

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРОВ

УДК 621.385.6:621.317.757.12

И. Н. Бондаренко, А. С. Гиссь,
Ф. Ф. Менде

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ СВЧ-ГЕНЕРАТОРОВ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИМИ РЕЗОНАТОРАМИ

Исследованы спектральные характеристики СВЧ-генераторов 3-см диапазона с различными схемами стабилизации на основе идентичных сверхпроводящих резонаторов (СПР). Нагруженная добротность перестраиваемого СПР на виде колебаний H_{21} составляла около 10^6 при 4,2 К. Получено подавление частотных шумов примерно 95 дБ/Гц на расстоянии 30 Гц от несущей частоты для отражательного клистрона, стабилизированного системой автоматической подстройки частоты с СПР, и около 135 дБ/Гц на расстоянии 1000 Гц — для автогенератора на ЛБВ с СПР в цепи обратной связи. Экспериментально исследована возможность создания системы двойной стабилизации частоты отражательного клистрона. При отстройке от несущей на 30 и 1000 Гц отношение шум/сигнал составляло соответственно —105 и —130 дБ/Гц при относительной нестабильности частоты генератора примерно 10^{-10} за 1 ч и возможности перестройки его частоты в пределах 40 МГц.

Стабилизирующие сверхпроводящие резонаторы (СПР) позволяют не только улучшить долговременную стабильность генераторов СВЧ, но и существенно снизить интенсивность шумовых составляющих в спектре СВЧ-сигнала [1].

Экспериментальные исследования спектра сигнала вблизи несущей частоты для различных типов генераторов, стабилизированных СПР, проведены в ряде работ [2—5]. Результаты представлены на рис. 1 в виде зависимости отношения мощности частотного шума в боковой полосе шириной 1 Гц к мощности несущей ($P_{ш}/P_c$) на расстоянии F от средней частоты спектра колебания.

Кривые 1 и 2 даны для автогенераторов на ЛБВ с СПР в цепи обратной связи; кривые 3 и 4 — соответственно для отражательного клистрона, стабилизированного внешним объемным перестраиваемым СПР, и генератора на диоде Ганна, ста-

билизированного системой автоматической подстройки частоты (АПЧ) с СПР. (Регулярные составляющие спектров на рисунке не приведены).

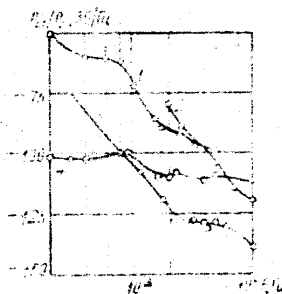


Рис. 1. Частотные шумовые характеристики с СВЧ-генераторов с СПР:

1, 2 — автогенератор на ЛБВ с СПР на частотах соответственно $f_c = 7,7$ ГГц [2] и $f_c = 1,25$ ГГц [4]; 3 — отражательный клистрон, стабилизированный внешним перестраиваемым СПР, $f_c = 10$ ГГц [3]; 4 — генератор Ганна, стабилизированный системой АПЧ с СПР, $f_c = 8,6$ ГГц [5].

Можно отметить преимущество генератора Ганна с системой АПЧ на частотах, очень близких к несущей, для которого $P_{ш}/P_c \approx -100$ дБ/Гц вплоть до 10 Гц. Минимальную величину $P_{ш}/P_c \approx -140$ дБ/Гц на частотах 1000 Гц имеет генератор на отражательном клистроне с внешним объемным СПР.

Однако объективное сравнение возможностей каждой из систем стабилизации затруднено, поскольку эти результаты получены, во-первых, при использовании СПР, отличавшихся конструктивно и по величине добротности, а во-вторых, в каждом случае использовалась своя методика измерения частотных шумов.

В данной работе проведено исследование и сравнение частотных флуктуаций трех типов высокостабильных СВЧ-генераторов 3-см диапазона: отражательного клистрона, стабилизированного по схеме АПЧ с СПР [6]; отражательного клистрона, стабилизированного СПР методом затягивания; генератора на ЛБВ с СПР в цепи обратной связи [7], а также экспериментально рассмотрена возможность создания такой системы стабилизации частоты СВЧ-генератора с использованием СПР, в которой существенно ослабляются частотные шумовые составляющие спектра колебания как вблизи, так и вдали от несущей частоты.

