

РАДИОФИЗИКА

Том XXI

ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК

ИЗДАНИЕ ГОРЬКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
РАДИОФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

1978

УДК 621.373.432

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСОВ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

И. М. Балаклицкий, Г. С. Воробьев, А. И. Цвык, В. П. Шестопалов

Путем теоретических оценок и экспериментальных исследований анализируются физические явления, которые приводят к искажениям спектра импульсов дифракционного излучения. Экспериментальные исследования проведены для импульсов ВЧ-колебаний длительностью 0,15—10 мкс, возбуждаемых в генераторе дифракционного излучения миллиметрового диапазона длин волн. Установлено влияние крутизны электронной перестройки частоты, величины фокусирующего магнитного поля, давления остаточных газов на спектральные характеристики прибора. Определена область изменения параметров генератора, где паразитные эффекты, приводящие к искажениям спектра, сказываются незначительно.

Анализируются физические явления, которые вызывают искажение спектра ВЧ-сигнала импульсного дифракционного излучения. Экспериментально исследованы спектральные характеристики импульсов ВЧ-колебаний длительностью $\tau = 0,15 \div 10$ мкс, возбуждаемых в генераторе дифракционного излучения (ГДИ) миллиметрового диапазона длин волн ($\lambda = 3,8 \div 8$ мм). Результаты эксперимента представлены в виде спектрограмм при изменении мощности генерации, крутизны электронной перестройки частоты, фокусирующего магнитного поля, давления остаточных газов в приборе. Установлены режимы работы ГДИ, где влияние паразитных эффектов на качество импульсов ВЧ-колебаний невелико.

В настоящее время отсутствуют исследования спектральных характеристик импульсов дифракционного излучения, хотя качество ВЧ-сигнала является определяющим фактором в случае практического использования приборов дифракционной электроники в науке и технике [1]. Результаты таких исследований приведены в данной работе.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО СПЕКТРА ИМПУЛЬСОВ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Известно, что качество спектра ВЧ-сигнала определяется шириной спектральной линии, стабильностью амплитуды и частоты (несущей) основного колебания, а также уровнем паразитных колебаний. В [2] показано, что ширина спектра импульсного дифракционного излучения, возбуждаемого на периодической структуре идеализированным (монокроматическим) импульсом электронного потока, определяется параметрами электродинамической системы и импульса тока. Ряд физических процессов, протекающих в электронном потоке, которые могут привести в реальных приборах типа ГДИ к искажениям спектра импульсного излучения, при этом не учитывался.

В общем случае эти искажения спектра связаны с изменениями в пространстве взаимодействия параметров электронного потока, что обусловлено техническими причинами (нестабильностью источников

питания, искажениями формы импульса напряжения модулятора, вибрацией зеркал открытого резонатора и т. д.) и физическими процессами, протекающими в приборе (нейтрализацией объемного заряда ионами остаточных газов, накоплением ионов и их последующими колебаниями, искажением формы электронного пучка в пространстве взаимодействия и другими факторами). Эти явления носят как регулярный характер (периодические флуктуации), так и случайный (хаотические флуктуации), что приводит в импульсном режиме к амплитудной и частотной модуляции несущей, а также к уширению спектра ВЧ-колебаний. Исследование качества спектра импульсного излучения с учетом указанных явлений связано с решением нестационарных задач дифракционной электроники.

Ограничимся исследованием спектра импульсов генерации, возбуждаемых в ГДИ, и определением степени влияния на ВЧ-колебания детерминированных гармонических процессов, связанных с изменениями параметров электронного потока.

Из линейной теории возбуждения ГДИ следует, что уход частоты генерации основной пространственной гармоники при изменении скорости электронов потока можно определить по формуле

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{L\omega_0}{8Q\beta c} \frac{\Delta U}{U_0}, \quad (1)$$

где L — длина пространства взаимодействия, Q — нагруженная добротность резонатора, образованного отражательной дифракционной решеткой и плоским зеркалом, $v_0 = \sqrt{2\eta U_0} = \beta c$ — постоянная скорость электронов пучка, c — скорость света, $\Delta U/U_0$ — относительное изменение напряжения, определяющее скорость электронов в пространстве взаимодействия.

Если предположить, что изменение скорости электронов пучка в пространстве взаимодействия приводит к линейному изменению амплитуды и частоты в течение длительности τ прямоугольного импульса генерации (время установления колебаний и время «звона» резонатора в генераторе значительно меньше длительности вершины огибающей импульса ВЧ-колебаний), то спектр такого ВЧ-сигнала можно записать в виде

$$\left| \frac{A_\omega}{A_0} \right|^2 = \frac{\pi M^2}{8\alpha} (\Delta_c^2 + \Delta_s^2) + \frac{m_a M}{2\alpha} \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}} (\Delta_c \cos \theta + \Delta_s \sin \theta) \times \\ \times \sin \frac{\overline{\Delta\omega}}{2} \tau + \left(\frac{m_a}{2\alpha} \sin \frac{\overline{\Delta\omega}}{2} \tau \right)^2. \quad (2)$$

