

УДК 537.862

*К. Б. МИКИТЧУК, С. А. МАЛЫШЕВ, А. Л. ЧИЖ***РЕЖИМ ОДНОЧАСТОТНОЙ ГЕНЕРАЦИИ В ОПТОЭЛЕКТРОННОМ ГЕНЕРАТОРЕ СВЧ НА ЛИНИЯХ ЗАДЕРЖКИ С ОПТИЧЕСКИМ УСИЛЕНИЕМ***Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь,  
e-mail: mikitchuk@ieee.org*

В данной работе проведено теоретическое исследование квазигармонической генерации в оптоэлектронном генераторе на линиях задержки с оптическим усилением. Рассматриваются особенности применения СВЧ-фазовращателей для обеспечения квазигармонической генерации с низким фазовым шумом и уровнем дискретных составляющих в спектре генерации, а также рассчитано пороговое значение коэффициента усиления контура обратной связи, при котором в оптоэлектронном генераторе на линиях задержки с оптическим усилением наступает режим динамических неустойчивостей генерации. Предложен метод обеспечения установления генерации в оптоэлектронном генераторе на частоте максимального усиления.

*Ключевые слова:* оптоэлектронный генератор, оптическое усиление, одночастотная генерация, динамические неустойчивости генерации.

*K. B. MIKITCHUK, S. A. MALYSHEV, A. L. CHIZH***SINGLE-FREQUENCY OSCILLATION IN THE ALL-OPTICAL GAIN OPTOELECTRONIC OSCILLATOR BASED ON FIBER-OPTIC DELAY LINE***B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,  
e-mail: mikitchuk@ieee.org*

The theoretical investigation of the single-frequency oscillation in all-optical gain optoelectronic oscillator based on fiber-optic delay lines is performed. It is shown that there is no need in microwave phase shifters within the optoelectronic oscillator loop in order to provide low phase noise and spurious level oscillations. Threshold of the dynamical instabilities in the all-optical gain optoelectronic oscillator is calculated. It is shown that the reproducibility of the oscillation frequency is provided by means of the continuous tuning of the loop gain during the switching-on.

*Keywords:* optoelectronic oscillator, all-optical gain, single-frequency oscillation, dynamical instabilities of oscillations.

**Введение.** Автогенераторы сверхвысокой частоты (СВЧ) с низким уровнем фазового шума имеют важное значение для многих коммерческих и военных применений, например беспроводные и оптические системы связи, системы радиолокации и измерительные СВЧ-приборы. Так, радиолокационные системы нуждаются в низком уровне флуктуаций частоты опорных сигналов для отслеживания движущихся объектов, а пределы измерений анализаторов спектра определяются фазовым шумом гетеродина. В целом параметры и характеристики вышеназванных систем улучшаются с уменьшением уровня фазового шума используемых в них генераторов. Автогенераторы СВЧ на основе линий задержки, в частности оптоэлектронные, позволяют получать генерацию квазигармонического СВЧ-сигнала со сверхнизким фазовым шумом, достигающим величины менее 140 дБн/Гц на отстройке 10 кГц от частоты генерации в диапазоне 8–12 ГГц [1]. При этом условиями генерации являются синфазное сложение сигналов на собственной частоте (фазовое условие генерации), а также компенсация активным элементом потерь и нелинейностей контура обратной связи (амплитудное условие генерации).

Данные условия в оптоэлектронном генераторе СВЧ являются необходимыми, но недостаточными для стационарной одночастотной (квазигармонической) генерации. Во-первых, при высоких коэффициентах усиления активного элемента может наступить режим динамических

нестабильностей генерации [2, 3] или многочастотная генерация [4]. Это делает невозможным использование оптоэлектронного генератора в качестве гетеродина в современных системах радиолокации, радиосвязи и измерительной СВЧ-техники. Во-вторых, так как необходимые условия генерации (фазовое и амплитудное) выполняются на дискретном конечном наборе собственных частот в пределах *полосы частот положительного усиления* (т. е. полосы частот, где усиление компенсирует потери и нелинейности в компонентах оптоэлектронного генератора), то в общем случае генерация квазигармонического сигнала может устанавливаться на любой собственной частоте, лежащей в рассматриваемом диапазоне [5]. Это накладывает значительные ограничения на архитектуру систем с фазовой автоподстройкой частоты, так как расстояние между собственными частотами в пределах полосы частот положительного усиления превышает ширину полосы петлевого фильтра системы фазовой автоподстройки частоты [6].

Таким образом, для стационарной генерации квазигармонического сигнала, помимо обеспечения выполнения фазового и амплитудного условий, необходимо дополнительно применять комплекс мер по управлению коэффициентом усиления контура обратной связи. В данной работе исследуются условия установления и поддержания стационарной генерации квазигармонического СВЧ-сигнала в оптоэлектронных генераторах на линиях задержки с оптическим усилением.

