

БЕСТОКОВАЯ ПЕРЕСТРОЙКА И СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ АВТОКОЛЕБАНИЙ КЛИНОТРОНА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

И. П. Безгина, В. Д. Ерёмка, Т. А. Макулина, И. М. Мыценко

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова, НАН Украины

Генераторные лампы обратной волны терагерцового диапазона, карсинотроны и клинотроны, находят широкое применение в радиоэлектронных системах при решении фундаментальных и прикладных задач. Нестабильность частоты выходного сигнала упомянутых ламп не хуже 10^{-4} . Перестройку частоты выходного сигнала карсинотронов и клинотронов, как правило, осуществляют путем изменения величины рабочего напряжения, то есть с затратами энергии в цепи управления. В статье описана конструкция клинотрона терагерцового диапазона, обеспечивающая перестройку и стабилизацию частоты выходного сигнала генератора без затрат мощности в цепи управления. На основании результатов выполненных исследований сделан вывод о возможности реализации перестройки частоты автоколебаний генераторных клинотронов терагерцового диапазона, который в отличие от традиционных способов: не приводит к увеличению в спектре излучения дополнительных спектральных составляющих; позволяет реализовать перестройку частоты автоколебаний в интервале от сотен МГц до единиц ГГц; обеспечить стабильность, близкую к стабильности частоты колебаний эталонного резонатора.

Ключевые слова: Клинотрон терагерцового диапазона, бестоковая перестройка и стабилизация частоты автоколебаний.

Введение

Значительный вклад в развитие теории и техники стабилизации частоты источников высокочастотных электромагнитных колебаний сделали пионерские работы многочисленных ученых и радиоинженеров XX века. В работах [1–3] сделана попытка систематизировать материалы по данной теме. Большинство способов стабилизации являются универсальными для всех диапазонов частот. Однако существует ряд особенностей в способах стабилизации частоты в коротковолновых диапазонах. Например, в терагерцовом диапазоне возбудить кварцевый резонатор затруднительно. Поэтому для реализации кварцевой стабильности в коротковолновых диапазонах применяют различные системы умножения частоты.

Эффективным способом стабилизации частоты в данном случае является применение пассивных эталонов частоты в виде объемных или высокодобротных открытых резонаторов. Сложности возрастают при обеспечении стабилизации в интервале частот, по сравнению с задачей стабилизации на фиксированной частоте. Свои специфические особенности имеют способы стабилизации частоты генераторов микроволнового излучения непрерывного действия с большой и малой мощностью выходного сигнала, а также генераторов импульсного действия. Среди существующих способов стабилизации частоты автоколебаний генераторов микроволнового излучения можно выделить три характерных группы:

- способы параметрической стабилизации;
- способы стабилизации с помощью электромеханических систем;
- способ стабилизации автоматической подстройкой частоты.

Для *параметрических* способов стабилизации частоты характерным является стремление по возможности сохранять неизменными параметры тех элементов и узлов генератора, которые наиболее ощутимо влияют на частоту автоколебаний генераторов. Резонаторная система стабилизируемого генератора должна обладать высокой эталонной добротностью. С этой целью применяют резонаторные системы с термокомпенсацией или с термостабилизацией. Способы термокомпенсации и термостабилизации обеспечивают достижение относительной нестабильности частоты ориентировочно 10^{-8} – 10^{-4} . Относительная нестабильность в пределах 10^{-8} – 10^{-9} достижима путем термостабилизации резонатора из материала, который становится сверхпроводящим при криогенных температурах. В предложенном в работе [4] способе стабилизации частоты высокая добротность объемного резонатора достигается при температуре окружающей среды, что обеспечивает относительную нестабильности частоты в пределах 10^{-4} – 10^{-5} .

Стабилизация частоты автоколебаний микроволновых генераторов *с помощью электромеханических колебательных контуров* основана на применении высоких эталонных колебательных свойств ряда минералов: кварца, сегнетовой соли, титаната бария, турмалина. Резонаторы из упомянутых материалов могут обеспечить высокую добротность Q_0 , приблизительно 10^6 . Однако применение таких резонаторов в схемах стабилизации генераторных клинотронов терагерцового диапазона весьма затруднительно из-за сложностей, возникающих при создании умножителей частоты с высоким коэффициентом умножения.

Способ стабилизации автоматической подстройкой частоты (АПЧ) является наиболее распространенным. Генераторы, стабилизированные способом АПЧ, могут работать не только в режиме генерирования автоколебаний с частотой повышенной стабильности, но и в режиме фазовой и частотной модуляции. Принцип стабилизации по схеме АПЧ основан на сравнении частоты или фазы стабилизируемого генератора с частотой или фазой колебаний эталонного резонатора. В предложенном ниже способе стабилизации частоты в качестве эталонного резонатора применен высокодобротный открытый резонатор, обладающий высокими качествами (пассивный эталон).

Цель данной статьи – представить информацию для потребителей вакуумных источников микроволнового излучения о разработке: способа стабилизации частоты автоколебаний клинотронов терагерцового диапазона и устройства генератора для реализации предложенного способа стабилизации без затрат мощности в цепи управления частотой.