Здесь $\Delta_c = C(\nu_1) - C(\nu_2)$, $\Delta_s = S(\nu_1) - S(\nu_2)$, $\overline{\Delta\omega} = \omega - \overline{\omega_0}$,

$$\alpha = m_u \frac{L \overline{\omega_0}^2}{16Q\beta c}, \quad M = 1 + m_a \frac{\overline{\Delta\omega}}{2\alpha}, \quad m_a = \frac{A_2 - A_1}{A_0 \tau},$$

$$m_u = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\overline{\omega_0} \tau} = \frac{2\alpha}{\overline{\omega_0}}, \quad m_u = \frac{U_2 - U_1}{\overline{U_0} \tau} = \frac{\Delta U}{\overline{U_0} \tau}, \quad \theta = \frac{\alpha \tau^2}{4} - \frac{\overline{\Delta\omega}^2}{4\alpha},$$

$$\overline{A_0} = \frac{1}{2} (A_2 + A_1), \quad \overline{\omega_0} = \frac{1}{2} (\omega_2 + \omega_1), \quad \overline{U_0} = \frac{1}{2} (\overline{U_2} + \overline{U_1}),$$

$$v_1 = -\sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}} \left(\frac{\tau}{2} + \frac{\Delta\omega}{2\alpha} \right), \quad v_2 = \sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}} \left(\frac{\tau}{2} - \frac{\Delta\omega}{2\alpha} \right).$$

$$S(v) = \int_0^v \sin\left(\frac{\pi}{2} \xi^2\right) d\xi, \quad C(v) = \int_0^v \cos\left(\frac{\pi}{2} \xi^2\right) d\xi \text{ — интегралы Френеля;}$$

индексами «1», «2», «—» обозначены соответственно начальные, конечные и средние значения параметров A , ω , U . Коэффициенты модуляции m_a , m , m_u характеризуют максимальное относительное изменение среднего значения амплитуды \bar{A}_0 импульса ВЧ-сигнала, амплитуды \bar{U}_0 импульса напряжения (скорости электронов) и несущей частоты ($\omega_0 = 2\pi f_0$) в течение длительности τ . При этом $m_u \geq 0$, $m_\omega \geq 0$ (нарастание частоты генерации с увеличением скорости электронов), а коэффициент m_a может быть положительным или отрицательным, что соответствует линейному нарастанию или спаду вершины импульса генерации.

Соотношение (2) позволяет проанализировать изменение качества спектра импульсов ВЧ-колебаний от различных параметров генератора. Если $\alpha = 0$ ($m_u = 0$), $m_a \neq 0$, то импульс генерации имеет только амплитудную модуляцию, которая приводит к несимметричности спектра (2), однако ширина спектра в этом случае примерно соответствует теоретическому значению

$$\Delta F \approx \frac{1}{\tau}. \quad (3)$$

При наличии частотной модуляции ($\alpha \neq 0$, $m_u \neq 0$), когда

$$m_u \leq \frac{8Q\beta c}{\pi L f_0^2 \tau^2}, \quad (4)$$

спектр импульса генерации имеет незначительные искажения, а его ширина соответствует (3). Если условие (4) не выполняется, то увеличение уклона m_u приводит к искажениям спектра (2) — наблюдается уширение спектра, а в его огибающей появляются периодические осцилляции.

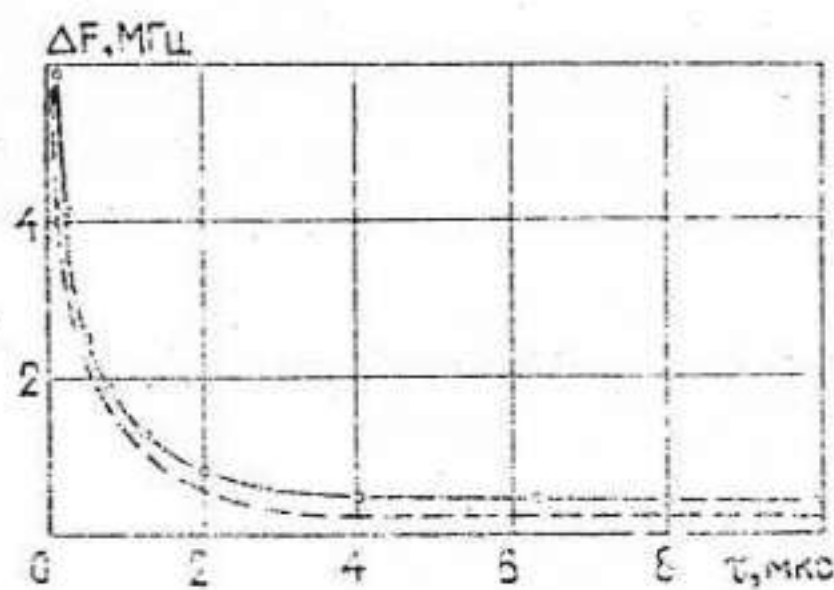
С увеличением добротности резонатора величина допустимого значения m_u , при которой наблюдаются минимальные искажения спектра, возрастает. Этот факт является важным в случае генерации в ГДИ длинных импульсов ВЧ-колебаний, где значительно влияют на качество спектра изменения скорости электронов пучка вследствие нейтрализации объемного заряда ионами остаточных газов.

Следовательно, к существенным искажениям спектра может привести паразитная частотная модуляция несущей импульса дифракционного излучения. Эти результаты подтверждаются проведенными экспериментальными исследованиями.

