

Автогенераторы на поверхностных акустических волнах (обзор)

В. А. Лойко^{1,2}, А. А. Добровольский¹, В. Н. Кочемасов¹, А. Р. Сафин^{1,2,3✉}

¹ООО "Радиокомп", Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

³Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

✉arsafin@gmail.com

Аннотация

Введение. Современные прецизионные радиотехнические системы предъявляют жесткие требования к качеству используемых источников опорных сигналов. Существует несколько различных способов построения источников опорных сигналов СВЧ-диапазона – СВЧ-автогенераторов (АГ). Одно из перспективных направлений развития таких автогенераторов – АГ с частотоподающими элементами на поверхностных акустических волнах.

Цель работы. Обзор мировых достижений в области разработки частотоподающих элементов на поверхностных акустических волнах (ПАВ) и АГ на их базе.

Материалы и методы. Отбор материала для анализа и обобщения проводился по доступным публикациям в общеизвестных технических журналах, рекламным проспектам и сайтам фирм – производителей устройств на ПАВ за последние 30 лет методом сравнения. Критериями отбора материала для обзора являлись: низкие значения спектральной плотности мощности частотных флуктуаций формируемого сигнала, наличие виброзащиты, наличие термостата, миниатюрность, оригинальность конструкции.

Результаты. В статье проведен анализ особенностей различных способов построения АГ СВЧ-диапазона. Показано, что достижение наилучших значений спектральной плотности мощности частотных флуктуаций в АГ с частотоподающими элементами на ПАВ возможно только при применении двухпортовых резонаторов. Проведен анализ основных технических характеристик термостатированных виброустойчивых АГ.

Заключение. Несмотря на большое количество различных фирм-производителей (более двадцати) на мировом рынке и многообразии различных моделей АГ с частотоподающими элементами на ПАВ (более ста различных моделей), всего две фирмы выпускают автогенераторы, стойкие к воздействию внешних вибраций и акустических шумов.

Ключевые слова: автогенератор, поверхностные акустические волны, спектральная плотность мощности частотных флуктуаций, G-чувствительность

Для цитирования: Автогенераторы на поверхностных акустических волнах (обзор) / В. А. Лойко, А. А. Добровольский, В. Н. Кочемасов, А. Р. Сафин // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 3. С. 6–21. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-6-21

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования: Грант РФФИ № 19-29-03015.

Статья поступила в редакцию 23.03.2022; принята к публикации после рецензирования 25.04.2022; опубликована онлайн 28.06.2022

Self-Oscillators Based on Surface Acoustic Waves (A Review)

Vitaliy A. Loiko^{1,2}, Alexander A. Dobrovolsky¹, Victor N. Kochemasov¹, Ansar R. Safin^{1,2,3✉}

¹"Radiocomp", Moscow, Russia

²National Research University "MPEI", Moscow, Russia

³Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Moscow, Russia

✉arsafin@gmail.com

Abstract

Introduction. Modern precision radio systems impose stringent requirements on the quality of the reference signal sources used. Various approaches are used to create sources of reference signals in the microwave range – microwave self-oscillators (SO). A promising direction in the development of such SO is SO with frequency-setting elements based on surface acoustic waves (SAW).

Aim. A review of international achievements in the development of frequency-setting elements based on SAW and respective SO.

Materials and methods. The selection of materials for a comparative analysis and generalization was carried out using available sources published over the past 30 years in well-known engineering journals, advertising brochures and websites of the manufacturers of devices based on SAW. The selection criteria included low values of the power spectral density of the frequency fluctuations of the generated signal, the presence of vibration protection, the presence of a thermostat, as well as the miniaturization and originality of the design.

Results. Specific features of various methods used for constructing microwave oscillators were analyzed. It is shown that the achievement of the best values of the power spectral density of frequency fluctuations in SO with frequency-setting elements on SAW is possible only with the use of two-port resonators. An analysis of the main technical characteristics of temperature-controlled vibration-resistant SO was carried out.

