad (1.20)$$

которое может быть применено к различным цилиндрическим катушкам.

Вводя общий ток $I = jS_0$ параметр поля $H_f = NI/h$. (в практической системе электрических единиц $H_f = 0,4\pi NI/h$) и производя второе интегрирование, получаем выражение в безразмерной форме.

$$H_z(P) = \frac{1}{2} H_f \left[\frac{h_1}{b-a} \ln \frac{b + \sqrt{b^2 + h_1^2}}{a + \sqrt{a^2 + h_1^2}} + \frac{h_2}{b-a} \ln \frac{b + \sqrt{b^2 + h_2^2}}{a + \sqrt{a^2 + h_2^2}} \right] \quad (1.21)$$

На практике часто интересуются конструкцией катушки, оптимальной с точки зрения получения максимального поля при потреблении заданной мощности P . Эта мощность рассеивается в катушке поэтому можем написать

$$P = 2\pi \int \int \frac{j^2}{\sigma_0} r dr dz$$

так как $\frac{fj}{\sigma_0}$ - тепло, рассеиваемое локально в единицу времени, а σ_0 - электропроводность.

Комбинируя это выражение с уравнением (1.20) можно получить

$$H_z = G \sqrt{\frac{Pf\sigma_0}{a}} \quad (1.22)$$

где G - безразмерный фактор Фабри, зависящий только от геометрии катушек. Для данной катушки эта функция обычно обладает максимумом G_M , который соответствует определенным безразмерным соотношениям ее параметров. Поэтому представляется возможным сравнить катушки различной геометрии по их энергетической эффективности при создании заданного магнитного поля. Для толстого цилиндрического соленоида $G_M = 0,143$ для $b/a = 3$ и $h/2a = 2$.

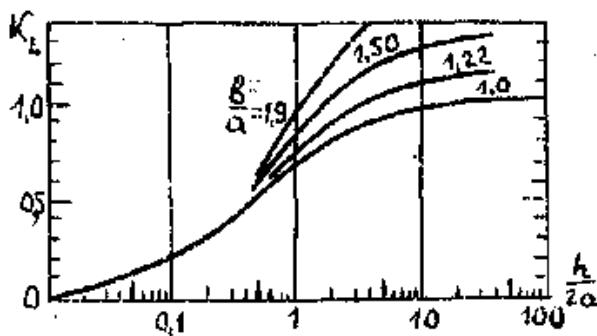
1.4.2. Импульсные магнитные поля.

Если заданы объем поля, его максимальное значение и источник тока, то существует свобода в выборе значений различных параметров соленоида, наиболее важным из которых является полное число витков N для катушки данной длины. Величина поля как функция тока и других параметров катушки дается уравнением (1.21).

Технически удобно использовать такой многovitковый соленоид совместно с конденсаторной батареей в качестве источника энергии. Относительно большая индуктивность катушек

$$L_k = \mu_0 N^2 \frac{\pi a^2}{h} K_L \quad (1.23)$$

(величина K_L задана в виде функции от b/a и $h/2a$, на рис.13) обуславливает длинный



период разряда и низкое значение полного тока I . Это позволяет использовать простые схемы конденсаторных батарей.

Если плотность тока постоянна по сечению провода S_0 , то сопротивление катушки

$$R_k = \pi N^2 (b + a) / \sigma f h (b - a) \quad (1.24)$$

Если предположить также, что индуктивность и сопротивление цепи определяются индуктивностью и сопротивлением катушки, то для параметра цепи γ находим

$$\gamma = \frac{1}{2} R \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{N}{2\sigma_0 f} \frac{b+a}{b-a} \left(\frac{\pi C}{\mu_0 K_L h a^2} \right)^{1/2} \quad (1.23)$$

Так как энергия W_R , рассеиваемая постоянным сопротивлением, возрастает с увеличением γ , то из последнего выражения можно сделать вывод, что для эффективной работы генератора

магнитного поля необходимо ограничивать число витков N , использовать небольшую емкость C (т.е. при заданной энергии батареи - большое зарядное напряжение) и добиваться хорошего коэффициента заполнения (например, использовать провод прямоугольного сечения).

В идеальной, без потерь энергии, цепи с очень длинной катушкой энергия, первоначально запасаемая в конденсаторе

$$W_0 = U_0^2 \cdot \frac{C}{2} \quad (1.26)$$

преобразуется в энергию магнитного поля, так что

$$H \approx \sqrt{\frac{2W_0}{\mu_0 \pi h a^2}}$$

В случае реальной катушки для значения поля в центре можно записать выражение

$$H_0 = DS \sqrt{\frac{2W_0}{\mu_0 \pi a^2 h}} \quad (1.28)$$

Омические потери здесь учтены введением коэффициента рассеяния

$$D = \frac{I_M}{I_0} = \frac{I_M}{U_0} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Геометрия катушки учитывается Форм-фактором G , который получается из сравнения

выражения для поля (1.21) (где $h_1 = h_2 = \frac{h}{2}$) с уравнением (1.28)

$$G = \frac{\pi}{\sqrt{10}} 10^{-3} N \sqrt{\frac{h}{L}} \frac{a}{b-a} \ln \left[\frac{(b/a) + \sqrt{(b/a)^2 + (h/2a)^2}}{1 + \sqrt{1 + (h/2a)^2}} \right] \quad (1.29)$$

Если индуктивность цепи L определяется индуктивностью катушки L_k , то формфактор G будет зависеть только от параметров катушки b/a и $h/2a$, и его можно найти с помощью уравнения (1.23):

$$G = \frac{1}{\sqrt{K_L}} \frac{h}{2a} \frac{1}{(b/a) - 1} \ln \left[\frac{(b/a) + \sqrt{(b/a)^2 + (h/2a)^2}}{1 + \sqrt{1 + (h/2a)^2}} \right] \quad (1.30)$$

Кроме того, сопротивление цепи (1.24) определяется сопротивлением катушки, то параметр цепи γ и, следовательно, функция G зависят только от параметров катушки и емкости C .

1.5. Индуктивные накопители энергии.

Кроме емкостного накопителя энергии в генераторе импульсных токов можно использовать индуктивный накопитель энергии. В этом случае источник питания питает токком I накопительную индуктивность L_0 , затем накопленная энергия передается с определенной эффективностью в нагрузку. Одним из преимуществ индуктивного накопителя энергии является то, что он занимает меньший объем, чем емкостный накопитель. Например, если энергия запасается в форме энергии магнитного поля при напряженности 50 кЭ ее плотность будет примерно в 1000 раз больше, чем в конденсаторе. Ожидается, что для энергий порядка многих мегаджоулей система с индуктивным накопителем может быть значительно дешевле, чем конденсаторная батарея.

Чтобы передать энергию от индуктивного накопителя в нагрузку, необходимо разомкнуть цепь питания. Однако еще не созданы эффективные переключатели с требуемыми характеристиками размыкания, вследствие чего индуктивные накопители не получили широкого распространения. Положение в этой области может быстро измениться с внедрением больших сверхпроводящих катушек, которые могут быть использованы в качестве накопительных индуктивностей, и с созданием подходящих переключателей.

ЭЛЕКТРОННЫЕ УМНОЖИТЕЛИ ОТКРЫТОГО ТИПА

В настоящее время для регистрации электромагнитного излучения в области спектра 1—1500 Å, электронов с энергией до нескольких десятков кэВ, а также ионов и нейтральных частиц малых и средних энергий (до нескольких тысяч кэВ) достаточно широко применяются вторичноэлектронные умножители открытого типа (ВЭУ), или, как их еще называют, умножители с открытым входом. Эти приемники представляют собой электроннооптические системы со вторичноэмиссионным усилением электронного потока, рождаемого излучением на катоде прибора, подобные используемым в обычных фотоэлектронных умножителях (ФЭУ). Однако, в отличие от последних, эти системы лишены обычного защитного вакуумного баллона, что обуславливает три особенности ВЭУ:

1. Отсутствие защитного баллона, а следовательно, и возможность устранения каких-либо разделительных окошек между источником излучения и катодом прибора (обычно первым динодом умножителя), приводит к существенному выигрышу в эффективности и к расширению регистрируемого спектра (области изменения энергии частиц) за счет исключения поглощения в окошках, которое весьма существенно для указанных выше видов излучений. Так, если пропускание даже такой мало поглощающей пленки, как целлулоидная, толщиной всего 1000 Å, составляет 84% для излучения с длиной волны 44 Å, то для $\lambda = 308 \text{ Å}$

пропускание уменьшается уже до 4%. Поэтому такие известные приемники, как ионизационные камеры и газовые счетчики с механически прочными окошками из слюды, бериллия, алюминия, обладают некоторой чувствительностью лишь в ограниченном диапазоне длин волн — в коротковолновой области участка спектра $1—1500 \text{ \AA}$ или в областях, прилегающих к скачкам поглощения в веществе окошка. Можно расширить область эффективности счетчиков, если использовать окошки из нитроцеллюлозы толщиной в несколько сотен \AA . Однако, поскольку эти пленки обладают очень малой прочностью и их трудно сделать герметичными, счетчики с такими окошками должны работать с непрерывным восполнением газовой смеси и при одновременном впуске воздуха в прибор и в счетчик. Это значительно осложняет работу со счетчиком и не всегда возможно.