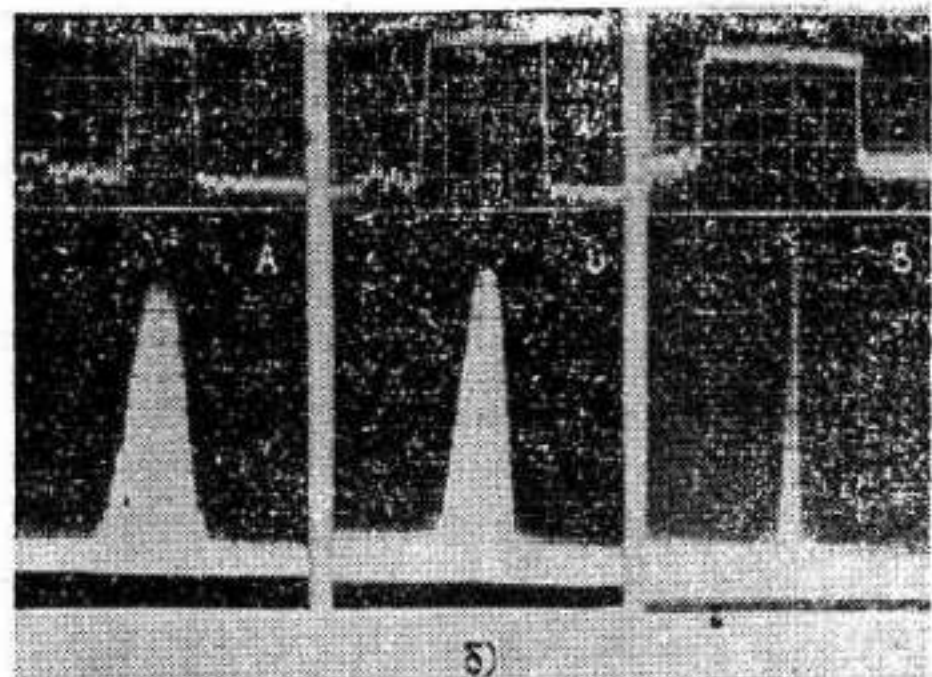
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования спектральных характеристик импульсов дифракционного излучения проводились в миллиметровом диапазоне ($\lambda = 3,8 \div 8$ мм) как на разборных макетах ГДИ при непрерывной откачке, так и на приборах отпаянных конструкций при давлении остаточных газов не хуже 10^{-7} мм рт. ст. Открытый резонатор с нагруженной добротностью 2000—3000 образован сферическим зеркалом и плоским с частичным заполнением отражательной дифракционной решеткой. Импульсы ленточного электронного потока сечением

$5 \times 0,2 \text{ мм}^2$ создавались диодной пушкой. Длительность импульсов напряжения модулятора (электронного тока) составляла $0,1 - 10 \text{ мкс}$, частота следования импульсов — $200 - 2000 \text{ Гц}$, амплитуда импульсов напряжения модулятора — $1,4 - 7 \text{ кВ}$ с уклоном вершины $k = \frac{\Delta U}{\tau} \approx 0,5 \div 5 \text{ В/мкс}$. Исследование спектра импульсов генерации проводилось на анализаторе С4-27.



а)



б)

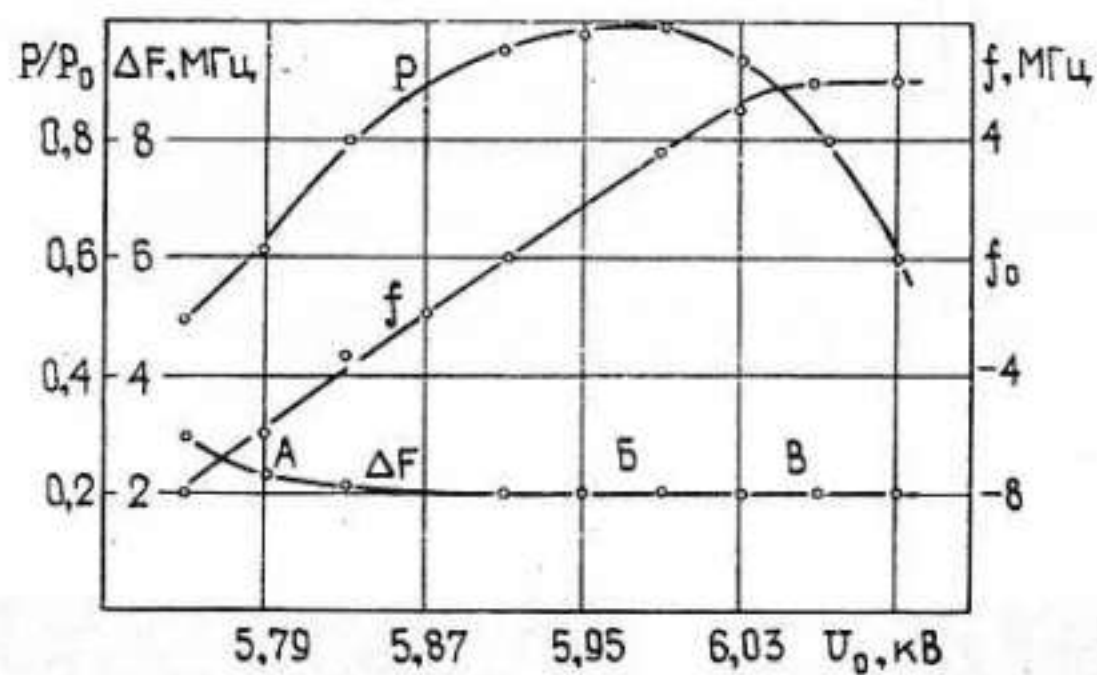
Рис. 1. Зависимости ширины спектра от длительности импульсов дифракционного излучения (а) и спектрограммы ВЧ-сигналов (б)
(А — $\tau = 0,15 \text{ мкс}$, Б — $\tau = 0,75 \text{ мкс}$, В — $\tau = 10 \text{ мкс}$).

