говорит нам, что решением Π_1 воздействие рельефа воспроизводится в ослабленном виде. Решение Π_2 учитывает точно рельеф, однако возмущения сильно сглажены. Это показывает необходимость использования во всех расчетах соотношения (4а). Построенные алгоритмы оперативны: любой из вариантов укладывался в счетное время, меньшее 30 мин при N = 170 и 15 мин при N = 113 (все расчеты проводились на БЭСМ-6).

5. В основе разработанного метода точного учета трансцендентного граничного условия вида (4а) лежит принцип суперпозиции, который использует в качестве отдельного элемента решение, обладающее высокой локализованностью. Этот метод имеет самостоятельное значение и его можно использовать в других теоретических моделях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Smith R. B. Adv. in Geophys., 1979, 21, р. 87. [2] Vergeiner I. Quart. J. Roy. Met. Soc., 1971, 97, N 411, р. 30. [3] Кожевников В. Н., Бибикова Т. Н., Журба Е. В. Изв. АН СССР. Сер. ФАО, 1977, 13, № 5, с. 451; [4] Klemp J. B., Lilly D. K. J. Atmos. Sci., 1977, 35, N 1, р. 78. [5] Long R. R. Tellus, 1955, 7, N 3, р. 341. [6] Davis R. E. J. Fluid Mech., 1969, 36, N 1, р. 127. [7] Krishnamurti T. N. Month. Weather Rev., 1964, 92, N 4, р. 147. [8] Гранберг И. Г. Изв. АН СССР. Сер. ФАО, 1979, 15, № 12, с. 1235. [9] Кожевииков В. Н., Козодеров В. В. Вестн. Моск. ун-та. Сер. Физ. Астрон., 1970, № 1, с. 11. [10] Кожевников В. Н., Козодеров В. В. Изв. АН СССР. Сер. ФАО, 1970, 6, № 10, с. 979. [11] Lyra I. Z. angew. Math. und Mech., 1943, 23, H. 1, р. 1. [12] Smith R. B. J. Atmos. Sci., 1977, 34, N 10, р. 1634.

Поступила в редакцию 02.04.81

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1982, Т. 23, № 5

УДК 539.1.074

АНАЛИЗ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСАМОГАСЯЩИХСЯ СЧЕТЧИКОВ

В. И. Шумшуров, М. В. Тельцов, З. Г. Зуева, А. Н. Антропов (НИИЯФ)

Газоразрядные счетчики применяются в качестве простейших детекторов элементарных частиц и у-квантов. Сфера их применения существенно расширилась после создания электронной схемы регистрации импульсов [1—3]. В этих счетчиках используется самостоятельный газовый разряд, гашение которого осуществляется схемой, содержащей, как правило, высокоомное (гасящее) сопротивление, вследствие чего такой детектор частиц обладает низким быстродействием. Открытие гасящих свойств некоторых газов и паров многоатомных органических соединений привело к созданию самогасящихся счетчиков, обладающих повышенным быстродействием [4, 5]. Исследования различных характеристик и механизма разряда самогасящихся счетчиков показали, что они имеют малую долговечность из-за разрушения молекул гасящего газа. Было также показано, что галогенные счетчики в обычном режиме являются несамогасящимися; подчеркнута роль схемы включения в гашении разряда [6—10]. В связи с вышеизложенным является актуальным повышение быстродействия несамогасящихся счетчиков, особенно при использовании их в автономном режиме работы, например на автоматических космических станциях [11, 12]. В этих условиях нагрузочная характеристика счетчика, имеющая восходящий участок, максимум и

нисходящий участок при увеличении мощности дозы облучения, приводит к неоднозначности в определении величины потока частиц или дозы [13].

