

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

ЭЛЕКТРОННЫЕ МЕТОДЫ ГЕНЕРАЦИИ
СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

А. С. Копорский, А. В. Чернетский, Н. В. Коротких,
В. И. Вознесенский

ВВЕДЕНИЕ

Импульсная техника находит широкое применение в различных областях науки и техники. Радиолокация, радиоастрономия, счетнорешающая техника, ядерная физика — далеко не полный перечень основных направлений развития современной науки и техники, прогресс которых в значительной степени определяется достижениями в импульсной технике.

Основная задача развития импульсной техники заключается в получении импульсов очень малой длительности с большой частотой повторения. В качестве генераторов импульсов до сих пор почти исключительно применялись радиотехнические генераторы. Однако радиосхемы в настоящее время не позволяют получать и преобразовывать импульсы, длительность которых меньше 10^{-9} сек. Уже при длительностях импульсов порядка 10^{-7} сек. и короче в сильной степени начинают сказываться паразитные емкости монтажа, междуэлектродные емкости электронных приборов, их входная динамическая проводимость. Не менее сложными являются и преобразующие устройства. Для усиления импульсов такой длительности используются широкополосные усилители с распределенными параметрами. Эти усилители, как известно, работают по принципу сложения, а не умножения сигнала. Поэтому они требуют значительного увеличения количества ламп. Кроме того, производство их достаточно сложно. Широкое распространение в качестве генераторов импульсов в настоящее время получили схемы с накопительными устройствами (рис. 1).

Ключом в этих генераторах могут служить тиратроны, ртутные или механические реле. Частота повторения импульсов у этих генераторов невелика и лежит в пределах сотен кГц. У тиратронных генераторов она ограничивается временем деионизации. У генераторов с механическим

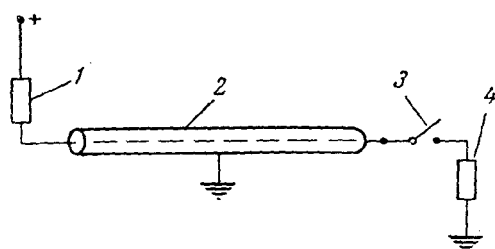


Рис. 1. Принципиальная схема импульсного генератора с накопителем: 1 — сопротивление зарядки, 2 — линия (коаксиальный кабель), 3 — ключ, 4 — сопротивление нагрузки.

ключом частота повторения определяется инерционностью механической системы; то же самое относится и к генераторам с ртутными прерывателями. Существенным достоинством этих генераторов является возможность получения импульсов с большой амплитудой, что освобождает от необходимости усиления.

В связи с вышеизложенным были сделаны попытки конструировать генераторы импульсов, свободные от перечисленных недостатков. Был предложен ряд электронных методов генерации очень коротких импульсов.

Принцип действия электронных генераторов импульсов заключается в получении пакетов электронов необходимой длительности. Как правило, для этой цели используются электронно-лучевые приборы. Принцип действия электронных генераторов импульсов заключается в следующем. Непрерывный, сфокусированный электронный луч тем или иным способом преобразуется в дискретные группы электронов — пакеты. Так как длительность выходного импульса определяется длительностью пакета, то сами пакеты могут подвергаться дальнейшему преобразованию, т. е. уменьшению их длительности.

Затем электронные пакеты возбуждают выходное устройство, в котором происходит преобразование кинетической энергии электронных пакетов в электромагнитную энергию импульсов. Отличительной особенностью таких приборов является возможность получения чрезвычайно коротких импульсов с большой частотой повторения *).

Прежде чем переходить к рассмотрению существующих импульсных электронных генераторов, остановимся коротко на основных проблемах, характерных для всех генераторов данного типа.

§ 1. ПРОБЛЕМЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ГЕНЕРАЦИИ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРОННЫМИ МЕТОДАМИ

Расплывание пакета. Одной из основных проблем является сохранение по возможности неизменными «внешних» размеров пакетов электронов, полученных каким-либо способом, в течение времени пролета их от формирующего устройства до выходного. В некоторых конструкциях это время достигает относительно больших величин, поэтому наблюдается так называемое расплывание пакета. Оно происходит по двум причинам. Первая — расталкивание элементарных заряженных частиц под действием кулоновских сил. Вторая — расплывание пакета вследствие разброса скоростей электронов.

Величина разброса скоростей электронов в пакете определяется типом генератора. В некоторых типах она достигает минимального значения — величины разброса начальных скоростей электронов. Таблица I иллюстрирует величины «длин пробегов» пакетов S при различных плотностях токов J и различных ускоряющих напряжениях для пакета в форме диска с однородными скоростями, причем под «длинной пробега» понимают длину увеличения протяженности пакета на 10%.