Экспериментально установлено, что при соответствующем выборе параметров и условий возбуждения генератора импульсы ВЧ-колебаний длительностью $\tau = 0,15 \div 10 \text{ мкс}$ имеют незначительные искажения — минимальную амплитудную модуляцию огибающей ($m_a \approx 0$) и удовлетворительное качество спектра (отсутствует паразитная модуляция, а его ширина примерно определяется соотношением (3)). Это наглядно видно из рис. 1, где приведены теоретическая (3) и экспериментальная зависимости ширины спектра от длительности импульса генерации ($\bar{U} = 6 \text{ кВ}$, $\bar{f}_0 = 75,8 \text{ ГГц}$), а также огибающие импульсов ВЧ-сигналов для $\tau = 0,15; 0,75; 10 \text{ мкс}$ и соответствующие им спектры (рис. 1б) с полосой $\Delta F = 6; 2; 0,4 \text{ МГц}$ на уровне 0,1 максимального значения мощности генерации (здесь спектрограммы А приведены в полосе обзора 20 МГц ; Б, В — 10 МГц). Эти характеристики соответствуют оптимальным условиям работы ГДИ (максимальная мощность генерации, минимальная крутизна электронной перестройки частоты), которые зависят от многих параметров: тока пучка, угла пролета электронов, величины магнитного поля и других. Поэтому целесообразно определить область возбуждения генератора, где влияние паразитных эффектов на качество спектра импульсов ВЧ-колебаний невелико.

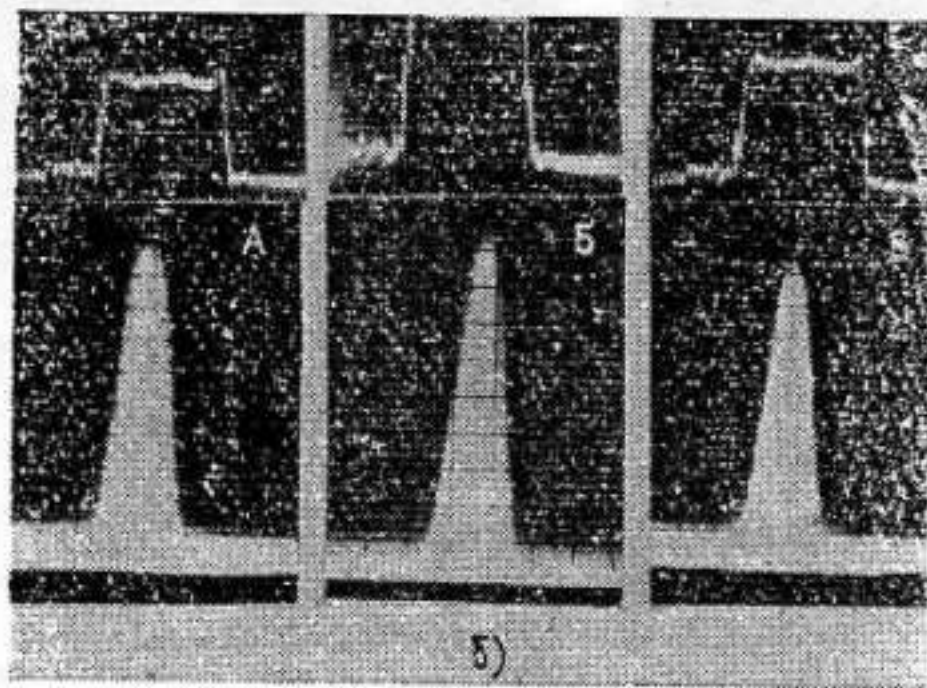
Качество спектра в зоне электронной перестройки ГДИ. Экспериментальные исследования характеристик импульсов генерации в зоне электронной перестройки ГДИ (рис. 2, 3 — перестройка частоты путем изменения ускоряющего напряжения или амплитуды импульса напряжения модулятора при фиксированных расстояниях между зеркалами резонатора) показывают, что графики зависимости импульсной мощности и частоты генерации от величины импульсного напряжения примерно имеют такой же вид, как и в непрерывном режиме [1]: зависимость мощности генерации имеет несимметричный характер; с увеличением тока пучка зона перестройки частоты уширяется, при этом для большинства возбуждаемых колебаний наблюдаются в начале или в конце зоны резкие срывы мощности с проявлением гистерезисных яв-

лений; частота генерации с увеличением \bar{U}_0 на значительном участке зоны нарастает, примерно по прямо пропорциональному закону с крутизной 0,1 — 0,2 МГц/В.

Однако в процессе исследования импульсных характеристик установлено, что для некоторых колебаний гистерезисные явления в приборе проявляются незначительно, а в зоне имеются области с малой крутизной ($\frac{df}{dU} \approx 0$), что является важным для генерации импульсов ВЧ-колебаний с минимальными искажениями спектра. Кроме того, для большинства возбуждаемых колебаний спектр коротких импульсов генерации ($\tau \leq 1$ мкс) по зоне имеет значительно меньшие искажения, чем длинные импульсы ($\tau > 1$ мкс).



