

УДК 621.3.011.7

МЕТОДИКА СИНТЕЗА ГЕНЕРАТОРА МИКРОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ БОЛЬШОЙ ЭНЕРГИИ

Гимпилевич Ю.Б., Денисов Л.В., Балюра Ю.В.

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок г Севастополь, Украина, 98053

E-mail: gimpil@mail.ru

Предложена методика синтеза электрической схемы гибридного генератора с нормированным выходным эффективным сопротивлением, позволяющая получить импульсы напряжения и тока с параметрами, гарантированно попадающими в диапазоны допустимых значений, определяемые стандартом.

Одним из видов испытаний радиоэлектронной аппаратуры является испытание на устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Испытательным воздействием в данном случае является сигнал генератора импульсных помех, выход которого нагружен на вход испытуемого устройства. При этом параметры нагрузки не нормируются поскольку при проведении испытаний нагрузка может переходить из высокоомного в низкоомное состояние (пробой изоляции).

В соответствии с ГОСТ [1] генератор должен обеспечить импульсы со следующими временными параметрами:

- импульс напряжения холостого хода длительностью на половинном уровне (50 ± 10) мкс с временем нарастания фронта $(1 \pm 0,3)$ мкс;
- импульс тока короткого замыкания длительностью на половинном уровне $(16 \pm 3,2)$ мкс с временем нарастания фронта $(6,4 \pm 1,28)$ мкс.

Импульсы формируют с помощью так называемых гибридных генераторов, способных обеспечивать работу как на высокоомную так и на низкоомную нагрузки. Один из вариантов схемы гибридного генератора

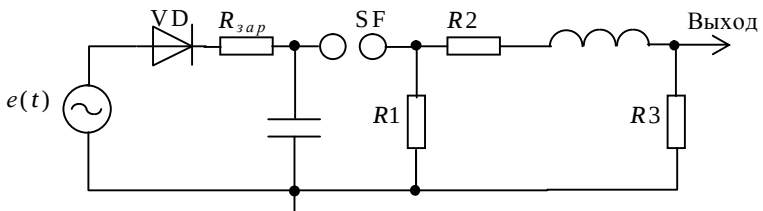


Рисунок 1 – Схема гибридного генератора: $e(t)$ – источник сетевого

показан на рисунке 1 [1].

Изображение напряжения на выходе генератора в режиме холостого хода можно записать в виде

$$U(p) = \frac{U_0 R_3}{L(p_1 - p_2)} \left(\frac{1}{p - p_1} - \frac{1}{p - p_2} \right), \quad (1)$$

где U_0 – напряжение на накопительном конденсаторе C в начальный момент времени, а параметры p_1 и p_2 определяются следующими соотношениями

$$p_1 = \frac{-\left(R_2 + R_3 + \frac{L}{R_1 C}\right) + \sqrt{\left(R_2 + R_3 + \frac{L}{R_1 C}\right)^2 - \frac{4L}{C} \left(1 + \frac{R_2 + R_3}{R_1}\right)}}{2L}; \quad (2)$$

$$p_2 = \frac{-\left(R_2 + R_3 + \frac{L}{R_1 C}\right) - \sqrt{\left(R_2 + R_3 + \frac{L}{R_1 C}\right)^2 - \frac{4L}{C} \left(1 + \frac{R_2 + R_3}{R_1}\right)}}{2L}. \quad (3)$$

Взяв обратное преобразование Лапласа от (1), получим напряжение на выходе в виде

$$U(t) = \frac{U_0 R_3}{L(p_1 - p_2)} [\exp(p_1 t) - \exp(p_2 t)]. \quad (4)$$

Функция (4) имеет максимум в момент времени $t = t_3$, который равен [2]

$$t_3 = \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) / (p_1 - p_2). \quad (5)$$

Проведем нормировку (4) относительно максимального значения $U(t_3)$:

$$u(t) = \frac{U(t)}{U(t_3)} = \frac{\exp(p_1 t) - \exp(p_2 t)}{\exp(p_1 t_3) - \exp(p_2 t_3)}. \quad (6)$$