Conclusion. Despite the large number of different manufacturers on the world market (more than 20 companies) and the variety of different models of oscillators with frequency-setting elements on SAW (more than a 100 different models), only two companies produce oscillators resistant to external vibrations and acoustic noise.

Keywords: self-oscillator, surface acoustic waves, power spectral density of frequency fluctuations, G-sensitivity

For citation: Loiko V. A., Dobrovolsky A. A., Kochemasov V. N., Safin A. R. Self-Oscillators Based on Surface Acoustic Waves (A Review). Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 6–21. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-6-21

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgment: RFBR grant no. 19-29-03015.

Submitted 28.03.2022; accepted 25.04.2022; published online 28.06.2022

Введение. Неотъемлемой частью любой современной радиотехнической системы является источник опорного сигнала – автогенератор (АГ). Предъявляемые к нему требования во многом определяются спецификой работы всей системы и спектром решаемых ею задач. В одних системах на первое место ставят массогабаритные показатели и энергопотребление, в других основной упор делается на качество формируемых сигналов и их временные характеристики. Наиболее жесткие требования к источникам опорных сигналов в части качества

формируемого сигнала предъявляются в системах связи, радионавигации, телеметрии, радиолокации и в измерительной технике.

В зависимости от способа стабилизации частоты АГ можно разделить на кварцевые генераторы, генераторы с резонаторами на поверхностных акустических волнах (ПАВ) (surface acoustic waves – SAW), генераторы на объемных резонаторах, генераторы с резонаторами на железо-иттриевом гранате (ЖИГ), генераторы на базе микроэлектромеханических систем

(МЭМС), генераторы на квантовых ячейках, генераторы на лейкосапфировых резонаторах, оптоэлектронные генераторы и т. д. Каждому виду свойственны свои преимущества и недостатки. Так, например, наиболее высокостабильными АГ являются генераторы на основе квантовых ячеек (рубидиевых, цезиевых, водородных и т. д.). Долговременная стабильность частоты формируемого сигнала в таких генераторах колеблется в диапазоне $1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-7}$ ppb¹ за сутки [1–3]. При этом формируемый сигнал, как правило, лежит в диапазоне частот 5...10 МГц и имеет относительно высокие значения спектральной плотности мощности частотных флуктуаций $L(\Delta f)$ на отстройках от несущей частоты Δf более сотен герц. Недостатками таких АГ является высокая (по сравнению с собственной стабильностью) чувствительность к температуре окружающей среды, внешним вибрациям и магнитным полям, что приводит к существенному усложнению их конструкции, увеличению массогабаритных показателей и, как следствие, накладывает существенные ограничения на их использование в авионике и мобильной технике [4, 5].

АГ на основе ЖИГ-резонаторов формируют СВЧ-сигналы частот от единиц до десятков гигагерц и могут иметь полосу перестройки до трех октав (т. е. отношение максимально возможной частоты сигнала, формируемого таким генератором, к минимально возможному значению частоты может достигать восьми). При этом они также чувствительны к изменениям температуры окружающей среды и к внешним магнитным полям, а значения спектральной плотности мощности частотных флуктуаций формируемого сигнала весьма невелики по сравнению с другими видами АГ [6, 7].

В этом же диапазоне находятся частоты СВЧ-сигналов, формируемых АГ на объемных резонаторах. Сигналы этих АГ в ряде случаев могут иметь относительно высокую стабильность частоты, а спектральная плотность мощности частотных флуктуаций формируемого

сигнала может достигать крайне низких значений по сравнению с другими видами АГ СВЧ-диапазона. При этом они также чувствительны к изменениям внешней температуры окружающей среды [8].

