

УДК 621.385.632

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА ВЫХОДНОГО СИГНАЛА УСИЛИТЕЛЕЙ НА ФАЗОСТАБИЛЬНЫХ ЛБВ

В. В. Дёмин¹, Е. М. Ильина¹, А. Г. Кудряшов², Б. К. Сивяков²

¹Саратов, АО НПП «Алмаз»

²Саратовский государственный технический университет им Ю.А. Гагарина

Статья получена 26 мая 2015 г.

Аннотация. Приводятся результаты расчёта и измерений интенсивности модуляционных колебаний и спектра импульсно-модулированного выходного сигнала усилителей на основе новой разновидности СВЧ-прибора – фазостабильной лампы с бегущей волной (ЛБВ). Показаны преимущества таких усилителей перед обычными по качеству спектра выходного сигнала; рассматриваются вопросы оптимизации режимов работы и особенности применения таких приборов.

Ключевые слова: усилитель СВЧ, фазостабильная ЛБВ, модуляционные и внеполосные колебания.

Abstract. Results of calculation and measurements of intensity of modulation oscillations and spectrum of pulse-modulated output signal of amplifier on a basis of a new kind of microwave device – phase-stable travelling wave tube (TWT) are given. Advantages of these amplifiers over common ones in a spectrum of output signal are shown; questions of optimization of operating modes and characteristics of these devices are discussed.

Keywords: microwave amplifier, phase-stable TWT, modulation and out-of-band oscillations.

Эффективность применения новой разновидности прибора – фазостабильной ЛБВ [1–3] в усилителях СВЧ может быть в полной мере оценена, если в качестве критериев её оценки будут выбраны параметры, являющиеся основными и для радиоэлектронной аппаратуры в целом. Так,

применительно к РЛС – это минимальный уровень модуляционных шумов и внеполосных колебаний [4, 5]. Уровень их будет исследован в системе «фазостабильная ЛБВ-испытательный стенд», в которой испытательный стенд отчасти имитирует штатный источник питания. Анализ будет проведен на первых двух экспериментальных образцах ЛБВ – с участком подавления сигнала и с участком крестатронного режима во входной секции, разработанных в рамках совместного инициативного проекта СГТУ имени Ю. А. Гагарина и АО НПП «Алмаз». Конструкции и основные параметры режимов работы фазостабильных приборов приведены в статье [6].

Расчёты проводились по программе [7], неоднократно применявшейся при расчётах ЛБВ различного назначения [8]. Измерения выполнялись на аттестованном испытательном оборудовании по проверенной измерительной технике. Уровень модуляционных шумов оценивался также по аналитическим соотношениям, приведённым в работе [4]. При этом использовалась информация о спектре флуктуаций напряжения источников питания, спектре выходного сигнала задающего генератора (ЗГ) и о модуляционных характеристиках ЛБВ.

Модуляционные характеристики фазостабильных ЛБВ

В конструкцию исследуемых приборов входила типичная для современных импульсных ЛБВ система электродов: катод, подогреватель катода, теневая (соединённая с катодом) и управляющая сетки, коллектор. Испытательный стенд обеспечивал независимое электропитание каждого электрода, а импульсный режим реализовывался модуляцией по управляющей сетке. Измерения шумов, выполненные ранее на ЛБВ в составе штатной аппаратуры, показали, что пульсации напряжения, подаваемого на подогреватель катода и коллектор, практически не влияют на спектр выходного сигнала и ими можно пренебречь. Следовательно, для расчёта спектра достаточно знать зависимости мощности и фазы выходного сигнала от уровня входной мощности, напряжения и тока пучка.

Поскольку пониженная фазовая чувствительность достигается за счёт

изменения параметров пространства взаимодействия во входной секции прибора [1], следует ожидать, что нелинейные свойства обычных и фазостабильных ЛБВ будут идентичны между собой. Это подтверждают расчётные зависимости коэффициента усиления и фазы выходного сигнала вышеназванных приборов от уровня входной мощности, приведённые на рис. 1.

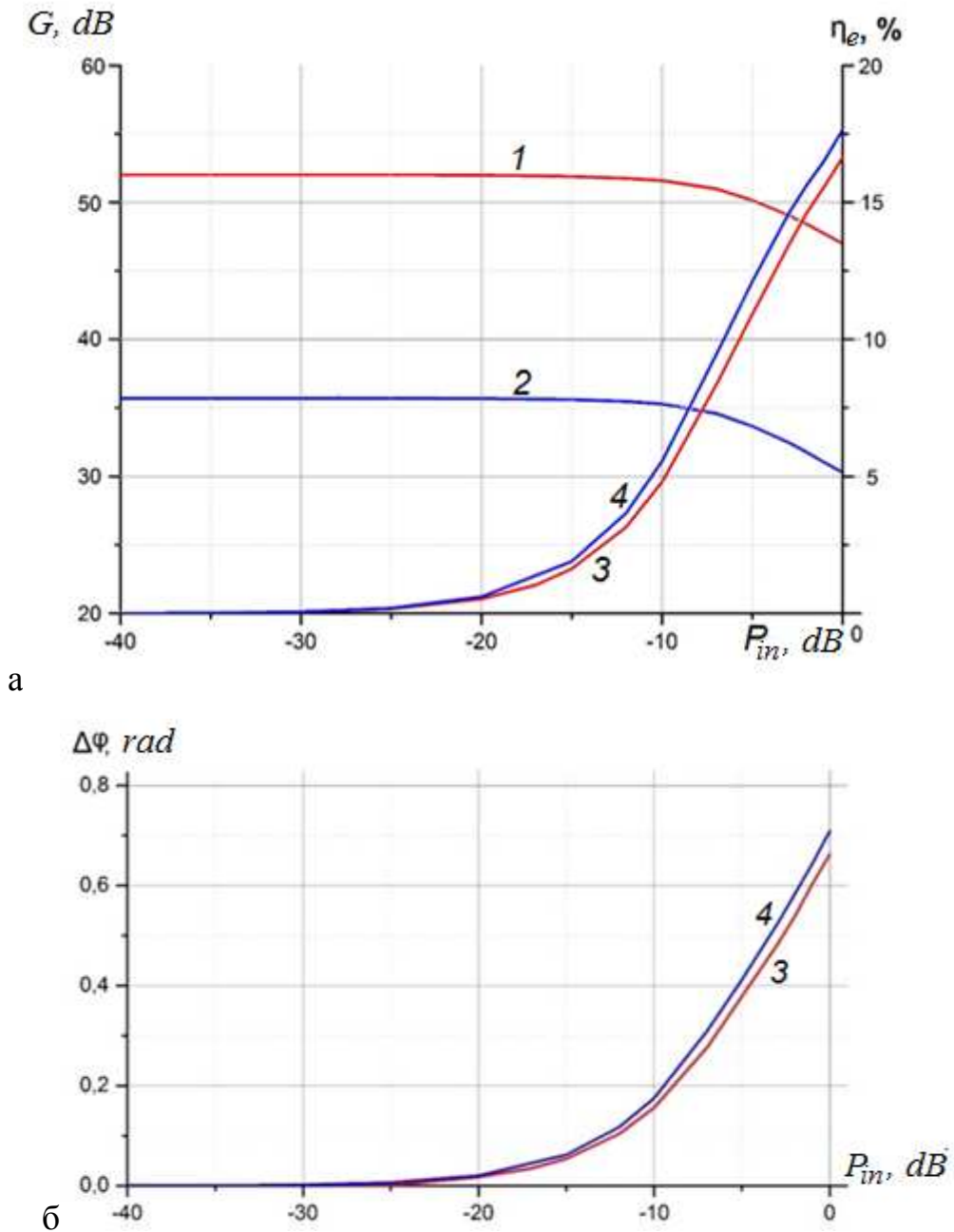
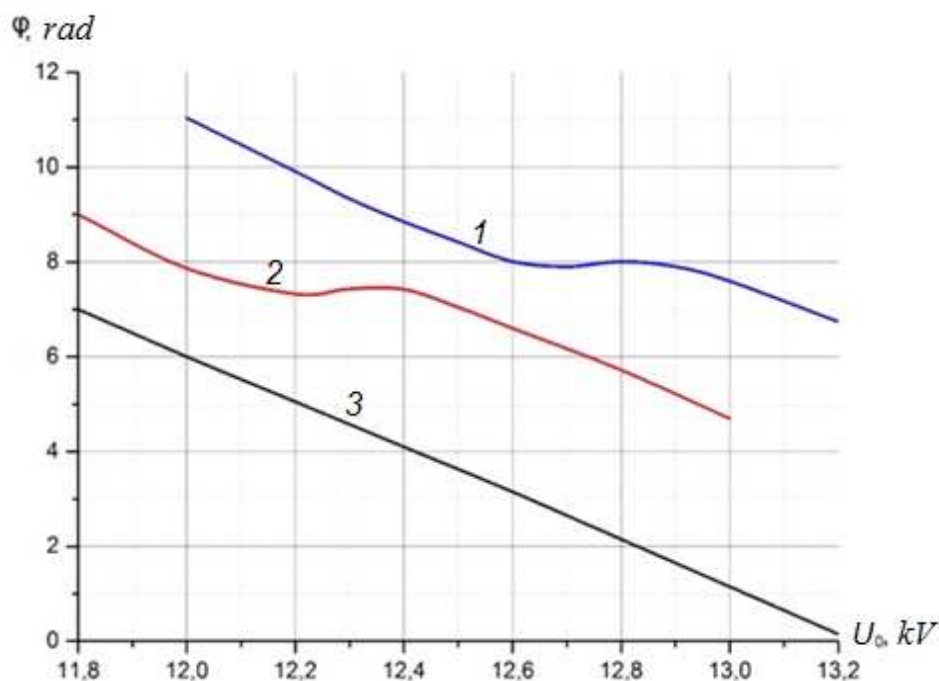