а)



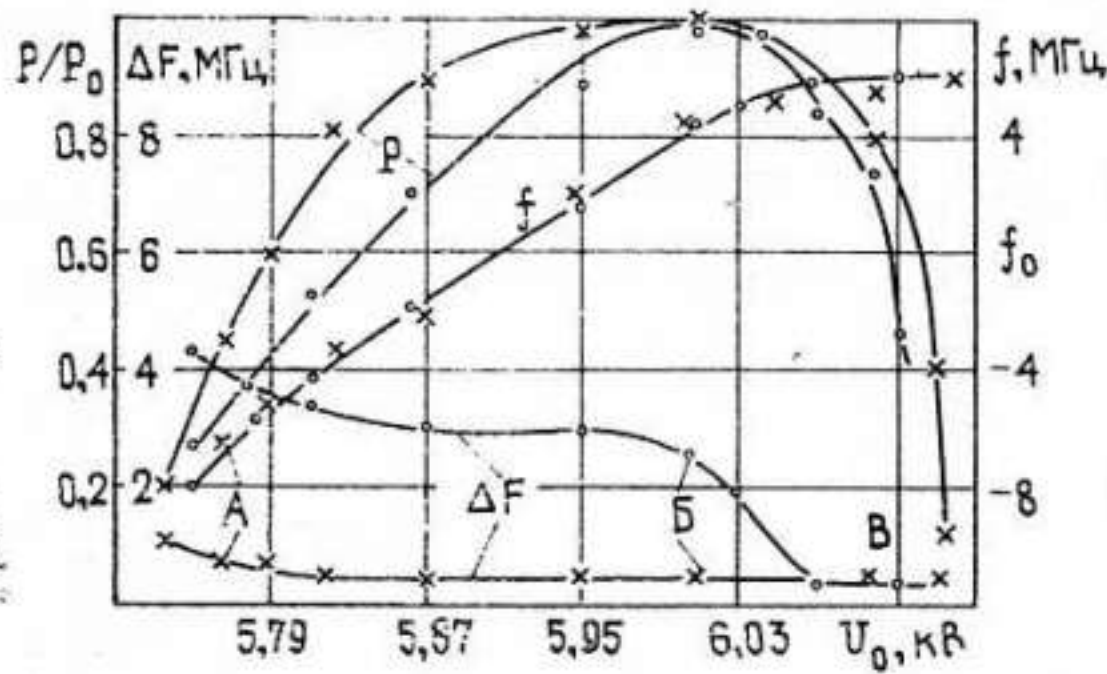
б)

Рис. 2. Зависимости мощности, перестройки частоты, ширины спектра импульсов генерации длительностью $\tau = 0,75$ мкс от ускоряющего напряжения (а) и спектрограммы ВЧ-сигналов (б).

В частности, на рис. 2а приведены зависимости мощности (P), перестройки частоты (f_0) и ширины спектра (ΔF) импульса генерации длительностью $\tau = 0,75$ мкс в зоне электронной перестройки (ток в импульсе — 0,8 А, $f_0 = 75,8$ ГГц, величина фокусирующего магнитного поля $H = 4,4$ кЭ). Форма импульса генерации и его спектр в различных областях зоны (А, Б, В) показаны на рис. 2б. Из этих характеристик видно, что несмотря на достаточно широкие пределы изменения крутизны перестройки частоты качество спектра меняется незначительно (уширение спектра импульсов $\tau \leq 1$ мкс, в основном, наблюдается в области начала или срыва генерации).

Увеличение τ ($\tau > 1$ мкс) приводило к уширению и несимметричности спектра, а также к появлению в нем паразитных ВЧ-колеба-

ний. Установлено, что эти искажения спектра были обусловлены техническими причинами, в частности, отклонениями импульса напряжения модулятора от прямоугольной формы (уклон вершины $k \approx 5 \text{ В/мкс}$). Так из теоретических оценок (4) следует, что для получения удовлетворительного спектра в исследуемых генераторах уклон вершины импульса напряжения в пространстве взаимодействия не должен превышать $\sim 0,05 \text{ В/мкс}$. Этот факт проиллюстрирован на рис. 3, где приведены характеристики импульсов генерации длительностью



а)