Значительное поглощение электронов и квантов в пленках, защищающих кристаллы-сцинтилляторы, и малая их энергия, а также быстрое разрушение кристаллов ионами, не позволяют эффективно регистрировать эти излучения также с помощью сцинтилляционных счетчиков.

В отличие от перечисленных приемников, в ВЭУ изменение эффективности при изменении λ или энергии частиц определяется лишь характеристиками его катода. Достоинство приемника состоит также в простоте, характерной для умножителей высокой временной разрешающей способности, малом собственном фоне (0,1 электрона/сек) и возможности регистрировать токи до 10^{-20} а, а также, при соответствующем выборе катода, в возможности построения на основе ВЭУ «солнечно-слепых» и селективных приемников, т. е. приемников, способных регистрировать коротковолновое излучение на фоне мощного излучения в видимой области спектра. Кроме того, исследования последних лет показали, что с ВЭУ можно проводить также и абсолютные измерения интенсивности регистрируемого излучения. Особенно четко преимущества ВЭУ проявляются при исследованиях в космосе, где умножитель работает в условиях естественного вакуума.

Перечисленные возможности, естественно, вызывают большой интерес к подобным приемникам, о чем свидетельствует значительное количество работ, выполненных как в СССР, так и за границей. Этот интерес не пропал и после разработки катодолюминесцентных приемников, которые также не имеют входного окна. В них поток электронов с катода (из материала, подобного употребляемому в ВЭУ) ускоряется и вызывает сцинтилляции люминофора, регистрируемые ФЭУ. Вследствие значительного собственного фона ФЭУ и его высокой чувствительности к рассеянному излучению эти приемники применяются обычно для регистрации достаточно мощных потоков излучения 46. Поэтому ВЭУ остается в настоящее

время самым чувствительным приемником, способным регистрировать токи с катода прибора, начиная с $10^{-19} - 10^{-20}$ а.

2. Из-за отсутствия защитного баллона появляется необходимость сохранить неизменными параметры умножителей при соприкосновении их эмитирующих поверхностей с атмосферой воздуха, что неизбежно при работе умножителя в разборных вакуумных приборах. Обычные ФЭУ такой устойчивостью не обладают. Взаимодействие с воздухом приводит также к образованию на эмитирующих поверхностях хотя бы тонкого окисного диэлектрического слоя, который затрудняет обеспечение устойчивости параметров умножителя при длительной работе прибора, т. е. при длительном блуждении эмитирующих поверхностей электронным потоком, формирующемся в умножителе, а также накладывает ограничение на величину допустимого выходного тока. При выборе путей преодоления этих трудностей необходимо иметь в виду, что эмитирующие поверхности ВЭУ наряду со стабильностью характеристик должны также обладать достаточным для достижения большого коэффициента усиления ВЭУ коэффициентом вторичной эмиссии α и большой фотоэлектрической работой выхода, чтобы обеспечить малый собственный фон и возможность регистрировать коротковолновое излучение в присутствии излучения в видимой области спектра. Поэтому проблема создания ВЭУ открытого типа — это прежде всего проблема выбора специальных материалов для эмитирующих слоев как динодов, так и катодов и методов сохранения их характеристик.

3. Необходимость такого конструктивного оформления приемников, которое обеспечило бы достаточную прочность и возможность быстрой их замены или удаления из прибора при юстировке последнего.

II. КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ВЭУ

1. Электроннооптические схемы и конструкции ВЭУ

В настоящее время в ВЭУ используются практически все известные умножающие системы как с дискретными динодами, так и с непрерывными эмиттерами.

Из систем первого типа наиболее часто употребляются различные модификации простой системы с электростатической фокусировкой и корытообразными динодами. При

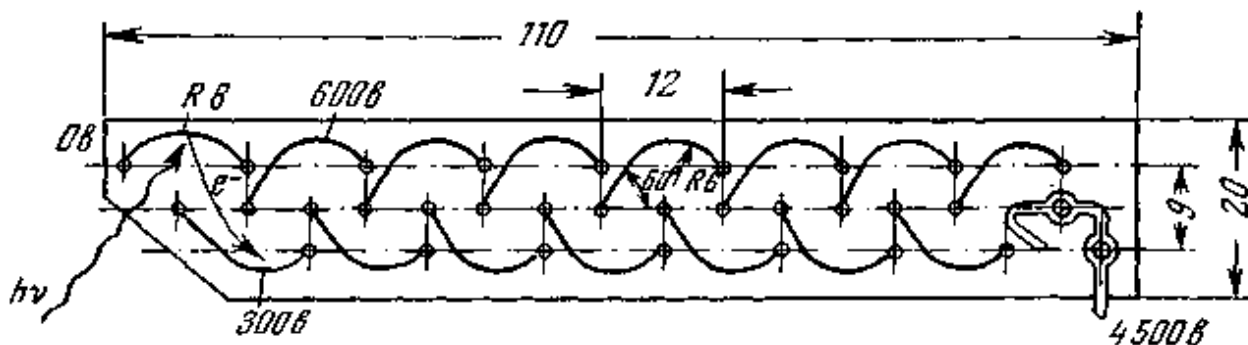


Рис. 1. Один из типов ВЭУ с корытообразными динодами.

регистрации не очень широких пучков излучения в качестве катода используется первый динод системы (рис. 1), который покрывается веществом с необходимой спектральной характеристикой или с необходимой величиной коэффициента вторичной эмиссии. Иногда первый динод заменяют плоской пластинкой, расположенной под углом к регистрируемому излучению. Для регистрации более широких пучков разработаны специальные входные системы с катодами большой площади, работающими на отражение. Катоды могут изготавливаться сменными, что удобно при регистрации разрушающих катод ионных пучков и особенно радиоактивных изотопов. Обычные для ФЭУ системы с полупрозрачными катодами использовать нельзя из-за поглощения в них излучения. В ряде применений требуется обеспечить постоянство выходного сигнала при изменении в достаточных пределах угла между пучком излучения и осью приемника. В этом случае полезны катоды в виде полусферы (см. рис. 2), а также в виде части цилиндра (см. рис. 1). В ВЭУ с корытообразными динодами оптическая связь между коллектором и катодом минимальна, а расстояния между динодами достаточно большие. Это обеспечивает низкий уровень фона и позволяет реализовать значительное усиление на каскад за счет увеличения разности потенциалов, приложенной к умножителю. Однако фокусирующие свойства системы не позволяют эффективно увеличивать число динодов свыше шестнадцати. Поэтому для достижения больших усилений необходимо использовать материалы динодов со значительным и устойчивым к воздействию воздуха коэффициентом вторичной эмиссии.

Наряду с системами с корытообразными динодами применяются также системы с динодами типа жалюзи, подобные ФЭУ-13 и с динодами в четверть цилиндра. Первая имеет достаточную площадь катода-динода, она компактна, может иметь встроенный делитель напряжения, мало чувствительна к внешним электрическим и магнитным полям; в ней электронный поток не встречается с несущими конструкциями, а число динодов может быть

доведено до 20 и немногим более. Однако диоды этой системы деформируются при высокотемпературной обработке, что необходимо для обеспечения стабильных и больших σ , а малое расстояние между диодами ограничивает разность потенциалов, приложенную к каскаду усиления. Последнее замечание относится и к весьма удобной системе с диодами в виде четверти цилиндра. Поэтому в этих системах обычно не реализуются столь большие усиления на каскад, как в системе с корытообразными диодами.