АГ на диэлектрическом лейкосапфировом резонаторе также формируют СВЧ-сигналы частот от единиц до десятков гигагерц. На момент публикации настоящей статьи они имеют самую низкую зарегистрированную спектральную плотность мощности частотных флуктуаций в мире: так, например, при отстройке от несущей 1 кГц достигнуты значения -157 дБн/Гц на частоте 10 ГГц [9]. Существенная зависимость физических свойств материала резонатора от внешних механических воздействий и температуры, а также большие размеры требуют сложных и громоздких систем термостабилизации и виброзащиты. Указанные недостатки ограничивают применение таких АГ в мобильной технике, несмотря на рекордно низкие значения спектральной плотности мощности частотных флуктуаций формируемых сигналов.

Альтернативой АГ на лейкосапфировых резонаторах являются оптоэлектронные генераторы на волоконно-оптических линиях задержки, формирующие сигналы в диапазоне 1...100 ГГц со спектральной плотностью мощности частотных флуктуаций не хуже -147 дБн/Гц при отстройке от несущей 1 кГц на частоте 10 ГГц [9, 10]. Преимуществом таких АГ также является возможность их изготовления в интегральном исполнении. Несмотря на достоинства указанного вида АГ, они также подвержены влиянию температуры окружающей среды и механическим воздействиям, а в спектре выходного сигнала присутствует множество паразитных частот, что делает их преимущественно лабораторными. Серийно выпускаемые образцы обладают сравнительно худшими значениями спектральной плотности мощности частотных флуктуаций формируемых сигналов [11–14].

Несколько менее стабильными по сравнению с АГ на квантовых ячейках, но при этом наиболее распространенными среди всех типов АГ, являются АГ на кварцевых резонаторах. Формируемые ими сигналы занимают ВЧ-диапазон, достигая частот 200...300 МГц. При этом они также чувствительны к изменениям

¹ Здесь и далее ppb от англ. parts per billion (частей на миллиард) или $1 \cdot 10^{-9}$ о. е.

внешней температуры окружающей среды и к вибрациям, однако при применении определенных технических решений удастся достичь достаточно высокой устойчивости к внешним воздействиям и низкой спектральной плотности мощности частотных флуктуаций вплоть до -190 дБн/Гц при отстройках от несущей более 100 кГц на частоте 100 МГц [15].

На настоящий момент наибольший интерес для применения в радиолокационной и измерительной технике представляет СВЧ-диапазон. Однако при умножении сигнала кварцевых ВЧ-генераторов ухудшается спектральная плотность мощности частотных флуктуаций (при умножении сигнала частотой 100 МГц до 1000 МГц деградация составляет минимум 20 дБ).

Сравнение свойств рассмотренных типов АГ позволяет заключить, что наиболее перспективными являются АГ на ПАВ. С одной стороны, они формируют сигналы с частотой, относящейся к СВЧ-диапазону, с другой – по сравнению с другими представителями АГ СВЧ-диапазона обладают относительно высокими значениями как кратковременной, так и долговременной стабильности частоты формируемых сигналов. Кроме того, они обладают низкой спектральной плотностью мощности частотных флуктуаций (вплоть до -180 дБн/Гц) при отстройках от несущей более 100 кГц на частотах не менее 500 МГц [16–19]. Таким образом, используя АГ на ПАВ в СВЧ-диапазоне, удастся достичь выигрыш на $5...10$ дБ по уровню спектральной плотности мощности частотных флуктуаций над АГ на кварцевых резонаторах при умножении их выходного сигнала до СВЧ-диапазона, на отстройках от несущей частоты более 100 кГц. Однако рассматриваемым АГ присущи все недостатки, свойственные их ближайшим аналогам – кварцевым генераторам: высокая чувствительность к температуре окружающей среды и воздействию вибраций. Однако применение специальных конструктивных и схемотехнических решений позволяет значительно уменьшить их подверженность влиянию внешних факторов [19–21].

ПАВ-генераторы могут быть построены на однопортовых или двухпортовых резонаторах, а также на линиях задержки [22]. В табл. 1

представлены некоторые наиболее часто упоминаемые в публикациях указанные устройства, а также их основные параметры.