1. Устройство клинотрона для реализации бестоковой перестройки и стабилизации частоты его автоколебаний

Клинотронный эффект в лампе обратной волны О-типа (ЛОВО) миллиметрового диапазона с ленточным электронным потоком и замедляющей системой (ЗС) в виде плоской гребенки первыми наблюдали А.Я. Кириченко, Г.Я. Левин и А.Я. Усиков (1956), исследуя в эксперименте характеристики разрабатываемых ЛОВ [5–8]. Клинотронный эффект проявляется в значительном увеличении мощности генерируемых электромагнитных колебаний при наличии острого угла между рабочей поверхностью ЗС и направлением движения ленточного электронного потока. В клинотроне функция периодической ЗС (гребенки) совмещена с функцией коллектора электронов [5–10]. Необходимость наклона ленточного электронного потока к рабочей поверхности плоских периодических ЗС для повышения эффективности энергообмена электронов с электрической компонентой замедленной волны электромагнитного поля в ЛОВО миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов в настоящее время является неоспоримым требованием [7]. Известно, что в традиционных ЛОВО миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, таких как клинотрон [6] и карсинотрон [11], электрическая перестройка и стабилизация частоты автоколебаний осуществляется путем изменения величины рабочего высоковольтного напряжения (изменения рабочего тока). В ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины предложен генераторный клинотрон с бестоковой перестройкой частоты выходного сигнала, реализована его конструкция, исследованы энергетические и частотные характеристики экспериментальных образцов таких генераторов [9, 10].

На рис. 1 схематически показана конструкция клинотрона с электроннооптической системой (ЭОС) 1, формирующей ленточный электронный поток 2, падающий под острым углом α на рабочую поверхность плоской косой гребенки 3. Над рабочей поверхностью косой гребенки 3 установлен управляющий электрод 4 с вводом 5 управляющего сигнала, изолированным от вакуумплотного корпуса 6 генераторного клинотрона. Плоский управляющий электрод 4 установлен параллельно оси ЭОС 1. Путем подачи на ввод 5 управляющего сигнала осуществляется бестоковая подстройка и перестройка частоты автоколебаний клинотрона [9, 10].

Для обеспечения однозначности при изменении частоты автоколебаний генераторного клинотрона под действием управляющего сигнала, а также для увеличения крутизны частотно-вольтной характеристики генератора при бестоковой перестройке частоты ламели гребенки выполнены перпендикулярными к рабочей поверхности структуры и под углом θ к её продольной оси, как показано на рис. 2. Здесь же представлена векторная диаграмма скорос-

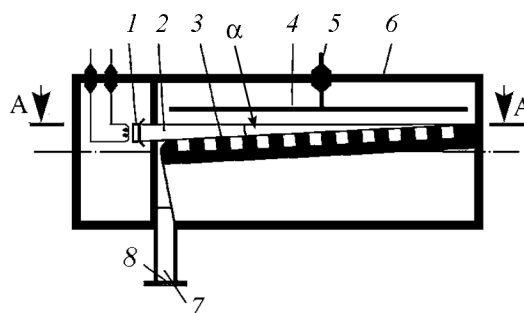


Рис. 1. Схематическое изображение генераторного клинотрона с бестоковым управлением частотой автоколебаний: 1 – ЭОС; 2 – ленточный электронный поток; 3 – ЗС типа плоская косая гребенка; 4 – плоский управляющий электрод; 5 – ввод управляющего сигнала; 6 – вакуумноплотный корпус клинотрона; 7 – волноводный вывод энергии; 8 – окно вывода энергии

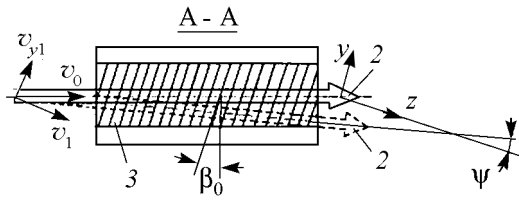


Рис. 2. Диаграмма составляющих скоростей электронов при перемещении ленточного электронного потока в скрещенных электрическом и магнитном полях над рабочей поверхностью плоской косо́й гребенки

тей электронов ленточного электронного потока в системе координат косо́й гребенки. Такой клинотрон терагерцового диапазона пакетирован с магнитной системой (на рис. 1 не показана).

До подачи управляющего сигнала электроны потока перемещаются в направлении оси η со скоростью \vec{v}_0 над рабочей поверхностью гребенки 3 в продольном магнитном поле \vec{B} . В потоке электрон e испытывает воздействие силы Лоренца

$$\vec{F} = e [\vec{v}_0 \times \vec{B}]. \quad (1)$$

Под действием силы Лоренца в плоскости периодической замедляющей структуры (косо́й гребенки 3) происходит отклонение направления движения ленточного электронного потока 2 на угол ψ от направления движения вдоль оси η (см. рис. 2). При $\vec{E}_{\text{упр}} = 0$ заряженные частицы электронного потока 2 перемещаются со скоростью $v_0 = v_{e\theta}$. Так как электроны посредством компоненты скорости v_z взаимодействуют с электрической компонентой электромагнитного поля замедленной волны, то при изменении напряженности поля управляющего сигнала $\vec{E}_{\text{упр}} \neq 0$ характеристики клинотрона с управляющим электродом изменятся, изменится и компонента скорости v_z . Для того чтобы изменение компоненты v_z скорости электрона от угла ψ поворота ленточного электронного потока 2 было однозначным, ЗС выполнена в виде косо́й гребенки. В периодической структуре (однородной вдоль оси $0y$ и периодической вдоль оси $0z$) распространение поверхностной волны в плоскости $x = 0$ можно рассматривать в произвольном направлении [11]. Заметим, что фазовая скорость v_y распространения волны вдоль оси $0y$ равна скорости света c в свободном пространстве, а в направлении оси $0z$ скорость волны замедлена до величины v_z .