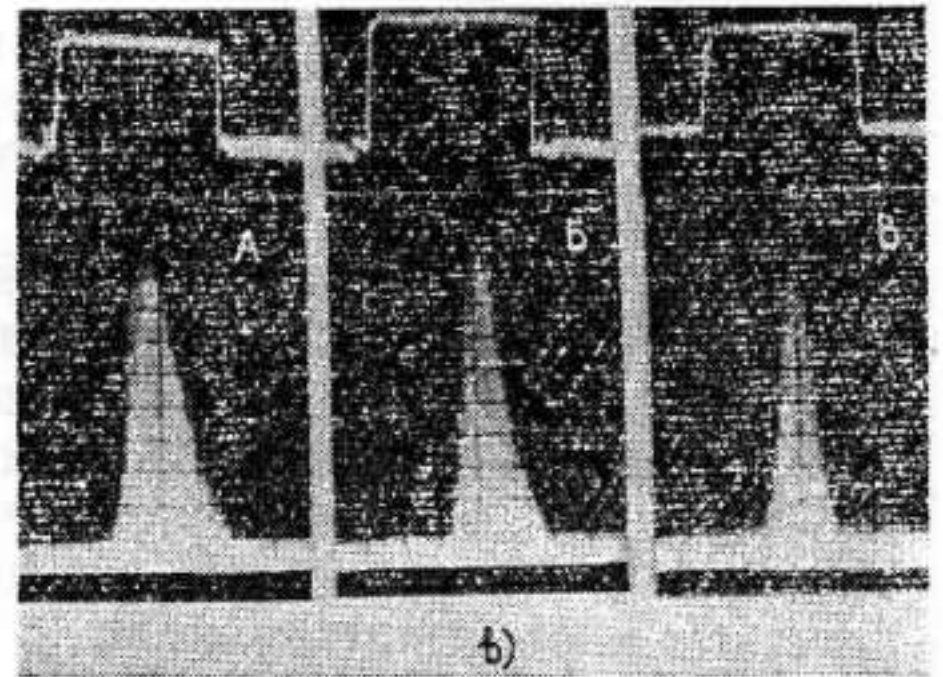
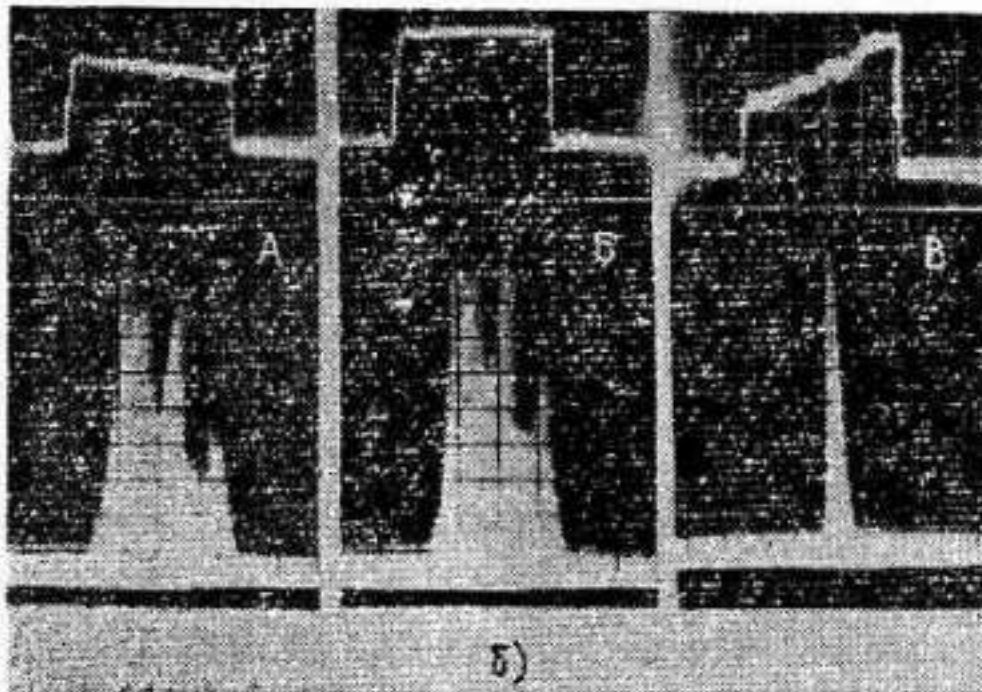


Рис. 3. Влияние уклона вершины импульса напряжения модулятора на мощность, частоту, ширину спектра (а) и на качество спектра (б, в) импульсов дифракционного излучения длительностью $\tau = 10 \text{ мкс}$ в зоне электронной перестройки ГДИ.

$\tau = 10 \text{ мкс}$ при $k_1 = 5 \text{ В/мкс}$ (графики, обозначенные точками) и $k_2 = 0,5 \text{ В/мкс}$ (графики с крестиками). Спектрограммы на рис. 3б для k_1 приведены в полосе обзора 10 МГц , а для k_2 (рис. 3в) — 3 МГц .

Из спектрограмм видно, что для k_1 в области линейного изменения крутизны электронной перестройки частоты спектр импульсов генерации имеет существенные искажения, где ширина спектра достигает 5 МГц . При этом, уменьшение амплитудной модуляции несущей (область максимальной мощности генерации, где $m_a \approx 0$; сигнал Б, рис. 3б) приводит к незначительному улучшению качества спектра, что указывает на присутствие в импульсе генерации паразитной частотной модуляции. Однако в области «нулевой» крутизны, даже при наличии в этом сигнале амплитудной и частотной модуляции (сигнал В, рис. 3б), качество спектра существенно улучшается — исчезают паразитные осцилляции, а его ширина примерно соответствует теоретическому значению (3).

Уменьшение уклона вершины импульса напряжения модулятора

приводит к значительному улучшению качества спектра ВЧ-колебаний. Так, при $k_2 = 0,5$ В/мкс (рис. 3в) спектр импульса генерации длительностью $\tau = 10$ мкс в зоне электронной перестройки частоты, как и для импульсов с длительностью $\tau \leq 1$ мкс, имеет минимальные искажения.

Влияние магнитного поля. Известно, что величина фокусирующего магнитного поля определяет статическую форму траектории электронного потока в пространстве взаимодействия. С учетом ионизационных процессов квазистатические пульсации потока в приборах с длительным взаимодействием могут существенным образом влиять на спектральные характеристики сигналов генерации [3].