Частотные свойства однопортовых резонаторов на ПАВ и кварцевых резонаторов на объемных акустических волнах схожи, благодаря чему для построения генератора на ПАВ-резонаторах используют традиционные схемы кварцевых генераторов. Эти схемы, как известно, по принципу построения делятся на трехточечные схемы (индуктивные и емкостные) и на АГ, где резонатор выступает в качестве последовательного колебательного контура. В качестве активного элемента таких АГ могут быть использованы транзисторы или туннельные диоды. Диапазон частотной перестройки трехточечных схем заключен между частотами последовательного и параллельного резонансов, в силу чего даже для сильных пьезоэлектриков (с коэффициентом электромеханической связи не менее 0.1), таких как ниобат лития, он составляет $0.1...0.2$ % от номинального значения [22].

Схемы построения АГ на линиях задержки и на двухпортовых резонаторах на ПАВ идентичны в том смысле, что эти элементы включаются в цепь обратной связи АГ. Более того, поскольку они являются четырехполюсниками, то могут использоваться только в схемах АГ с трехполюсными активными элементами. Отличие между АГ этих типов заключается лишь в том, что линия задержки имеет потери, как правило, на $10...15$ дБ больше, чем резонаторы (табл. 1), что требует нескольких каскадов усиления сигнала в таких схемах. Указанные обстоятельства, в свою очередь, приводят к усложнению схем АГ, снижению их стабильности и весьма большим значениям фазового шума [22].

Анализ мировой литературы. Как следует из анализа отечественной и зарубежной литературы, первые упоминания о генераторах на ПАВ-резонаторах и о перспективности развития указанного направления начали появляться в 1965 – 1970 гг. Понимая перспективность применения данного вида продукции в военной и коммерческой аппаратуре, большинство ведущих фирм-производителей и научно-исследовательских институтов начали уделять все большее внимание проблемам улучшения

Табл. 1. Основные параметры некоторых выпускаемых в настоящее время резонаторов и линий задержки на ПАВ
 Tab. 1. Main parameters of some currently produced SAW resonators and delay lines

Модель	Производитель/страна	Номинальная частота, МГц	Вносимые потери, дБ
<i>Однопортовые резонаторы</i>			
A144-430.0M1	АЭК Дизайн/РФ	430	0.5
AE1474M-1064		1064	3
RT-400D	Бутис/РФ	400	0.9
RT-1000D		1000	1.5
TC0527B	TAI-SAW/Тайвань	600	2
TC0447A		904.3	2.2
ESR390E	Abracon Corporation/США	390	2
ASR915E		915	2.5
RO2131D	Murata Manufacturing/Япония	314.35	2.5
RSR-868.950-75-5035-TR	Raltron Electronics/США	868.950	2.0
ACTR965/868.35	Advanced Crystal Technology/Великобритания	868.35	2.2
SR2442B	SAW Components/Германия	2442	1.5
GSRs TC0556A	Golledge Electronics/Великобритания	1033.333	-
R1901	Qualcomm/США	315	1.8
SR5005	Vanlong Technology/США	915.5	2.2
R43392	Geyer Electronic /Германия	433.92	1.5
R868.35	SJK/Китай	868.35	2.1
R922	SJK/Китай	922.625	1.5
RO3144A-2	RFM Integrated/США	916.5	2.5
SR3-1000	WTL/Китай	1000	1.5
<i>Двухпортовые резонаторы</i>			
A174-500M1	АЭК Дизайн/РФ	500	4.1
A174-1532.25M1		1532.25	9.5
RT-403D55-2	Бутис/РФ	403.55	4.9
RT-1090D		1090	10
TD0116A	TAI-SAW/Тайвань	1090	10
TD0125A		915	8.5
NS-34R	EPSON TOYOCOM/Япония	800...2500	6
ACTQ963/868.0	Advanced Crystal Technology/Великобритания	868	8
ACTQ434/433.92		433.920	8
SR434G	SAW Components/Германия	433.920	9
SQ5002	Vanlong Technology/США	916.5	9
R1000	SJK/Китай	1000	6
<i>Линии задержки</i>			
A110-400M1	АЭК Дизайн/РФ	400	37
AE5683H-881.5		881.5	20
AE5683H-1960		1960	28
MBC-1029	Teledyne/США	500	40
MBC-1004		900	40
SDL74A	SAW Components/Германия	74	21.5
SDL868A		867.5	9
101136C	Microsemi/США	1575	24.7