Выражение для скорости волны, распространяющейся относительно оси $0z$ под произвольным углом ψ , имеет вид [11]

$$v_\psi = \frac{v_z}{\cos \psi - v_z/v_y \sin \psi}. \quad (2)$$

В случае больших замедлений фазовой скорости ($c/v_z \geq 10$) для угла $\psi \leq 45^\circ$ соотношение (2) упрощается

$$v_\psi = \frac{v_z}{\cos \psi}. \quad (3)$$

Естественно, возбуждение волн электромагнитного поля в периодической структуре можно осуществить с помощью электронного потока, который движется над её рабочей поверхностью в плоскости $x = 0$ под произвольным углом ψ к оси $0z$. Тогда, при условии выполнения соотношения (3), можно утверждать, что изменение направления движения электронного потока в плоскости $x = 0$ при $\vec{v}_{e\psi} = \text{const}$ приводит к изменению проекции вектора $\vec{v}_{e\psi}$ на ось $0z$, то есть компоненты v_{ez} . Это равнозначно изменению величины периода ЗС (см. рис. 2). Если предположить,

что при этом выполняется условие примерного синхронизма скорости электронного потока и волны электромагнитного поля в периодической структуре ($\vec{v}_{e\psi} \approx \vec{v}_\psi$), то с изменением направления движения потока электронов должна измениться и частота возбуждаемых электромагнитных колебаний в соответствии с законом дисперсии периодической структуры [12].

При небольших изменениях длины генерируемой волны λ и возбуждении в клинотроне «косой гребенки», имеющей аномальную дисперсию на первой отрицательной пространственной гармонике, выполняется соотношение

$$\frac{c}{v_z} \cong \kappa \lambda, \quad (4)$$

где κ – коэффициент пропорциональности, зависящий от λ [9]. Таким образом, при пропускании вблизи рабочей поверхности гребенки потока электронов, перемещающегося с постоянной скоростью, и изменении направления его движения в плоскости $x = 0$ электронно-волнового взаимодействия путем изменения угла ψ можно управлять величиной длины волны генерируемых электромагнитных колебаний согласно соотношению

$$\lambda \cong \frac{c}{\kappa \vec{v}_{e\psi} \cos \psi}. \quad (5)$$

При изменении угла ψ в интервале от 0 до 10° можно производить изменение частоты на несколько десятых долей процента, что в восьмимиллиметровом диапазоне составляет около сотни МГц [12].

Если ленточный электронный поток в клинотроне сопровождают продольным магнитным полем \vec{B} конечной величины, то направление движения электронного потока над рабочей поверхностью периодической замедляющей структуры (в данном случае гребенки) можно изменять путем воздействия на него поперечным электрическим полем. Поперечное электрическое поле в пространстве взаимодействия клинотрона терагерцового диапазона можно создать, например, поместив на некотором расстоянии b над рабочей поверхностью гребенки ($x = 0$) электрод 4 (см. рис. 1) в виде проводящей пластины, снабженной вводом 5 для управляющего сигнала и изолированной от корпуса 6 генератора. Управляющий сигнал $U_{упр}$, поданный на ввод 5, создает между пластиной 4 и рабочей поверхностью плоской косой гребенки 3 электрическое поле \vec{E}_x . Вектор \vec{E}_x перпендикулярен направлению $O\eta$. В скрещенных электрическом и магнитном полях электронный поток 2 испытывает дрейф в направлении оси Oy или оси Oz (в зависимости от полярности управляющего сигнала). Скорость дрейфа $v_{др}$ заряженных частиц можно определить с помощью соотношения [12]

$$v_{др} = 10^8 \frac{E_x}{B} = \frac{U_{упр}}{Bb}. \quad (6)$$

До подачи управляющего сигнала $U_{упр}$ на электрод 4 ленточный электронный поток 2 перемещается вдоль оси $O\eta$ под углом $\theta \neq 0$ к оси Oz . Поданный на электрод 4 управляющий сигнал $U_{упр}$ изменит направление движения электронов на угол ψ относительно направления $O\eta$, при этом

$$v_{др} = \vec{v}_{e\psi} \sin \psi, \quad (7)$$

а проекция $\vec{v}_{e\psi}$ на ось Oz

$$v_{ez} = \vec{v}_{e\psi} \cos(\theta \pm \psi). \quad (8)$$

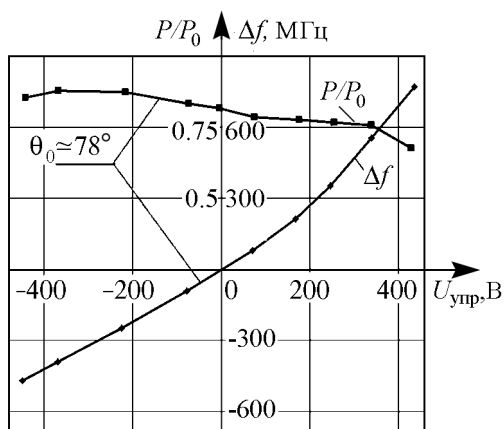


Рис. 3. Зависимость изменения Δf частоты автоколебаний генераторного клинотрона терагерцового диапазона от величины напряжения $U_{упр}$ управляющего сигнала на управляющем электроде

работы на длине волны $\lambda = 0.8$ мм, при $\theta \approx 78^\circ$ обеспечивает крутизну $\gamma = df/dv_{\psi} \approx 3.3$ Мг/В частотно-вольтовой характеристики генераторного клинотрона терагерцового диапазона с управляющим электродом. Диапазон бестоковой перестройки частоты автоколебаний генераторного клинотрона с управляющей пластиной составляет примерно 0.3% рабочей частоты и определяется, в основном, шириной резонансного участка дисперсионной характеристики. При упрощенном описании физики процессов бестоковой перестройки частоты в генераторном клинотроне с пластиной не учитываются следующие эффекты:

- влияние напряжения управляющего сигнала на клинотронный эффект,
- снос электронного потока,
- ортоклинотронное влияние на эффективность электронно-волнового взаимодействия,
- явления в пространстве взаимодействия клинотрона при изменении направления магнитного поля в зазоре магнита.