Таблица I

J (а/см ²)	$U_{\text{уск}}$ (кв)	S (см)
0,05	1	0,9
0,5	1	0,3
0,5	10	2,8

стигает минимального значения — величины разброса начальных скоростей электронов. Таблица I иллюстрирует величины «длин пробегов» пакетов S при различных плотностях токов J и различных ускоряющих напряжениях для пакета в форме диска с однородными скоростями, причем под «длинной пробега» понимают длину увеличения протяженности пакета на 10%.

*) В настоящее время получены импульсы длительностью порядка 10^{-12} сек. с частотами повторения в сотни мгц.

Очевидно, что при увеличении плотности тока в пакете, что желательно с точки зрения повышения мощности генераторов импульсов, необходимо увеличивать ускоряющие напряжения и уменьшать длину пробега пакета, т. е. уменьшать время пролета его до выходного устройства.

Применяемые в настоящее время выходные устройства чаще всего выполняются в виде коаксиального кабеля или двухпроводной линии. В следующем разделе приводится пример расчета возбуждения такого выходного устройства заданным током пакета.

Возбуждение выходного устройства. Предположим, что на один из проводников идеальной бесконечной двухпроводной линии или коаксиального кабеля падает конвекционный ток с линейной плотностью $j(x, t)$, другой проводник находится под постоянным потенциалом. Рассмотрим в общем виде, воспользовавшись аппаратом разрывных функций¹, волновые процессы, происходящие в такой линии при воздействии на нее импульса тока произвольной формы. Не теряя ничего в смысле общности рассмотрения задачи, предположим, что плотность конвекционного тока $j(x, t)$ равна постоянной величине $\frac{J_0}{l}$ вдоль некоторого отрезка линии длиной l , а во времени представляет прямоугольную функцию длительностью τ_0 . Иными словами:

$$j(x, t) = J_0/l \cdot [\sigma_0(t) - \sigma_0(t - \tau_0)][\sigma_0(x) - \sigma_0(x - l)], \quad (1)$$

где J_0 — общая сила тока, σ_0 — примитивная разрывная функция нулевого порядка.

В случае необходимости можно от этого случая легко перейти с помощью интеграла Дюамеля к плотности конвекционного тока произвольной формы.

Волновое уравнение, описывающее распределение потенциала в линии $V(x, t)$, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} - a \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{1}{C} \frac{\partial j}{\partial t} = f(x, t), \quad (2)$$

где $a = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, L — погонная индуктивность, C — погонная емкость.

Известно, что решение неоднородного волнового уравнения для бесконечной линии при нулевых начальных условиях имеет вид

$$V(x, t) = \frac{1}{2a} \int_0^t d\tau \int_{x-a(t-\tau)}^{x+a(t-\tau)} f(\xi, \tau) d\xi. \quad (3)$$

Подставив в (3) выражение для $j(x, t)$, получим:

$$\begin{aligned} V(x, t) = & \frac{1}{2} \frac{J_0}{l} \sqrt{\frac{L}{C}} \int_0^t [\delta(\tau) - \delta(\tau - \tau_0)] \{ \sigma_1[x - a(t - \tau)] - \\ & - \sigma_1[x - l - a(t - \tau)] \} d\tau = \frac{1}{2} \frac{J_0}{l} \sqrt{\frac{L}{C}} \{ \sigma_1(x - at) - \sigma_1(x - l - at) - \\ & - \sigma_1[x - a(t - \tau_0)] + \sigma_1[x - l - a(t - \tau_0)] \}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь через σ_1 обозначена примитивная разрывная функция первого порядка (рис. 2).

Выражение в скобках легко расшифровывается: это равнобедренная трапеция, движущаяся со скоростью a вправо. Длина нижнего основания трапеции $l + at_0$, а длина верхнего $at_0 - l$, высота ее равна l .

Амплитуда импульса напряжения равна

$$V_0 \approx \frac{1}{2} J_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5)$$

при $I_0 = 10^{-2} a$, $\sqrt{\frac{L}{C}} = 100$ ом, $V_0 = 0,5$ в.

Таким образом, при падении на один из проводников линии электронного пакета в линии возбуждается и по ней начинает распространяться электромагнитный импульс (в общем случае два). Этот импульс можно

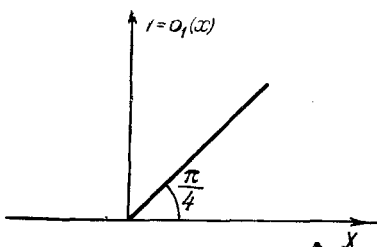


Рис. 2. Примитивная разрывная функция первого порядка.