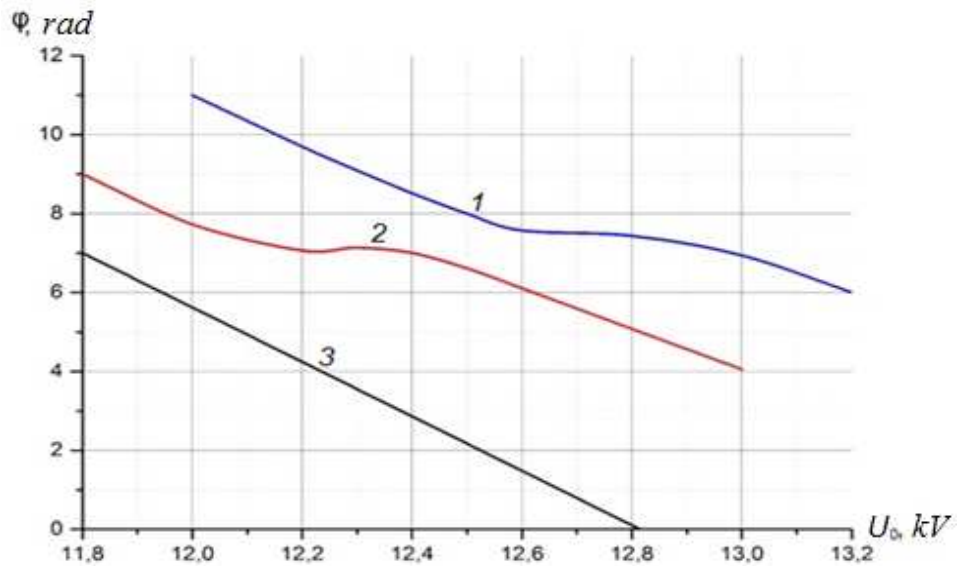
Рис. 1. Зависимости коэффициента усиления G (1, 2), КПД η_e (3, 4) (а) и фазы выходного сигнала $\Delta\phi$ (3, 4) (б) от входной мощности P_{in} для базового прибора (1, 3) и фазостабильной ЛБВ с крестатронным участком (2, 4). $P_{in} = 0$ дБ соответствует режиму насыщения выходной мощности.

Незначительное отличие максимального фазового сдвига фазостабильной ЛБВ от фазового сдвига базового прибора связано с несколько большей величиной её КПД и меньшим коэффициентом усиления. В фазостабильной ЛБВ, как и в обычном приборе, амплитудные флуктуации входного сигнала в нелинейном режиме (по сравнению с линейным) будут уменьшаться, а фазовые – оставаться без изменения. При этом появится новая составляющая фазового шума, обусловленная преобразованием амплитудной модуляции в фазовую.

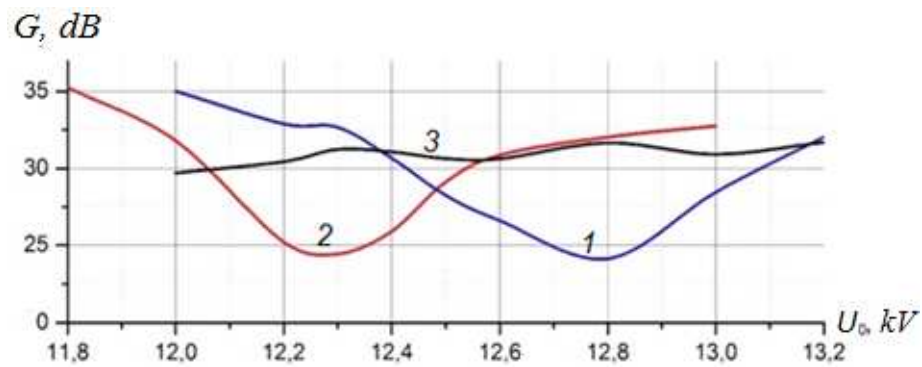
Поскольку, согласно схеме электропитания ЛБВ, напряжение замедляющей системы (ЗС) всегда остается постоянным, для оценки влияния его флуктуаций на спектр выходного сигнала достаточно знать амплитудную и фазовую чувствительности сигнала к изменению этого напряжения в заданном режиме работы. На рис. 2 представлены расчётные зависимости фазы и коэффициента усиления фазостабильных ЛБВ с крестатронным участком и с участком подавления, а также базового прибора с коэффициентом усиления ~30 дБ (с укороченной входной секцией) в линейном режиме (б, г) и режиме насыщения выходной мощности (а, в).