**Методы моделирования оптоэлектронного генератора.** В общем случае автогенератор частоты на линиях задержки для обеспечения стационарной квазигармонической генерации должен содержать активный элемент с низкими собственными фазовыми шумами, охваченный контуром положительной обратной связи, который в свою очередь содержит узкополосный СВЧ-фильтр для частотной селекции собственных частот. В оптоэлектронном генераторе СВЧ на линиях задержки с оптическим усилением в качестве активного элемента используется оптический усилитель на волокне, легированном эрбием, охваченный контуром положительной обратной связи. Для квазигармонической генерации при этом необходимо использование оптоэлектронного контура обратной связи, обеспечивающего выполнение фазового и амплитудного условий генерации для СВЧ-поднесущих в оптическом волокне, иначе для оптической несущей возникает многомодовая лазерная генерация и из-за конкуренции мод сильно возрастает фазовый шум генерируемого СВЧ-сигнала. На рис. 1 приведена структурная схема оптоэлектронного автогенератора СВЧ на линиях задержки с оптическим усилением. Оптоэлектронный генератор включает оптический усилитель на волокне, легированном эрбием, а также контур положительной обратной связи, состоящий из дополнительных корректирующих волоконно-оптических линий задержки,

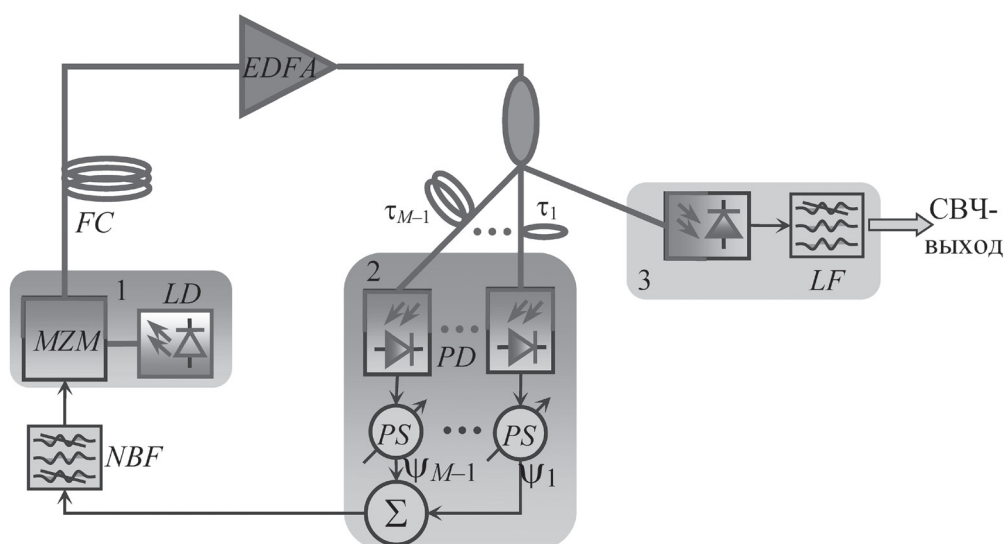


Рис. 1. Структурная схема оптоэлектронного генератора СВЧ на линиях задержки с оптическим усилением: 1 – электрооптический преобразователь; 2 – оптоэлектронный преобразователь; 3 – устройство вывода сигнала генерации; MZM – электрооптический модулятор Маха – Цендера; EDFA – оптический усилитель на волокне, легированном эрбием;  $1 \times M$  – волоконно-оптический разветвитель; FC – волоконно-оптическая катушка; LD – лазерный диод; PD – фотодиод; PS – СВЧ-фазовращатель; NBF – узкополосный СВЧ-фильтр; LF – СВЧ-фильтр нижних частот

оптоэлектронного преобразователя, узкополосного СВЧ-фильтра, электрооптического преобразователя и основной волоконно-оптической линии задержки.

Следует отметить, что в общем случае в оптоэлектронном генераторе дополнительная периодическая частотная селективность контура обратной связи вводится посредством того, что модулированный по интенсивности оптический сигнал с помощью волоконно-оптического разветвителя соединяется с дополнительными корректирующими волоконно-оптическими линиями задержки. Оптоэлектронное преобразование осуществляется путем детектирования оптических сигналов с помощью СВЧ-фотодиодов, при этом СВЧ-фазовращатели используются для обеспечения синфазного сложения полученных СВЧ-сигналов в СВЧ-сумматоре на частоте генерации. Электрооптическое преобразование СВЧ-сигнала после узкополосной фильтрации в контуре обратной связи осуществляется путем модуляции по интенсивности излучения лазерного диода с распределенной обратной связью с помощью электрооптического модулятора Маха – Цендера. В рассматриваемом оптоэлектронном генераторе вывод оптического сигнала, модулированного по интенсивности СВЧ-сигналом генерации, реализуется с помощью волоконно-оптического разветвителя на выходе оптического усилителя. После оптоэлектронного преобразования в устройстве вывода СВЧ-сигнал генерации выводится из оптоэлектронного генератора.