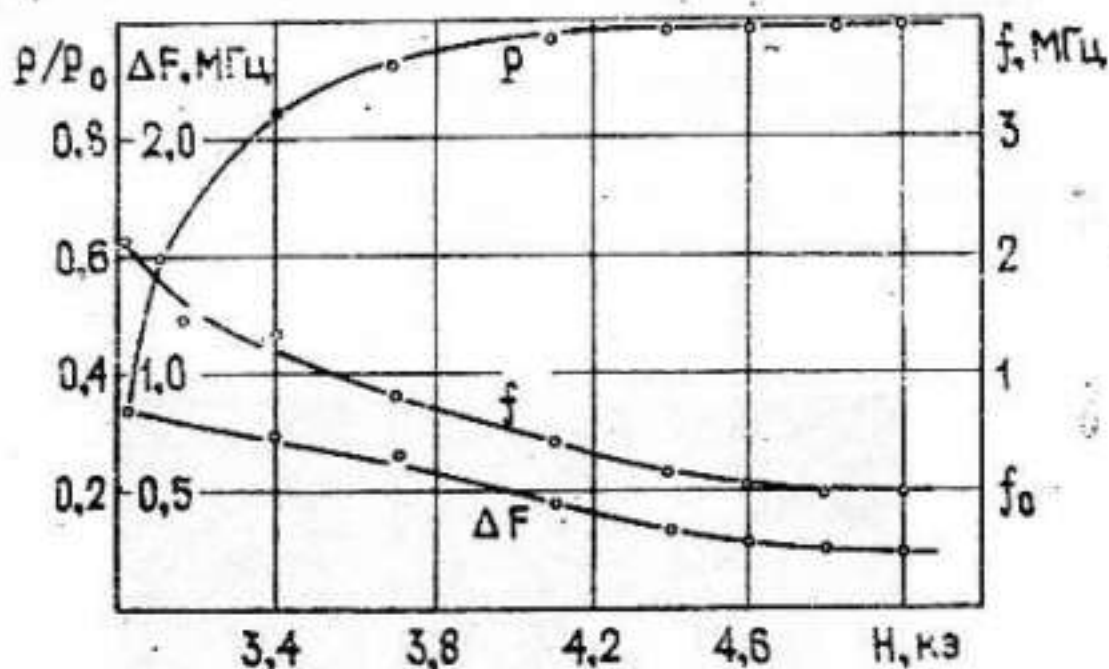


Рис. 4. Зависимости мощности, изменения частоты и ширины спектра импульсов генерации от магнитного поля ($\tau = 10$ мкс, $\bar{f}_0 = 75,8$ ГГц, $k = 0,5$ В/мкс).

Проведенные экспериментальные исследования качества спектра импульсов генерации в ГДИ показывают, что спектр на уровне $P \geq 0,5 P_{\max}$ с изменением величины фокусирующего магнитного поля меняется незначительно; существенные искажения спектра наблюдаются в области пусковых значений H . В частности, на рис. 4 приведены зависимости мощности, изменения частоты и ширины спектра импульсов генерации длительностью $\tau = 10$ мкс от магнитного поля. Видно, что с уменьшением магнитного поля частота генерации и ширина спектра возрастают. При этом существует оптимальная величина H_{opt} (если прибор при изменении H не юстируется), где спектр имеет минимальные искажения. Увеличение H относительно H_{opt} уменьшает амплитуду пульсаций граничных электронов потока (поток удаляется от дифракционной решетки) и снижает эффективность взаимодействия его с полем резонатора, что приводит к уменьшению мощности и изменению качества спектра импульсов ВЧ-колебаний.

Влияние давления остаточных газов. Наиболее трудно устранимыми в приборах с длительным взаимодействием являются искажения спектра, связанные с ионизационными процессами, которые приводят к нейтрализации объемного заряда и к последующему изменению параметров электронного потока. Степень влияния этих процессов на качество спектра возрастает с увеличением длительности и величины импульса электронного тока, с увеличением давления остаточных газов (например, в приборах типа ЛОВО [3]).

Экспериментальные исследования качества спектра ВЧ-колебаний в ГДИ от давления остаточных газов показывают, что на длительностях импульсов генерации $\tau \leq 10$ мкс при уменьшении давления в приборе от 10^{-7} мм рт. ст. до 10^{-4} мм рт. ст. заметных искажений в спектре не наблюдается. В частности, на рис. 5 приведены зависимости им-

пульсного электронного тока (I), ширины спектра и спектрограммы импульсов генерации длительностью $\tau = 10$ мкс от давления остаточных газов в ГДИ. Видно, что заметное уширение спектра проявляется при $p \leq 10^{-4}$ мм рт. ст., где происходит отравление катода электронной пушки и значительное уменьшение величины электронного тока.