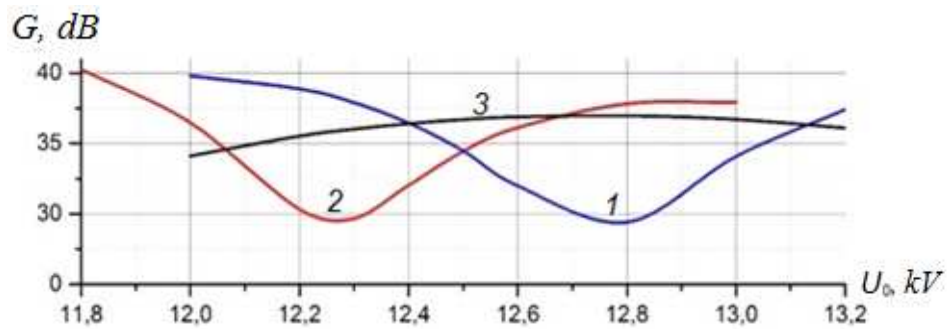
а



б



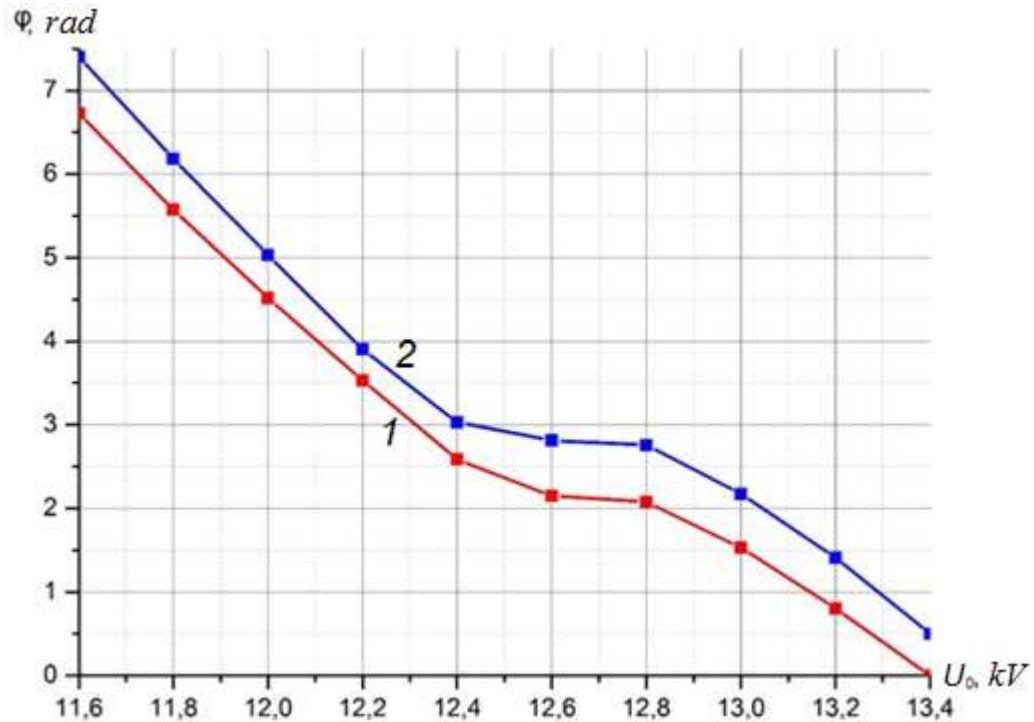
в



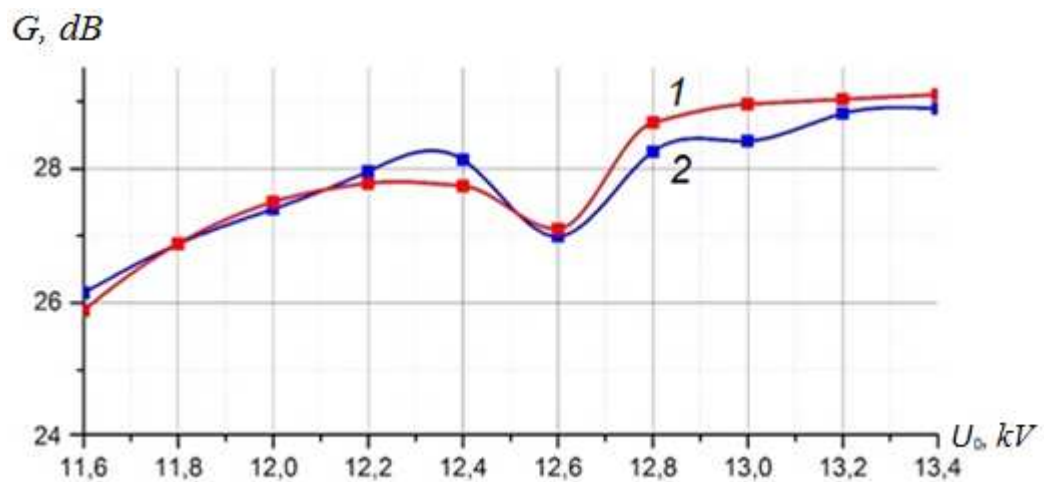
г

Рис. 2. Зависимости фазы выходного сигнала φ (а, б) и коэффициента усиления G (в, г) [в нелинейном (а, в) и линейном (б, г) режимах] от напряжения пучка U_0 для приборов с участком подавления сигнала (1) и с крестатронным участком (2) в секции компенсации, а также базового прибора с коэффициентом усиления 30 дБ (3).

Видно, что центр интервала напряжений ЗС, в котором фаза стабильна, соответствует минимуму коэффициента усиления как в линейном, так и в нелинейном режимах работы. Это подтверждают и измеренные характеристики фазостабильной ЛБВ, приведенные на рис. 3.



а



б

Рис. 3. Измеренные зависимости фазы φ (а) и коэффициента усиления G (б) фазостабильной ЛБВ от напряжения ЗС U_0 при токе катода $I = I_0$ (1) и $I = 1,05I_0$ (2); I_0 – номинальное значение тока катода.

Следовательно, всегда можно подобрать такой входной сигнал, при котором в фазостабильной ЛБВ будет близка к нулю не только фазовая, но и амплитудная чувствительность к изменению напряжения ЗС.

В отличие от фазовой чувствительности к изменению напряжения ЗС, аналогичные зависимости от тока пучка в фазостабильных ЛБВ ранее подробно не исследовались и будут рассмотрены впервые. На рис. 4, 5 приведены расчётные и измеренные зависимости мощности и фазы выходного сигнала фазостабильных ЛБВ с участками крестатронного режима и подавления от тока пучка, а также аналогичные зависимости для нефазостабильных аналогов. При этом в роли последних были использованы те же фазостабильные ЛБВ, настроенные на нефазостабильные режимы за счёт увеличения напряжения ЗС.

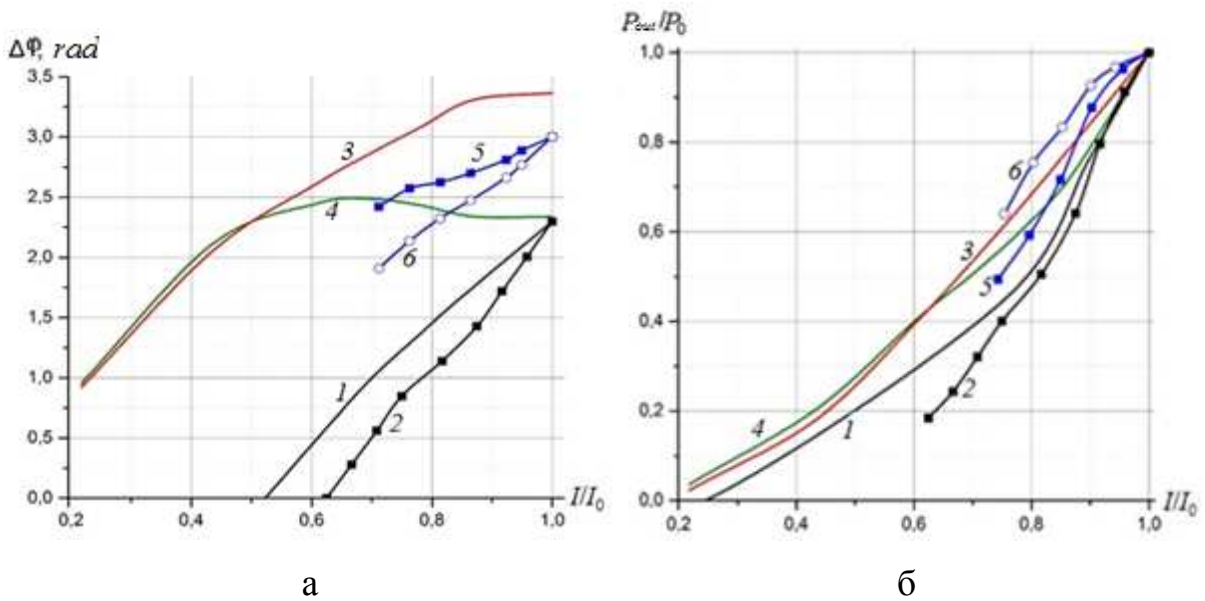


Рис. 4. Зависимости фазы $\Delta\varphi$ (а) и выходной мощности P_{out}/P_0 (б) от тока пучка I/I_0 серийного прибора (1 – расчет, 2 – эксперимент), базового прибора с коэффициентом усиления 30 дБ (3 – расчет) и фазостабильной ЛБВ с участком крестатронного режима [4 – расчет, 5, 6 – эксперимент (5 – фазостабильный режим, 6 – нефазостабильный режим)].

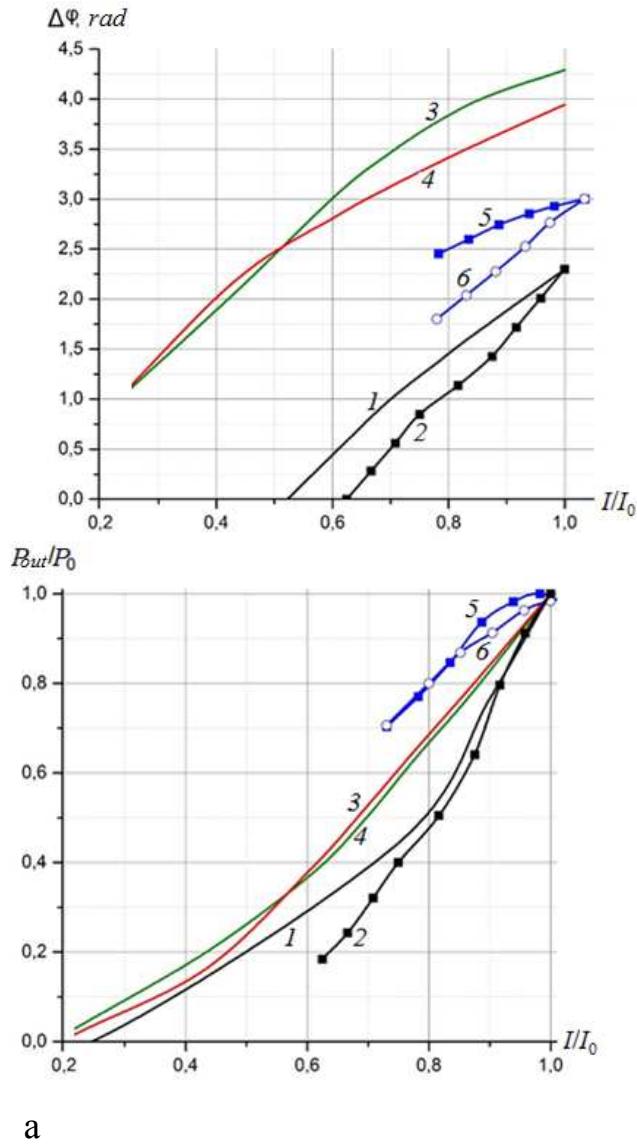


Рис. 5. Зависимости фазы $\Delta\varphi$ (а) и выходной мощности $P_{\text{вых}}/P_0$ (б) от тока пучка I/I_0 серийного прибора (1 – расчет, 2 – эксперимент), базового прибора с коэффициентом усиления 30 дБ (3 – расчет) и фазостабильной ЛБВ с участком подавления сигнала [4 – расчет, 5, 6 – эксперимент (5 – фазостабильный режим, 6 – нефазостабильный режим)].