Наиболее простой моделью рассматриваемого оптоэлектронного генератора СВЧ является линейная стационарная модель [1]. Однако из-за предположения о стационарности генерации корректное установление условий стационарной генерации и динамических нестабильностей, а также уровня дискретных составляющих в спектре генерации оказывается невозможным, так как взаимодействие сигнала генерации с шумом является нестационарным процессом. Более сложные модели, такие как нелинейная нестационарная модель оптоэлектронного генератора на основе полного интегро-дифференциального уравнения нелинейной динамики [2] или модель эволюции векторов отсчетов комплексных медленноменяющихся амплитуд во временной области [3], позволяют моделировать нелинейное ограничение амплитуды генерации, описывать переходные процессы при включении, а также режим динамических нестабильностей генерации. Данные модели реализованы для оптоэлектронного генератора с электронным усилением без дополнительных корректирующих волоконно-оптических линий задержки. Для учета распределенных шумов, нелинейностей компонентов оптоэлектронного генератора (в частности, оптического усилителя на волокне, легированном эрбием), нестационарности взаимодействия сигнала генерации с шумовыми составляющими в спектре была предложена нелинейная нестационарная модель эволюции одного отсчета комплексной огибающей СВЧ-сигнала в оптоэлектронном генераторе СВЧ с произвольным количеством дополнительных корректирующих волоконно-оптических линий при учете зависимости частоты генерации от времени [7–9]. Эта модель позволяет получать выходные параметры и характеристики генерации в зависимости от конструктивных параметров и режимов работы компонентов оптоэлектронного генератора. Однако из-за сложности анализа многомерных зависимостей динамический режим работы оптоэлектронного генератора принято описывать с помощью коэффициента усиления контура обратной связи в режиме малых сигналов  $g_V$  и нормированной амплитуды генерации  $\mu$  [2, 3]. Коэффициент усиления контура обратной связи в режиме малых сигналов и нормированная амплитуда генерации на входе электрооптического преобразователя записываются в следующем виде [10]:

$$g_V = \left[ \frac{\alpha_{mw} \sqrt{\kappa_{mw}}}{\sqrt{M-1}} \sum_{k=1}^{M-1} \alpha_k \kappa_k \right] \frac{\pi R |\sin \varphi_B| S_{PD} \alpha_f a_{MZM} P_{LD} \gamma_{MZM} G_{EDFA}(0)}{2V_\pi}, \quad (1)$$

$$\mu = \pi V_{osc} / V_\pi, \quad (2)$$

где  $P_{LD}$  – мощность генерации лазера;

$\gamma_{MZM} = (\eta_{MZM} - 1) / (\eta_{MZM} + 1)$ , где  $\eta_{MZM}$  – контрастность модулятора Маха – Цендера;

$\varphi_B$  – фаза смещения модулятора Маха – Цендера;

$V_\pi$  – полуволновое напряжение модулятора вблизи частоты генерации в оптоэлектронном генераторе;

$S_{PD}$  – чувствительность СВЧ-фотодиодов вблизи частоты генерации в оптоэлектронном генераторе;

$R$  – сопротивление нагрузки фотодиода;

$\alpha_{MZM}$  – вносимые потери модулятора Маха – Цендера;  
 $G_{EDFA}(P_{dc})$  – коэффициент усиления оптического усилителя на волокне, легированном эрбием;  
 $P_{dc}$  – постоянная составляющая оптической мощности на входе оптического усилителя;  
 $\alpha_{mw}$  – потери в СВЧ-тракте;  
 $\kappa_{mw}$  – коэффициент разветвления направленного СВЧ-ответвителя;  
 $(M-1)$  – количество дополнительных корректирующих волоконно-оптических линий задержки;  
 $\alpha_k$  и  $\kappa_k$  – вносимые потери и коэффициент разветвления волоконно-оптического ответвителя в  $k$ -ю дополнительную волоконно-оптическую линию задержки;  
 $\alpha_f$  – потери, вносимые в основную волоконно-оптическую линию задержки;  
 $V_{osc}$  – амплитуда СВЧ-сигнала генерации на входе электрооптического преобразователя.