Улучшить фокусирующие свойства систем с дискретными диодами, увеличить число

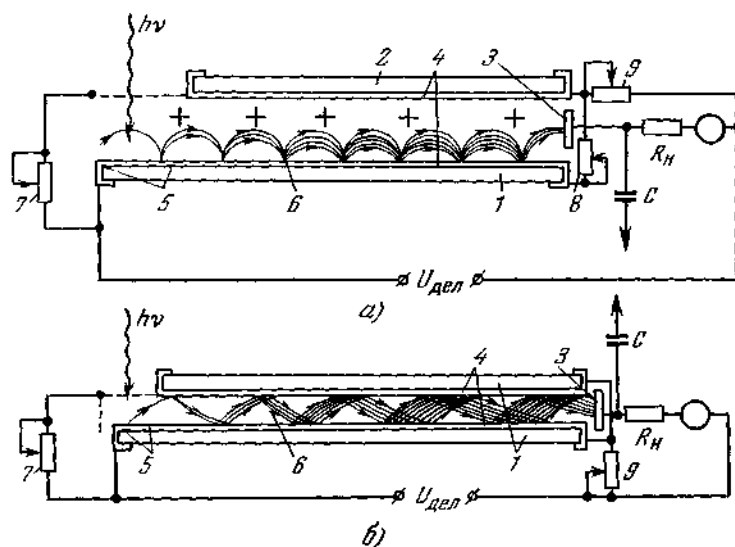


Рис. 4. Принцип работы ВЭУ с протяженными эмиттерами. а) ВЭУ с фокусировкой в скрещенных полях (кресты — направление вектора магнитного поля); б) ВЭУ щелевого типа

1 — рабочая (эмиттерная) пластина; 2 — вспомогательная (полевая) пластина; 3 — коллектор; 4 — эмиттирующие и токопроводящие слои (делитель); 5 — катодная область; 6 — траектория электронов; 7, 8 — потенциометры для компенсации разности длины пластин и создания поля между пластинами; 9 — потенциометр коллектора.

диодов и соответственно использовать для их изготовления материалы с устойчивыми и малыми значениями σ а можно за счет использования скрещенных электрического и магнитного полей. Такая система может использовать магнитные поля, уже имеющиеся в приборе, и вследствие идентификации траекторий электронов

должна обладать повышенным временным разрешением. Однако она достаточно сложна и громоздка. В последнее время благодаря развитию методик получения устойчивых полупроводниковых слоев идея фокусировки электронов в скрещенных полях была осуществлена в весьма компактных и простых ВЭУ со сплошными эмиттерами, (рис. 4, а). Умножитель состоит из двух стеклянных или кварцевых пластинок с нанесенными на них слоями, выполняющими роль как эмиттеров, так и делителей напряжения, и системы постоянных магнитов. Начальный участок более длинной рабочей пластины служит катодом. Разность потенциалов линейно возрастает от начала к концу пластин и создает напряженность поля E_x , стремящуюся переместить электрон к коллектору. Регулировкой потенциометров в цепи рабочей и вспомогательной пластин между ними создается электрическое поле E_y , вытягивающее электроны из рабочей пластины. При наличии магнитного поля напряженности

H траектория электронного потока в умножителе представляет собой набор участков удлиненной циклоиды с шагом ξ , определяемой величинами $U_{del}(E_x), E_y, H$. Коэффициент усиления умножителя K увеличивается с ростом числа соударений электронного потока с рабочей пластиной $m = \frac{l}{\xi}$, (l — длина пластины) и с ростом величины $\sigma\varepsilon$, где $\varepsilon = \frac{U_{del}}{m}$ — энергия, запасенная электронами за один шаг. Увеличение m при изменении только H или U_{del} сопровождается уменьшением ε , и K должен быть экстремальной функцией этих величин. Лишь при параллельном и противоположном изменении U_{del} и H , K может монотонно возрастать.

Наличие магнитного поля не является обязательным условием получения усиления на эмиттерах с малым значением σ . Если расстояние между пластинами уменьшить до $1/30$ — $1/100$ длины пластин, а на обе пластины подавать идентичные разности потенциалов, то электроны, имитированные излучением из одной пластины, двигаясь под действием сил только электрического поля по параболическим траекториям, достигают противоположной пластины с достаточным запасом энергии и размножаются (см. рис. 4, б). После m столкновений электронная лавина собирается на коллекторе. Такие умножители получили название щелевых.

Аналогичная картина усиления электронного потока наблюдается и в канальных умножителях, которые представляют собой трубочки, покрытые изнутри проводящим эмитирующим слоем, при тех же отношениях длины канала к его внутреннему диаметру (калибр канала), что и для щелевых умножителей. Коэффициент усиления умножителя по тем же причинам, что и для магнитных ВЭУ, должен быть экстремальной функцией U_{del} и калибра. Описанные умножители весьма компактны. Так, например, известны ВЭУ с внутренним диаметром 0,1 мм и менее и длиной в несколько миллиметров. Они могут быть собраны в блоки, которые можно использовать как усилители яркости с разрешением, определяемым диаметром трубок, или как многоканальные умножители. При сборке блоков трудно сделать калибры всех трубочек точно идентичными и обеспечить в них совершенно одинаковое усиление. Однако если выбрать оптимальные значения калибра, требования к точности воспроизведения калибра снижаются. Как канальные, так и щелевые умножители имеют, однако, два существенных недостатка. Во-первых, площадь катода, представляющая собой начальный участок канала или щели, мала. Во-вторых, прямая видимость от коллектора к входу умножителя делает возможной сильную оптическую и ионную обратную связь,

приводящую к резкому росту фона ВЭУ при повышении U_{del} . Изгиб пластин или каналов уменьшает обратную связь, однако это значительно усложняет изготовление умножителей. На работу практически всех ВЭУ оказывает влияние наличие магнитных полей. Так, поле в 10 э может уменьшить коэффициент усиления умножителя с корытообразными динодами в 100 раз. В ВЭУ с динодами типа жалюзи увеличение поля до 80 э сопровождается уменьшением K в два раза. Поэтому, как правило, конструктивное оформление блока приемника должно предусматривать защиту умножителя экраном.

2. Методы регистрации излучения

ВЭУ открытого типа является приемником, предназначенным в основном для регистрации потоков излучения малых интенсивностей. В связи с этим особое значение приобретает выбор режима его работы — метода регистрации излучения.

Существуют два режима регистрации излучения с помощью электронного умножителя: по среднему выходному току и по счету отдельных импульсов напряжения, вызванных на

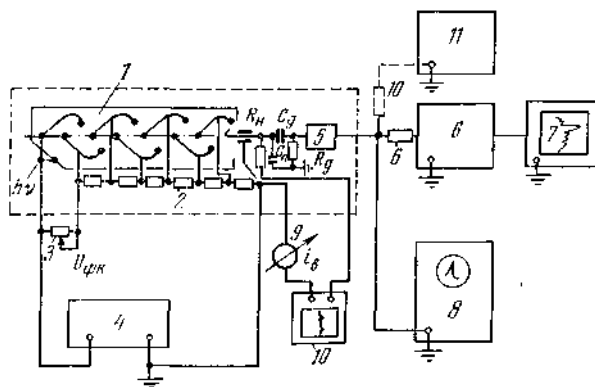


Рис. 7. Блок-схема регистрации излучения с помощью ВЭУ.

Штриховой линией обведены элементы, находящиеся в вакуумной камере. 1 — ВЭУ с кожухом; 2 — делитель напряжения; 3 — потенциометр для регулировки разности потенциалов катод — анод; 4 — регулируемый стабилизированный выпрямитель 0—5000 в; 5 — предусилитель (катодный повторитель); 6 — измеритель скорости счета с выносным щупом; 7 — самописец; 8 — осциллограф; 9 — микроамперметр; 10 — самопишущий микроамперметр; 11 — пересчетная схема.

выходе ВЭУ теми элементарными актами взаимодействия излучения с веществом катода, в результате которых в вакуум эмитируется хотя бы один электрон (эффективные акты N_0 имп/сек).

В первом случае поток электронов,

вырывааемых излучением из катода ВЭУ, усиливается его умножающей системой и при большом коэффициенте усиления K регистрируется стрелочным или записывающим прибором (рис. 7). Если коэффициент усиления ВЭУ недостаточен для работы указанных приборов, сигнал дополнительно усиливается усилением постоянного тока.

Основные рабочие характеристики — зависимость выходного тока i_B (или K) от разности потенциалов на делителе умножителя (U_{del}), а также темновой ток, линейность выходного тока и стабильность его при воздействии на приемник воздуха, при длительной работе ВЭУ и при токовых перегрузках умножителя. Источник питания должен быть

стабилизирован, поскольку изменение U_{del} определяет стабильность выходного сигнала. Относительные среднеквадратичные флуктуации выходного тока ВЭУ определяются как флуктуациями входного тока, складывающимися из флуктуации регистрируемого излучения и флуктуации числа выбитых в одном эффективном акте электронов V , так и флуктуациям коэффициента усиления ВЭУ.