Из приведённых на рис. 4, 5 зависимостей следует, что фазостабильные ЛБВ, наряду с пониженной чувствительностью фазы выходного сигнала к изменению напряжения ЗС, обладают и меньшей фазовой чувствительностью к изменению тока пучка, но при этом, как и обычные приборы, характеризуются высокой амплитудной чувствительностью. Измеренные модуляционные характеристики, подтверждая факт уменьшения фазовой чувствительности

фазостабильных ЛБВ к изменению тока пучка, не демонстрируют заметных величин этого уменьшения по причинам, в настоящее время пока не установленным.

Из сопоставления модуляционных характеристик фазостабильной ЛБВ с участком подавления сигнала и обычной ЛБВ следует, что в приборе с участком подавления интервал изменения тока, в котором фаза сигнала изменяется незначительно, меньше, а общее изменение фазы больше, чем в обычной ЛБВ. Это даёт основания считать такую конструкцию малоэффективной для уменьшения внеполосных колебаний импульсно-модулированного радиосигнала. К тому же теоретический расчёт составляющих спектра импульсного радиосигнала ЛБВ представляет собой самостоятельную и достаточно сложную задачу, выходящую за рамки проведённой работы, основной целью которой являлось сопоставление спектральных характеристик усилителей на основе обычных и фазостабильных приборов.

Следует отметить, что в ЛБВ с участком подавления сигнала в секции компенсации была реализована практически нулевая фазовая чувствительность к изменению напряжения ЗС, тогда как в приборе с участком крестатронного режима она составила примерно 8 град/°.

Исследование модуляционных колебаний вблизи сигнала несущей частоты

При измерении уровня модуляционных колебаний, вносимых усилителем СВЧ, необходимо, прежде всего, исключить колебания ЗГ (или предварительного усилителя). В настоящей работе им являлся генератор сигналов E-8257D, обеспечивающий необходимую для анализа стабильность частоты, а измерения проводились на анализаторе спектра E-4440A (оба прибора производства фирмы Agilent Technologies). В спектре сигнала ЗГ, показанном на рис. 6, были обнаружены составляющие с частотами, кратными 31, 63, 50 и 150 Гц. Асимметрия равноотстоящих по частоте составляющих практически отсутствует, что свидетельствует о существенном преобладании одного типа модуляции.

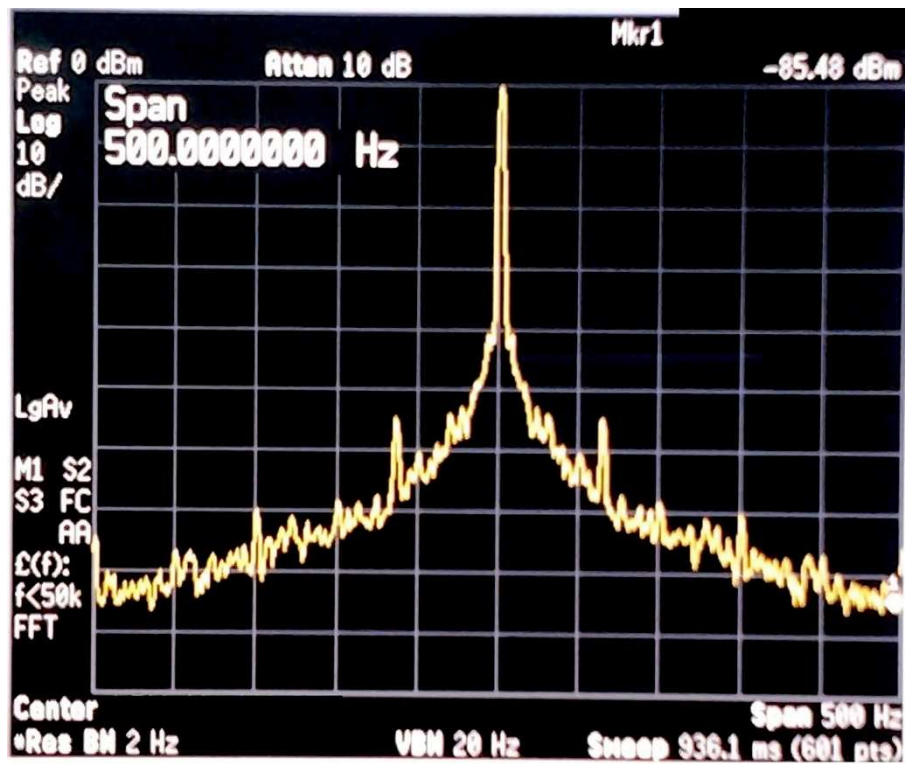
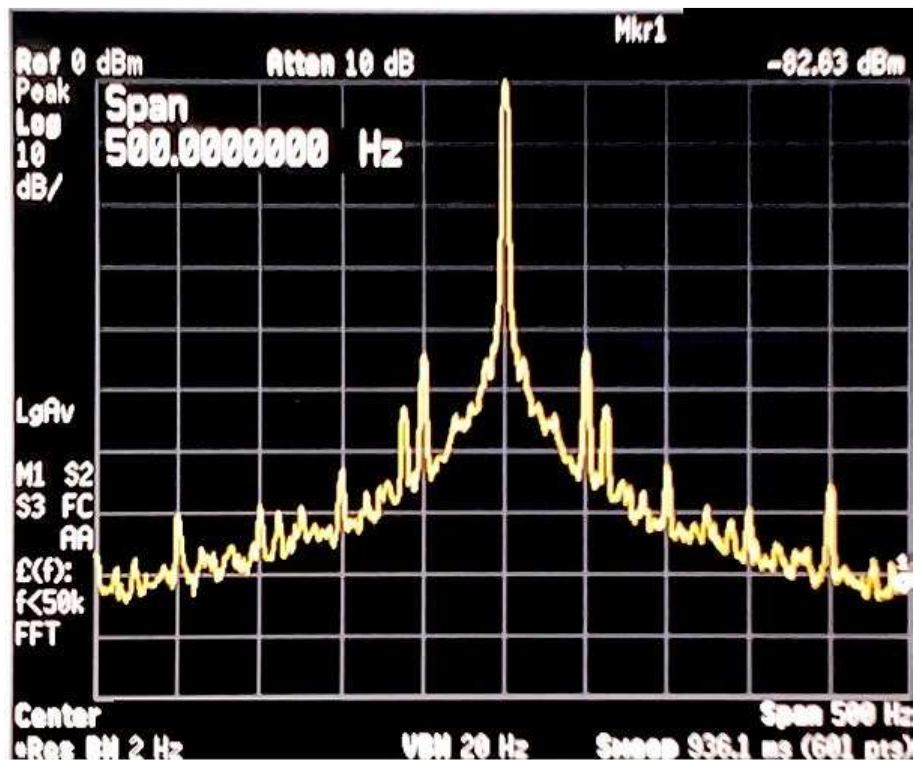
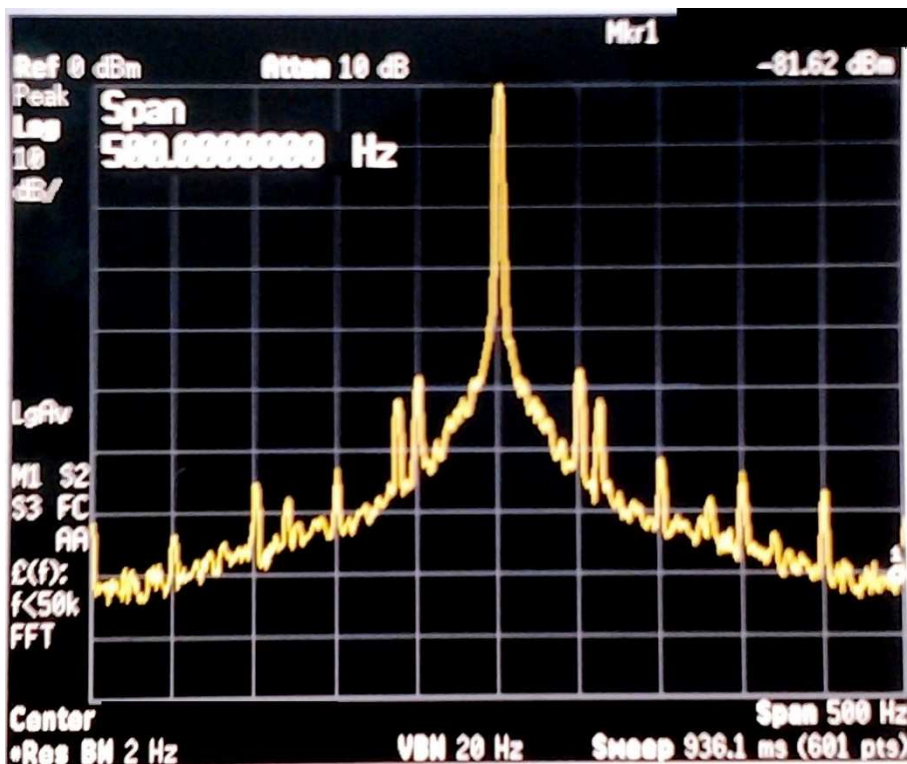