таких характеристик АГ, как температурная и долговременная стабильность частот формируемого сигнала и снижение спектральной плотности мощности его частотных флуктуаций. Наряду с этим бурно развивается конструирование и повышение технологичности изготовления относительно простых и миниатюрных источников опорных сигналов СВЧ-диапазона для телекоммуникационного и связанного оборудования гражданского назначения.

В 1979 г. в журнале "Зарубежная радиоэлектроника" вышла обзорная статья "Генерация и синтез частот с применением приборов на поверхностных акустических волнах", в которой опубликовано обобщение мировых достижений в данной области на тот момент [23]. В 1980–1996 гг. Т. Е. Parker, J. A. Greer, G. K. Montress, J. Callerame, D. Andres и др. опубликовали цикл статей, посвященный проблемам улучшения таких характеристик АГ на

ПАВ-резонаторах, как спектральная плотность мощности частотных флуктуаций, чувствительность к вибрации, долговременная стабильность. Более того, в этот период появились первые упоминания о возможности достижения на частотах не менее 500 МГц при отстройках от несущей частоты более 100 кГц значений спектральной плотности мощности частотных флуктуаций ниже -180 дБн/Гц [16], что, безусловно, является значительным прогрессом, не оставляющим сомнений в перспективности применения АГ на ПАВ-резонаторах и достойным результатом по сей день. В рекламных проспектах и научных публикациях в журналах в период 1990–2005 гг. несколько десятков зарубежных фирм, таких как Andersen laboratories (США), Sawtek (США), Temex (Франция), Crystek Corporation (США), RF Monolithics (США), Rakon (Франция), Vectron (США), E2V (Великобритания) и т. д., предлагали свои АГ на ПАВ. Подавляющее большинство предложений касалось весьма миниатюрных и простых источников опорных сигналов на ПАВ, однако также были представлены более качественные экземпляры устройств, снабженных вибро- и акустозащитой, системой термостатирования, встроенным умножителем частоты, системой синхронизации с внешним сигналом и т. д. По мнению авторов настоящей статьи, осознание преимуществ более сложных АГ на ПАВ в военной технике (радиолокации) и разрешение проблем с использованием таких устройств в жестких условиях эксплуатации в совокупности с усложнением межгосударственных взаимоотношений привели к значительному снижению количества публикаций по данной теме и предложений на общемировом рынке в настоящее время.

Несмотря на весьма большой список как отечественных, так и зарубежных фирм – производителей акустoeлектронных устройств на ПАВ (табл. 1), востребованность и перспективность АГ на их основе как в военной технике, так и в различных областях гражданской продукции, на мировом рынке на сегодняшний день присутствует множество производителей относительно простых АГ на ПАВ (табл. 2) и всего несколько производителей, предлагающих более сложные и качественно лучшие в техническом плане

(в частности, виброзащищенные) модели (табл. 3). Отметим, что обеспечить рекордно низкие значения спектральной плотности мощности частотных флуктуаций формируемых сигналов АГ на ПАВ возможно только при применении двухпортовых резонаторов, обладающих на резонансной частоте высокими значениями собственной добротности Q [24–26] и приемлемыми значениями вносимых потерь (табл. 1).