Зависимость изменения частоты автоколебаний $\Delta f = f(U_{упр})$ генераторного клинотрона с рабочей частотой $f_0 = 0.5$ ТГц представлена на рис. 3.

2. Схема бестоковой стабилизации частоты автоколебаний клинотрона терагерцового диапазона

Конструкция генераторного клинотрона терагерцового диапазона с бестоковой перестройкой частоты выходного сигнала реализована с применением оригинального способа бестоковой стабилизации частоты его автоколебаний. В работах [12, 13] рассмотрен способ, использующий амплитудную модуляцию части сигнала стабилизируемого генератора. Данный прием позволяет получить высокий коэффициент стабилизации при наличии затрат мощности в цепи управления, но без добавления в спектр автоколебаний дополнительных составляющих. Предлагаемая новая схема

С помощью управляющего сигнала, подаваемого на электрод 4, можно изменять частоту автоколебаний клинотрона согласно соотношению

$$f = \kappa \left(v_0 \cos \theta \pm 10^8 \frac{U}{bB} \sin \theta \right). \quad (9)$$

Величину угла θ нарезки прямоугольных щелевых резонаторов гребенки выбирают, исходя из необходимой крутизны частотно-вольтовой (по величине напряжения управляющего сигнала) характеристики генераторного клинотрона. Чем меньше угол θ , тем больше крутизна частотно-вольтовой характеристики клинотрона терагерцового диапазона. Косая гребенка, рассчитанная для

стабилизации (рис. 4) путем фазовой автоподстройки частоты автоколебаний генераторного клинотрона терагерцового диапазона исключает затраты мощности в цепи управления. Она содержит генераторный клинотрон *1* непрерывного действия, волноводный направленный ответвитель *2*, амплитудный модулятор *3*, эталонный резонатор *4*, амплитудный детектор *5*, избирательный усилитель *6*, опорный генератор *7*, фазовый детектор *8*, усилитель постоянного тока *9*. Устройство работает следующим образом. Выходной сигнал стабилизируемого генераторного клинотрона *1*

$$u_H(t) = U_H \cos(\omega t + \theta_0) \quad (10)$$

(здесь θ_0 – начальная фаза колебания) через направленный ответвитель *2* поступает на вход амплитудного модулятора *3*, где осуществляется модуляция его амплитуды сигналом с частотой Ω опорного генератора *7*

$$U_\Omega(t) = U_\Omega \cos(\Omega t + \gamma_0).$$

Здесь γ_0 – начальная фаза опорного напряжения. На выходе амплитудного модулятора *3* формируется сигнал, состоящий из трех гармонических составляющих

$$U(t) = U_H \cos(\omega_H t + \theta_0) + \frac{MU_H}{2} \cos[(\omega_H + \Omega)t + \theta_0 + \gamma] + \frac{MU_H}{2} \cos[(\omega_H - \Omega)t - \theta_0 - \gamma],$$

где M – коэффициент модуляции. Этот сигнал поступает на вход эталонного резонатора *4*, настроенного на центральную частоту ω_0 . Спектральная диаграмма входного напряжения, а также частотные зависимости модуля $Y(\omega)$ и аргумента $\arg Y(\omega)$ входной проводимости резонатора *4* для этого случая изображены на рис. 5 [13]. Так как частотные характеристики $Y(\omega)$ симметричны, то для боковых гармоник тока можно написать

$$I_{\text{верхн}} = I_{\text{нижн}} = \frac{M}{2} U_H y_\delta,$$

где $y_\delta = Y_H / \sqrt{1 + (2Q\Omega/\omega_H)^2}$ – модуль входной проводимости при расстройке $\Delta\omega = \pm\Omega$, Q – добротность резонатора. Фазовые сдвиги между боковыми гармониками напряжения и тока равны

$$\varphi_{\text{уверхн}} = -\arctg\left(2Q\frac{\Omega}{\omega_H}\right) = -\varphi_6,$$

$$\varphi_{\text{унижн}} = \arctg\left(2Q\frac{\Omega}{\omega_H}\right) = \varphi_6.$$

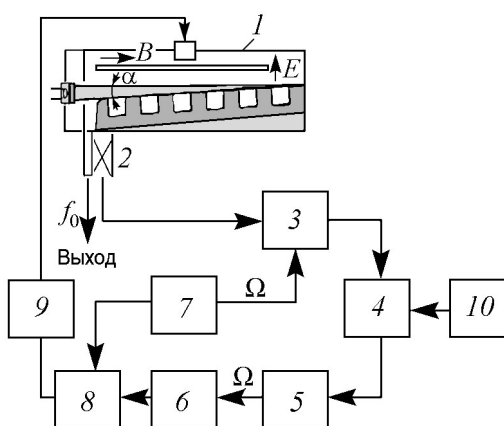


Рис. 4. Схема бестоковой стабилизации частоты автоколебаний клинотрона терагерцового диапазона: *1* – клинотрон с кривой ЗС и ленточным электронным потоком, *2* – направленный ответвитель, *3* – амплитудный модулятор, *4* – эталонный резонатор, *5* – амплитудный детектор, *6* – избирательный усилитель, *7* – опорный генератор, *8* – фазовый детектор, *9* – усилитель постоянного тока, *10* – источник управляющего сигнала