рассматривать как некоторую сумму гармонических составляющих. Следует помнить, что задачей данной статьи является рассмотрение электронных методов генерации импульсов короче 10^{-9} сек. Следовательно, гармонические составляющие этих импульсов будут иметь весьма малые длины волн (сантиметровой и миллиметровой длины). Как известно, на этих частотах весьма существен вопрос

о согласовании выходного устройства с линией передачи. Согласование в значительной степени затрудняется тем, что электронные генераторы являются вакуумными приборами.

Согласование до настоящего времени остается узким местом многих генераторов импульсов.

Перейдем к изложению существующих методов генерации импульсов и описанию конструкций генераторов.

§ 2. ИМПУЛЬСНЫЙ ГЕНЕРАТОР КЛИСТРОННОГО ТИПА

Принцип действия генератора основан на давно известном и широко применяемом эффекте клистронного сжатия^{2,3}, который заключается в модуляции по скоростям электронов луча. Вследствие этого ток луча во времени становится непостоянным, т. е. получается группирование электронов в пакеты, которые затем возбуждают выходное устройство.

Конструкция клистронного генератора импульсов несколько отличается от клистронного генератора синусоидальных колебаний. У импульсного генератора, во-первых, отсутствует обратная связь. Переменное высокочастотное напряжение на модулятор (сетку) подается от внешнего («постороннего») генератора. Во-вторых, выходной системой у него служит не резонатор, а коаксиальный кабель или длинная линия.

В литературе⁴ описан импульсный генератор, работающий на этом принципе. На рис. 3 изображен генератор вместе с измерительным устройством. Высокочастотная энергия от генератора 210 мкГц частоты подводится к резонатору, выполненному в виде отрезка коаксиальной линии, расположенной на одном конце, и заканчивающейся на другом конце сетками, расположенными на расстоянии 10 мм, на которых создается разность потенциалов, равная 400 в. Электронный луч, ускоряясь высоко-

частотным напряжением, модулируется по скоростям. В пролетном пространстве происходит фокусировка электронного луча с помощью продольного магнитного поля. Длина пролетного пространства равна 400 мм. В качестве выходного устройства используется 70-омный коаксиальный кабель. Внешний проводник кабеля оканчивается на сетке, сквозь которую проходят электронные пакеты прежде, чем они попадают на внутренний проводник кабеля (коллектор). Расстояние между внутренним проводником и сеткой составляет 4 мм. При попадании на внутренний проводник кабеля пакета электронов вдоль линии начинает распространяться электромагнитный импульс. Этот генератор позволяет получать импульсы длительностью порядка $2 \cdot 10^{-10}$ сек.

Для исследования получаемых импульсов использовалась схема, приведенная на рис. 3.

Электромагнитная энергия из линии направлялась в 10-см волновод. В конце линии находился миллиамперметр. Волновод оканчивался смесителем, к которому подводилась также энергия от специального 10-см генератора. Сигнал разностной частоты усиливался с помощью усилителя промежуточной частоты. Индикатором служил диодный измеритель тока. Это устройство необходимо было для выделения гармоник импульса.

При исследовании импульсов оказалось, что максимальная энергия 14-й гармоники составляет около 10^{-4} вт и достигается при следующих режимах: 1) $V_1 = 250-270$ в, $V_0 = 2000$ в и 2) $V_1 = 140$ в, $V_0 = 1350$ в, где V_0 — ускоряющее постоянное, V_1 — переменное напряжение.

Генераторы клистронного типа находят применение при исследовании широкополосных схем совпадения, для счета числа частиц, а также для других целей. Достоинствами генераторов такого типа являются возможность получения относительно мощных импульсов, а также большой коэффициент использования тока луча.

К числу недостатков следует отнести: необходимость фиксирования коллектора на определенном расстоянии от резонатора, что неудобно, если требуются дальнейшие преобразования электронного сгустка; наличие хвостов (расплывчатость фронтов) у полученных импульсов.

Для получения более коротких импульсов методом клистронного сжатия и для избавления от «хвостов» необходимо ставить несколько ступеней сжатия подобно многорезонаторному клистрону, что усложняет конструкцию.