Исходными данными при расчете формирующей схемы в режиме холостого хода, которые оговорены требованиями стандарта [1], являются длительность импульса напряжения на половинном уровне (момент времени t_4) и длительность фронта t_ϕ импульса напряжения. Эти параметры определяются из условий:

$$u(t_4) = 0,5; \quad (7)$$

$$t_\phi = t_2 - t_1, \quad (8)$$

где t_1 и t_2 – моменты времени, для которых выполняются следующие соотношения

$$u(t_1) = 0,1; \quad (9)$$

$$u(t_2) = 0,9. \quad (10)$$

Объединяя (5), (7)–(10) и учитывая (6), приходим к следующей

системе из пяти уравнений с пятью неизвестными t_1 , t_3 , t_4 , p_1 и p_2

$$\begin{cases} \frac{\exp(p_1 t_1) - \exp(p_2 t_1)}{\exp(p_1 t_3) - \exp(p_2 t_3)} = 0,1; \\ \frac{\exp(p_1 t_2) - \exp(p_2 t_2)}{\exp(p_1 t_3) - \exp(p_2 t_3)} = 0,9; \\ \frac{\exp(p_1 t_4) - \exp(p_2 t_4)}{\exp(p_1 t_3) - \exp(p_2 t_3)} = 0,5; \\ t_3 = \frac{\ln(p_2 / p_1)}{p_1 - p_2}; \\ t_2 - t_1 = t_\phi. \end{cases} \quad (11)$$

Данная система уравнений является нелинейной, поэтому ее решение было выполнено на ЭВМ с использованием пакета прикладных программ “Mathcad 2000 Professional”. Для решения использовалась итерационная процедура “Find”, которая

позволяет найти точное решение. В результате расчетов при номинальных значениях $t_\phi = 1$ мкс и $t_4 = 50$ мкс получены следующие значения: $t_1 = 0,05$ мкс; $t_2 = 1,05$ мкс; $t_3 = 2,48$ мкс; $p_1 = -1,5 \cdot 10^4$; $p_2 = -1,99 \cdot 10^6$.

На основе полученных значений p_1 и p_2 рассчитан и построен график импульса напряжения, изображенный на рисунке 2,а. Анализ результатов показывает точное соответствие импульса напряжения

требованиям стандарта [1], что подтверждает правильность решения.

Перейдем к анализу схемы в режиме формирования импульса тока.

Изображение выходного тока в режиме короткого замыкания можно записать в виде

$$I(p) = \frac{U_0}{L(p_3 - p_4)} \left(\frac{1}{p - p_3} - \frac{1}{p - p_4} \right), \quad (12)$$

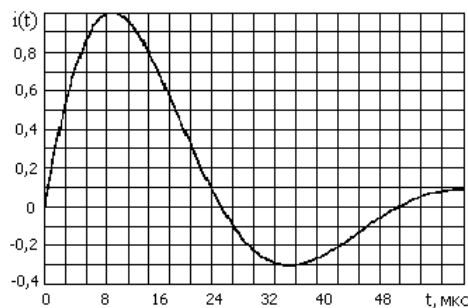


Рисунок 2 – Диаграммы работы формирующей цепи: а) нормированный импульс напряжения; б) нормированный импульс тока

где параметры p_3 и p_4 определяются следующими соотношениями

$$p_3 = \frac{-\left(R_2 + \frac{L}{R_1 C}\right) + \sqrt{\left(R_2 + \frac{L}{R_1 C}\right)^2 - \frac{4L}{C}\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}}{2L}, \quad (13)$$

$$p_4 = \frac{-\left(R_2 + \frac{L}{R_1 C}\right) - \sqrt{\left(R_2 + \frac{L}{R_1 C}\right)^2 - \frac{4L}{C}\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}}{2L}. \quad (14)$$

Взяв обратное преобразование Лапласа от (12), получим выходной ток в виде

$$I(t) = \frac{U_0}{L(p_3 - p_4)} [\exp(p_3 t) - \exp(p_4 t)]. \quad (15)$$

Попытка решить задачу в классе действительных корней характеристического уравнения p_3 и p_4 не привела к успеху. Поэтому рассмотрим случай комплексно-сопряженных корней [3] характеристического уравнения второго порядка:

$$\begin{aligned} p_3 &= \alpha + j\omega; \\ p_4 &= \alpha - j\omega, \end{aligned} \quad (16)$$

где α – коэффициент затухания, ω – частота собственных колебаний разрядного контура

Подставив (16) в выражение (15) и, преобразовав, получим

$$I(t) = \frac{U_0}{L \cdot \omega} e^{\alpha t} \sin \omega t. \quad (17)$$

Таким образом, выходной ток при соответствующем выборе параметров схемы представляет собой затухающий колебательный процесс. Моменты времени t_{jk} , соответствующие экстремальным значениям тока, определим из условия равенства нулю первой производной выражения (17)

$$t_{jk} = \frac{\arctg(-\omega/\alpha) + k\pi}{\omega}, \quad (18)$$

где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ – целое число.