Так как указанная форма нагрузочной характеристики связана непосредственно с просчетами частиц, целесообразно для анализа причии, дающих основной вклад в число просчетов, произвести сравнение экспериментальных данных по скорости счета с расчетными значениями. Распределение интервалов времени между прохождениями частиц, как известно [14], описывается выражением

$$P(\tau) = n e^{-n\tau},\tag{1}$$

где *n* — интенсивность излучения в с⁻¹, *P* — вероятность интервала т. Для исключения возможных методических ошибок было получено

экспериментальное распределение интервалов времени между импуль-



Рис. 1. Основная схема включения счетчика (a); эквивалентная схема (б); схема с дополнительными емкостью и источником напряжения (в)

сами для двух значений интенсивности: $n_1 = 1,02 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1}$ и $n_2 = -2,6 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$. Результаты подтвердили корректность использования выражения (1).

Учитывая, что быстродействие счетчиков часто определяется параметрами схемы включения, играющими существенную роль также в формировании амплитуды и длительности импульса, поступающего на вход усилителя-формирователя и далее на счетное устройство, рассмотрим основную схему, приведенную на рис. 1, а, где R_0 — ограничивающий (гасящий) резистор, $C_{\rm сч}$ — емкость счетчика, $R_{\rm вх}$ и $C_{\rm вх}$ — входные сопротивления и емкость схемы формирователя, $V_{\rm p}$ источник рабочего напряжения. Если известны напряжение $V_{\rm p}$, подаваемое на счетчик, и напряжение начала счета V_s , можно определить полное время $T_{\rm B}$ на восстановление работоспособности схемы после прохождения ионизирующей частицы:

$$T_{\mu} = R_0 C_{cq} \ln \frac{V_p}{V_p - V_s}.$$
 (2)

Такое рассмотрение является феноменологическим, производится без анализа механизма газового разряда, но позволяет оценить быстродействие схемы. При этом можно полагать, что частица, прошедшая через счетчик в интервале времени $[0, \tau < T_{\rm B}]$, не сосчитывается, так как напряжение на счетчике $V(\tau)$ ниже V_s . Доля сосчитанных частиц в соответствии с (1) равна $P_1 = e^{-nT_{\rm B}}$ и зависит как от интенсивности *n*, так и от элементов схемы R_0 и $C_{\rm cu}$, определяющих величину $T_{\rm B}$. Используя выражение (2), находим число сосчитываемых за 1 с частиц $N=nP_1$. На рис. 2 пунктиром приведены расчетные нагрузочные характеристики для следующих значений т: 1,5 · 10⁻⁴; 1,2 · 10⁻⁴; 1 · 10⁻⁴; 7,33 · 10⁻⁵ с (кривые $a_1 - a_4$ соответственно) в широком диапазоне мощностей доз и их сравнение с экспериментальной характеристикой (кривая б) счетчика СТС-5, имеющего емкость $C_{cv}=2 \cdot 10^{-12}$ Ф и сопротивление $R_0=4,3 \cdot 10^6$ Ом.

Как видно из рис. 2, расчетные кривые аналогичны экспериментальным (имеют восходящий участок, максимум и нисходящий участок), что дает качественное согласие с опытом, однако выбором одного фиксированного параметра $\tau = T_{\rm B}$ нельзя совместить расчетную кривую с экспериментальной. Так, с уменьшением τ , например, кривые подни-



Рис. 2. Расчетные нагрузочные характеристики: $\tau = 1, 5 \cdot 10^{-4} (a_i)$; $1, 2 \cdot 10^{-4} (a_2)$; $1 \cdot 10^{-4} (a_3)$ н $7, 3 \cdot 10^{-5} (a_4)$; экспериментальная характеристика счетчика СТС-5, включенного по основной схеме (б): $C_{o_{i}} = 2 \cdot 10^{-12} \Phi$, $R_0 = 4, 3 \cdot 10^6$ Ом; экспериментальная характеристика при суммарной $C_{o_{i}} = 4 \cdot 10^{-12} \Phi$ (e); то же, но с $V_{\pi} = 9$ В и $C_{\pi} = 2 \cdot 10^{-12} \Phi$ (z)



Рис. 3. Экспериментальные xарактеристики счетчика, снятые без усилителяформирователя: R_0 =4,3 МОм (1) и 470 кОм (2)

маются выше, их максимум сдвигается вправо, а участки спада по наклону существенно отличаются. Это указывает на более сложный ха-