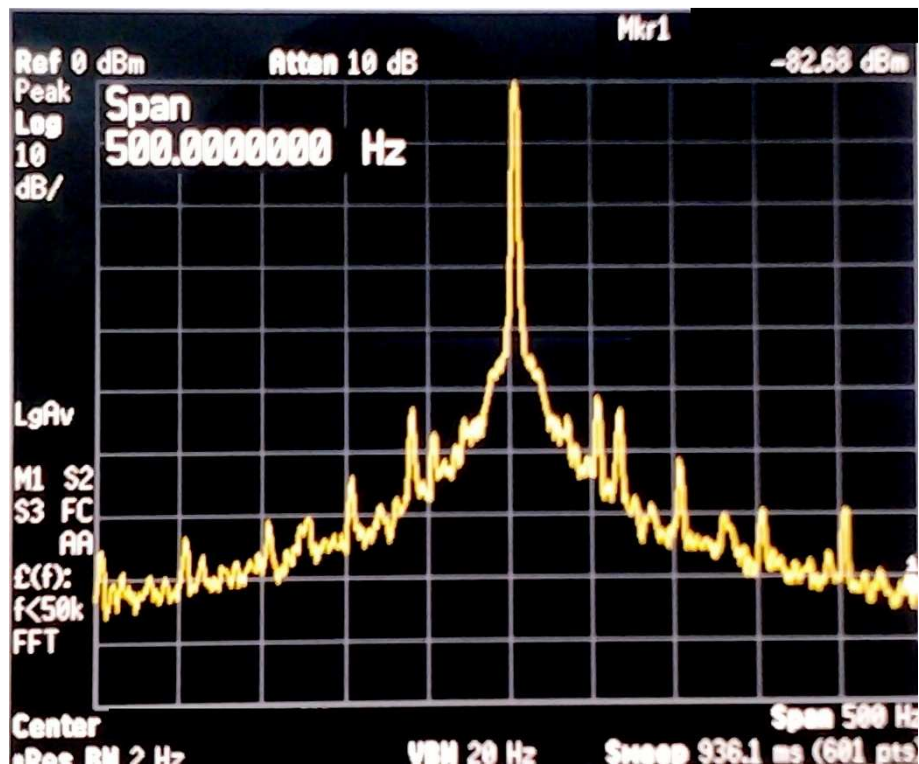
Рис. 6. Спектр генератора Agilent E-8257D.



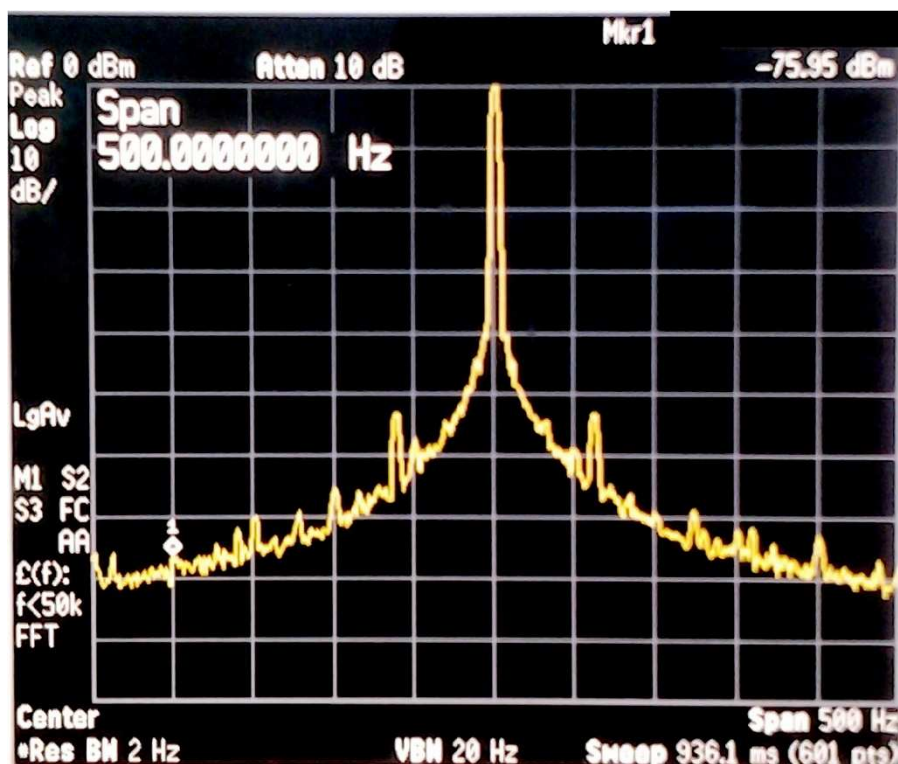
а



б



в



Г

Рис. 7. Спектрограммы базового прибора (а), фазостабильного прибора с крестатронной секцией ФЛБВ №1 в нефазостабильном режиме работы (б), а также приборов ФЛБВ № 1 (в) и ФЛБВ № 2 (г) в фазостабильном режиме.

На рис. 7 представлены измеренные спектрограммы базового прибора (а), фазостабильного прибора с крестатронным участком ФЛБВ № 1, работающего в нефазостабильном режиме (б), а также фазостабильных ЛБВ ФЛБВ № 2 (с секцией подавления) (в) и ФЛБВ № 1 (с крестатронным участком) (г) при входном сигнале, соответствующем насыщению выходной мощности. В табл. 1 приведены результаты измерений составляющих спектра этих приборов. Видно, что сигналы с частотами, кратными 31 Гц, в спектре выходного сигнала ЛБВ (на уровне собственного шума анализатора) отсутствуют, что позволяет идентифицировать их как сигналы, обусловленные только амплитудной модуляцией. Уровень сигналов на частоте 63 Гц при прохождении через ЛБВ не меняется, что однозначно определяет их как продукт фазовой модуляции внутренних автогенераторов ЗГ и даёт основание не учитывать их в дальнейшем анализе. Сигналы с частотами, кратными 50 Гц, представляют

собой результат нелинейного преобразования сигнала питающей электросети источниками питания ЗГ. Их уровень при прохождении через ЛБВ уменьшается, а это означает, что они являются в основном продуктом амплитудной модуляции и поэтому вносят свой вклад в фазовые шумы усилителя за счёт амплитудно-фазового преобразования сигнала в ЛБВ.