Выражение (1) записано без учета потерь, вносимых узкополосным СВЧ-фильтром в случае, если частота генерации СВЧ-сигнала не совпадает с центральной частотой СВЧ-фильтра, что применительно к реальному оптоэлектронному генератору справедливо для случая генерации на частоте максимального усиления, являющейся собственной частотой оптоэлектронного генератора, для которой коэффициент усиления в режиме малых сигналов наибольший по сравнению с другими собственными частотами [5].

**Условия установления генерации на частоте максимального усиления.** Генерация квазигармонического СВЧ-сигнала возможна на одной из собственных частот в пределах полосы частот положительного усиления СВЧ, поэтому от включения к включению оптоэлектронного генератора генерация устанавливается на различных собственных частотах. Экспериментально показано, что использование режима включения, при котором коэффициент усиления в контуре положительной обратной связи плавно увеличивается, обеспечивает генерацию на частоте максимального усиления [4].

На рис. 2, а приведен переходной процесс в оптоэлектронном генераторе без дополнительных корректирующих волоконно-оптических линий задержки при использовании данного режима включения, что реализовано с помощью увеличения мощности генерации лазерного диода. Из рисунка видно, что после включения оптоэлектронный генератор последовательно находится в подпороговом состоянии (I), режиме установления генерации (II), а также в режимах квазистационарной (III) и стационарной генерации (IV).

В подпороговом состоянии не существует полосы частот положительного усиления, т. е. генерация невозможна ни на одной из собственных частот, так как не выполняется амплитуд-

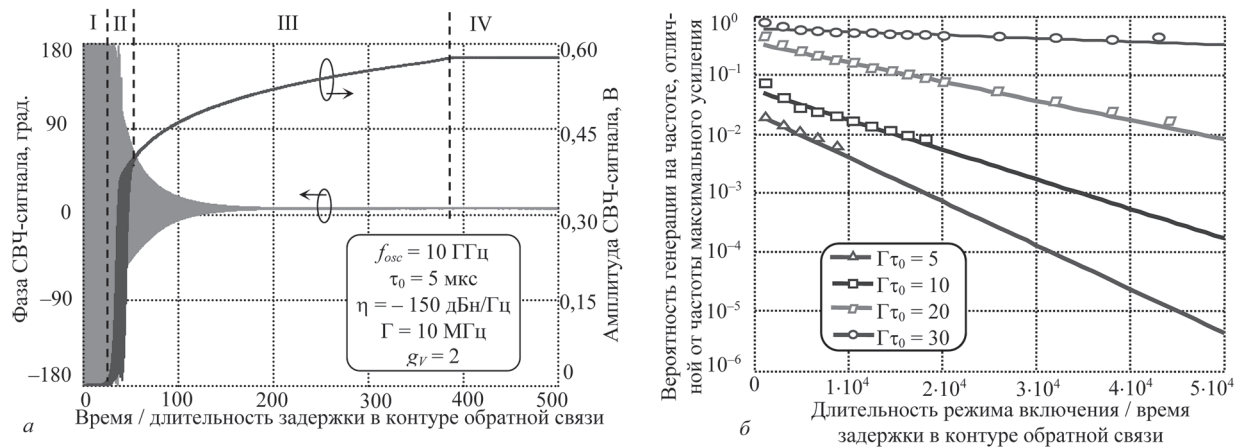


Рис. 2. Переходной процесс в оптоэлектронном генераторе без корректирующих волоконно-оптических линий задержки при использовании режима включения, при котором обеспечивается линейное увеличение коэффициента усиления в контуре обратной связи (а) и вероятность генерации на частоте, отличной от частоты максимального усиления, в зависимости от длительности режима включения (б):  $f_{osc}$  – частота генерации;  $\eta$  – уровень собственных шумов выходного сигнала генерации;  $\Gamma$  – ширина полосы пропускания полосового СВЧ-фильтра;  $\tau_0$  – длительность задержки в волоконно-оптической катушке;  $\tau_m$  – длительность задержки в  $m$ -й дополнительной корректирующей волоконно-оптической линии задержки;  $\psi_m$  – фазовый сдвиг, вносимый СВЧ-фазовращателем на выходе  $m$ -й дополнительной корректирующей волоконно-оптической линии задержки;  $g_V$  – коэффициент усиления контура обратной связи в режиме малых сигналов

