

ДИСКРЕТНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ АМПЛИТУДНЫХ ШУМОВ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КЛИСТРОНОВ

© 2020 г. Д. А. Комаров^а, *, С. П. Масленников^б, Е. П. Якушкин^а

^а Научно-производственное предприятие “Торий”,
ул. Обручева, 52, Москва, 117393 Российская Федерация

^б Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
Каширское шоссе, 31, Москва, 115409 Российская Федерация

*E-mail: npp@toriy.ru

Поступила в редакцию 22.10.2018 г.

После доработки 25.11.2018 г.

Принята к публикации 11.01.2019 г.

Представлена кинематическая теория дискретных шумов клистронов, связанная с пульсациями выпрямленного напряжения источников питания. Дано сопоставление результатов теории с экспериментальными данными и рекомендации по выбору коэффициента пульсаций.

DOI: 10.31857/S003384942004004X

ВВЕДЕНИЕ

Теория шумов в СВЧ-усилителях достаточно детально разработана и является предметом многочисленных монографий (см., например, [1]). Успехи в этой области позволили разработать сверхмалозадающие приборы СВЧ. Основное направление исследований касалось теории случайных флуктуаций, к которым относятся тепловые, ионно-плазменные, фликкер-шумы и т.д. Однако помимо случайных шумовых процессов немаловажным аспектом работы усилителей СВЧ является дискретный шум, связанный не со случайными явлениями, а с детерминированными составляющими в спектре сигнала вблизи несущей. Причиной появления подобных составляющих являются прежде всего пульсации источников питания. Важная особенность этих шумовых компонент — их непосредственная близость к частоте несущей (вплоть до 10 Гц), что для доплеровских радиолокационных станций (РЛС) представляет известные трудности при определении скорости объектов. Известен экспериментальный критерий достижения уровня дискретных составляющих в спектре сигнала: при коэффициенте пульсации выпрямленного напряжения не больше 10^{-5} при отстройке частоты от несущей до 1 кГц уровень шумов не более -100 дБ [2]. Однако теоретического обоснования этой величины нет до настоящего времени, что вызывает порой дискуссии как у разработчиков РЛС, так и у разработчиков усилителей СВЧ. В связи с современными требованиями, предъявляемыми к разрабатываемым

РЛС, задача существенного снижения дискретных составляющих является весьма актуальной.

В данной работе на основе элементарной кинематической теории клистронных усилителей получена связь величины дискретных составляющих амплитудных шумов с пульсациями выпрямленного напряжения источника питания. Обоснованы рекомендации, обеспечивающие запас по уровню шумов, связанных с источником питания, на уровне 5...7 дБ от требуемых 100 дБ за счет уменьшения коэффициента пульсации выпрямленного напряжения до 0.5×10^{-5} .

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим следующую модель клистронного усилителя: электронная пушка, находящаяся под отрицательным выпрямленным напряжением, резонатор-модулятор (входной резонатор клистронов), пространство взаимодействия (произвольное), выходной резонатор, в котором осуществляется энергоотбор СВЧ-мощности от электронного потока.

Примем следующие упрощающие анализ предположения:

- в пульсации выпрямленного напряжения катода ограничимся первой гармоникой;

- фаза пролета в резонаторе-модуляторе не зависит от пульсаций выпрямленного напряжения.

Первое приближение позволяет рассмотреть только область частот вблизи несущей, не превышающей значения частоты питания, и оправдано тем, что высшие гармоники выпрямленного на-

пряжения менее первой в 10 и более раз. Второе приближение дает возможность представить помеху в виде аддитивного шума и оценить верхний предел дискретных составляющих.

С учетом введенных упрощающих приближений выпрямленное напряжение катода представимо в виде

$$U_k = U_0 (1 + A_n \cos(\omega_c t)), \quad (1)$$

где U_0 — постоянная составляющая катодного напряжения, A_n — коэффициент пульсаций по первой гармонике, ω_c — циклическая частота переменного тока питающей сети.