Во втором случае электроны, одновременно эмитированные из катода в одном эффективном акте, усиливаются электронным множителем и формируют на его выходной RC -целочке импульсы напряжения. Если постоянная времени, составленная паразитной емкостью C_n и нагрузочным сопротивлением R_H (см. рис. 7), много больше, чем длительность импульса тока в множителе ($\leq 10^{-8}$ сек), то, как известно, амплитуда импульса равна

$$V_{imp} = \frac{Q}{C_{II}} \quad (Q \text{ — заряд, приносимый электронной лавиной);}$$

длительность его переднего фронта — порядка длительности импульса тока в множителе, а время и скорость спада определяются постоянной времени, формируемой параллельным соединением R_H , R_g (см. рис. 7) и C_n . Основные рабочие характеристики — счетная характеристика, а также стабильность скорости счета и число фоновых импульсов. Вследствие статистичности траекторий электронов в множителе и процесса вторичной эмиссии импульсы на выходе ВЭУ имеют ощутимый разброс по величине. Поэтому при увеличении U_{del} (по мере роста среднего коэффициента усиления) скорость счета вначале монотонно растет (все большее число импульсов превышает V_{nc})- Затем при $V_{imp, min} > V_{nc}$ наблюдается «плато» характеристики с наклоном, определяемым: в основном изменением числа импульсов фона. Плато простирается до U_{del} , при котором либо уже $V_{imp} > V_{max}$ либо резко возрастает фон, либо (в системе с непрерывными эмиттерами) начинается заметное уменьшение коэффициента усиления. Наличие плато позволяет работать без стабилизации источника питания множителя.

Из сказанного ложно заключить, что для ВЭУ наиболее пригоден режим счета импульсов, так как в этом случае (при работе на плато) на результатах измерений не сказываются изменения, которые для умножителей открытого типа могут быть существенными как за счет воздействия воздуха, так и за счет электронного пучка. Кроме того, в этом режиме можно учитывать лишь флуктуации потока регистрируемого излучения,

Однако для работы ВЭУ в этом режиме при пороге срабатывания схемы в 1—5 мВ желательно иметь коэффициент усиления умножителя $10^6 - 10^7$.

Выходные параметры, получаемые при обоих методах регистрации, связаны между собой и с плотностью потока регистрируемого излучения I_0 (квантов/сек-см², электронов/сек-см², ионов/сек-см²) простыми соотношениями, которые можно получить при рассмотрении выражения для среднего тока на выходе ВЭУ:

$$i_B = i_k K = e\bar{v}N_0 K = e\bar{v}N_0 K' = e\chi\chi'aa_0SI_0K' \quad (1)$$

где i_k — ток с катода ВЭУ, e — заряд электрона, K — средний коэффициент усиления ВЭУ,

$$N = N_0aa_0 = I_0S\chi_{II}aa_0 \quad (2)$$

$$a = a_1a_2a_3 \quad (3)$$

—эффективность диодной умножающей системы, определяемая эффективностью сбора электронов на участке катод — диод (a_1), на участке диод— диод (a_2) и вероятностью вырывания с первого диода хотя бы одного электрона (a_3);

$$a_0 = a_{01}a_{02} \quad (4)$$

— эффективность счетной схемы, определяемая соотношением между скоростью счета и конечным разрешаемым временем схемы (a_{01}) и соотношением между шириной распределения импульсов от ВЭУ по амплитудам и динамическим диапазонам схемы (a_{02}),

$$K' = i_B / e\bar{v}N = K / aa_0 \quad (5)$$

— коэффициент усиления ВЭУ при работе в режиме счета импульсов (на один сосчитанный импульс), S — освещенная эффективная площадь катода,

$$\chi_{II} = N_0 / SI_0 \quad (6)$$

— эффективность счета излучения на веществе катода (импульсный квантовый выход),

$$\chi = \bar{v}_0\chi_{II} \quad (7)$$

--- коэффициент преобразования излучения на веществе катода, совпадающий с квантовым выходом γ (электронов/квант) при регистрации электромагнитного излучения, с величиной σ при регистрации электронов и т. д.

Из (1) и (2) для эффективности регистрации излучения в режиме измерения тока и счета импульсов выражения будут соответственно таковы:

$$\beta_T = \chi K = \chi_{II}\bar{v}K \quad (8)$$

и

$$\beta_{II} = \chi_{II}aa_0 \quad (9)$$

Величины, входящие в эти выражения, можно определить по отдельности путем расчета и по соответствующим характеристикам умножителя. Это позволяет отдельно изучать характеристики диодных систем и катодов, анализировать источники ошибок при регистрации излучения и предугадывать реакцию приемника на любой вид радиации.

МАТЕРИАЛЫ УМНОЖАЮЩИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭТИХ СИСТЕМ

Существуют два пути обеспечения заданных характеристик умножающих систем ВЭУ и стабильности этих характеристик, т. е. стабильности K , aa_0 , распределения импульсов по амплитудам и т.д. при воздействии на эмитирующие поверхности ВЭУ воздуха, электронного пучка и пр. Изменение указанных характеристик определяется в основном изменением коэффициента вторичной эмиссии эмитирующих поверхностей умножающей системы. Первый путь заключается в проведении непосредственно в исследовательском приборе периодических подактиваций умножающей системы. Если система изготовлена из сплавов магния с алюминием, серебром или медью, то простой прогрев ее до $300\text{--}450^\circ\text{C}$ в остаточных газах (при $10^{-4}\text{--}10^{-5}$ мм. рт. ст.) должен приводить к восстановлению эмитирующего слоя (MgO) и характеристик умножителя. Однако в этом случае аппаратура усложняется, а проведение абсолютных измерений требует градуировки приемника перед каждым измерением в связи с невоспроизводимостью значений K от активировки к активировке и возможностью необратимых изменений характеристик катодов. Поэтому большинство исследователей идет по пути создания таких ВЭУ, которые не требовали бы активировки в приборе и сохраняли бы свои характеристики неизменными достаточно долго. Для этого эмиттеры ВЭУ должны обладать устойчивостью как к воздействию воздуха, так и к токовым перегрузкам.

Материалы эмиттеров. Изменение σ эмиттеров при длительном соприкосновении с воздухом

Возможными причинами изменения коэффициента вторичной эмиссии эмиттеров при соприкосновении с атмосферой воздуха являются окисление их поверхности, изменение слоя в результате окисления избытка металла или растворения в нем газа, образование гидратов, а также увеличение в слое концентрации дефектов кристаллической решетки типа дислокаций, которые являются ловушками для электронов с дискретным энергетическим спектром и существенно изменяют σ . Возникновение их возможно в слоях, полученных окислением:

металлов или сплавов. В этих слоях могут возникать механические напряжения сжатия, тем большие, чем больше единицы отношение объемов, приходящихся на атом в слое и подложке (α), и отношение коэффициентов теплового расширения подложки и слоя (ρ). Частично возникающие напряжения разрежаются уже в процессе формирования и охлаждения слоя за счет образования определенной концентрации дефектов, однако имеются, по-видимому, остаточные напряжения, которые могут еще разрежаться при адсорбции воздуха из-за изменения энергии системы на поверхности эмиттера.

Таким образом, проблема достаточно сложна, и для достижения неизменности параметров эмитирующих слоев при воздействии на них воздуха они должны быть предельно «насыщены» кислородом, малогигроскопичны, устойчивы, при формировании их окислением должны иметь коэффициенты α и ρ возможно более близкие к единице и должны обладать защитными свойствами к дальнейшему окислению, т. е. не должны иметь пор и трещин и должны иметь малую скорость диффузии через слои при комнатной температуре. При этом желательно также, чтобы эмиттеры обладали и возможно большим значением σ и большой фотоэлектронной работой выхода. Обеспечить выполнение всех перечисленных условий в одном эмиттере весьма трудно. Однако, в соответствии со сказанным, наиболее обоснован выбор в качестве эмитирующих поверхностей ВЭУ малогигроскопичных окислов с хорошими

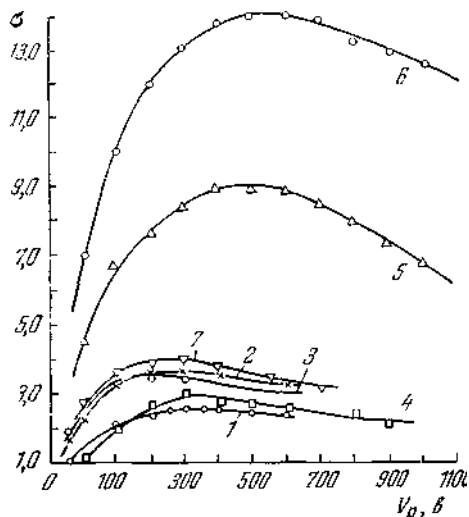


Рис. 8. Значения коэффициента вторичной эмиссии для некоторых эмиттеров. 1 — SnO_2 с большим избытком металла, $R = 3 \cdot 10^4$ ом; 2 — SnO_2 с меньшим избытком металла, $R = 3,2 \cdot 10^9$ ом; 3 — свинцово-силикатное стекло, восстановленное в водородной среде, $R = 1,2 \cdot 10^7$ ом; 4 — бериллиевая бронза, очищенная электрическим травлением и прогретая при 450°C и давлении 10^{-5} мм рт. ст.; 5 — слой BeO на CuBe с нормальной эмиссией; 6 — слой BeO на CuBe с аномальной эмиссией; 7 — слой BeO , полученный окислением металлического Be.