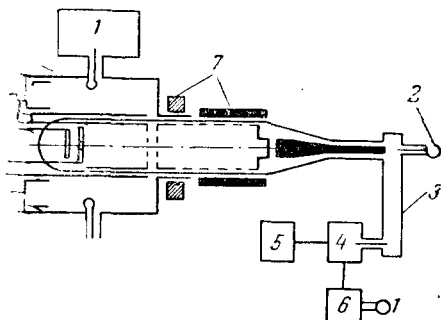


Рис. 3. Импульсный генератор клистронного типа: 1 — генератор синусоидальных колебаний с частотой 210 мГц, 2 — индикатор, 3 — 10-см волновод, 4 — смеситель, 5 — 10-см генератор, 6 — усилитель промежуточной (60 мГц) частоты, 7 — фокусирующие катушки.

§ 3. ЛАМПА С ПОПЕРЕЧНЫМ ОТКЛОНЕНИЕМ ЛУЧА КАК ГЕНЕРАТОР ОЧЕНЬ КОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

В настоящее время широкое применение нашел генератор типа описанного в ^{5,6}. Принцип действия генератора заключается в следующем. Плоский электронный луч (рис. 4) проходит между отклоняющими пла-

стинами, к которым подводится высокочастотное напряжение, создающее поперечное электрическое поле. Это переменное поле заставляет электронный луч пробегать по электроду 3 дважды за период высокочастотного напряжения. Таким образом, сквозь щель в электроде 3 дважды за период будут проходить группы электронов в направлении коллектора 1. Коллектором может служить внутренний проводник коаксиальной кабеля или двухпроводной линии (рис. 5).

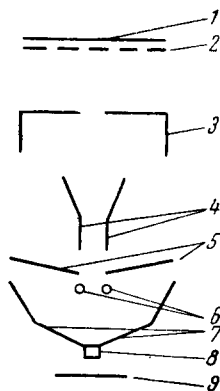


Рис. 4. Поперечный разрез импульсного генератора с поперечным отклонением: 1 — коллектор (анод), 2 — антидинаatronная сетка, 3 — экран со щелью, 4 — отклоняющие пластины, 5 — ускоряющие электроды, 6, 7 — фокусирующие электроды, 8 — катод, 9 — экран.

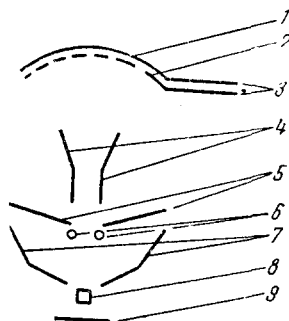


Рис. 5. Поперечный разрез генератора с выходным устройством в виде двухпроводной линии: 1 — анод, 2 — антидинаatronная сетка, 3 — линия (или коаксиальный кабель), 4 — отклоняющие пластины, 5 — ускоряющие электроды, 6, 7 — фокусирующие электроды, 8 — катод, 9 — экран.

Остановимся на конструкции генераторов этого типа. В приборе применяется пушка Пирса с прямоугольным катодом, которая создает плоский ленточный луч. Электрод 7, образующий угол $67,5^\circ$ с плоскостью, перпендикулярной эмитирующей поверхности катода, наряду с фокусировкой управляет также величиной тока луча. Электроды 6, выполненные в виде стержней, служат для дополнительной фокусировки луча. Пластины 5 являются ускоряющими электродами. Потенциалы

электродов подбираются так, чтобы сфокусировать луч на электроде 3. Пластины 4 служат для отклонения луча. Прикладывая к ним переменное напряжение, мы заставляем луч колебаться в плоскости чертежа. При этом только определенная часть электронов луча, как уже говорилось, попадает на коллектор. Электрод 2, выполненный в виде сетки, играет роль антидинаatronной сетки.

Выходной ток имеет форму либо трапецеидального, либо треугольного импульса в зависимости от соотношения ширины щели и толщины луча. Таким образом, имеется возможность в некоторых пределах изменять форму импульса. Основными параметрами этого генератора являются: крутизна выходной характеристики, которая в значительной степени определяет крутизну фронта выходного импульса и полное напряжение между отклоняющими пластинами, необходимое для полного переброса луча с правой пластины электрода 3 на левую, или наоборот, т. е. напряжение, необходимое для получения пакета электронов.

Крутизна S выходной характеристики лампы с поперечным управлением (приращение тока коллектора i_k при конечном приращении напряжения на пластинах 4) определяется соотношением $S = \frac{\partial i_k}{\partial u_1}$.

Крутизну S можно также определить, исходя из геометрии конструкции и ее других параметров $S \cong i_k \cdot B \cdot q$, где q — чувствительность отклонения, B — ширина луча, i_k — плотность тока перед коллектором в плоскости щели.

Выражая плотность тока у коллектора i_k и чувствительность отклонения q через конструктивные размеры прибора, получим $S \cong j_0 B \frac{l}{\sqrt{u_1}}$, где j_0 — плотность тока у катода, l — длина отклоняющих пластин, u_1 — среднее напряжение отклоняющих пластин относительно катода.