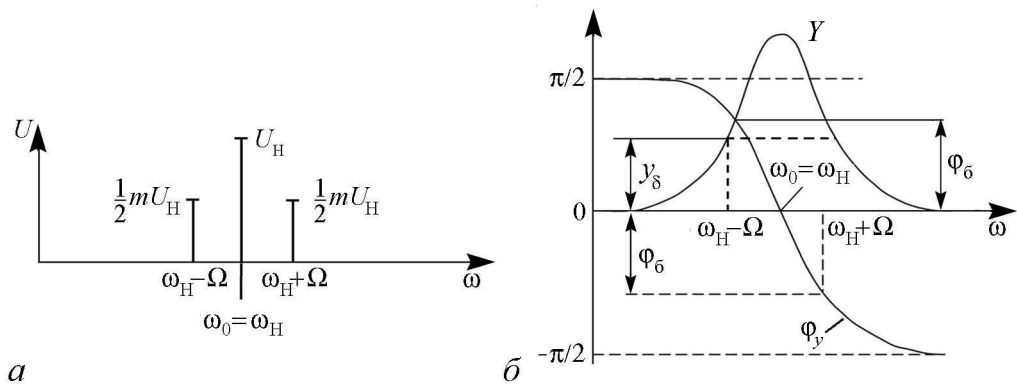


Рис. 5. *a* – спектральная диаграмма входного напряжения, *b* – частотная зависимость модуля $Y(\omega)$ и аргумента $\varphi(\omega)$ входной проводимости резонатора при $\omega_0 = \omega_H$ [13]

После прохождения через эталонный резонатор 4 сигнал (10) приобретает следующий вид:

$$U(t) = U_H \cos(\omega_H t + \theta_0) + \frac{M' U_H}{2} \cos[(\omega_H + \Omega)t + \theta_0 + \gamma] + \frac{M' U_H}{2} \cos[(\omega_H - \Omega)t - \theta_0 - \gamma],$$

где коэффициент модуляции в резонаторе

$$M' = \frac{M}{\sqrt{1 + (2Q(\Omega/\omega_H))^2}}.$$

Из формулы видно, что $M' < M$, то есть глубина модуляции меньше глубины модуляции приложенного напряжения.

Кроме этого, необходимо отметить, что огибающая выходного напряжения сдвинута по фазе относительно огибающей входного напряжения на угол φ_δ . Этот сдвиг по мере увеличения частоты опорного генератора 7 стремится к $\pi/2$.

В отличие от LC-контуров, для резонаторов не существует простых аналитических выражений для этих величин, справедливых в широкой полосе частот. Эти соотношения приемлемы при небольших расстройках $\Delta\omega = \omega_H - \omega_0$ по сравнению с ω_0 [14, 15].

В случае, если резонансная частота резонатора 4 ω_r не совпадает с несущей частотой ω_{H0} генератора 1, характер явлений изменяется. Расположение спектра входного сигнала относительно резонансной кривой резонатора 4 иллюстрируется рис. 5. Несовпадение частот ω_H и ω_r приводит к асимметрии боковых частот на выходе резонатора 4. Возникновение асимметрии поясняется векторной диаграммой выходных напряжений, представленной на рис. 6. На этой диаграмме вектор OD представляет собой несущее колебание, фаза которого запаздывает относительно фазы входного колебания (принятой равной нулю) на угол θ_0 , что соответствует положительной расстройке $\Delta\omega = \omega_H - \omega_0$. Амплитуда колебания верхней боковой частоты (вектор DC₁) значительно меньше, чем амплитуда колебания нижней боковой частоты (вектор DC₂). Длина равнодействующего вектора OF изменяется по сложному закону, не совпадающему с синусоидальным законом изменения огибающей входного колебания.

Сигнал с выхода резонатора 4 подается на амплитудный детектор 5, выходное напряжение которого пропорционально огибающей модулированного колебания. Нарушение симметрии амплитуд и фаз колебаний боковых частот приводит к нелинейным искажениям. Эти искажения проявляются в возникновении новых частот, кратных частоте Ω опорного генератора 7. Далее сигнал с выхода амплитудного детектора 5 поступает на вход избирательного усилителя 6, который настроен на частоту Ω опорного генератора 7. Усилитель выделяет и усиливает первую гармонику Ω , фаза которой зависит от расстройки $\Delta\omega$. Сигнал после усилителя 6 применяют в системе автоподстройки частоты генератора 1. Это происходит следующим образом. Уход частоты стабилизируемого генератора 1 и несовпадение частот ω_H и ω_p приводит к асимметрии боковых частот $\omega_H - \Omega$ и $\omega_p + \Omega$ на выходе резонатора 4. При этом огибающая выходного сигнала получает дополнительный угол сдвига фаз $\Delta\gamma(\Delta\omega)$, являющийся функцией расстройки $\Delta\omega$ и изменяющий знак при переходе через точку, соответствующую резонансной частоте ω_p . Выходной сигнал избирательного усилителя 6 подают на один вход фазового детектора 8, на его другой вход подают сигнал с частотой Ω от опорного генератора 7. В состав опорного генератора 7 входит регулируемый фазовращатель, который позволяет исключить влияние набега фаз и при $\Delta\omega = 0$ установить выходное напряжение фазового детектора 8 равным нулю. Далее сигнал рассогласования усиливают (усилителем 9) до необходимой величины и подают на ввод управляющего электрода (см. рис. 1) генераторного клинотрона 1. Перестройку частоты автоколебаний генераторного клинотрона 1 можно осуществить двумя способами.