Резонатор, который использован в генераторах, вытачивался из меди, механически и электрохимически полировался, покрывался слоем свинца из борфтористоводородного электролита и размещался в вакуумном кожухе, откачанном до давления $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па. Нагруженная добротность резонатора

на виде колебаний H_{01} составляла около $1 \cdot 10^7$ при 4,2 К. Сверхпроводящим штырем, вводимым в полость резонатора, можно было производить перестройку частоты в диапазоне 38 МГц. Связь с резонатором осуществлялась коаксиальными линиями.

Для исследования частотных флуктуаций был выбран метод прямого детектирования с использованием в качестве частотного дискриминатора объемного перестраиваемого сверхпроводящего резонатора [8]. Резонатор имел нагруженную добротность около $1 \cdot 10^7$ при 4,2 К. Применение такого дискриминатора позволяет выполнять измерения на частотах анализа 20—1 000 Гц.

Блок-схема установки для измерения частотных флуктуаций приведена на рис. 2.

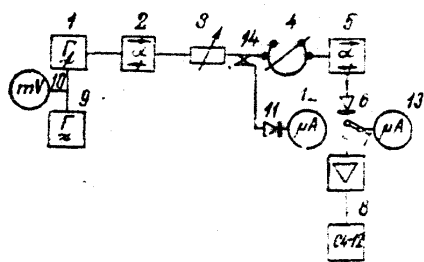


Рис. 2. Блок-схема установки для измерения частотных флуктуаций:

1 — исследуемый генератор; 2, 5 — фазовые векторы; 3 — аттенуатор; 4 — перестраиваемый СПР; 6, 11 — амплитудные детекторы; 7 — малошумящий усилитель; 8 — анализатор спектра С4-12; 9 — генератор низких частот Г3-56; 10 — милливольтметр В3-7; 12, 13 — индикаторные устройства; 14 — направленный отверстие.

Калибровка анализатора спектра С4-12 производилась в единицах шумовой девиации δf (в Гц/Гц^{1/2}) с использованием генератора низких частот Г3-56. Для этого в случае исследования клистрона, стабилизированного по схеме АПЧ с СПР, на его отражатель подавалось внешнее модулирующее напряжение заданной частоты, величина которого определялась по формуле:

$$U = \frac{\alpha K_{\text{ст}}(F) \sqrt{\Delta F}}{S}$$

где α — величина шумовой девиации, на которую калибруется анализатор спектра; ΔF — полоса пропускания С4-12, равная 7 Гц; S — крутизна электронной перестройки нестабилизированного клистрона; $K_{\text{ст}}(F)$ — коэффициент стабилизации системы.

Зависимость коэффициента стабилизации рассматриваемой системы от частоты флуктуаций вызвана наличием в схеме инерционных элементов. С ростом частоты его величина уменьшается. Для определения $K_{\text{ст}}$ на отражатель клистрона подавалось внешнее модулирующее напряжение заданной частоты при включенной и выключенной системе АПЧ. Отношение модулирующих напряжений, обеспечивающих одну и ту же девиацию частоты в обоих случаях, дает $K_{\text{ст}}$.

По измеренным величинам шумовой девиации вычислялось отношение $P_{\text{ш}}/P_{\text{с}}$ для одной боковой полосы по формуле $P_{\text{ш}}/P_{\text{с}} = 10 \lg \frac{(\delta f)^2}{4F^2}$ (в дБ/Гц).

Для генератора, стабилизированного по схеме АПЧ с СПР, эта величина принимала значения от -95 до -120 дБ/Гц в диапазоне частот от 30 до 1 000 Гц (рис. 3, кривая 3). На частоте питания сети

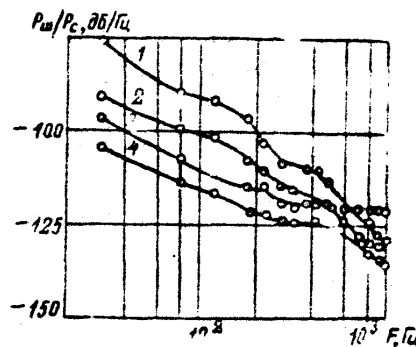


Рис. 3. Частотные шумы генераторов, исследованных в данной работе.