Максимальное значение тока будет наблюдаться при $k = 0$, которому соответствует момент времени t_8

$$t_8 = t_{j0} = \frac{\arctg(-\omega/\alpha)}{\omega}. \quad (19)$$

Нормируя (19) относительно максимального значения $I(t_8)$, получаем

$$i(t) = \frac{I(t)}{I(t_8)} = e^{\alpha(t-t_8)} \cdot \frac{\sin(\omega t)}{\sin(\omega t_8)}. \quad (20)$$

Исходными данными при расчете формирующей схемы в режиме короткого замыкания являются длительность импульса тока на половинном уровне $t_u = t_9 - t_6$ и длительность фронта t_ϕ импульса тока, поскольку эти параметры оговорены требованиями стандарта [1]. Эти параметры определяются из условий:

$$t_\phi = t_7 - t_5; \quad (21)$$

$$t_u = t_9 - t_6, \quad (22)$$

где t_5 и t_7 – моменты времени, для которых выполняются следующие соотношения

$$i(t_5) = 0,1; \quad (23)$$

$$i(t_6) = 0,5; \quad (24)$$

$$i(t_7) = 0,9; \quad (25)$$

$$i(t_9) = 0,5. \quad (26)$$

Объединяя (21)–(26) и учитывая (19) и (20), приходим к следующей системе из семи уравнений с семью неизвестными $t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, \alpha, \omega$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \exp[\alpha(t_5 - t_8)] \frac{\sin \omega t_5}{\sin \omega t_8} = 0,1; \\ \exp[\alpha(t_6 - t_8)] \frac{\sin \omega t_6}{\sin \omega t_8} = 0,5; \\ \exp[\alpha(t_7 - t_8)] \frac{\sin \omega t_7}{\sin \omega t_8} = 0,9; \\ \exp[\alpha(t_9 - t_8)] \frac{\sin \omega t_9}{\sin \omega t_8} = 0,5; \\ \frac{\arctg(-\omega/\alpha)}{\omega} = t_8; \\ t_7 - t_5 = t_\phi; \\ t_9 - t_6 = t_u. \end{array} \right. \quad (27)$$

Для решения этой нелинейной системы использовалась итерационная процедура “Find”, которая позволила получить точный результат. Решение находилось при номинальных временных параметрах импульса тока $t_\phi = 6,4$ мкс и $t_u = 16$ мкс. В результате расчетов получены следующие значения: $t_5 = 0,540$ мкс; $t_6 = 3,013$ мкс; $t_7 = 6,940$ мкс; $t_8 = 10,217$ мкс; $t_9 = 19,013$ мкс $\alpha = -3,488 \cdot 10^4$ 1/с; $\omega = 12,764 \cdot 10^4$ 1/с.

Для импульса тока стандарт оговаривает дополнительное условие: первый отрицательный выброс тока не должен превышать 30% от максимального значения [1]. Момент времени t_{10} , соответствующий максимуму первого отрицательного выброса определим из (18), положив в этой формуле $k = 1$. В результате получим

$$t_{10} = \frac{\arctg(-\omega/\alpha) + \pi}{\omega}. \quad (28)$$

Подставляя (28) в (20), приходим к выражению для определения относительного уровня первого выброса, который обозначим как δ

$$\delta = \exp\left(\frac{\alpha\pi}{\omega}\right). \quad (29)$$

Подставляя в (29) значения α и ω , получаем значение $\delta = 0,424$, которое превышает допустимое почти в полтора раза. Таким образом, требования стандарта [1] в части получения импульса тока с номинальными параметрами при оговоренном ограничении на уровень первого выброса не могут быть в принципе реализованы в схеме гибридного генератора.