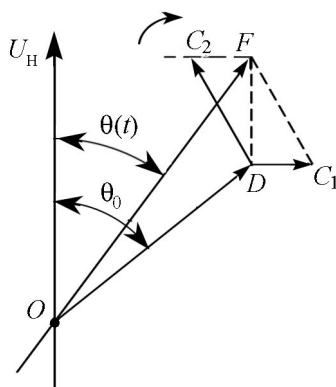


Рис. 6. Векторная диаграмма выходных напряжений

Первый способ содержит операцию перестройки частоты автоколебаний клинотрона путем изменения резонансной частоты ω_p эталонного резонатора 4 с помощью источника 10 управляющего сигнала, напряжение которого воздействует на реактивность эталонного резонатора 4.

Второй способ содержит операцию механической перестройки резонансной частоты ω_p эталонного резонатора 4. Второй способ обеспечивает возможность достижения более высокой стабильности резонансной частоты ω_p .

Описанная выше схема была применена для стабилизации частоты генератора дифракционного излучения ($\lambda = 8$ мм) [12] и способствовала процессу изучения спектра генерируемых им колебаний. Кроме того, было проведено макетирование схемы стабилизации на более низких частотах [13]. Как видно из рис. 5 и проведенной экспериментальной проверки, частота модуляции Ω должна быть соизмерима с полосой пропускания эталонного резонатора. Её можно определить с помощью соотношения

$$\Omega \approx \frac{\omega_H}{2Q}.$$

В этом случае боковые частоты $\omega_H \pm \Omega$ при $\omega_H = \omega_p$ попадут на склон амплитудно-

частотной характеристики резонатора 4 с наибольшей крутизной, где будем наблюдать максимальное изменение их амплитуд, а следовательно, угла сдвига фаз огибающей. В терагерцовом диапазоне радиоволн при реальных добротностях эталонных резонаторов частота модуляции может быть выбрана в пределах 100–1000 МГц, что требует применения высокочастотного фазового детектора.

Выводы

Предложена и описана оригинальная схема фазовой автоматической бестоковой подстройки частоты автоколебаний клинотронов терагерцового интервала частот. Описана конструкция ТГц клинотрона, обеспечивающая возможность осуществления бестоковой перестройки и модуляции частоты автоколебаний клинотрона терагерцового диапазона в полосе 0.3% относительно выбранной рабочей точки, а также бестоковой стабилизации частоты его автоколебаний без добавления в их спектр дополнительных составляющих. Показано, что описанная схема стабилизации частоты колебаний выходного сигнала генераторного клинотрона терагерцового диапазона может обеспечить относительную нестабильность не хуже относительной нестабильности частоты колебаний эталонного резонатора.

Библиографический список

1. *Нейман М.С.* Стабилизация частоты в радиотехнике. Связьиздат, 1937. 157 с.
2. *Грошковский Я.* Генерирование высокочастотных колебаний и стабилизация частоты. М.: ИЛ, 1953. 364 с.
3. *Бычков С.И., Буренин Н.И., Сафаров Р.Т.* Стабилизация частоты генераторов СВЧ. М.: Советское радио, 1962. 376 с.
4. *Ковшов Ю.С., Иванов А.И., Кишко С.А., Пономаренко С.С., Кулешов А.Н.* Стабилизация частоты электромагнитных колебаний в ЛОВ-генераторах субмиллиметрового диапазона // Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. 2013. №1094. Сер. «Радіофізика та електроніка». Вып. 23. С. 77.
5. А. с. №341113 СССР, МПК Н01 J 25/00. Лампа обратной волны / Г.Я. Левин (СССР). Заявл. 17.12.1956 // Бюллетень. Открытия, изобретения. 1972. № 25. С. 201.
6. Клинотрон // Г.Я. Левин, А.И. Бородкин, А.Я. Кириченко и др. / Под ред. А.Я. Усикова. Киев: Наук. думка, 1992. 200 с.
7. *Кириченко А.Я., Яковенко В.М.* Клинотрону – 50 // Радиофизика и электроника. Сб. научн. тр. НАН Украины. ИРЭ им. А.Я. Усикова. Харьков, 2007. Т. 12, спец. вып. С. 5.
8. *Ерёмка В.Д.* Вакуумные источники электромагнитного излучения терагерцового интервала частот: Зигзаги развития от клинотрона до клиноорбитрона // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2013. Т. 21, № 1. С. 7.
9. *Альтиулер Ю.Г., Татаренко А.С.* Лампы малой мощности с обратной волной. М.: Сов. Радио, 1963. 296 с.
10. А. с. №555751 СССР, МКИ Н01 J 25/00. Лампа обратной волны / В.Д. Ерёмка, А.Я. Кириченко, В.А. Солодовник (СССР). Заявл. 08.01.1976 // Бюллетень. Открытия, изобретения. 1979. № 10. С. 189.