1 — отражательный клистрон, стабилизированный внешним СПР; 2 — автогенератор на ЛБВ с СПР; 3 — отражательный клистрон, стабилизированный системой АПЧ с СПР; 4 — отражательный клистрон, стабилизированный системой двойной стабилизации.

50 Гц в спектре сигнала имела регулярная составляющая, достигающая -80 дБ/Гц. На частотах кратных 50 Гц (100 Гц, 150 Гц), величина пульсаций достигала -90 дБ/Гц. Выше 700 Гц отношение $P_{\text{ш}}/P_{\text{с}}$ становилось постоянной величиной — примерно 120 дБ/Гц.

Стабилизация частоты отражательного клистрона методом затягивания осуществлена по схеме, в которой энергия в нагрузку отбирается из соединительной линии, связывающей резонатор клистрона с СПР [9]. Исследуемая схема представляла клистронный генератор, соединенный с нагрузкой при помощи волноводного тройника, в одно из плеч которого включен СПР. С помощью фазовращателей, расположенных в цепи между клистроном и СПР, устанавливается наилучший режим работы системы. Измеренный коэффициент стабилизации частоты составил примерно $5 \cdot 10^3$. Полоса удержания генератора по напряжению отражателя достигала 8 В, потери мощности на стабилизацию — 3 дБ.

Калибровка анализатора спектра при измерении частотных шумов генератора производилась способом, аналогичным рассмотренному выше. Отношение шум/сигнал равнялось $-(75 \div 130)$ дБ/Гц при отстройке от несущей на 30—1 000 Гц соответственно (рис. 3, кривая 1). Регулярные составляющие шумов достигали -40 и -60 дБ/Гц на частотах 50 и 100 Гц и наблюдались через каждые 50 Гц в частотах 400—500 Гц, превышая значения в соседних точках на 10 дБ/Гц.

Генератор на ЛБВ с СПР в цепи обратной связи выполнен по схеме, рассмотренной в работе

17. Питание ЛБВ осуществлялось от стандартных блоков питания Б7-3, Б1-4, Б5-11.

Спектральное распределение шумов генератора на ЛБВ представлено на рис. 3 (кривая 2). Измерительная установка калибровалась при помощи генератора, стабилизированного системой АПЧ. На частотах 30—1000 Гц от несущей $P_{ш} P_c = (90 \div 135)$ дБ/Гц. На частотах анализа до 400 Гц, кратных частоте напряжения сети, $P_{ш} P_c$ на 10—30 дБ/Гц больше, чем в соседних точках.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что в случае применения СПР для всех трех типов генераторов характерна малая величина частотных шумов. На низких частотах анализа (до частот 400 Гц от несущей) приемущество имеет генератор, стабилизированный системой АПЧ. Эта система дает лучшие результаты также на частотах, кратных частоте пульсации сети. На частотах выше 500 Гц наиболее низкие шумовые генераторы на ЛБВ.

Характеристики генератора, стабилизированного системой АПЧ, можно существенно улучшить, применив дополнительную стабилизацию этого генератора внешним СПР. Такая система стабилизации изображена на рис. 4. Отражательный кलि-

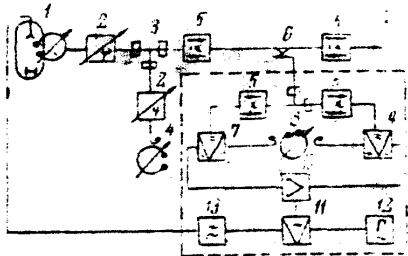


Рис. 4. Схема двойной стабилизации клистронного генератора с помощью СПР:

- 1 — отражательный клистрон; 2 — фазовращатель; 3 — волноводный триод; 4, 5 — перестраиваемые СПР; 6 — направленный ответвитель; 7 — смеситель; 8 — амплитудный модулятор; 9 — усилитель промежуточной частоты; 10 — фазовый детектор; 11 — опорный низкочастотный генератор; 12 — фильтр нижних частот

рон 1, стабилизированный внешним объемным СПР 4, включен в схему АПЧ (обведена пунктиром), исследованную выше. Процесс двойной стабилизации происходит одновременно. Потери на стабилизацию определяются в основном мощностью, необходимой для осуществления режима затягивания, т. е. 3 дБ. Общий коэффициент стабилизации системы равен произведению коэффициентов стабилизации составляющих ее схем. Эталонные СПР имели одинаковую конструкцию и возможность перестройки на частоте в пределах около 38—40 МГц. Нагруженная добротность резонатора для схемы с затягиванием составляла примерно $5 \cdot 10^6$, а для схемы АПЧ — около 10^7 при 4,2 К. Полоса удержания по напряжению отражателя определяется величиной полосы удержания для схемы АПЧ.