Следует отметить, что увеличение ширины луча B ограничивается трудностью его фокусировки. Среднее постоянное напряжение u_1 определяется из условия наилучшей фокусировки луча, так как постоянное электростатическое поле между ускоряющими пластинами 5 и отклоняющими пластинами используется как дополнительная линза для фокусировки луча.

Длина отклоняющих пластин l ограничивается на высокой частоте, как известно, временем пролета электронов между пластинами. Максимальная частота управляющего напряжения должна быть меньше или, в крайнем случае, равна: $f \leq \frac{1}{2\tau_{пр}}$, где $\tau_{пр}$ — время пролета электронов между пластинами.

При выводе зависимости крутизны предполагалось, что электронный луч касается отклоняющих пластин, хотя практически он занимает около $1/3$ пространства между отклоняющими пластинами. Поэтому максимальная крутизна выходной характеристики составит примерно $1/3$ расчетного значения, составляющего $1,9 \text{ ма/в}$ (при $B=3 \text{ см}$, $j_0=10 \text{ ма/см}^2$, $l=0,8 \text{ см}$ и $U_1=150 \text{ в}$, т. е. $0,5 \div 0,6 \text{ ма/в}$), что достаточно хорошо подтверждается экспериментальными результатами. Полное отклоняющее напряжение U_4 , необходимое для переброса луча, может быть определено, если известна чувствительность отклонения q , толщина луча в плоскости щели δ , ширина щели в экране a , d — расстояние между пластинами. Чувствительность отклонения вычисляется из конструктивных размеров прибора, среднего напряжения отклоняющих пластин и напряжения экрана со щелью, как:

$$q = \frac{l}{2dU_4} \left(\frac{U_{q1}}{U_1} \right)^{1/2} \alpha = \frac{0,8 \cdot 1,5}{2 \cdot 0,4 (200)^{1/2} \cdot (150)^{1/2}} = 0,1 \text{ мм/в.}$$

Тогда полное отклоняющее напряжение U_4 выражается следующим образом:

$$U_4 = \frac{\delta + n}{S} = 30 \text{ в}$$

при $\delta = 1 \text{ мм}$, $h = 2 \text{ мм}$, $S = 0,1 \text{ мм/в}$, $d = 0,4 \text{ см}$.

Длительность импульса на выходе генератора легко подсчитывается из очевидного соотношения:

$$\tau_U = \frac{\arcsin U_4 / 2U_n}{\pi f} \quad (4)$$

при $f = 10 \text{ мгц}$, $U_n = 500 \text{ в}$, $U_4 = 30 \text{ в}$ длительность импульса получается порядка 10^{-9} сек.

Интересно то, что измерение длительности получаемых импульсов в описанном генераторе производится в той же колбе, в которой собран сам генератор. Индикация осуществляется при помощи круговой развертки электронного пакета. Для этого внутри генератора вставляется дополнительно взаимно-перпендикулярно две пары отклоняющих пластин, а в коллекторе прорезается небольшое отверстие. На эти пластины подаются напряжения, сдвинутые друг относительно друга на 90° .

При отсутствии отклоняющего напряжения электронный луч проецирует окружность на покрытом люминофором экране. При вырезании импульса на экране вместо окружности появляются две дуги, длины которых соответствуют длительности выходных импульсов. Если период развертывающего напряжения T , диаметр окружности на экране D , а длина

светящихся дуг l' , то длительность импульса определится, как $\tau_U = \frac{TU'}{\pi D}$.

Две светящиеся дуги означают, что за период изменения напряжения на вырезах пластин образуются два импульса.

Экспериментальная проверка показала, что при помощи такого генератора можно сравнительно легко получать импульсы длительностью порядка 10^{-9} сек. Генератор относительно прост в наладке и изготовлении. Однако лишь малая часть тока луча в нем используется полезно.

Кроме того, естественно, что при попытках получить импульсы меньшей длительности будет уменьшаться амплитуда выходного импульса. Этот тип генератора позволяет на 100-омной нагрузке (коаксиальный кабель, например) получать импульсы с амплитудой порядка 0,3—0,5 в, что в значительной степени ограничивает возможность применения таких генераторов, хотя принципиально, несомненно, имеется возможность повышать мощность выходных импульсов.

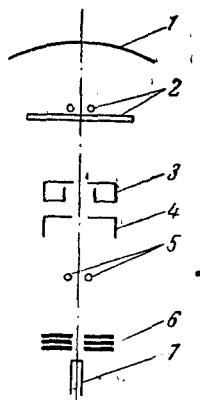


Рис. 6. Поперечный разрез комбинированного импульсного генератора: 1 — флюоресцирующий экран, 2 — система круговой развертки, 3 — резонатор, настроенный на частоту 3000 мГц, 4 — экран со щелью, 5 — система отклонения (Лехеровская линия), 6 — линза, 7 — электронная пушка.