11. *Силин Р.А., Сазонов В.П.* Замедляющие системы. М.: Сов. радио, 1966. 632 с.
12. *Ерёмка В.Д., Кириченко А.Я., Солодовник В.А.* Исследование возможности бес-токового управления частотой ЛОВО – клинотрона // Труды Института радио-физики и электроники АН УССР. 1977. Т. 23. С. 60.
13. А. с. №892741 СССР, МПК H03 L 7/06. Устройство стабилизации частоты генератора / И.М. Балаклицкий, Ю.В. Майстренко, И.М. Мыщенко (СССР). Заявл. 29.10.1979 // Бюллетень. Открытия, изобретения. 1981. № 47. С. 171.
14. *Мыщенко И.М., Роечко А.Н., Чернявский И.Ю.* Устройство для стабилизации частоты генераторов СВЧ // 36. Наукових праць Харківський військовий універ-ситет. Харків, 2002. Вып. 3(41). С. 108.
15. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Сов. радио, 1971. 672 с.
16. *Семенов А.Н.* Техническая электродинамика. М.: Связь, 1973. 480 с.

Поступила в редакцию 25.06.2015

CURRENT-LESS TUNING AND CONTROL OF SELF-OSCILLATIONS FREQUENCY TERAHERTZ RANGE KLYNOTRON

I. P. Bezgina, V. D. Yeryomka, T. A. Makulina, I. M. Mytsenko

A.Ya. Usikov Institute of Radiophysics and Electronics, Kharkiv, NAS of Ukraine

Terahertz-range backward wave oscillator – carcinotrons and klynotrons are widely used in radioelectronics systems for solving fundamental and applied problems. Instability of the output signal frequency of the said lamps is not worse than 10^{-4} . The frequency of the carcinotron and klynotron output signal as a rule carried out by changing the operating voltage, i.e. with the expenditure of energy in the control circuit. In this paper, we report on the design of the terahertz electromagnetic radiation klynotron oscillator, which provides an implementation method current-less tuning and stabilization frequency of its output signal. Based on the results of studies concluded that the possibility of the process of restructuring oscillation frequency terahertz range klynotron oscillator, which, unlike traditional methods, does not lead to an increase in the emission spectrum of additional spectral components and allows for tuning of the frequency of self-oscillations in the range of hundreds of MHz – GHz units, provide stability close to the stability of the oscillation frequency of the reference resonator.

Keywords: Klynotron, method of current-less self-oscillations frequency tuning, terahertz range, method of current-less klynotron self-oscillations frequency control.

References

1. *Neumann M.S.* Frequency Stabilization in Radio. Svyaz'izdat. 1937. 157 p. (in Russian).
2. *Groszkowski Ya.* Generation of High-Frequency Oscillations and Frequency Stabili-zation. M.: Foreign Literature, 1953. 364 p. (in Russian).
3. *Bychkov S.I., Burenin N.I., Safarov R.T.* Frequency Stabilization of Microwave Oscillators. M.: Soviet Radio, 1962 . 376 p. (in Russian).

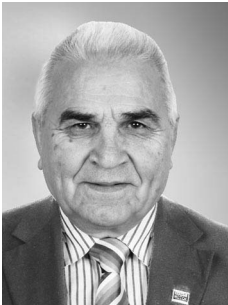
4. *Kovshov Y.S., Ivanov A.I., Kishko S.A., Ponomarenko S.S., Kuleshov A.N., Yephimov B.P.* Stabilization of the electromagnetic oscillations frequency in the submillimeter range BWT oscillators // News of the V.N. Karazin Kharkiv National University. 2013. №1094. Ser. «Radiophysics and electronics», Issue 23. P. 77 (in Russian).
5. Authorship Certificate №341113 from 12.17.1956 USSR. Backward Wave Tube / G.Ya. Levin (USSR) // Bull. Discoveries and Inventions. 1972. № 25. P. 201 (In Russian).
6. Klynotron / G.Ya.Levin. A.I.Borodkin, A.Ya.Kirichenko et al., Ed. A.Ya.Usikov. Kiev: Naukova Dumka, 1992. 200 p. (in Russian).
7. *Kirichenko A.Y., Yakovenko V.M.* Klynotron – 50 // Radio Physics and Electronics. Collection of Scientific Papers / NAS of Ukraine. A.Ya. Usikov Institute of Radiophysics and Electronics. Kharkiv, 2007. Vol.12, Special Issue. P.5 (in Russian).
8. *Yeryomka V.D.* Terahertz vacuum electromagnetic radiation sources: Evolution zig-zag from klynotron to klynoorbictron // Izv. VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2013. Vol. 21, № 1. P. 7 (in Russian).
9. *Altshuler Yu.G., Tatarenko A.S.* Tubes with Low-Power Backward Wave. M.: Sov. Radio, 1963. 296 p. (in Russian).
10. Authorship Certificate №555751 from 8.01.1976 USSR, ICI H01 J 25/00. Backward wave tube / V.D. Yeryomka, A.Ya.Kirichenko, V.A.Solodovnik (USSR) // Bull. Discoveries and Inventions. 1979. № 10. P. 189 (in Russian).
11. *Silin R.A., Sazonov V.P.* Slow Wave Systems. M.: Sov. Radio, 1966. 632 p. (in Russian).
12. *Yeryomka V.D., Kirichenko A.Ya., Solodovnik V.A.* Study the possibility of current-free frequency control O-type BWO-klynotron // Proceedings of the Institute of Radio Physics and Electronics AS of Ukrainian SSR. 1977. Vol. 23. P. 60 (in Russian).
13. Authorship Certificate №892741 from 29.10.1979 USSR, ICI H03 L 7/06. The Device Oscillator Frequency Stabilization / I.M. Balaklitsky, Yu.V. Maystrenko, I.M. Mytsenko (USSR) // Bull. Discoveries and Inventions. 1981. № 47. P. 171 (in Russian).
14. *Mytsenko I.M., Roenko A.N., Chernyavsky I.Y.* Device for stabilizing the frequency of the microwave oscillator // Collection of scientific works of the Kharkov Military University. Kharkiv, 2002. Issue 3 (41). P. 108 (in Russian).
15. *Gonorovsky I.S.* Radio Circuits and Signals. M.: Soviet Radio, 1971. 672 p. (in Russian).
16. *Semenov A.N.* Technical Electrodynamics. M.: Svyaz', 1973. 480 p. (in Russian).