Таблица 1. Измеренный уровень составляющих спектра вблизи несущей частоты

Исследуемые элементы схемы	Относительный уровень составляющих спектра, -, дБ, при величине отстройки, Гц											
	-31	+31	-50	+50	-63	+63	-100	+100	-150	+150	-200	+200
ЗГ (с $R_{\text{вых}}=400$ мВт)	54,0	54,0	56,4	56,8	53,4	53,5	70,8	70,4	72,4	72,4	78,2	78,3
ЗГ (с $R_{\text{вых}}=20$ мВт)	54,1	54,1	56,4	56,6	54,4	54,6	70,4	70,3	72,3	72,4	78,5	78,7
Базовая ЛБВ	-	-	44,0	43,5	53,3	53,4	62,0	62,0	70,0	70,0	70,0	76,0
Нефазостаб. аналог	-	-	48,0	47,0	54,4	54,6	63,0	61,0	64,0	65,0	74,0	67,0
ФЛБВ № 1	-	-	57,0	52,0	53,9	53,9	64,0	61,0	70,0	70,0	73,0	70,0
ФЛБВ № 2	-	-	58,0	60,0	53,3	53,4	66,0	70,0	70,0	73,0	77,0	74,0

Наличие асимметрии в уровнях составляющих спектра выходного сигнала ЗГ и ЛБВ, отстоящих от частоты несущей (слева и справа) на величины, кратные 50 Гц, свидетельствует о том, что сигнал промодулирован по амплитуде и фазе с частотой сети. Это не дает возможности провести полноценный анализ спектра сигнала, но позволяет дать сравнительную оценку спектров исследуемых приборов. Так, из данных табл. 1 и рис. 7 следует, что уровень модуляционных колебаний максимален в базовом приборе, несколько меньше в фазостабильной ЛБВ с крестатронным участком (ФЛБВ № 1) и резко снижен в фазостабильной ЛБВ с участком подавления (ФЛБВ № 2).

С использованием результатов измерений пульсаций напряжения пучка и напряжения превышения, составивших 1,7 В и 18 мВ соответственно, были выполнены расчёты максимальных (на частоте отстройки 50 Гц) амплитудных и фазовых составляющих спектра и их интегральной величины для реализованных конструкций фазостабильных ЛБВ и базового прибора.

Результаты расчёта и измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2. Максимальный уровень составляющих спектра в усилителях на ЛБВ

Тип ЛБВ			Базовый	Нефазостаб. аналог	ФЛБВ № 1	ФЛБВ № 2
ЗС	$\Delta E/\Delta U_0$	Ед./%	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0
	$\Delta \varphi/\Delta U_0$	Град./%	42	30	8	2
Сетка	$\Delta E/\Delta U_c$	Ед./%	0,008	0,004	0,004	0,002
	$\Delta \varphi/\Delta U_c$	Град./%	2,4	1,6	0,77	0,64
Флукт. ЗС	F_{a_0}	дБ	-	-	-	-
	F_{φ_0}	дБ	-44	-47	-58	-71
Флукт. сетки	F_{Ac}	дБ	-74	-80	-80	-86
	F_{φ_c}	дБ	-66	-69	-76	-78
Сумма	Расчёт	дБ	-44	-47	-58	-62
	Эксперимент	дБ	- (43...44)	-(48...47)	- (57...52)	- (58...60)

Преобразование амплитудной модуляции ЗГ в фазовую на выходе ЛБВ оценивалось по формуле

$$F_{AM-FM} = F_{AM\text{ ЗГ}} + 10 \lg \left(Kp / 0,25 \right), \quad (1)$$

где Kp – коэффициент преобразования амплитудной модуляции в фазовую, рад/дБ.

Расчёт коэффициента Kp по кривым рис. 1 даёт значения 0,06 рад/дБ и, следовательно, фазовые модуляционные колебания в выходном сигнале ЛБВ, обусловленные амплитудно-фазовым преобразованием, будут на 6 дБ меньше, чем амплитудные колебания на выходе ЗГ. Поскольку флуктуации сигнала выбранного ЗГ практически не зависят от режима его работы (табл. 1) и составляют на частоте 50 Гц -56,4...-56,8 дБ, а коэффициент преобразования амплитудной модуляции в фазовую для всех рассматриваемых конструкций

ЛБВ одинаков, то уровень создаваемой составляющей спектра [найденный по соотношению (1)] будет находиться в пределах $-62\dots-63$ дБ для всех приборов.

Из табл. 1 видно, что в базовом приборе, в фазостабильной ЛБВ с участком крестатронного режима и в её нефазостабильном аналоге максимальная составляющая спектра создаётся за счёт фазовой модуляции СВЧ сигнала, обусловленной пульсациями напряжения источника питания ЗС (вклад других факторов пренебрежимо мал). В фазостабильной ЛБВ с участком подавления сигнала максимальная составляющая спектра определяется амплитудно-фазовым преобразованием амплитудных флуктуаций сигнала ЗГ в ЛБВ. Последнее означает, что при улучшении спектра ЗГ может быть достигнуто ещё более значительное уменьшение модуляционных шумов в усилителях на основе фазостабильных приборов.

В целом можно отметить удовлетворительное соответствие результатов расчёта и измерений. При этом следует иметь в виду, что флуктуации источников питания и сигнала ЗГ в испытательном стенде значительно больше, чем в современной штатной аппаратуре. В связи с этим представляется целесообразным оценить модуляционные колебания реальных передатчиков СВЧ на ЛБВ. Будем считать, исходя из типичных значений для бортовых доплеровских передатчиков, что максимальный относительный уровень пульсаций напряжения пучка составляет 10^{-6} , уровень пульсаций напряжения превышения сетки – 10^{-5} , а полоса пропускания приемника равна 100 Гц; входной сигнал соответствует режиму насыщения, что формирует нулевую чувствительность его к изменению напряжения пучка. Кроме того, предположим, что амплитудные и фазовые флуктуации входного сигнала пренебрежимо малы и не влияют на спектр выходного сигнала ЛБВ.

Результаты расчета флуктуаций сигнала СВЧ усилителей на основе базового прибора и фазостабильной ЛБВ с секцией подавления представлены в табл. 3 и на рис. 8.

Таблица 3. Результаты расчёта амплитудных и фазовых флуктуаций усилителей СВЧ на ЛБВ

Тип ЛБВ	Параметры	Напряжение пучка, кВ							
		11,9	12,1	12,3	12,5	12,7	12,9	13,1	13,3
Базовый	$\Delta\varphi/\Delta U_0$, град./%	42	42	42	43	43	43	43	44
	$\Delta\varphi/\Delta U_c$, град./%	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
	$\Delta E/\Delta U_c$, ед./%	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
	W_A , дБ/Гц	-123	-123	-123	-123	-123	-123	-123	-123
	W_φ , дБ/Гц	-106	-106	-106	-106	-106	-106	-106	-106
ФЛБВ № 2	$\Delta\varphi/\Delta U_0$, град./%	34,1	32,9	28,1	17,9	2,0	18,4	26,3	34,3
	$\Delta\varphi/\Delta U_c$, град./%	1,60	1,60	1,40	1,05	0,64	0,95	1,45	1,55
	$\Delta E/\Delta U_c$, ед./%	0,004	0,004	0,004	0,003	0,002	0,003	0,004	0,005
	W_{φ_0} , дБ/Гц	-108	-108	-110	-113	-133	-113	-110	-108
	W_{φ_c} , дБ/Гц	-122	-122	-123	-126	-130	-127	-125	-122
	W_{Ac} , дБ/Гц	-129	-129	-129	-131	-135	-131	-129	-125

Данные рис. 8 наглядно иллюстрируют вклад пульсаций каждого источника в амплитудные и фазовые составляющие модуляционных колебаний выходного сигнала СВЧ усилителя на фазостабильной ЛБВ. Видно, что в спектре сигнала, как и следовало ожидать, преобладают фазовые составляющие, при этом следует иметь в виду, что, в зависимости от принадлежности этих пульсаций (источнику напряжения ЗС или управляющей сетки), эти составляющие могут взаимно компенсироваться.

Следует особо отметить, что амплитудные модуляционные шумы, как свидетельствуют данные табл. 3, обусловлены, прежде всего, пульсациями напряжения превышения управляющей сетки. По кривым рис. 8, данным табл. 3 и с учётом вышеупомянутой взаимной компенсации фазовых составляющих можно приближенно найти, что для рассмотренного конкретного случая в интервале изменения напряжения пучка, составляющем ~300 В, фазовые и амплитудные модуляционные колебания (шумы) не превышают -135 дБ/Гц.