§ 4. КОМБИНИРОВАННЫЙ ГЕНЕРАТОР

Импульсный генератор ⁷ представляет собой комбинацию двух уже описанных нами приборов. Принцип действия его заключается в следующем. Вырезаются пакеты электронов методом, описанным в предыдущем параграфе. Затем эти пакеты уплотняются путем клистронного сжатия (рис. 6). Следует отметить, что в данном приборе в качестве отклоняющей системы использовалась лехеровская линия, настроенная в резонанс. Луч проходил между проводниками этой линии. Отклоняющее устройство возбуждалось на частоте 300 мГц. Полученные вырезаемые пакеты электронов проходили через сжимаемую камеру, настроенную в резонанс на частоте 3000 мГц, в которой производилась модуляция их по скоростям. Измерение длительности полученных пакетов электронов производилось так же, как и в предыдущем случае, то есть при помощи круговой

развертки. В результате комбинации двух методов удалось получить пакеты длительностью примерно $2 \cdot 10^{-12}$ сек. Этот результат является, несомненно, большим достижением в импульсной технике.

§ 5. ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ С МАГНИТНЫМ ТОРМОЖЕНИЕМ

Этот тип генератора ^{8,9} является пока единственным известным прибором, позволяющим получать мощные короткие импульсы. Принцип действия описываемого генератора отличен от генераторов описанных выше. Прибор является сравнительно простым и высокоэффективным. Конструкция прибора несложна (рис. 7). Вакуумный заземленный прибор T с продольной симметрией содержит высокоэффективный катод K , который заэкранирован от магнитных полей, и металлической сетки G . Между сеткой G и катодом K подключается импульсный генератор. В момент подачи внешнего импульса на сетку ее потенциал достигает величины V_0 по отношению к катоду. Длительность внешнего импульса больше, чем время пролета электронов в приборе t_0 . Длина первой секции, так же как и третьей секции, мала по сравнению с длиной второй секции, которая на

несколько порядков больше величины радиуса R трубки. Радиус третьей секции R' несколько больше радиуса R второй секции. Длина третьей секции в несколько раз больше ее радиуса.

Внутри второй секции создается аксиальное магнитное поле B_z . Это фокусирующее магнитное поле, создаваемое катушкой, обычно предполагаемое ничтожным в области катода, должно быть однородным во второй секции и быстро возрастающим между $z_2 - z_1 = \Delta z$ до величины B_1 . Добиться резкого возрастания напряженности поля можно путем выполнения первых двух секций из магнитного материала, а последней (третьей) — из немагнитного. Применение такого магнитного поля решает проблему фокусировки цилиндрического луча с высокой плотностью заряда на большом расстоянии без значительного изменения величины площади поперечного сечения луча, или распыливания тока и потенциала луча. Больше того, это позволяет легко изменять осевую скорость луча.

Принцип действия прибора заключается в следующем. Мощный электронный поток эмитируется катодом и образует цилиндрический луч во второй секции под воздействием постоянного фокусирующего магнитного поля B_0 . Все электроны луча вращаются вокруг продольной оси с одинаковой угловой скоростью $d\Phi/dt$ и подходят к третьей секции с продольной скоростью dz/dt . В течение времени пролета t_0 постоянный ток i_0 проходит сквозь систему кроме незначительной части, оседающей на сетке G . Входя в зону возрастания напряженности магнитного поля, луч претерпевает радиальное сжатие фронта благодаря силе Лорентца до тех пор, пока эта сила опять не скомпенсируется силой расталкивания и центробежной силой. В то же время осевая скорость электронов уменьшается и становится нулевой в области, где $B(r, z) = B_1$. Таким образом, увеличивается плотность пространственного заряда; по этой причине потенциал падает, а потенциальный барьер возрастает и препятствует прохождению электронов. Градиент осевого потенциала становится отрицательным во второй секции, нулевым в точке $z = z^*$ и положительным в третьей секции.