Безгина Ирина Петровна родилась в Харькове, Украина (1970). Окончила Харьковский институт инженеров городского хозяйства (ХИИГХ, 1992). После окончания ХИИГХ работает в Институте радиофизики и электроники имени А.Я.Усикова Национальной академии наук Украины, сначала в должности инженера, затем ведущего инженера-конструктора в Отделе физических основ радиолокации. Занимается систематизацией и компьютерной обработкой результатов экспериментальных исследований. Соавтор двух научных статей в журналах «Радиофизика и электроника», «Telecommunication and Engineering».

61085 Украина, Харьков, ул. Академика Проскуры, 12
 Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАНУ
 E-mail: v.yeryomka@gmail.com

Ерёмка Виктор Данилович родился в Донецкой обл. Украины (1938). Окончил Киевский политехнический институт (1961). После окончания КПИ работает в Институте радиофизики и электроники имени А.Я. Усикова Национальной академии наук Украины. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (ХГУ, 1974) в области физической электроники. Руководил Лабораторией вакуумной СВЧ-электроники и микроэлектроники (1982–1996); Отделом вакуумной электроники (1996–2001). С 2001 года по настоящее время – старший научный сотрудник того же отдела. Соавтор монографий «Электровакуумные приборы диапазона миллиметровых волн» (2007), «Физические основы и радиоэлектронные средства контроля надводной обстановки и судоходства» (2012), «Особенности распространения радиоволн над морской поверхностью» (2013), «Нетрадиционные методы и средства радиолокации» (2015). Опубликовал более 130 научных статей по направлениям физической электроники и радиофизики. Автор 80 изобретений в области вакуумной микроволновой электроники. Область научных интересов – физическая электроника, вакуумная терагерцовая электроника и наноэлектроника, радиофизика, терагерцовая радиофизика, радиолокация. Член редколлегии журнала «Техника и приборы СВЧ», член Программного комитета Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (1994), член Программного комитета Международной зимней школы – семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот (2012), член Украинского физического общества (2001), Member IEEE (1994), Senior Member IEEE (2003).



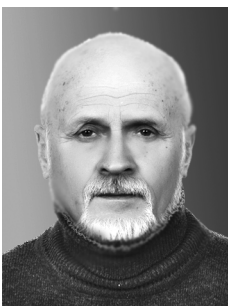
61085 Украина, Харьков, ул. Академика Проскуры, 12
Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАНУ
E-mail: v.yeryomka@gmail.com

Макулина Татьяна Алексеевна родилась в Харькове, Украина. Окончила Харьковского института радиоэлектроники имени академика М.К. Янгеля (ХИРЭ, 1972). После окончания ХИРЭ работает там же сначала в должности инженера, затем младшего научного сотрудника НИС (1972–1985), затем в должности ведущего инженера ОКБ ХГПЗ им. Т.Г. Шевченко (1986–2006); с 2006 года по настоящее время ведущий инженер-разработчик узлов передающих измерительных комплексов Отдела физических основ радиолокации ИРЭ НАНУ. Автор и соавтор 7 научных статей и 3 патентов на изобретения. Область научных интересов: радиотехника, радиосистемы, радиолокация.



61085 Украина, Харьков, ул. Академика Проскуры, 12
Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАНУ
E-mail: v.yeryomka@gmail.com

Мыценко Игорь Михайлович родился в Харькове, Украина (1947). Окончил Харьковский институт радиоэлектроники имени академика М.К. Янгеля (ХИРЭ) (1974). После окончания ХИРЭ работает в Институте радиофизики и электроники имени А.Я.Усикова Национальной Академии наук Украины (ИРЭ НАНУ). Участвовал в 8 научных экспедициях в различных районах Мирового океана (1978–1997). Руководил отделом радиофизических исследований (1987–1997). Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук (ХГУ, 1990) в области радиофизики. С 1997 года по настоящее время старший научный сотрудник Отдела физических основ радиолокации ИРЭ НАНУ. Защитил диссертацию на соискание учёной степени доктора физико-математических наук (ИРЭ НАНУ, 2014) в области радиофизики. Соавтор монографий: «Диагностика условий распространения УКВ в тропосфере» (2010), «Физические основы и радиоэлектронные средства контроля надводной обстановки и судоходства» (2012), «Особенности распространения радиоволн над морской поверхностью» (2013), «Нетрадиционные методы и средства радиолокации» (2015). Опубликовал более 100 научных статей по направлениям радиофизики, радиолокации и физической электроники. Автор 15 изобретений в области радиофизики и электроники СВЧ. Область научных интересов: радиофизика, радиолокация, загоризонтное распространение радиоволн над морской поверхностью.



61085 Украина, Харьков, ул. Академика Проскуры, 12
Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАНУ
E-mail: v.yeryomka@gmail.com