ное условие генерации. Свыше порогового значения коэффициента усиления контура обратной связи положительное усиление возникает в полосе частот, которая может содержать несколько собственных частот оптоэлектронного генератора, т. е. начинается режим установления генерации, в общем случае сопровождающийся конкуренцией сигналов на собственных частотах. В режиме квазистационарной генерации увеличение амплитуды СВЧ-сигнала с течением времени свидетельствует о том, что на данном этапе еще не работает механизм ограничения амплитуды СВЧ-сигнала из-за нелинейностей компонентов оптоэлектронного генератора, в частности нелинейностей модулятора Маха – Цендера и оптического усилителя. Если также учесть, что модулятор Маха – Цендера и оптический усилитель не вносят фазовых искажений в преобразовываемый сигнал, то оптоэлектронный генератор на данном этапе можно считать линейной системой. При этом амплитуда СВЧ-сигнала на собственных частотах определяется случайно инжектированным шумом, а генерация устанавливается на одной из собственных частот, величина СВЧ-сигнала на которой оказалась максимальной. Поэтому для установления генерации на частоте максимального усиления необходимо, чтобы на всем протяжении режима установления генерации не возникало конкуренции собственных частот и в пределах полосы частот положительного усиления оставалась только одна собственная частота. В режиме квазистационарной генерации уровень дискретных составляющих на побочных собственных частотах, где идет паразитная подпороговая генерация, постепенно уменьшается, что приводит к стационарной генерации квазигармонического СВЧ-сигнала, дискретные составляющие в спектре которого значительно подавлены и не приводят к динамическим нестабильностям генерации.

На рис. 2, б приведена зависимость вероятности установления генерации на частоте, отличной от частоты максимального усиления, от длительности режима включения, при котором обеспечивается линейное увеличение коэффициента усиления контура положительной обратной связи оптоэлектронного генератора без дополнительных корректирующих волоконно-оптических линий задержки. Эта зависимость приведена для различных произведений ширины полосы узкополосного СВЧ-фильтра  $\Gamma$  и длительности задержки в волоконно-оптической линии  $\tau_0$ , т. е. различных значений количества собственных частот оптоэлектронного генератора в пределах полосы СВЧ-фильтра. Из рисунка видно, что вероятность установления генерации на собственных частотах, отличных от частоты максимального усиления, экспоненциально зависит от длительности режима включения оптоэлектронного генератора. При этом большие значения вероятности установления генерации на частоте, отличной от частоты максимального усиления, соответствуют большим значениям произведения ширины полосы узкополосного СВЧ-фильтра  $\Gamma$  и длительности задержки в волоконно-оптической линии  $\tau_0$ . В результате моделирования установлено, что при использовании дополнительных корректирующих волоконно-оптических линий задержки увеличивается частотная селективность контура обратной связи оптоэлектронного генератора, что приводит к снижению вероятности установления генерации на собственных частотах, отличных от частоты максимального усиления, по сравнению с оптоэлектронным генератором без дополнительных корректирующих волоконно-оптических линий задержки.

**Особенности фазового условия генерации.** В реальных конструкциях оптоэлектронных генераторов для обеспечения совпадения частоты максимального усиления и центральной частоты узкополосного СВЧ-фильтра используются СВЧ-фазовращатели [1]. В общем случае, как показывают результаты моделирования, частота максимального усиления в них может отстоять от центральной частоты СВЧ-фильтра более чем на половину интервала между собственными частотами, а зависимость частоты генерации от сдвига фазы носит кусочно-линейный характер и при перестройке фазовращателя в пределах  $360^\circ$  испытывает скачок, величина которого равна интервалу между ближайшими к центральной частоте СВЧ-фильтра собственными частотами оптоэлектронного генератора.

На рис. 3, а приведена зависимость фазового шума (на отстройке 10 кГц от частоты генерации) и уровня дискретных составляющих в спектре оптоэлектронного генератора от фазового сдвига в контуре обратной связи без дополнительных корректирующих волоконно-оптических линий задержки. Видно, что в случае, если произведение ширины полосы узкополосного СВЧ-фильтра  $\Gamma$  и длительности задержки  $\tau_0$  в волоконно-оптической линии превышают 10, фазовый шум