Так как виртуальный катод разрастается, то ток луча падает ввиду того, что падает магнитное поле, которое индуцирует осевое электрическое поле. Таким образом, имеет место обмен магнитной и электрической энергий. Индуцированное магнитное поле возникает только в третьей секции. Во второй секции оно компенсируется электрическим полем благодаря неоднородному распределению пространственного заряда вдоль луча в течение периода. Точно такое же явление наблюдается, например, в последовательном резонансном контуре, состоящем из индуктивности и емкости, который при определенных условиях становится идеальным проводником. Во время преобразования магнитной энергии в электрическую, электрическое поле вдоль луча, которое создает магнитное поле, становится равным нулю, так как происходит наложение индуцированного

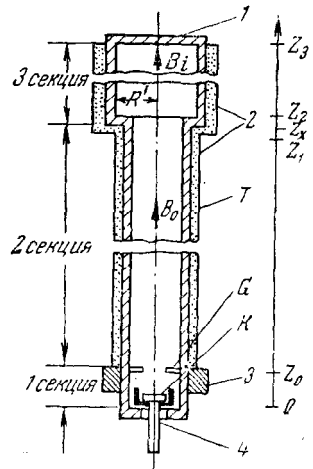


Рис. 7. Разрез генератора с магнитным торможением луча с магнитной системой: 1 — оболочка, 2 — обмотки электромагнитов, 3 — компенсирующая катушка или кольцо из ферромагнитного материала, 4 — изолятор, T — трубка, K — катод, G — сетка, R' — радиус широкой части трубки, R — радиус второй секции, на рисунке не отмечен.

ного электрического поля и электрического поля, вызванного изменением концентрации проводящих электронов.

Индукцированные силовые линии начинаются на внутренней стенке трубки T и кончаются на фронтальных электронах луча. Из-за высокой плотности пространственного заряда луча они не проникают в глубь него. Этот эффект экранировки поверхностными электронами и является причиной образования потенциального барьера. Фронтальные электроны, на которых кончаются индуцированные силовые линии, образуют заряд позади потенциального барьера в области положительного градиента потенциала. Фокусирующее магнитное поле там, хотя и больше чем B_t , уменьшающее продольную скорость подходящих электронов в первоначально свободном от поля пространстве, но, тем не менее, не превышает предельного значения для электронов в индуцированном электрическом поле позади виртуального катода. Электроны ускоряются, следовательно они поглощают энергию электрического поля, которая преобразуется в магнитную энергию, так как электроны увеличивают скорость, двигаясь в третьей секции.

Таким образом, в первоначально свободной от поля третьей секции электромагнитное поле возникает скачком и исчезает, когда электроны достигают стенок трубки. Следовательно, этот процесс разрядки может рассматриваться как очень короткий электромагнитный импульс, который трубка будет излучать, если она выполнена как отражатель и если ее торец сделать из диэлектрика, например из стекла.

Во время разрядки плотность пространственного заряда на участке Δz уменьшается и виртуальный катод движется в отрицательном направлении оси z , постепенно рассасываясь. Одновременно осевое магнитное поле во второй секции уменьшается.

То, что магнитная энергия пространственного заряда пропорциональна его электромагнитному моменту, предполагает, что луч во второй секции теряет свой общий электромагнитный момент, когда магнитное поле уменьшается.

Это же может быть объяснено, исходя из природы внутренних электромагнитных сил, возрастающих при сжатии, которые имеют антипараллельные составляющие по отношению к скорости электронов. Так как Ларморова сила исчезает, когда момент электронов становится нулевым, то радиальное поле пространственного заряда расталкивает электроны по направлению к стенкам трубки, где они, наконец, оседают.

Вторая и третья секции могут рассматриваться как волноводы с сильно различными волновыми сопротивлениями. Рассогласованность волноводов вызывает отражение волны, связанной с лучом на границе двух секций. В процессе отражения генерируются высшие гармоники в третьей секции в соответствии с электронами, которые ускорялись в трубке.

Математическая обработка явления торможения электронного луча магнитным полем сводится к решению уравнения Лагранжа, описывающего движение электронного потока в электрическом и магнитном полях.

Из решения следует, что

$$(dz/dt)^2 = 2kV_0 - \left(\frac{1}{2} kbB_0\right)^2 \cdot (1 + 2 \ln R/b),$$

где b — радиус луча, V — скалярный потенциал, A — векторный потенциал. Причем

$$d\Phi/dt = -kA\Phi/r = -\frac{1}{2} kbB_0.$$

Эти равенства показывают, что энергия луча частично трансформируется в энергию вращения. Продольная скорость уменьшается с увеличением B_0 и исчезает при $B_0 = B_l$, где B_l определяется предельным полем, задаваемым равенством

$$B_l = \left(\frac{8V_0}{kb^2(1+2\log R/b)} \right)^{1/2} \text{ (гаусс)}$$

b — в сантиметрах, V — в вольтах. Следовательно, никакой ток не может пройти сквозь трубку, если $B_0 \geq B_l$.