защитными свойствами.

Практически применяются три основные группы материалов.

Первая группа применяемых эмиттеров объединяет полупроводниковые слои из окислов олова, смесей окислов, кремния, легированного Аи, алюминия, активированного молибденом, а также слои на поверхности свинцово-силикатных стекол, восстановленных в водородной среде, и некоторых других стекол. Все они могут использоваться в ВЭУ со сплошными эмиттерами. В настоящее время наилучшими являются, по-видимому, слои на свинцово-силикатном стекле. Эти слои имеют сопротивление 10^6 — 10^9 ом, не зависящее от давления окружающей среды, и обладают постоянством

параметров вдоль слоя. Они имеют также наименьший температурный коэффициент сопротивления и могут пропускать через себя наибольшие токи без разрушения слоя при

разностях потенциалов вплоть до 5000 в. Пластины можно прогревать на воздухе до 400° С и мыть обычными растворителями. Однако эти слои, как и эмитирующие слои всей группы, имеют σ не более 3,5—3,8 (рис. 8).

Вторая группа эмиттеров — «чистые» сплавы (SiBe) и металлы (Al), которые, однако, либо вследствие воздействия воздуха, либо в результате предварительного прогрева в остаточных газах покрыты очень тонким (25—50 Å) защитным слоем окисла (соответственно BeO и Al₂O₃), предохраняющим поверхность от изменений при дальнейшем взаимодействии с воздухом или при обезгаживании электронной бомбардировкой. Поскольку слой очень тонкий, он практически не участвует в формировании вторичной эмиссии и σ_{\max} не превышает 2,8—3,2 (кривая 4 на рис. 8). Поэтому эту группу эмиттеров используют в тех умножающих системах, которые допускают значительное увеличение числа каскадов.

Малые значения σ_{\max} у перечисленных групп эмиттеров и достаточная устойчивость эмитирующих слоев обуславливают тот факт, что изменение σ у них при хранении на воздухе в течение нескольких сотен часов обычно не превышает точности измерения. Например, для эмиттеров из свинцово-силикатного стекла изменение за год хранения составляет 6%.

Последняя группа эмиттеров включает слои из окислов щелочноземельных металлов, которые, являясь веществами со значительной шириной запрещенной зоны и малым сродством к электрону (0,5 эВ), обладают значительными коэффициентами вторичной эмиссии. В основном используется окись бериллия, так как окись магния и тем более окислы стронция и бария достаточно активно взаимодействуют с влагой воздуха.

Изменение σ эмиттеров при длительной работе их в ВЭУ. Устойчивость эмиттеров к токовым перегрузкам

При длительной работе ВЭУ σ его эмитирующих поверхностей может меняться при облучении их электронами, в основном либо вследствие отложения на них продуктов разложения паров масел и смазок, либо вследствие диссоциации и окрашивания этих слоев.

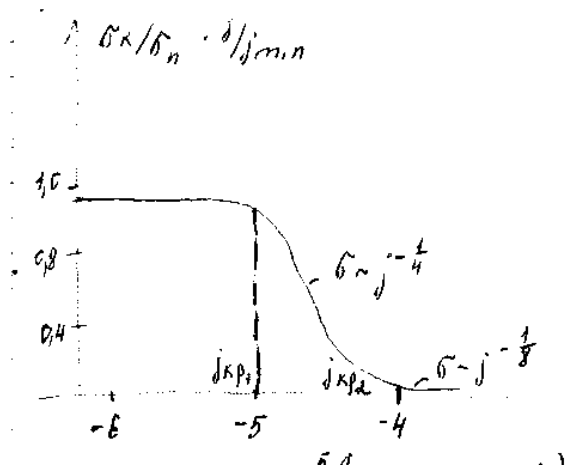
Если в измерительной системе при работе ВЭУ давление паров масел диффузионных насосов, вакуумных замазок и смазок и паров других органических веществ достаточно высоко, то первая из причин уменьшения σ является основной. Толщина слоя продуктов разложения возрастает пропорционально парциальному давлению паров, току в пучке первичных электронов и времени облучения. С повышением температуры эмиттера скорость образования этого слоя уменьшается, а при $T > 250^\circ \text{C}$ он вообще не образуется. Значения σ

слоев масел 2,6—2,8. У продуктов его разложения σ еще меньше (~1,8). Поэтому особенно сильно образование слоя продуктов разложения сказывается у эмиттеров с большим значением σ (MgO, BeO) и несколько меньше — у эмиттеров с малым значением σ . Кроме того, он может заряжаться и снижать стабильность работы ВЭУ.

Хорошим вымораживанием паров органики указанную выше причину изменения σ можно свести к минимуму. В этом случае основной причиной изменения σ эмиттеров с окисными эмитирующими слоями под электронным пучком является диссоциации вещества эмитирующего слоя и накапливание в нем продуктов диссоциации. Эта причина проявляется (при соответствующих плотностях тока) в том случае, если испытания проводятся в условиях высокого вакуума и даже если эмиттеры (как в ФЭУ) до облучения уже содержат избыток металла. Эмитирующие же окисные поверхности ВЭУ, подвергшиеся воздействию воздуха, по свойствам близки к диэлектрическим, и их диссоциация под электронным пучком приводит к возникновению в слоях центров окрашивания, идентичных возникающим при наличии в них избытка металла и кислорода и хорошо обнаруживаемых по наличию особенностей на спектральных характеристиках фотоэффекта. При вторичной эмиссии образование этих центров возможно как за счет захвата электронов существующими дефектами кристаллической решетки, так и механизмом, в котором ионизация электронами анионных узлов дает возможность атомам перейти в междоузлие с образованием центров окрашивания как на них, так и на освободившихся узлах. Изменения σ определяют, по-видимому, в основном центры с фотоэлектронной работой выхода <4 эВ.

Изменение σ со временем описывается :

При увеличении j вплоть до некоторого $j_{кр1}$ значения σ меняются мало. Затем следует участок с наклоном, близким 0,25, или $\sigma \propto j^{-1/4}$, после чего при $j > j_{кр2}$ наклон близок к 0,125, или $\sigma \propto j^{-1/8}$.



$$\log j \left(\frac{a}{\text{cm}^2} \right)$$

Из приведенного рассмотрения можно заключить, что допустимый выходной ток умножителей соответствует $j_{кр1}$. Эта величина зависит от материала эмиттеров. Однако в общем диапазон

изменения $j_{кр1}$ для эмиттеров, устойчивых к воздействию воздуха, невелик. Действительно, для многих исследованных веществ, в том числе и для металлических эмиттеров с очень тонкими слоями окислов, эти значения колеблются от 10^{-6} до $3 \cdot 10^{-6}$ а/см². В случае металлических эмиттеров, длительно находившихся на воздухе, изменение σ при электронной бомбардировке может быть также обусловлено частичным их обезгаживанием. Лишь для SnO₂ со значительным избытком олова $j_{кр1}$ повышается до 10^{-5} а/см². Однако при повышении сопротивления слоя до 10^6 — 10^8 ом $j_{кр1}$ снижается до значений, характерных для остальных исследованных эмиттеров. Поэтому, хотя в принципе и существуют методы улучшения характеристик слоев (например, легированием и т. д.), в настоящее время все используемые свежизготовленные эмиттеры не очень значительно отличаются по устойчивости при электронной бомбардировке. При этом невысокие допустимые плотности тока $j_{кр1}$ обусловлены, по-видимому, диэлектрическим характером поверхностных эмитирующих слоев, что отличает эмиттеры, используемые в умножителях открытого типа, от эмиттеров ФЭУ.

Длительное воздействие воздуха на эмиттеры, как правило, еще несколько снижает величину $j_{кр1}$.

Влияние на эмиттеры некоторых других факторов.