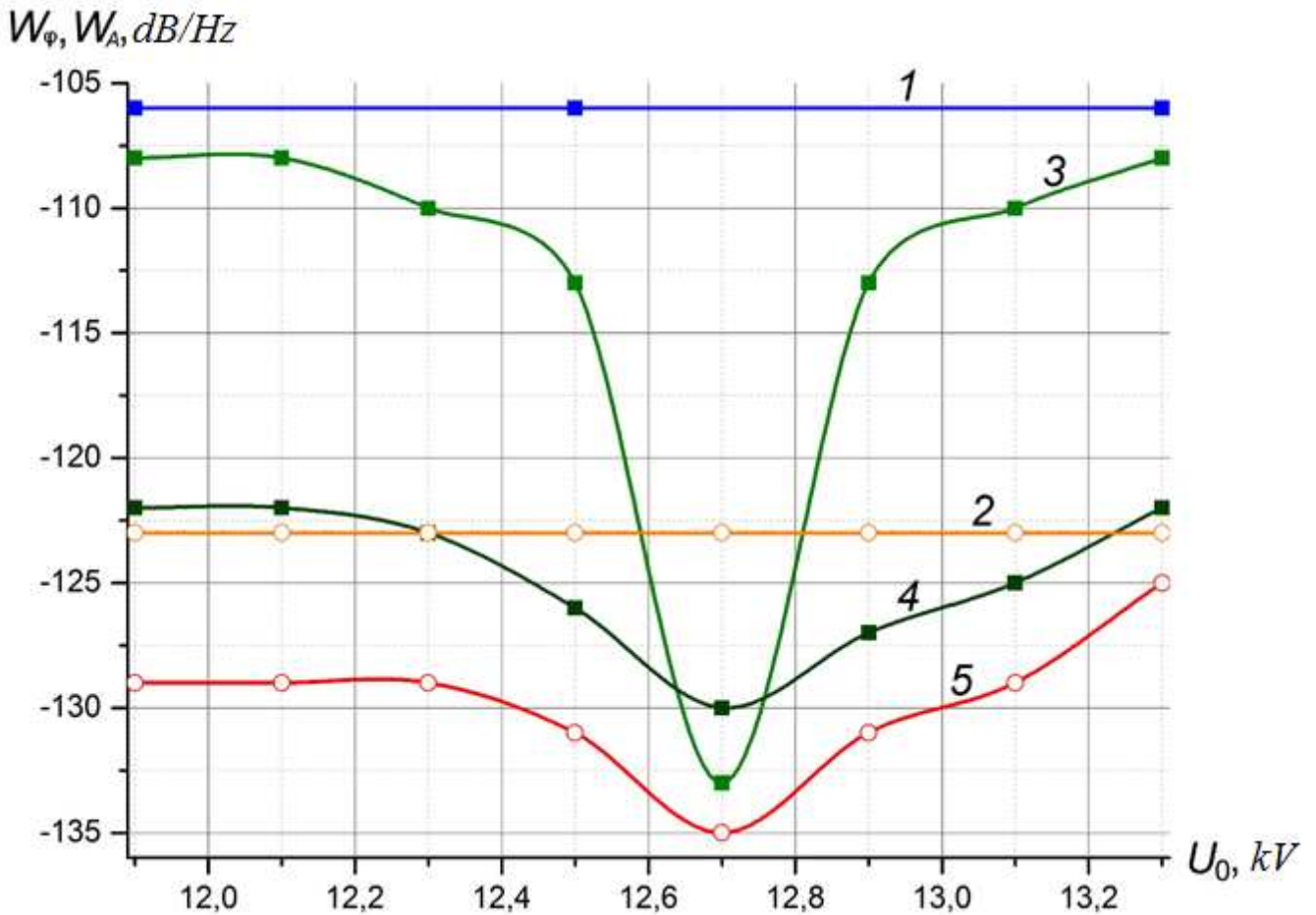


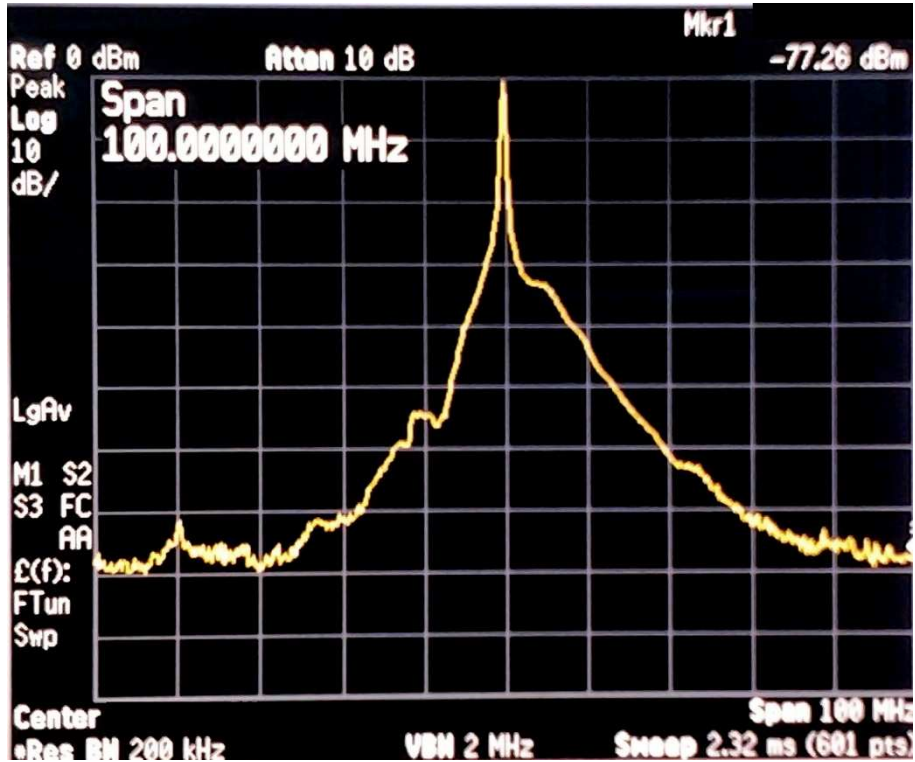
Рис. 8. Расчетные фазовые (1) и амплитудные (2) модуляционные шумы в базовом приборе, а также фазовые шумы, обусловленные пульсациями напряжения ЗС (3), сетки (4), и амплитудные шумы (5) в фазостабильной ЛБВ с секцией подавления сигнала.

Аналогичные результаты, обусловленные пульсациями напряжения, могут быть получены и в фазостабильной ЛБВ с участком крестатронного режима, поскольку результаты расчётов, приведённые в предыдущих разделах, свидетельствуют о возможности достижения даже более благоприятных модуляционных характеристик, чем у ЛБВ с участком подавления сигнала.

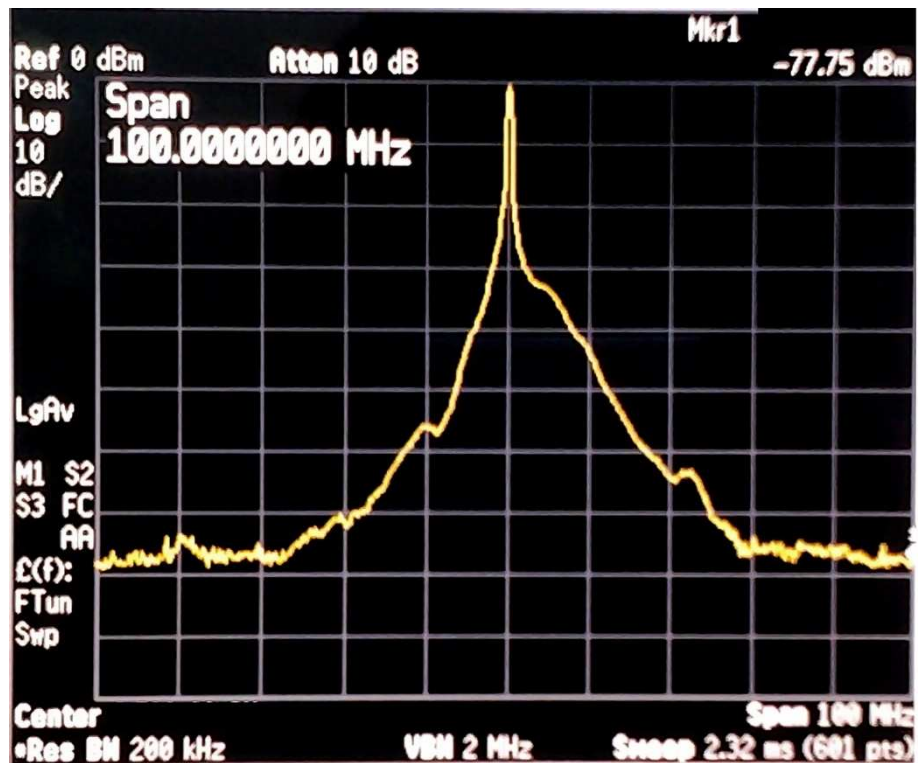
Спектры импульсно-модулированных радиосигналов усилителей на фазостабильных ЛБВ

Результаты расчётов модуляционных характеристик дают основания предполагать, что фазостабильная ЛБВ с участком крестатронного режима будет иметь наиболее качественный спектр импульсного радиосигнала,