В связи с этим была предпринята попытка получения приближенного решения при наложении дополнительного ограничения на уровень первого выброса. Для этого система уравнений (27) была дополнена ограничивающим неравенством

$$\exp\left(\frac{\alpha\pi}{\omega}\right) \leq \delta_1, \quad (30)$$

где δ_1 – задаваемый уровень первого выброса.

Для решения была использована итерационная процедура “Minner”, которая обеспечивает приближенное нахождение корней с минимизацией среднеквадратической ошибки.

В результате расчетов при $\delta_1 = 0,3$ и номинальных значениях t_ϕ и t_u получены следующие значения: $\alpha = -4,778 \cdot 10^4$ 1/с; $\omega = 12,468 \cdot 10^4$ 1/с. На основе этих значений построен график импульса тока, изображенный на рисунке 2,б. При этом параметры импульса тока в данном случае попадают в диапазон допустимых значений, оговоренных стандартом [1]: длительность импульса тока $t_u = 16$ мкс; длительность фронта $t_\phi = 6$ мкс; относительный уровень первого выброса $\delta = 0,3$. Данное решение дает предельное значение относительного уровня первого выброса. Рассмотрим результаты решения при значениях $\delta_1 < 0,3$. Расчеты показывают, что вплоть до значения $\delta_1 = 0,12$ параметры импульса тока остаются в допустимых пределах, оговоренных стандартом. Причем при уменьшении δ_1 происходит уменьшение длительности фронта и практически не изменяется длительность импульса. При $\delta_1 < 0,12$ длительность фронта импульса тока становится менее 5,12 мкс, т.е. импульс перестает удовлетворять требованиям стандарта. При дальнейших расчетах было выбрано среднее значение $\delta_1 = 0,25$, которому соответствуют следующие

параметры: $t_{\phi} = 5,8$ мкс; $t_u = 16$ мкс; $\alpha = -5,412 \cdot 10^4$ 1/с; $\omega = 12,285 \cdot 10^4$ 1/с.

Перейдем к расчету элементов формирующей схемы. Как видно из соотношений (2), (3), (13), (14) и (16) коэффициенты p_1 , p_2 , α , ω зависят только от элементов схемы гибридного генератора. Поскольку элементы схемы входят в состав формирующего контура как в режиме формирования импульса напряжения, так и в режиме формирования импульса тока, то параметры элементов должны одновременно удовлетворять как условиям (2), (3), так и условиям (13), (14). Кроме того, необходимо учесть, чтобы эффективное выходное сопротивление генератора находилось в пределах: $1,5 \text{ Ом} \leq R_{\text{вых}} \leq 2,5 \text{ Ом}$ [1]. Под этим сопротивлением понимают отношение амплитуды импульса напряжения в режиме холостого хода к амплитуде импульса тока в режиме короткого замыкания. Используя выражения (4) и (15), находим эффективное

$$R_{\text{вых}} = \frac{U(t_8)}{I(t_8)} = \frac{R_3 \omega [\exp(p_1 t_3) - \exp(p_2 t_3)]}{(p_1 - p_2) \exp(\alpha t_8) \cdot \sin(\omega t_8)}. \quad (31)$$

Используя (2), (3), (13), (14) и учитывая (31), сформируем объединенную систему уравнений с ограничивающим неравенством:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\left(R_2 + R_3 + \frac{L}{R_1 C} \right) \frac{1}{L} = p_1 + p_2; \\ \left(R_2 + R_3 + \frac{L}{R_1 C} \right)^2 \frac{1}{L^2} - \frac{4L}{C} \left(1 + \frac{R_2 + R_3}{R_1} \right) = (p_1 - p_2)^2; \\ -\frac{\left(R_2 + \frac{L}{R_1 C} \right)}{2L} = \alpha; \\ \left(R_2 + \frac{L}{R_1 C} \right)^2 \frac{1}{4L^2} - \frac{4 \cdot L}{C} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = \omega^2; \\ 1,5 \leq \frac{R_3 \omega [\exp(p_1 t_3) - \exp(p_2 t_3)]}{(p_1 - p_2) \exp(\alpha t_8) \cdot \sin(\omega t_8)} \leq 2,5. \end{array} \right. \quad (32)$$

Данная нелинейная система содержит 5 неизвестных: R_1 , R_2 , R_3 , C и L . Точного решения она не имеет, поэтому для ее решения была использована процедура "Minner". Основной проблемой при решении данной системы является нахождение первых приближений этих неизвестных. Попытка произвольного задания начальных приближений показала существование множества физически нереализуемых решений (отрицательные или комплексные величины параметров элементов схемы).