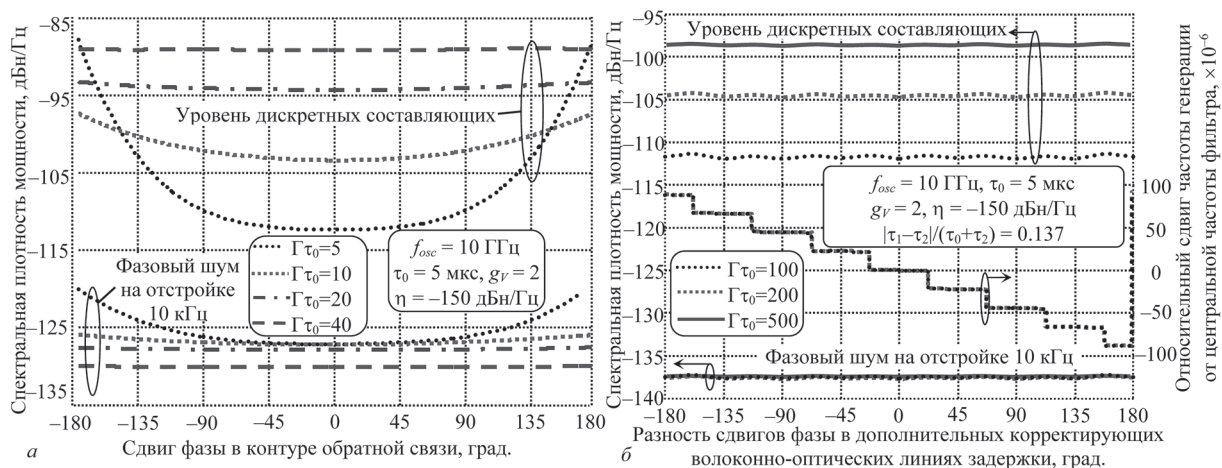


Рис. 3. Зависимость фазового шума на отстройке 10 кГц от частоты генерации, уровня дискретных составляющих в спектре генерации оптоэлектронного генератора, а также сдвига частоты генерации от центральной частоты СВЧ-фильтра от фазового сдвига в контуре обратной связи без дополнительных корректирующих волоконно-оптических линий задержки (а) и разности сдвигов фазы в двух дополнительных корректирующих волоконно-оптических линиях задержки (б)

на отстройке 10 кГц от частоты генерации и уровень дискретных составляющих в спектре генерации изменяются не более чем на 3 дБ во всем диапазоне перестройки СВЧ-фазовращателей.

На рис. 3, б показана зависимость фазового шума (на отстройке 10 кГц от частоты генерации), уровня дискретных составляющих в спектре генерации, а также относительной разности частоты генерации и центральной частоты СВЧ-фильтра от разности фазовых сдвигов, вносимых на выходе двух дополнительных корректирующих волоконно-оптических линий задержки. Для расчетов значение фазового сдвига на выходе двух дополнительных корректирующих волоконно-оптических линий задержки фиксируется таким образом, чтобы обеспечить совпадение частоты генерации с центральной частотой узкополосного СВЧ-фильтра, после чего изменяется значение фазового сдвига в одной из дополнительных волоконно-оптических линий задержки. Из рисунка видно, что зависимость частоты генерации от разности сдвига фаз является кусочно-непрерывной, т. е. при изменении разности фаз между двумя дополнительными корректирующими волоконно-оптическими линиями задержки в оптоэлектронном генераторе происходит перестройка генерации между собственными частотами в пределах одного периода амплитудно-частотной характеристики волоконно-оптической линии задержки вблизи центральной частоты СВЧ-фильтра. Также следует отметить, что в пределах интервала непрерывности наблюдается линейная зависимость частоты генерации от разности фаз, а при перестройке СВЧ-фазовращателя в пределах  $360^\circ$  имеет место скачок между собственными частотами, расположенными в спектре по разные стороны от центральной частоты СВЧ-фильтра. Таким образом, использование оптоэлектронного генератора с несколькими дополнительными корректирующими волоконно-оптическими линиями задержки и СВЧ-фильтром с относительно низкой добротностью позволяет получать генерацию квазигармонического сигнала с низким фазовым шумом и уровнем дискретных составляющих в спектре без использования СВЧ-фазовращателей.

**Динамические нестабильности генерации в оптоэлектронном генераторе.** Амплитуда комплексной огибающей сигнала генерации в режиме квазигармонической генерации имеет вид случайного процесса во времени, а в случае динамических нестабильностей – квазипериодического импульсного процесса [3]. Следовательно, при стационарной квазигармонической генерации в идеальном случае нормированная автокорреляционная функция амплитуды комплексной огибающей представляет собой функцию Дирака. В случае реальных случайных процессов конечной длительности, получаемых в эксперименте и при моделировании, автокорреляционная функция амплитуды комплексной огибающей представляет собой сумму собственного шума и дискретной импульсной функции. В режиме динамических нестабильностей генерации нормированная автокорреляционная функция амплитуды комплексной огибающей является квазипериодической.

В наихудшем случае, с точки зрения реализации генератора СВЧ, появление динамических нестабильностей зависит только от энергетического баланса в оптоэлектронном генераторе и не ограничивается частотной селективностью СВЧ-фильтра. При этом условия стационарной генерации определяются конструктивными параметрами оптоэлектронного генератора, в частности коэффициентом контура обратной связи в режиме малых сигналов, параметрами оптического усилителя, а также рабочей точкой модулятора Маха – Цендера.