В ряде случаев, например, для снижения уровня фона в масс-спектрометрах, ВЭУ необходимо прогревать в вакууме. Свежизготовленные активированные диоды из сплавов можно нагревать без изменения σ вплоть до температуры активировки. В этом случае допустимая температура прогрева умножителя ограничивается лишь термостойкостью его плат. На σ этих эмиттеров с достаточной толщиной окисного слоя (1000 А) не сказывается и прогрев в атмосфере. Нагревание во влажном Н₂ разрушает эмитирующий слой и снижает σ эмиттеров со слоями MgO на 30%.

Свойства всех эмиттеров существенно ухудшаются, если в ВЭУ, например, при случайном повышении давления в измерительной системе свыше 10^{-4} мм рт. ст., зажигается тлеющий разряд. Уже моментальное действие такого разряда (2—3 сек) приводит к разрушению эмитирующего слоя, снижает σ эмиттеров из SiBe на 10%. Уменьшение σ тем больше, чем больше ток, время разряда и поддерживающая его разность потенциалов.

Свойства эмиттеров из сплавов можно восстановить их повторной активировкой. Для этого достаточно прогреть их 30 — 60 мин при 340° С при откачке диффузионным насосом без разборки умножителя, то для эмиттеров из SiBe требуется разборка умножителя и

повторное окисление при 650° С и давлении кислорода порядка 10⁻² мм рт. ст.. Только в этом случае обеспечивается окисление избытка бериллия в окисном эмитирующем слое и полное восстановление эмитирующих свойств. Восстановление эмиттеров из свинцового стекла требует повторения цикла формирования полупроводникового слоя

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ ТОКА С КАТОДА УМНОЖИТЕЛЯ

Характеристики умножающих систем с дискретными динодами

Как уже отмечалось, наибольшие усиления на каскад позволяет реализовать умножающая система с корытообразными динодами. Зависимость коэффициента усиления от разности потенциалов на умножителе и счетные характеристики для такой системы с умножающими динодами из бериллиевой бронзы, активированной, как описано в п. 1 гл. II, и собранной на слюде, представлены на рис. 11. Аналогичные характеристики имеют ВЭУ с

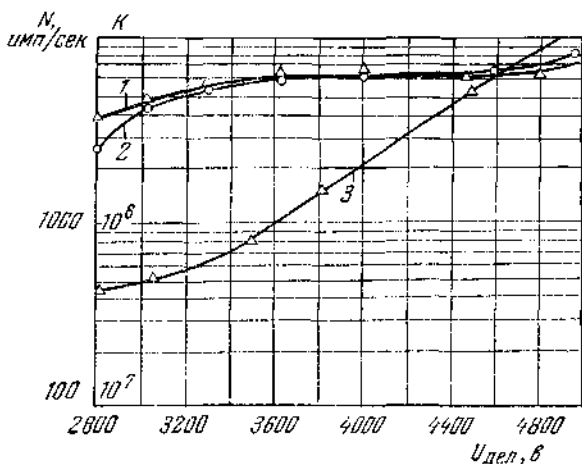
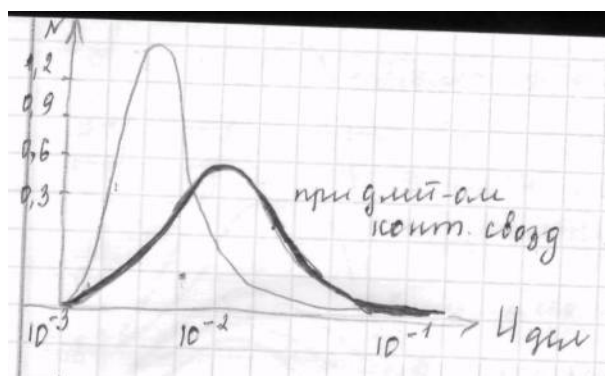


Рис. 11. Счетные характеристики и коэффициент усиления ВЭУ из бериллиевой бронзы.
 Порог срабатывания счетной схемы 1 мв; динамический диапазон порядка 500.
 1, 2 — $N = f(U_{дел})$ для двух различных ВЭУ; 3 — $K = f(U_{дел})$.

катодом в виде жалюзи, собранные на керамике. Умножающая система имеет коэффициент усиления до 109 и плато счетной характеристики, практически не имеющее наклона при изменении $V_{дел}$ от 3600 до 4600 в. Собственный фон системы при давлении 10⁻⁶ мм рт. ст.

и работе на плато характеристики порядка 6—30 имп/мин. При дальнейшем возрастании $V_{дел}$ (при возрастании K и выходного тока) скорость счета растет за счет повышения числа ложных импульсов с малой амплитудой, сопутствующих основному. Это может быть обусловлено как ионизацией ионов остаточных газов, так и возникновением последствия эмиссии. Распределение импульсов от ВЭУ по амплитудам, характеризующее статистический разброс



коэффициента усиления умножителя, и изменение этого распределения при изменении $V_{дел}$ иллюстрируют кривые рис. 12. После длительного воздействия воздуха ($V_{дел} = \text{сопз1}$) распределение меняется приблизительно от

кривой 1 к кривой 3. Качественно форма кривых согласуется с расчетной, и для исключения просчетов при регистрации излучения в режиме счета импульсов необходимо, чтобы счетная схема имела порог срабатывания порядка 1 мв и динамический диапазон не менее 500.

Характеристики умножающих систем с непрерывными эмиттерами

Характеристики всех типов умножителей с непрерывными эмиттерами имеют много общего. Наиболее четко характерные особенности таких умножителей можно проследить на примере ВЭУ канального типа. Для умножителей с прямыми каналами из стекла с полупроводниковым эмитирующим слоем, работающими при давлении 10^{-4} — 10^{-7} мм рт. ст., различные теоретические расчеты зависимости $K = f(U_{дел})$ в большей или меньшей степени совпадают с экспериментальными данными лишь для малых значений $U_{дел}$ (для малых K). При увеличении K свыше 10^5 — 10^6 наблюдается резкое увеличение коэффициента усиления (рис. 13), которое не предсказывается элементарной теорией и объясняется возникновением положительной ионной обратной связи между выходом и входом умножителя. Действительно, в этом случае коэффициент усиления начинает зависеть от давления в системе и регистрируемого потока излучения, а передний фронт импульса становится ступенчатым. При

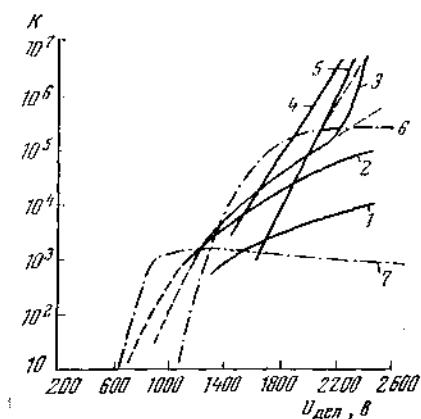


Рис. 13. Зависимость $K = f(U_{дел})$ для прямого капального умножителя 35.

1—5 — экспериментальные данные соответственно для значений калибра канала 40, 50, 60, 80, 100; 6, 7 — теоретические кривые соответственно для калибра 50 и 28.

фотографировании импульсов от ВЭУ с большим временным разрешением оказывается, что на самом деле они состоят из стартового импульса и последующей серии импульсов. Коэффициент усиления по стартовым импульсам порядка 10^7 — 10^8 , что близко к теоретической величине, в то время как полный коэффициент усиления серии может, доходить до 10^{10} . Длительность серии 1—4 мсек, а расстояние между импульсами в ней зависит от состава остаточных газов: чем больше масса молекул газа, тем больше временной интервал. При возрастании давления или при увеличении $U_{дел}$ наряду с сериями начинают появляться «ложные» импульсы, считаемые

отдельно от основной серии, а затем может возникнуть самопроизвольный тлеющий заряд. При давлении 10^{-9} мм рт. ст. (эксперименты на космических ракетах) описанные явления не наблюдаются, общее усиление не столь велико и длительность импульсов не превышает 10^{-8} сек.

Таким образом, при использовании ВЭУ с прямыми каналами в обычных исследовательских приборах с рабочим давлением 10^{-5} — 10^{-7} мм рт. ст. выходной ток умножителя будет достаточно стабильным лишь при $K \geq 10^6$ (U_{del} до 2500 в). При больших коэффициентах усиления значение выходного тока и амплитуда импульса напряжения, формируемая серией, начинают зависеть от давления, регистрируемой интенсивности и т. д.

Отрицательное влияние положительной ионной обратной связи значительно уменьшается, если канал умножителя изгибается по радиусу если умножитель при общей длине канала около 50 мм изготавливается в виде спирали диаметром 8 — 12 мм и шагом порядка 4 мм.

Эффективность и точность регистрации электронного потока с катода.