Выражение для тока имеет вид

$$i_0 = \frac{4\pi\epsilon_0(2k)^{1/2}\alpha^2(1-\alpha^2)^{1/2}}{1+2\log R/b} V_0^{3/2},$$

где

$$\alpha = B_0/B_l < 1.$$

Для определения энергии генерируемого импульса и длительности его необходимо обратиться к теореме Пойнтинга:

$$\operatorname{div} \mathbf{S} = -\rho \mathbf{v} \mathbf{E} - d\omega/dt,$$

где $\mathbf{S}$ — вектор Пойнтинга, ω — плоскость электромагнитной энергии. Это выражение означает, что поток энергии в единицу времени в единицу объема частично идет на ускорение электронов и частично на увеличение электромагнитной энергии.

Магнитная энергия определяется выражением

$$W_m(t_0) = \frac{4\pi\epsilon_0\alpha^2 V_0^2 z_1}{1+2\log R/b} \left(1 - \frac{\alpha^2(1+4\log R/b)}{(1+2\log R/b)} \right)$$

и

$$\Delta t = \frac{1}{2} \pi \sqrt{LC},$$

где L — индуктивность и C — емкость определяются из соотношений энергий:

$$W_m(t_0) = \frac{1}{2} i_{0L}^2,$$

$$W_C(t_0) = i_0 V_0 t - \frac{1}{2} V^{*2} C$$

V^* — потенциал пространства в точке z^* .

Числовые расчеты дают следующие результаты:

1. При $V_0 = 3 \cdot 10^4$ в, $z_1 = 100$ см, $R = R' = 2,5$ см, $b = 0,34$ см, $\alpha = 0,9$ и $B_l = 1510$ гаусс, и $B_0 = 1360$ гаусс, $(dz/dt)_0 = 4,5 \cdot 10^9$ см/сек, $t_0 = 2,22 \times 10^{-8}$ сек, $W_m(t_0) = 1,03 \cdot 10^{-2}$ вт·сек, $C = 1,1 \cdot 10^{-14}$ ф, $L = 3,55 \cdot 10^{-5}$ гн,

$$\Delta t = 9,8 \cdot 10^{-10} \text{ сек.}$$

2. $R = b = 0,34$ см, $R' = 5$ см, $\alpha = 0,99$ получается:

$$B_l = 3400 \text{ гаусс, } B_0 = 3350 \text{ гаусс, } (dz/dt)_0 = 1,45 \cdot 10^9 \text{ см/сек,}$$

$$t_0 = 6,9 \cdot 10^{-8} \text{ сек, } W_m(t_0) = 7,35 \cdot 10^{-2} \text{ втсек, } L = 6,6 \cdot 10^{-5} \text{ гн,}$$

$$C = 6 \cdot 10^{-15} \text{ ф, } \Delta t = 10^{-9} \text{ сек.}$$

Таким образом, по расчетам видно, что система с магнитным торможением луча позволяет получать достаточно мощные и короткие электромагнитные импульсы.

Экспериментальная проверка принципа действия и конструкции прибора на низкой частоте (60 гц) подтвердила возможность генерации импульсов методом магнитного торможения.

Недостатками генератора является зависимость мощности импульсов от частоты повторения, а также ограниченность его применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электронные генераторы имеют большое будущее. Их основными достоинствами являются — простота, стабильность в работе, возможность получения очень коротких импульсов в широком диапазоне частот их повторения. То, что в настоящее время они имеют ограниченное применение, объясняется прежде всего новизной самих методов электронной генерации импульсов. Они мало известны широкому кругу специалистов; работы в этой области только начинают разворачиваться. Кроме того, существующие генераторы в основном маломощны и имеют ограниченную область применения. Однако, несомненно, развитие описанных методов, или методов, которые могут быть предложены в будущем, откроют новые возможности импульсной техники.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Харкевич, Нестационарные волновые явления, М., 1947 г.
2. Сб. «Отражательные клистроны», ч. I, изд. «Сов. радио», 1954 г.
3. Сб. «Клистроны», ч. II, изд. «Сов. радио», 1954 г.
4. D. B. Hasted, Proceeding of Phys. Soc. **60**, 340 (1948).
5. E. W. Grant, H. Von-Foerster, J. Ap. Phys. **25**, 674 (1954).
6. L. R. Bloom, H. Von-Foerster, Rev. Sci. Inst. **25**, 649 (1954).
7. E. W. Ernst, H. Von-Foerster, J. Ap. Phys. **25**, 674 (1954).
8. Randorf, Wireless Eng. **28**, 215 (1951).
9. Billington, Randorf, Wireless Eng. **31**, N 11 (1954).