рактер процессов в схеме и самом счетчике. Необходимо отметить также, что различие расчетных и экспериментальных данных нельзя рассматривать как проявление эффекта «мертвого» времени продлевающегося типа (14). Расчетные кривые а лучше согласуются с кривой I, представленной на рис. 3, снятой по схеме рис. 1, a, когда сигнал через R=51 кОм непосредственно подается на счетное устройство типа ПСО2, минуя электронную схему усилителя-формирователя. Из сравнения кривой б (рис. 2) и кривой I (рис. 3) видно, что быстродействие счетчика увеличивается, если уменьшить мертвое время схемы включения, в данном случае исключив мертвое время усилительной схемы.

Среди других причин, которые могли бы повлиять на форму нагрузочной характеристики, следует отметить наличие объемного заряда положительных ионов в счетчике, движение этих ионов к катоду, изменение коэффициента газового усиления (КГУ), изменение амплитуды импульса на входе усилителя-формирователя и наложение двух или более импульсов. Эти факторы взаимно связаны: увеличение объемного заряда, например, приводит к изменению КГУ и амплитуды.

Формально, в соответствии с выражением (2), изменение напряжения V_s можно использовать как параметр, зависящий от интенсивности облучения, однако прямое измерение V_s и в особенности его изменения при облучении счетчика нарастающим по интенсивности потоком статистически распределенных частиц затруднено. Косвенные данные об этом можно получить путем анализа амплитудного распределения импульсов, которое обусловлено переходным процессом в схеме после прохождения частицы через счетчик.

В соответствии с известными данными [15, с. 267] будем полагать, что длительность активной стадии разряда $\tau_a < 5 \cdot 10^{-8}$ с и для рассмотрения схем со временем восстановления напряжения $T_{\rm B} > 1 \cdot 10^{-6}$ с (что практически всегда выполняется) можно для приближенного вычисления амплитуды, длительности и фронтов импульса использовать простую эквивалентную схему, приведенную на рис. 1, б. В этой схеме ключ K_1 замыкается в момент прохождения частицы и размыкается через время τ_a , после чего ключ K_2 замыкается и снова размыкается. Для уномянутой выше схемы счетчика СТС-5 величина $T_{\rm B} \approx 1.4 \cdot 10^{-5}$ с, что подтверждает корректность использования приближения $\tau_a \ll T_{\rm B}$ и возможность применения эквивалентной (расчетной) схемы. Выражение для вычисления параметров электрического импульса имеет вид [16]:

$$U_{\mu x}(t) = V(\tau) \frac{2R_{32} a e^{-\alpha t}}{(R_{31} + R_{32}) m} \operatorname{sh} mt \ \operatorname{при} \ \alpha^{2} > \omega_{0}^{2}, \tag{3}$$

где

$$R_{31} = R_0 + R_{\mu \chi} \frac{C_{B\chi}}{C_{Cq}}; \ L_3 = R_0 R_{\mu \chi} C_{\mu \chi}; \ R_{32} = R_{\mu \chi};$$

$$C_3 = C_{Cq}; \ m = \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}; \ \alpha = \frac{R_{31} + R_{32}}{2L_3}; \ \omega_0^2 = \frac{1}{L_3 C_3};$$

$$V(\tau) = V_p (1 - e^{-\tau/R_0 C_{Cq}}),$$

а т — интервал времени между импульсами и соответственно

$$U_{PX}(t) = V(\tau) \frac{2R_{P2}\alpha t}{R_{P1} + R_{P2}} e^{-\alpha t} \text{ при } [\alpha^2 = \omega_0^2.$$
(4)

Амплитудное значение достигается в момент $t_m = 1/\alpha$ для случая $\alpha^2 = \omega_0^2$ и в момент $t_m = \frac{1}{m} \ln \frac{\alpha + m}{\alpha - m}$ для случая $\alpha^2 > \omega_0^2$. Здесь пред-