Как и всякий другой приемник излучения, ВЭУ может быть использован для проведения как относительных, так и абсолютных измерений. Последние в данном случае предполагают измерения с заданной точностью плотности потока регистрируемого излучения, которые, при известных характеристиках катода и источника, могут быть переведены в энергетические величины. Рассмотрим точность регистрации электронного потока с катода.

При относительных измерениях в режиме регистрации тока на выходе умножителя эта точность определяется регистрирующим прибором и стабильностью коэффициента усиления умножающей системы (формула (8)) как при работе и хранении ВЭУ, так и при изменении энергии регистрируемого излучения. Стабильность умножителей можно получить порядка 1 — 2%, если: выходные токи $< 0,1$ — 1 мка; питание умножителя стабилизировано с точностью не хуже 1 %; время измерений ограничено; место и угол встречи излучения с катодом неизменны; умножитель и подводящие провода экранированы; регистрируемый поток достаточен, чтобы флуктуационные ошибки были меньше 1 % и (для ВЭУ с непрерывными эмиттерами) давление в приборе неизменно, а регистрируемые потоки близки.

Регистрация корпускулярного излучения

При регистрации ионных и атомарных пучков с помощью ВЭУ, работающего в режиме измерения выходного тока, $\chi = \sigma_M$ где σ_M — коэффициент вырывания вторичных электронов корпускулами. Эта величина для обезгаженных металлов (Mo, N1) соответствует 0.2 при $V_p = 200$ — 600 эв и затем линейно возрастает при увеличении V_p . Для необезгаженных металлов линейный рост начинается с 200 эв а σ_M несколько выше, при $V_p =$

б кэв σ_M , уже достигают значения 2.4 для ионов K^+ на Mo, 2 — для Ne^+ на Pt. 2 — для Li^+ на Pt. Окисление металлов и сплавов приводит к возрастанию σ_M .

Регистрация электро-магнитного излучения

При регистрации электромагнитного излучения с помощью ВЭУ, работающего в режиме регистрации тока, $\chi = \gamma$ электронов/квант. Вследствие больших трудностей измерения эффективности катодов для участка спектра 1,5—2000 А проведены лишь в последнее время. Однако из уже выполненных работ по исследованию фотоэффекта в мягкой рентгеновской, далекой ультрафиолетовой и ближней ультрафиолетовой областях спектра можно представить себе процесс эмиссии и оценить эффективность ряда катодов ВЭУ. Так, исследования рентгеновского фотоэффекта показали, что возбужденные излучением с длиной волны 1,54—300А рентгеновские фото электроны и электроны Оже обладают достаточной энергией и способны возбуждать значительное количество одновременно выходящих в вакуум медленных вторичных электронов. Формирующаяся при этом «пачка» электронов имеет среднее число \bar{V} электронов, включая рентгеновский, не потерявший свою энергию до конца. При возбуждении катода характеристическим рентгеновским излучением величина \bar{V} для металлов порядка 2, для диэлектриков порядка 12.

В ультрафиолетовой области спектра \bar{V} порядка 1 для металлов, для диэлектриков 1,2-1,8.

Применение ВЭУ

Масс-спектрометрия (возможность регистрации ионных токов $10^{-19} - 10^{-12} a$), спектроскопия мягкого рентгена ($\lambda = 10 - 300 \text{ \AA}$), с успехом могут применяться ВЭУ и в экспериментах по изучению прохождения ионов и электронов через вещество. Используются ВЭУ также в растровых электронных микроскопах для регистрации рассеянных и вторичных электронов и получения телевизионной картины исследуемой поверхности, а также в электронографах с объективной регистрацией. В последнем случае рассеянные от исследуемого образца электроны сканируются относительно трех входных диафрагм умножителя образующих фильтр для некогерентно рассеянных электронов, и самописец вычерчивает кривую распределения интенсивностей в рефлексах электронографической картины за вычетом фона.

Кроме того, имеются сообщения об использовании блоков из канальных умножителей для трансформации рентгеновского излучения с энергией квантов от 50 кэв до 1 Мэв в

видимое при рентгеновской дефектоскопии и ВЭУ с катодами из набора тонких металлических фольг для регистрации очень жесткого электромагнитного излучения.

ПРИБОРЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

ОСЦИЛЛОГРАФ (от лат. *oscillo* — качаюсь и греч. *ИцгарЪб* — пишу), измерит. прибор, предназначенный для визуального наблюдения и исследования формы сигналов. *О.* позволяет достаточно точно и оперативно измерять осн. параметры сигналов: амплитуду, частоту, временные интервалы, фазовый сдвиг и т. д. Под сигналом понимают величину, отражающую тем или иным способом состояние физ. системы. Самыми распространёнными являются электрич. сигналы (ток или напряжение), меняющиеся во времени, $x(t)$. В зависимости от способа получения графика ф-ции $x(t)$ *О.* разделяют на светолучевые и электронно-лучевые.

В светолучевых *О.* значение электрич. сигнала $x(t)$ в какой-то момент времени t преобразуется в пропорц. сигналу вертикальное отклонение светового луча, сфокусированного на отражающем экране или светочувствит. плёнке. Для получения графика ф-ции $x(t)$ необходимо устройство развёртки луча во времени (вдоль горизонтали экрана или плёнки). В качестве преобразователя величины тока или напряжения, в пропорц. отклонение светового луча в светолучевом *О.* применяют магнитоэлектрич. гальванометр, к рамке к-рого прикрепляют отражающее зеркальце. Для развёртки луча по горизонтали экрана можно использовать вращающийся барабан с плоскими зеркальными гранями. Скорость вращения этого барабана определяет коэф. развёртки в с/см. Т. о., светолучевой *О.* должен включать в себя в качестве осн. блоков магнитоэлектрич. гальванометр и оптич. систему, состоящую из осветителя, фокусирующих линз, зеркальца на рамке гальванометра, зеркального барабана развёртки, экрана и др. вспомогат. устройств. Высокая чувствительность гальванометров позволяет применять их в светолучевых *О.* без усилителей и исследовать колебат. процессы с частотой до 10 кГц. Магн. система может быть общей для неск. гальванометров, поэтому можно конструировать светолучевые *О.*, имеющие неск. Измерит. каналов (2-24).

В электронно-лучевых *О.* изображение сигнала осуществляется с помощью сфокусированного электронного луча, к-рый вызывает свечение люминофора экрана электронно-лучевой трубки (ЭЛТ).

Структурная схема электронно-лучевого О. (рис. 1) включает след. основные блоки: блок усилителя вертикального отклонения луча, на входе усилителя имеется многоступенчатый делитель напряжения (аттенюатор). задающий коэф. отклонения (отношение входного сигнала к вызванному им отклонению луча); блок развёртки в канале горизонтального отклонения луча, в состав этого блока входят схема синхронизации, генератор пилообразного напряжения развёртки, усилитель горизонтального отклонения; базовый блок, в состав к-рого входят ЭЛТ, схема управления лучом (яркость, фокус, сдвиг по вертикали и горизонтали, модуляция яркости луча), блок питания.

Исследуемый сигнал поступает на вход $У$ и подаётся (непосредственно или через конденсатор) на входной аттенюатор, с помощью к-рого выбирают коэф. отклонения, т.е. усиление сигнала, удобное для наблюдения на экране ЭЛТ. Конденсатор не пропускает к усилителю постоянную составляющую сигнала. Это необходимо, напр., в тех случаях, когда исследуется небольшая переменная составляющая сигнала на фоне большой постоянной составляющей. После аттенюатора сигнал поступает на вход усилителя вертикального отклонения, с выхода к-рого усиленный сигнал подают на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ.

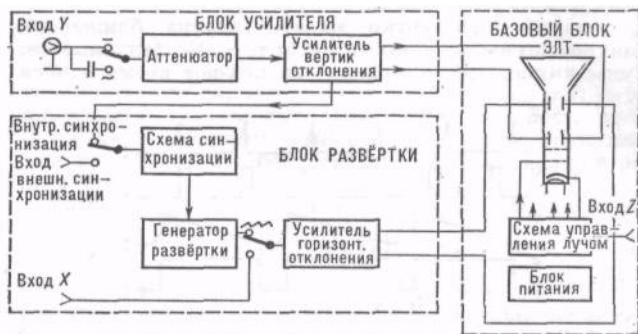


Рис. 1. Структурная схема осциллографа.

Из усилителя вертикального отклонения исследуемый сигнал поступает также на вход схемы синхронизации для запуска развёртки, для этого можно использовать и внеш. сигнал, поданный на вход внеш. синхронизации. Схема синхронизации вырабатывает прямоуг.