Результаты исследования частотных шумов системы двойной стабилизации отражательного клистрона представлены на рис. 3 (кривая 4). Отношение $P_{ш} P_c$ принимало значение $(10^5 \div 130)$ дБ/Гц на частотах анализа 30—1000 Гц соответственно. Полученная интенсивность частотных шумов на 10—20 дБ/Гц ниже меньшей из величин исследованных в работе систем стабилизации частоты отражательного клистрона. Регулярные составляющие в спектре сигнала на частотах 50, 100, 150 Гц сохраняются. Долговременная относительная нестабильность частоты системы составляла 10^{-10} за час.

Следует отметить, что в ходе экспериментов было обнаружено заметное влияние на результаты измерений механических вибраций измерительной установки. Для их устранения криостаты, в которых размещались резонаторы генератора и дискриминатора, крепились на одной массивной платформе, установленной на резиновых амортизаторах. Применение этих мер позволило уменьшить соответствующие вибрационные составляющие спектра на 1—2 порядка.

Отмеченные в спектрах всех исследованных генераторов регулярные составляющие, обусловленные влиянием переменного напряжения сети, могут быть ослаблены улучшением источников питания, использованием аккумуляторов, а также тщательной экранировкой измерительной аппаратуры от внешних наводок.

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что СВЧ-генераторы, стабилизированные с помощью СПР, вне зависимости от используемой системы стабилизации, имеют малые частотные шумы вблизи несущей и вполне могут быть применимы в устройствах и системах, в которых требуются улучшенные спектральные характеристики СВЧ-сигналов. Применение системы двойной стабилизации частоты, можно на 10—20 дБ уменьшить уровень шумов в генераторе, стабилизированного по схеме АПЧ с СПР. При этом сохраняются высокая длительная стабильность и возможность перестройки частоты генератора в широком диапазоне частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Менде Ф. Ф., Бондаренко И. Н., Трубицын А. В. Сверхпроводящие и охлаждаемые резонансные системы. — Киев: Наукова думка, 1976.
2. Кукушкин А. В., Насонов В. С. Фазовые флуктуации сигнала генератора на ЛБВ со сверхпроводящим резонатором. — ПТЭ, 1969, вып. 6, с. 127.
3. Каплун З. Ф., Иванюк К. П., Дедик Ю. В. Частотные флуктуации отражательного клистрона, стабилизированного сверхпроводящим резонатором. — Электронная техника Сер. Электроника СВЧ, 1972, вып. 1, с. 17.
4. Blomfield D. L. H., Pointon A. J. Short-term Frequency Stability of an L-band Oscillator. — Electron. Lett., 1973, vol. 9, No 19, p. 461.
5. Stein S. R., Turneaure J. P. The Development of the Superconducting Cavity Stabilized Oscillator. — In: Proc. 2. th Ann. Frequency Contr. Symp. Cherry Hill, N. J., 1973, Washington, 1973, p. 414.
6. Д. с. 340056 (СССР) / Ф. Ф. Менде, Н. Н. Прешлаз, В. А. Чаркин, И. Т. Баранов. Устройство фазовой автоподстройки частоты. Б. И., 1972, № 17, с. 187.

7. Хайкин М. С. Генератор на лампе с бегущей волной, стабилизированный сверхпроводящим резонатором. — ПТЭ, 1961, вып. 3, с. 104.

8. Дедик Ю. В., Иванюцкий К. П., Ковалев З. Ф. Частотный дискриминатор на сверхпроводящем резонаторе. — Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1969, вып. 10, с. 88.

9. Jimenez J., Sudraud P., Septier A. Frequency stabilization of a Reflex-Klystron Oscillator by a Superconducting Cavity. — Electron. Lett., 1971, vol. 7, No 7, p. 153.

*Статья поступила 30 марта 1981 г.,
после переработки — 7 сентября 1981 г.*