На рис. 4, а приведена нормированная автокорреляционная функция амплитуды комплексной огибающей СВЧ-сигнала в оптоэлектронном генераторе с оптическим усилением без дополнительных корректирующих волоконно-оптических линий задержки для различных значений коэффициента усиления контура обратной связи в режиме малых сигналов при постоянном смещении модулятора Маха – Цендера вблизи точки закрытия ( $\varphi_B = 160^\circ$ ). Из рисунка видно, что для значений коэффициента усиления контура обратной связи в режиме малых сигналов, составляющего 3,2 и менее, нормированная автокорреляционная функция амплитуды комплексной огибающей представляет собой сумму белого шума и дискретной импульсной функции, а генерация в оптоэлектронном генераторе является стационарной квазигармонической. В случае, когда коэффициент усиления волоконно-оптической линии задержки в режиме малых сигналов достигает величины 3,4 и более, нормированная автокорреляционная функция амплитуды комплексной огибающей является квазипериодической, и, следовательно, имеют место динамические нестабильности генерации. Также установлено, что порогом генерации является значение коэффициента усиления контура обратной связи в режиме малых сигналов, равное единице, безотносительно к рабочей точке модулятора Маха – Цендера и количеству дополнительных корректирующих волоконно-оптических линий задержки.

На рис. 4, б приведена зависимость максимальной нормированной амплитуды  $\mu$  в режиме стационарной квазигармонической генерации от фазы смещения модулятора Маха – Цендера для различных значений контрастности последнего. Из рисунка видно, что для оптоэлектронного генератора с оптическим усилением с модулятором Маха – Цендера, смещенным вблизи квадратурной точки, максимальное значение нормированной амплитуды квазигармонической генерации составляет величину, близкую к 2,4, что соответствует расчетным данным, приведенным в работах [2, 3] для оптоэлектронного генератора с электронным усилением. Максимальное значение нормированной амплитуды квазигармонической генерации слабо изменяется при смещении модулятора Маха – Цендера от квадратурной точки (фаза смещения  $90^\circ$ ) к точке закрытия до фазы смещения порядка  $120^\circ$ . При дальнейшем смещении модулятора Маха – Цендера к точке закрытия происходит снижение максимального значения нормированной амплитуды квазигармонической генерации. Следовательно, при создании реального оптоэлектронного генератора

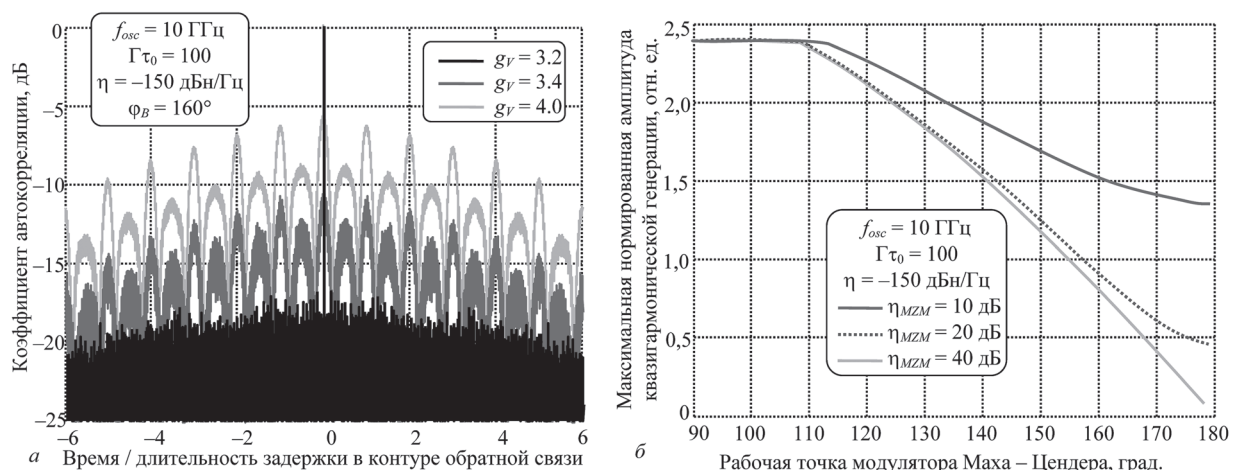


Рис. 4. Выходные характеристики и параметры, характеризующие оптоэлектронный генератор без дополнительных корректирующих волоконно-оптических линий задержки при переходе к режиму динамических нестабильностей генерации: коэффициент автокорреляции амплитуды комплексной огибающей СВЧ-сигнала генерации (а); максимальная нормированная амплитуда квазигармонической генерации в зависимости от конструктивных параметров оптоэлектронного генератора (б)

необходимо выбирать рабочие точки компонентов таким образом, чтобы мощность сигнала генерации не превышала максимального значения, которое определяется из максимальной нормированной амплитуды квазигармонической генерации следующим образом (см. формулы (1) и (2)):

$$P_{\max} = \frac{\kappa_M^2}{\alpha_{mw} \left[ \sum_{m=1}^{M-1} \kappa_m \right]^2} \frac{(\mu_{cr} V_{\pi} / \pi)^2}{2R}, \quad (3)$$

где  $\mu_{cr}$  – максимальная нормированная амплитуды стационарной квазигармонической генерации на входе модулятора Маха – Цендера (см. рис. 4, б).