импульсы пост, амплитуды независимо от формы и величины входного сигнала. Благодаря этому достигается устойчивый запуск генератора развёртки, вырабатывающего пилообразное напряжение.

После усиления до необходимой величины усилителем горизонтального отклонения пилообразное напряжение поступает на горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ. Крутизна (скорость изменения) пилообразного напряжения определяет скорость горизонтального перемещения луча и тем самым коэф. развёртки (отношение времени нарастания сигнала к отклонению луча за это время). Одно из осн. условий стабильного изображения сигнала на экране ЭЛТ состоит в том, чтобы временное положение к.-л. точки периодич. сигнала относительно начала развёртки оставалось неизменным в каждом цикле развёртки.

В О. предусматривают возможность подачи внеш. напряжения на горизонтально отклоняющие пластины. При этом усилитель горизонтального отклонения отключают от генератора развёртки и подключают к входу X.

Генератор развёртки может работать в автоколебат. и ждущем режимах. В автоколебат. режиме трудно обеспечить одно из самых важных условий стабильного изображения сигнала на экране ЭЛТ (кратность периода развёртки произвольному периоду повторения сигнала). Этот режим поэтому малоупотребителен при измерениях. В ждущем режиме генератор развёртки в буквальном смысле «ждёт» внутр. или внеш. сигналов запуска (синхронизации). Генератор развёртки в ждущем режиме запускают: при внутр. запуске — самим исследуемым сигналом или напряжением питающей сети; при внеш. запуске — сигналом, подаваемым на вход внеш. синхронизации (для этого в О. имеется переключатель «Синхронизация», к-рый устанавливают в соответствующее положение). При внеш. запуске параметры запускающего сигнала обычно остаются постоянными, поэтому движение луча слева направо на рис. 2 изображена работа развёртки в ждущем режиме с внеш. синхронизацией синхроимпульсами (рис. 2,а), связанными с наблюдаемым сигналом (рис. 2,б) жёсткой временной связью. Синхроимпульсы задают начало импульса пилообразного напряжения (рис. 2,в) развёртки О.

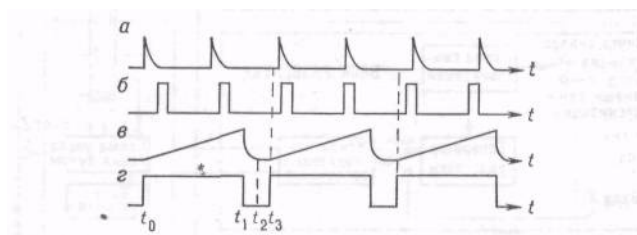


Рис. 2. Развёртка в ждущем режиме с внешней синхронизацией

По достижении (в момент t_1) своего макс. значения напряжение развёртки затем убывает до минимума (в момент t_2). Отрезок ($t_2 — t_1$) соответствует обратному ходу луча.

Начиная с момента t_2 генератор развёртки «ждёт» запуска ближайшим синхроимпульсом в момент t_3 и т. д. Исследуемые импульсы (рис. 2,а) задержаны на некоторое время относительно синхроимпульсов. Неизменное положение наблюдаемых импульсов относительно импульсов пилообразного напряжения в каждом цикле развёртки обеспечивает их стабильное изображение на экране ЭЛТ. Импульсы (рис. 2, г), вырабатываемые в О., используют для подсвета прямого хода луча в интервале (t_0, t_1) и для гашения обратного хода луча в интервале (t_1, t_2) в каждом цикле развёртки. Желаемый масштаб изображения по горизонтали обеспечивается выбором коэф. развёртки.

По своему назначению электронно-лучевые О. можно разделить на универсальные, импульсные, многоканальные, запоминающие, стробоскопические и т. д. Универсальные О. предназначены для исследования однократных и периодич. электрич. сигналов и измерения их

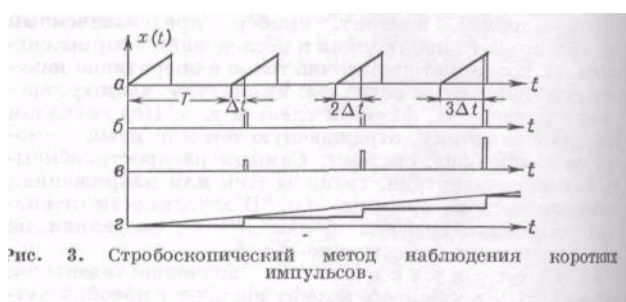
амплитудных и временных параметров. Универсальность обеспечивается наличием сменных блоков в каналах вертикального отклонения и развёртки.

Для импульсного О. характерны широкая полоса частот усилителя вертикального отклонения, наличие быстрых развёрток с малыми коэф. развёртки. Эти условия необходимы для наблюдения кратковрем. импульсных процессов и измерения их параметров. В нек-рых импульсных О., кроме того, в канале вертикального отклонения имеется широкополосная линия задержки, необходимая для того, чтобы иметь возможность наблюдать передний фронт импульсного сигнала в режиме внутр. синхронизации ждущей развёртки. В этом случае исследуемый сигнал сначала запускает генератор развёртки, а затем, спустя время задержки, появляется на входе усилителя вертикального отклонения.

В многоканальных О. имеется неск. (2 - 4) каналов вертикального отклонения и задержанной развёртки, что обеспечивает одноврем. исследование синхронных и несинхронных сигналов в разл. амплитудных и временных масштабах, сравнение сигналов по форме при наличии временного сдвига между ними, подсвет исследуемого участка развёртки с одноврем. изображением его в изменённом временном масштабе, алгебраич. сложение сигналов и т. д.

В запоминающих О. в качестве ЭЛТ используют запоминающие трубки (потенциалоскопы, графekoны и др.), предназначенные для записи электрич. сигналов, хранения этой записи и считывания (воспроизведения) записанных сигналов в заданный момент времени. Вариантом запоминающих О. являются цифровые запоминающие О., принцип действия к-рых заключается в преобразовании мгновенных значений исследуемых сигналов в цифровую форму с помощью быстродействующих аналого-цифровых преобразователей и запоминания их в цифровых запоминающих устройствах. Форма записанных сигналов и результаты измерения их параметров отображаются на экране ЭЛТ. Примером может служить цифровой запоминающий О. С9—8 (СССР), в к-ром управление осн. режимами работы осуществляется 12-разрядным микропроцессором.

Стробоскопические О. предназначены для исследования повторяющихся сигналов



малой длительности и характеризуются наличием стробоскопич. блоков в усилителе вертикального отклонения и развёртке. Принцип действия стробоскопич. системы основан на том, что при поступлении повторяющихся исследуемых сигналов (рис.

3,а) на вход усилителя вертикального отклонения при каждом запуске развёртки на экране ЭЛТ изображается не весь сигнал, а только короткая его часть, наз. «вырезкой» сигнала. «Вырезка» мгновенных значений сигнала производится с помощью коротких стробирующих импульсов (рис. 3,б). Каждая «вырезка» сдвинута на величину шага считывания Δt относительно предыдущей «вырезки». Автоматический сдвиг стробоскопических импульсов на величину Δt в каждом цикле повторения сигнала обеспечивает стробоскопический блок развёртки. На выходе стробирующего устройства получают модулированную последовательность стробирующих импульсов (рис. 3,в), которые затем усиливают, расширяют и подают на схему, запоминающую амплитуду очередного импульса до прихода следующего. Т. о., получается ступенчатая функция, огибающая которой воспроизводит форму сигнала (рис. 3,г). Длительность преобразованного сигнала во столько раз больше длительности исследуемого сигнала, во сколько раз его период T больше шага считывания Δt .

ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКАЯ ТРУБКА — вид электронно-лучевых приборов из

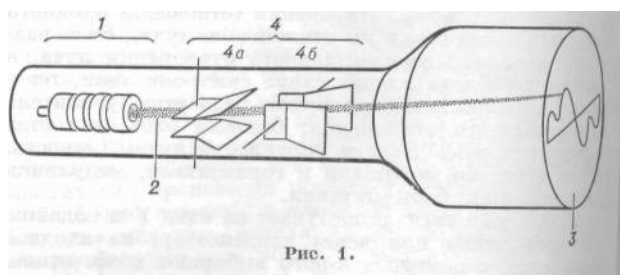


Рис. 1.

группы приёмных электронно-лучевых трубок, предназначенный для регистрации в графической форме хода быстропротекающих процессов, данные о которых могут быть представлены в виде электрических сигналов. Основными элементами О.

т. являются помещённые в вакуумно-плотную оболочку электронный прожектор 1 (рис. 1), формирующий узкий пучок электронов 2, светящийся под воздействием электрон-