Первичная модуляция скорости электронного потока, вызванная напряжением (1), может быть определена как:

$$v_n \equiv v_0 \left(1 + \frac{A_n}{2} \cos(\omega_c t) \right), \quad (2)$$

где v_0 — скорость невозмущенного электрона, а v_n — скорость после прохождения модулятора. Решение уравнения движения электронов с начальной скоростью (2) для зазора резонатора-модулятора может быть записано в следующем виде:

$$v(\tau, t) = v_0 (1 + \mu [\cos(\omega \tau) - \cos(\omega t)]) + \frac{v_0 A_n}{2} \cos(\omega_c t), \quad (3)$$

где ω — циклическая частота источника входного сигнала в резонаторе-модуляторе, μ — параметр малости теории СВЧ-диода [3], τ — время влета электрона в зазор резонатора-модулятора.

Следует отметить, что выражение (3) содержит два слагаемых: первое — классическое выражение теории СВЧ-диода, а второе — возмущение скорости под действием модуляции в пушке. Используя предположение о независимости угла пролета в зазоре резонатора-модулятора от пульсаций и теорему Шокли-Рамо, в соответствии с [3] можно получить выражение для переменной составляющей наведенного тока в цепи входного резонатора:

$$I_n(t) = a \cos(\omega t) + b \cos(\omega_c t - \theta_0), \quad (4)$$

где $a = 2\mu^2 A_4 \frac{I_k}{\varphi_0}$, $b = \frac{I_k A_n}{\varphi_0 2k} \sin(\theta_0)$, $A_4 = 2 \sin(\varphi_0) - \varphi_0 (1 + \cos(\varphi_0))$, $\theta_0 = \frac{k\varphi_0}{2}$, (φ_0 — невозмущенная фаза пролета, k — отношение частоты сигнала к частоте переменного тока питающей сети, I_k — ток катода).

В выражении (4) рассмотрение ограничено первой гармоникой наведенного тока. Наведенное напряжение в цепи входного резонатора можно принять равным:

$$U_c(t) = I_n(t) r_k, \quad (5)$$

Таблица 1. Амплитуды сигнала от частоты спектральной составляющей наведенного тока

Амплитуда составляющей	Частота
$0.5\beta(a^2 + b^2)$	0
αa	Ω
αb	ω_c
$0.5\beta ab$	$\omega - \omega_c$
$0.5\beta ab$	$\omega + \omega_c$
$0.5\beta a^2$	2ω
$0.5\beta b^2$	$2\omega_c$

где r_k определяет активное сопротивление резонатора-модулятора.

Используя эквивалентное представление пространства группировки клистрона в виде триода [4], нелинейное группирование электронного потока можем записать в следующем виде:

$$I_r(t) = \alpha U_c(t) + \beta U_c^2(t), \quad (6)$$

где коэффициенты α и β определяют крутизну вольт-амперной характеристики и могут быть заранее выбраны исходя из условия получения максимума первой гармоники тока. Подстановка выражений (4) и (5) в соотношение (6) позволяет получить явное представление функции тока во временной области с учетом высших гармонических составляющих и составляющих спектра вблизи несущей частоты. Ввиду громоздкости выражения, зависимости амплитуд сигнала в выходном резонаторе от частоты спектральной составляющей представлены в виде табл. 1.

Обращает внимание тот факт, что амплитуда тока на частоте вблизи несущей зависит от первой гармоники усиленного сигнала. Таким образом, обеспечение оптимальных условий группировки увеличивает и субгармонические составляющие.