полагается, что в счетчике после прохождения частицы происходит самостоятельный газовый разряд, емкость счетчика не шунтирована другими элементами схемы, а остаточное напряжение на счетчике равно нулю. Выражения (3) и (4) позволяют рассчитать параметры импульса; они показывают, насколько существенную роль играют величины Ro, Cov, Rвх и Cвх при формировании импульса. Например, при V = 400 В, $R_{\text{вx}} = 5 \cdot 10^4$ Ом, $C_{\text{сq}} = 5 \cdot 10^{-12}$ Ф для двух значений $C_{\text{вx}} : 200 \times 10^{-12}$ ×10⁻¹² и 20·10⁻¹² Ф амплитуда импульса будет 1,47 и 2,63 В соответственно. Подключение к счетчику дополнительной емкости ведет к увеличению амплитуды. Так, для $C_{cy} = 4 \cdot 10^{-12} \Phi$ при тех же значениях R_0 , $R_{\text{вх}}$ и $C_{\text{вх}} = 20 \cdot 10^{-12}$ Ф амплитуда будет 3,11 В вместо 1,47 В. В выражениях (3) и (4) учтена зависимость амплитуды от степени восстановления напряжения V(т). Увеличение емкости счетчика и соответствующее увеличение амплитуды может привести к увеличению скорости счета при больших дозах за счет импульсов, имевших ранее недостаточную для регистрации амплитуду, и за счет наложения импульсов. На рис. 2 (кривая в) приведена экспериментальная нагрузочная характеристика для счетчика СТС-5 с дополнительной параллельной емкостью Сд= =2·10-12 Ф. Как видно, эта кривая лежит выше кривой б. Небольшое увеличение емкости счетчика указанным образом позволяет частично уменьшить число просчетов при средних значениях дозы, но основные черты нагрузочной характеристики сохраняются.

53

Отметим также, что величины $T_{\rm B}$ н t_m в общем случае не совпадают. Так, для первого примера ($C_{\rm Bx} = 200 \cdot 10^{-12}$ Ф) $t_m = 10 \cdot 10^{-6}$ с, а для второго ($C_{\rm Bx} = 20 \cdot 10^{-12}$ Ф) $t_m = 5,08 \cdot 10^{-6}$ с при одном значении $T_{\rm B} = 13,9 \cdot 10^{-6}$ с. Пользуясь выражениями для t_m и $T_{\rm B}$, можно оценить возможность наложения импульсов. На рис. 4 представлена схема возможных наложений а) для случая $t_m < T_{\rm B}$, б) для $t_m > T_{\rm B}$. При $t_m \ll T_{\rm B}$ наложение импульсов практически исключается, и наоборот, при $t_m \gg T_{\rm B}$ число наложений велико и возрастает с ростом интенсивности облучения, что может привести и, как видно из рис. 2 (кривая б), приводит к увеличению числа регистрируемых импульсов в эксперименте по сравнению с расчетом. Таким образом, для повышения быстродействия необходимо уменьшать $C_{\rm Bx}$ и $R_{\rm Bx}$, в чем легко убедиться путем вычисления величины t_m .



Рис. 4. Схема наложения импульсов

Естественно, что для повышения быстродействия схемы желательно уменьшать и время восстановления путем уменьшения R_0 . Рис. 3 иллюстрирует и этот факт (кривая 1 снята при $R_0=4,3$ МОм, кривая 2 при $R_0=470$ кОм). Однако время восстановления должно быть значительно больше времени деионизации газа в счетчике [17, 18]. Время деионизации не остается постоянным, а зависит от величины R_0 , C_{cq} и V_p . На рис. 5 приведена зависимость скорости счета повторных (ложных) импульсов от времени восстановления напряжения на аноде [18], представленная в полулогарифмическом масштабе для различных значений C_{cq} . Скорость деионизации, определяемая по наклону прямых, как это видно из рисунка, изменяется в несколько раз и максимальна для малых C_{cq} , что, по-видимому, обусловлено более быстрым восстановлением напряжения и удалением к катоду объемного заряда положительных ионов. При малых концентрациях ионов процесс деионизации, повидимому, можно описывать экспоненциальным выражением.