Первое приближение для сопротивления резистора R_3 определим, выразив его из формулы (31)

$$R_3 = \frac{R_{\text{сблх}}(p_1 - p_2) \exp(\alpha t_8) \sin(\omega t_8)}{\omega [\exp(p_1 t_3) - \exp(p_2 t_3)]}. \quad (33)$$

Подставляя в эту формулу среднее значение сопротивления $R_{\text{сблх}} = 2 \text{ Ом}$, $\alpha = -5,412 \cdot 10^4 \text{ 1/с}$; $\omega = 12,285 \cdot 10^4 \text{ 1/с}$ и учитывая (19), получаем:
 $R_3 = 18,32 \text{ Ом}$.

Наложим следующие ограничения на параметры: $R_1, R_3 \gg R_2 \gg L/CR_1$. При этом из формул (2), (3), (13) и (14) следуют приближенные соотношения

$$p_1 \approx \frac{-R_3 + \sqrt{R_3^2 - 4 \frac{L}{C} (1 + R_3/R_1)}}{2L}; \quad (34)$$

$$p_2 \approx -\frac{R_3}{L}; \quad (35)$$

$$\alpha \approx -\frac{R_2}{2L}; \quad (36)$$

$$\omega \approx \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (37)$$

Далее из формул (35), (36), (37) рассчитаем приближенные значения L , R_2 и C соответственно $L = 9,20 \text{ мкГн}$; $R_2 = 1 \text{ Ом}$; $C = 7,20 \text{ мкФ}$. На последнем этапе рассчитаем приближенное значение сопротивления R_1 , выразив его из уравнения (34)

$$R_1 = \frac{R_3}{|p_1|CR_3 - p_1^2 LC - 1}. \quad (38)$$

Подставив в (38) ранее рассчитанные параметры, получим: $R_1 = 19,70 \text{ Ом}$.

Используя рассчитанные первые приближения, удалось добиться устойчивого решения системы (32) даже при существенных изменениях начальных приближений. При этом получены следующие значения параметров элементов схемы гибридного генератора: $R_1 = 25,95 \text{ Ом}$; $R_2 = 0,91 \text{ Ом}$; $R_3 = 16,89 \text{ Ом}$; $C = 6,45 \text{ мкФ}$; $L = 8,90 \text{ мкГн}$.

Для оценки результатов подставим эти значения в (2), (3) (13), (14). В результате получаем: $p_1 = -1,425$; $p_2 = -2,019$; $\alpha = -5,412 \times 10^4 \text{ 1/с}$; $\omega = 12,08 \times 10^4 \text{ 1/с}$. Как и следовало ожидать, рассчитанные значения отличаются от номинальных, полученных выше. Это приведет к некоторому отклонению временных характеристик формируемых импульсов от номинальных значений. Для установления степени отличия

временных характеристик импульсов от номинальных значений, было проведено моделирование формирующей цепи в пакете программ "Micro-Sap 5". Моделирование было проведено в режиме холостого хода и режиме короткого замыкания. В результате моделирования получены следующие данные.

Параметры импульса напряжения: длительность фронта – 0,99 мкс; длительность импульса – 51,61 мкс.

Параметры импульса тока: длительность фронта – 5,86 мкс; длительность импульса – 16,23 мкс; относительный уровень первого выброса тока – 24,48 %.

Сравнивая полученные результаты с требованиями стандарта (эти требования приведены выше), приходим к выводу, что все характеристики импульсов напряжения и тока находятся в диапазоне допустимых значений. При этом выходное эффективное сопротивление генератора, рассчитанное по формуле (31), составляет $R_{\text{вых}} = 1,79$ Ом, что также удовлетворяет требованиям стандарта.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 50007-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Технические требования и методы испытаний. Введ. 01.07.93. — М.: Изд-во стандартов, 1993. — 15 с.
2. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения / М. Бейер, В. Бёк, К. Мёллер, В. Цаенгль. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 555 с.
3. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский — М.: Радио и связь, 1986. — 512 с.

Поступила в редакцию 8.11.2001 г.