Представляя выходной резонатор клистрона эквивалентной схемой и следуя теории линейных электрических цепей периодического несинусоидального тока [5], выражение для комплексной амплитуды тока в резонаторе для произвольной гармонической составляющей, с учетом постоянной составляющей, можем записать в следующем виде:

$$I_p(\omega_i, I_i) = I_i \frac{Z_1(\omega_i)}{Z_2(\omega_i)},$$

$$Z_1(\omega_i) = \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{j\omega_i L} + j\omega_i C \right)^{-1}, \quad (7)$$

$$Z_2(\omega_i) = r,$$

Таблица 2. Зависимость коэффициента шума от коэффициента пульсаций

$A_{\text{п}}, 10^{-5}$	$K_{\text{ш}}, \text{дБ}$
0.5	107
0.6	106
0.7	104
0.8	103
0.9	102
1.0	101
1.1	100
1.2	99
1.3	98

где I_i – ток гармоники, i – номер соответствующей гармоники табл. 1, а r, L, C – первичные параметры контура, легко определяемые из значения резонансной частоты, волнового сопротивления и добротности.

Действующее значение полного тока в нагрузке $I_{\text{д}}$ может быть записано в следующем виде:

$$I_{\text{д}} = \sqrt{I_{\text{п}}^2(0, I_0) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N I_{\text{п}}^2(\omega_i, I_i)}, \quad (8)$$

а коэффициент шума в обычном виде [1]:

$$K_{\text{ш}} = 10 \lg(P_{\text{г}}/P), \quad (9)$$

где $P_{\text{г}}$ – активная мощность в нагрузке от гармоники сигнала, P – полная мощность.

2. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для вычисления соотношения (9) необходимо определить значения коэффициентов α и β в аппроксимации (6). Это может быть сделано исходя из известной первой гармоники конвекционного тока (т.е. фактически по известной мощности выходного сигнала клистрона) и из экспериментальных данных по величине второй гармоники, всегда на 30 дБ меньшей, чем амплитуда основной гармоники.

Для коэффициента пульсации, равного 10^{-5} , по соотношениям табл. 1 и формулам (7)–(9), расчетная величина коэффициента шума (при отстройке до 1 кГц) составила 101.2 дБ и хорошо соответствовала экспериментальным данным [2].

Однако необходимо отметить, что это значение находится на пределе технических требований к величине дискретных составляющих амплитудных

шумов и при этом теоретически служит верхней границей значений. Улучшение ситуации с помощью пространства взаимодействия за счет подавления амплитуды второй гармоники конвекционного тока принципиально возможно, но это приведет и к снижению электронного коэффициента полезного действия прибора. Из представленного рассмотрения очевидно, что единственным путем снижения дискретных составляющих амплитудных шумов является уменьшение коэффициента пульсаций выпрямленного напряжения. В табл. 2 приведены результаты расчета коэффициента шума (9) от коэффициента пульсаций. Представленные результаты расчета показывают, что обеспечение запаса по уровню шумов, связанных с источником питания, на уровне 5...7 дБ от требуемых 100 дБ может быть обеспечено при коэффициенте пульсации 0.5×10^{-5} . Очевидно, что этот же запас будет сохраняться при иных отстройках от частоты несущей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотрена элементарная кинематическая теория дискретных составляющих амплитудных шумов клистронных усилителей вблизи рабочей частоты, связанная с пульсацией выпрямленного напряжения. Результаты расчета находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными. Рассмотрение ограничено только случаем пульсаций напряжения катода, хотя очевидно, что для приборов с сеточным управлением важны пульсации управляющего напряжения. Кроме того, учет высших гармонических составляющих пульсаций заметно ухудшит ситуацию с шумами. В связи с этим на основании анализа результатов расчета следует держать уровень пульсаций выпрямленного напряжения не более 0.5×10^{-5} , что обеспечит значимый запас (на уровне 5...7 дБ) по величине дискретных составляющих амплитудных шумов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах. М.: Мир, 1986.
2. Мирошников Ю.А. Техника тренировки и динамических испытаний СВЧ ЭВП. М.: изд. МИРЭА, 1991.
3. Гвоздовер С.Д. Теория электронных приборов сверхвысоких частот. М.: Гостехтеориздат, 1956.
4. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Гостехтеориздат, 1957.
5. Белецкий А.Ф. Теория линейных электрических цепей. СПб.: Лань, 2009.