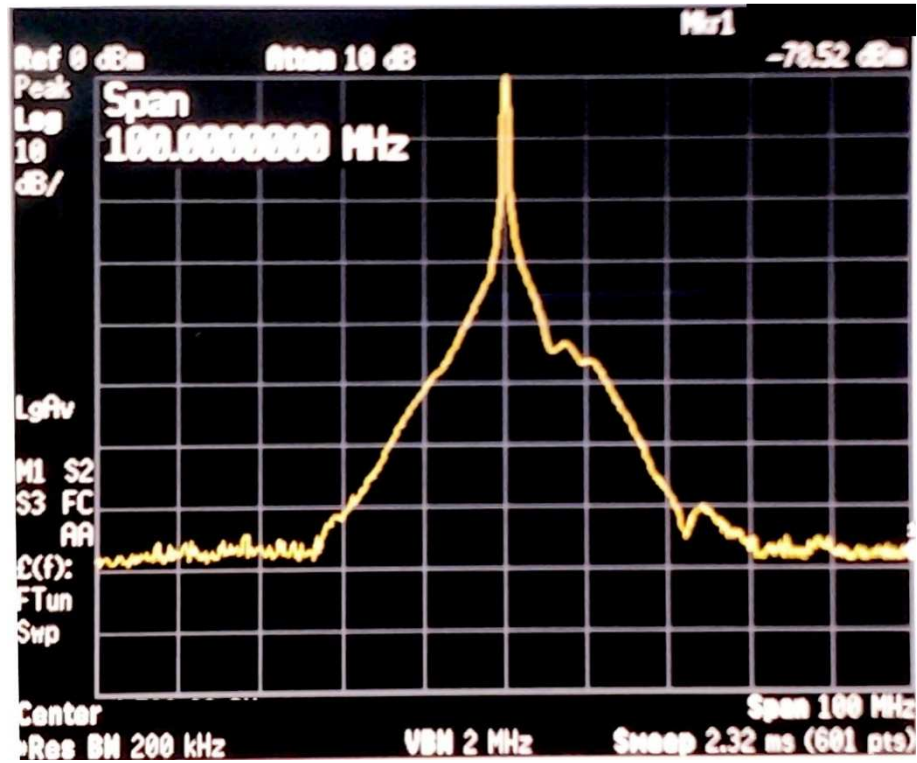
поскольку отличается наименьшим, в исследованных ЛБВ, общим сдвигом фазы на фронтах импульса. Это предположение полностью подтвердилось на измерениях, результаты которых представлены на рис. 9.



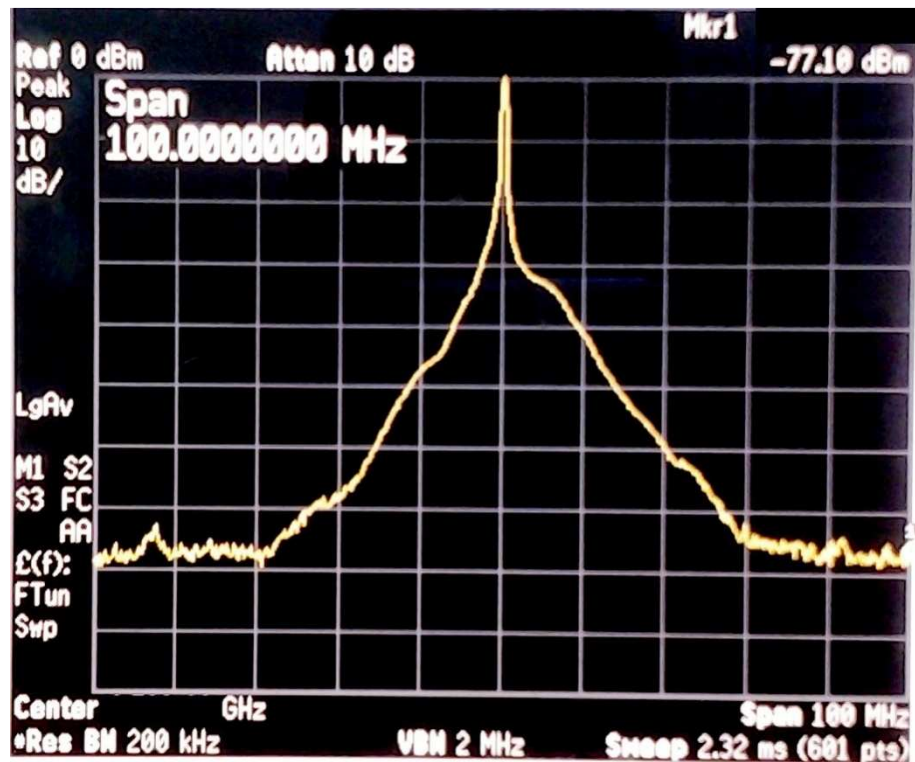
а



б



В



Г

Рис. 9. Спектрограммы серийной ЛБВ (а), нефазостабильного аналога с секцией крестатронного режима (б), ФЛБВ № 1 (в) и ФЛБВ № 2 (г) в режиме насыщения выходной мощности.

Качество спектра импульсного радиосигнала принято оценивать уровнем мощности составляющих, выходящих за пределы разрешённой полосы частот (так называемых внеполосных колебаний), или шириной полосы частот на заданном уровне этих составляющих, что больше подходит для анализа в нашем случае и представлено в табл. 4.

Таблица 4. Уровни составляющих спектра импульсного радиосигнала усилителей на ЛБВ

Тип ЛБВ	Ширина спектра радиосигнала, МГц			
	Уровень -20 дБ	Уровень -40 дБ	Уровень -60 дБ	Уровень -70 дБ
Базовый	2	13	32	45
Нефазостабильный аналог	2	12	30	43
ФЛБВ № 1	2	10	30	40
ФЛБВ № 2	2	15	36	48

Видно, что фазостабильная ЛБВ с участком крестатронного режима, ФЛБВ № 1, на уровне составляющих спектра -40 дБ и менее (а именно такие уровни определяют внеполосные колебания) обеспечивает минимальную ширину спектра выходного сигнала усилителя СВЧ, а базовый прибор и ФЛБВ № 2 – максимальную.

Заключение

Проведённые предварительные исследования по использованию фазостабильных ЛБВ в усилителях СВЧ показали, что, по сравнению с приборами традиционной конструкции, они позволяют уменьшить уровень модуляционных и внеполосных колебаний. При этом максимальный вклад в фазовые флуктуации вносят пульсации напряжения замедляющей системы, а в амплитудные – пульсации напряжения превышения. Для уменьшения уровня модуляционных колебаний (шумов) более эффективными представляются фазостабильные ЛБВ с участком подавления сигнала в секции компенсации, для снижения внеполосных колебаний – ЛБВ с крестатронным участком.

Литература

1. Кац, А.М., Кудряшов В.П., Суслин П.И. Фазовые характеристики ЛБВ в несинхронных режимах // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1971. № 5. С. 84-91.
2. Кудряшов В.П., Сивяков Б.К., Яковлева И.Б. Лампа бегущей волны // Пат. РФ № 2046442. МПК⁶ H01J 25/34. Приоритет от 21.05. 92. Опубл. 20.10. 95. Бюл. № 29.
3. Дёмин В.В., Ильина Е.М., Кудряшов А.Г., Сивяков Б.К. Уменьшение фазовой чувствительности лампы с бегущей волной // Электронный «Журнал радиоэлектроники». 2014. № 12, декабрь.
URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/2/text/html>.
4. Кац А. М., Кудряшов В.П., Трубецков Д.И. Сигнал в лампах с бегущей волной. Ч. 1. Лампа с бегущей волной О-типа. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1984. 144 с.
5. Гилмор-мл. А.С. Лампы с бегущей волной. М.: Техносфера. 2013. 616 с.
6. Кудряшов А.Г., Кудряшов В.П., Сивяков Б.К. Исследование характеристик фазостабильной лампы с бегущей волной // Вестн. Саратов. гос. техн. ун-та. 2014. № 12. С. 55-60.
7. Ильина Е.М., Филатов В.А., Конторин Ю.Ф. Усовершенствованные одномерная нелинейная модель и программа расчета выходных характеристик ЛБВ // Материалы XII Зимней школы-семинара по СВЧ электронике и радиофизике. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2002. С.40-43.
8. Сивяков Б.К., Кудряшов А.Г. Фазостабильная ЛБВ // Материалы 10-й юбилейной междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2014). Саратов: Изд-во СГТУ. 2014. Ч.1. С. 21-24.