Повысить быстродействие схемы можно за счет собирания положительных ионов на аноде вместо катода. На рис. 1 приведена схема, позволяющая существенно ускорить восстановление напряжения на счетчике, в которую введен дополнительный низковольтный источник питания для автоматического гашения разряда и дополнительный конденсатор малой емкости. Такая схема обладает неперегружаемостью, более широким диапазоном измеряемых интенсивностей, позволяет более чем на порядок увеличить радиационный ресурс счетчика, повысить быстродействие. Экспериментальная нагрузочная характеристика счетчика СТС-5, включенного по описанной схеме при Ro=470 кОм и напряжении V_д=9 В, приведена на рис. 2 (кривая г). Отличительной особенностью этой нагрузочной характеристики является отсутствие участка спада, следовательно, схема позволяет расширить диапазон рабочих мощностей дозы, устранить неоднозначность в ее определении. Несмотря на качественное сходство кривой 2 (рис. 3) и кривой г (рис. 2), предпочтение следует отдать включению счетчика по схеме рис. 1, в, так как включение счетчика по схеме рис. 1, a с $R_0 = 470$ кОм без усилителя-формирователя приводит к Numn

быстрому износу счетчика. Таким образом, в работе проде-

лано следующее:

— показана актуальность повыбыстродействия шения несамогасящихся счетчиков, рассмотрены основные причины низкого быстродействия и пути их устранения;

— предложена простая формула для вычисления времени восстановления Т_в напряжения на счетчике и формула расчетной нагрузочной характеристики; проведено сравнение расчета с экспериментом;

— предложена эквивалентная (расчетная) схема и приведены выражения для вычисления амплитуды и других параметров электрического импульса;

– приведена схема возможных наложений импульсов;

показана зависимость скорости деионизации от R_0 и C_{cy} ;

— предложена схема включения, позволяющая расширить диапазон рабочих мощностей дозы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ
[1] Gicger H., Müller G. Phys. Zeits, 1928, 29, р. 839. [2] Neher H. V., Нагрег W. W. Phys. Rev., 1936, 49, р. 940. [3] Дмитриев А. Б. Приб. и техн. эксперимента, 1957, № 2, с. 3. [4] Trost A. Zeit f. tech. Physik, 1935, 16, р. 407.
[5] Trost A. Zeit f. Physik, 1937, 105, р. 399. [6] Ramsey W. E. Phys. Rev., 1940, 57, р. 1022. [7] Montgomery C. G., Montgomery D. D. Phys. Rev., 1940, 57, р. 1030. [8] Stever H. G. Phys. Rev., 1942, 61, р. 38. [9] Wilkin-son D. H. Phys. Rev., 1948, 74, р. 1477. [10] Дмитриев А. Б., Филатов А. И., Эйг Л. С. Приб. и техн. эксперимента, 1967, № 5, с. 157. [11] Вернов С. Н., Чудаков А. Е. УФН, 1960, 70, с. 585. [12] Вернов С. Н., Чудаков А. Е. и др. Изв. АН СССР, 1964, 28, № 12, с. 2058. [13] Дмитриев А. Б., Пес-ков Д. И. и др. Приб. и техн. эксперимента, 1959, № 3, с. 47. [14] Гольдан-ский В. И., Куценко А. В., Подгорецкий М. И. Статистика отсчетов при регистрации ядерных частиц. М., 1958, с. 170–172, 189—202. [15] Векслер В. И., Грошев Л. В., Исаев Б. М. Ионизационные методы исследования излучений. М.—Л., 1949, с. 267. [16] Теумин И. И. Справочник по переходным электриче-ским процессам. М.: Связьиздат, 1952, с. 93—98. [17] Simpson J. А. Phys. Rev., 1944, 66, р. 39 [18] Филатов А. И. Приб. и техн. экоперимента, 1976, № 5, с. 73.

Поступила в редакцию 06.04.81



Рис. 5. Скорость счета повторных импульсов N от времени восстановразличных ления напряжения для значений Ссч