Следует отметить, что в оптоэлектронных генераторах для обеспечения низкого уровня собственного фазового шума используются модуляторы Маха – Цендера вблизи точки закрытия с фазой смещения в диапазоне от  $130^\circ$  до  $165^\circ$  и коэффициентом контрастности свыше 30 дБ [7–9], поэтому в оптоэлектронном генераторе с оптическим усилением стационарная квазигармоническая генерация устанавливается с амплитудой, не превышающей на входе модулятора Маха – Цендера половины полуволнового напряжения, деленного на  $\pi$ .

**Заключение.** В данной работе с помощью нелинейной нестационарной модели оптоэлектронного генератора выполнено теоретическое исследование условий установления и поддержания стационарной генерации квазигармонического СВЧ-сигнала в оптоэлектронных генераторах на линиях задержки с оптическим усилением. В результате проведенного моделирования предложен режим включения оптоэлектронного генератора, обеспечивающий установление генерации на частоте максимального усиления. Определено, что использование оптоэлектронного генератора с несколькими дополнительными корректирующими волоконно-оптическими линиями задержки и СВЧ-фильтром с относительно низкой добротностью позволяет получать генерацию квазигармонического сигнала с низким фазовым шумом и уровнем дискретных составляющих в спектре без использования СВЧ-фазовращателей. Показано, что в оптоэлектронном генераторе с оптическим усилением и модулятором Маха – Цендера, смещенным вблизи точки закрытия, существует максимальное значение мощности стационарной квазигармонической генерации, свыше которого наступает режим динамических неустойчивостей и поддержание стационарной генерации квазигармонического сигнала оказывается невозможным.

### Список использованной литературы

1. *Oldyniec, M.* RF and microwave oscillator design / M. Oldyniec. – Boston: Artech house, 2002.
2. *Chembo, Y. K.* Nonlinear dynamics and spectral stability of optoelectronic microwave oscillators / Y. K. Chembo, L. Larger, P. Colet // J. Quantum Electronics. – 2008. – Vol. 44, no. 9. – P. 858–866.
3. *Levy, E. C.* Modeling optoelectronic oscillators / E. C. Levy, M. Horowitz, C. R. Menyuk // JOSA B. – 2009. – Vol. 26, N 1. – P. 148–158.
4. *Chembo, Y. K.* Effects of gain and bandwidth on the multimode behavior of optoelectronic microwave oscillators / Y. K. Chembo // Opt. Express. – 2008. – Vol. 16, N 13. – P. 9067–9072.
5. *Banky, T.* Optimum configuration of multiloop optoelectronic oscillators / T. Banky, B. Horvath, T. Berceci // J. Opt. Soc. Am. B (JOSA B). – 2006. – Vol. 23, N 7. – P. 1371–1380.
6. *Кузменков, А. С.* Обзорный анализ современных архитектур синтезаторов частот с ФАПЧ / А. С. Кузменков, А. Е. Поляков, Л. В. Стрыгин // Радиотехника и телекоммуникации. – 2013. – Т. 5, № 3. – С. 121–133.
7. *Микитчук, К. Б.* Численная модель волоконно-оптического оптоэлектронного генератора СВЧ с полностью оптическим усилением / К. Б. Микитчук, С. А. Малышев, А. Л. Чиж // Молодежь в науке – 2013: прил. к журн. «Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук». – 2014. – Ч. 2. – С. 46–51.
8. *Mikitchuk, K.* Numerical nonlinear time-varying model of delay-line optoelectronic oscillator / K. Mikitchuk, A. Chizh, S. Malyshev // Proc. of Intern. conf. on numerical electro-magnetic modelling and optimization for RF, Pavia, May 14–16, 2014. – Pavia, 2014. – P. 1–4.
9. *Микитчук, К. Б.* Обобщенная модель во временной области оптоэлектронного СВЧ-генератора на основе волоконно-оптических линий задержки / К. Б. Микитчук, А. Л. Чиж, С. А. Малышев // Полупроводниковые лазеры и системы на их основе: сб. ст. 9-го Белорус.-Рос. семинара. – Минск: Ин-т физики НАН Беларуси, 2013. – С. 233–236.
10. *Mikitchuk, K.* Analog optical link operating at the gain peak wavelength of an erbium-doped fiber amplifier / K. Mikitchuk, A. Chizh, S. Malyshev // Proc. of 44<sup>th</sup> European Microwave Conf., Rome, Oct. 5–12, 2014. – Rome, 2014. – P. 679–682.

Поступила в редакцию 10.04.2015