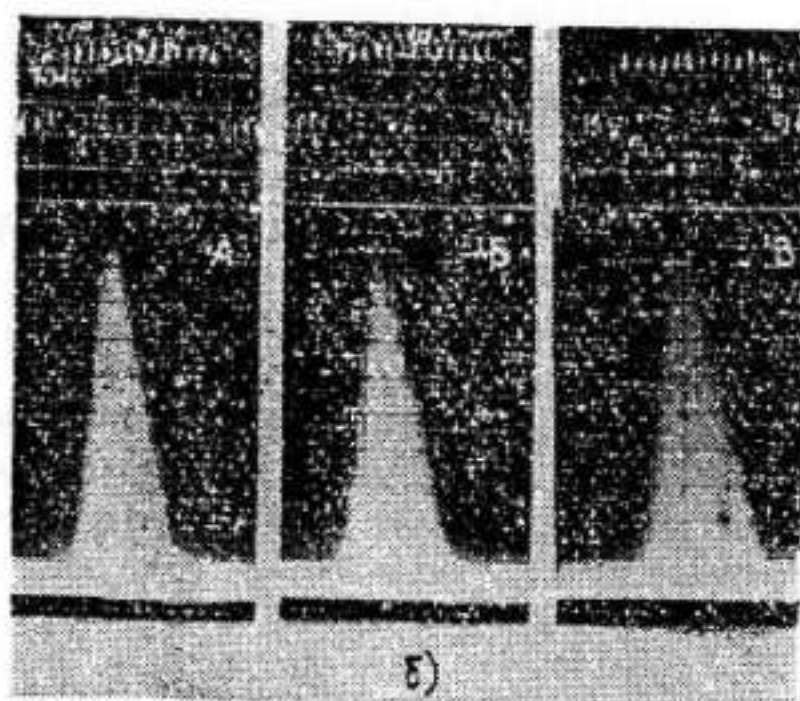
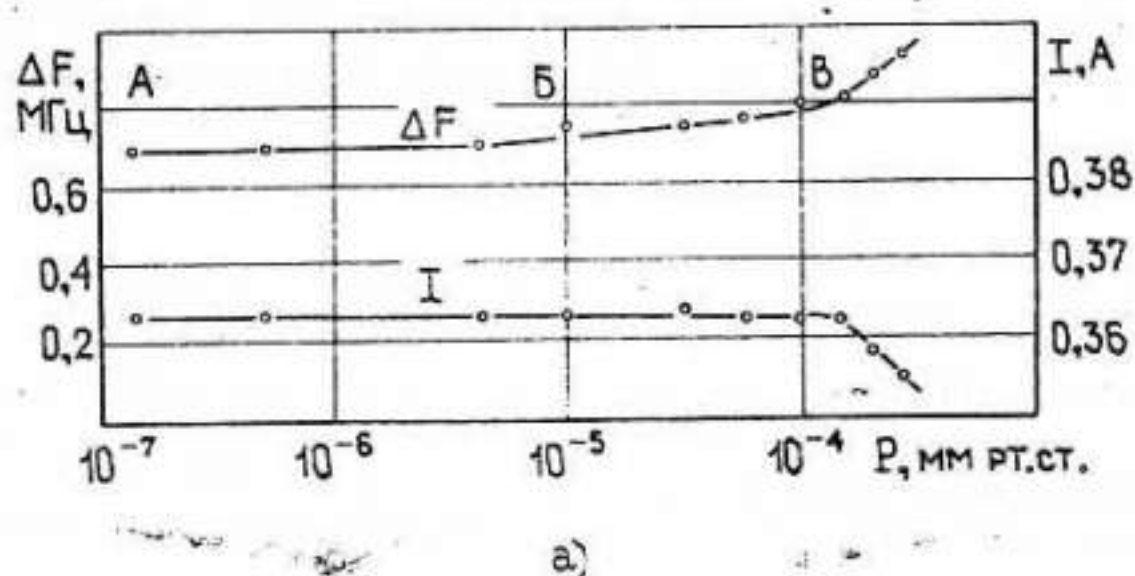


Рис. 5. Влияние давления остаточных газов в ГДИ на электронный ток, ширину спектра импульсов генерации длительностью $\tau = 10$ мкс (а) и на качество спектра ВЧ-колебаний (б).

В заключение отметим, что для сравнения качества спектра импульсов дифракционного излучения, возбуждаемых в ГДИ, проводились (при равных технических условиях) исследования спектра импульсов генерации резонансных ЛОВО. В результате сопоставления этих исследований установлено, что качество спектра в ГДИ выше, чем в ЛОВО. Так, на длительностях импульсов ВЧ-колебаний $\tau = 1$ мкс ширина спектра $\Delta F_{\text{ГДИ}} = 1,5 \div 2$ МГц, $\Delta F_{\text{ЛОВ}} = 6 \div 8$ МГц, а для $\tau = 10$ мкс — $\Delta F_{\text{ГДИ}} = 0,4 \div 5$ МГц, $\Delta F_{\text{ЛОВ}} = 40 \div 60$ МГц, при этом в ЛОВО наблюдаются значительные искажения спектра, обусловленные как искажениями формы импульса напряжения модулятора, так и изменениями параметров пучка при нейтрализации объемного заряда ионами остаточных газов.

ВЫВОДЫ

1) Проведены теоретические оценки влияния изменения скорости электронов потока в пространстве взаимодействия на качество спектра импульсов дифракционного излучения, возбуждаемых в приборах типа ГДИ.

2) При соответствующих технических условиях в области электронной перестройки частоты ГДИ качество спектра импульсов генерации длительностью $\tau \leq 10$ мкс меняется незначительно.

3) В зоне электронной перестройки ГДИ существуют области с

достаточно малой крутизной («нулевой»), где качество спектра ВЧ-колебаний значительно улучшается.

4) Экспериментально исследовано влияние фокусирующего магнитного поля на качество спектра импульсов ВЧ-колебаний ГДИ.

5) Ионизационные процессы, протекающие в ГДИ, приводят к незначительному изменению качества спектра сигнала генерации длительностью $\tau \leq 10$ мкс при изменении давления остаточных газов в достаточно широких пределах ($p \leq 10^{-4}$ мм рт. ст.).

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Шестопалов, Дифракционная электроника, изд. Вища школа, Харьков, 1976.
2. И. М. Балаклицкий, Б. К. Скрынник, А. И. Цвык, В. П. Шестопалов, Изв. вузов — Радиофизика, 18, № 10, 1528 (1975).
3. А. М. Кац, Е. М. Ильина, И. А. Манькин, Нелинейные явления в СВЧ-приборах О-типа с длительным взаимодействием, изд. Сов. радио, М., 1975.

Институт радиофизики и электроники
АН УССР

Поступила в редакцию
22 июля 1977 г.

INVESTIGATION OF THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF DIFFRACTION RADIATION PULSES

I. M. Balaklitskii, G. S. Vorob'ev, A. I. Tsvyk, V. P. Shestopalov

The physical phenomena which lead to the spectral distortions of diffraction radiation pulses are analysed by theoretical estimations and experimental investigations. The experimental investigations have been made for HF-oscillation pulses of 0.15 — 10 μ sec duration excited in the oscillator of diffraction radiation of the millimeter wave range. The influence of the curvature of the electron frequency retuning, the values of the magnetic field, the pressure of residual gases on the spectral characteristics of the device has been established. The region of the parameter variation of the oscillator in which spurious effects leading to the spectral distortion have an unessential effect is determined.