Признанным мировым лидером в производстве АГ не только на кварцевых резонаторах, но и на ПАВ является фирма Rakon, которая предлагает несколько десятков различных моделей генераторов [27], таких как термокомпенсированные кварцевые генераторы (temperature compensated crystal oscillators – TCXO) с частотой 1.25...375 МГц и температурной стабильностью 0.05...10 ppm²; термостатированные кварцевые генераторы (oven-controlled crystal oscillators – OCXO), в том числе ультрамалозащумящие и высокостабильные, с частотой 10...130 МГц и температурной стабильностью 0.1...1000 ppb; миниатюрные нетермостатированные ПАВ-генераторы, управляемые напряжением (voltage controlled SAW oscillators – VCSO), с низким энергопотреблением (не более 200 мВт) в корпусе для поверхностного монтажа с номинальными частотами 800, 1000, 1600, 2000 МГц и относительно неплохими по сравнению с технически более сложными и дорогостоящими моделями собственного производства значениями спектральной плотности мощности частотных флуктуаций выходного сигнала (не хуже -170 дБн/Гц на частоте 1 ГГц при отстройке от несущей более 100 кГц); ультрамалозащумящие термостатированные ПАВ-генераторы (oven controlled SAW oscillators – OCSO), управляемые напряжением, и т. д., которые могут поставляться с системами виброзащиты, внешней/внутренней синхронизации, умножения частоты 320 МГц...10 ГГц и температурной стабильностью 1...3 ppm.

Рассмотрим особенности нескольких наиболее интересных представителей семейства OCSO фирмы Rakon с точки зрения электрических

² Здесь и далее ppm от англ. parts per million (частей на миллион) или $1 \cdot 10^{-6}$ о. е.

Табл. 2. Основные параметры некоторых выпускаемых в настоящее время АГ на ПАВ
 Tab. 2. Main parameters of some currently produced SAW generators

Модель/ производитель	Номинальная частота, МГц	Спектральная плотность мощности частотных флуктуаций, дБн/Гц, на отстройках		Диапазон рабочих температур, °С	Габаритные размеры, мм ³
		1 кГц	1 МГц		
LNO320B1/Rakon	320	-152	-180	0...+50	95×76×23
LNO1000B3/Rakon	10 000	-115	-151	0...+50	120×76×23
RSV2522/Rakon	1000	-115	-172	-40...+85	22×25×5
RK600N/Rakon	800	-105	-170	-20...+70	25×25×13
PE19XC7000/ Pasternack	500	-100	-150	-30...+70	50.8×38.1×15.24
PE19XC7004/ Pasternack	6000	-80	-135	-30...+70	50.8×38.1×15.24
PE19XP5004/ Pasternack	500	-95	-145	-30...+70	22.86×22.86×5.33
PE19XP5008/ Pasternack	6000	-80	-130	-30...+70	22.86×22.86×5.33
ГК261-С-ПВ1-2000/Элла	2000	-95	-130	-50...+65	142×52.2×23
ГПВ-2/Элла	616	-100	-	-60...+70	65×30×18.5
ГК141-С-ПВ10/Элла	1260	-90	-125	-40...+65	76×53×23
HFSO800-5H/Synergy	800	-123	-172	-20...+70	12.7×12.7×4.6
HFSO2000-5TC/Synergy	2000	-112	-166	-40...+85	19.05×19.05×4.2
NY13M09WA/NDK	1986.819	-97	-148	-10...+85	13.8×9.2×2.6
TS0032A/TAI-SAW	628.1737	-116	-170	-	13.7×9.4
EV-9000GB/Epson	2400	-95	-150	-20...+60	14×9×2.8
PS-701/Vectron	1000	-113	-155	-40...+85	7×5×2.5
PS-501/Vectron	1000	-112	-159	-40...+85	14.4×9.5×4.9
VS-403/Vectron	5898	-83	-140	-40...+85	19.9×13×5.9
CCSO-914X-1000/Crystek	1000	-115	-170	-40...+85	14.2×9.14×5.33
CVCSO-914SXT/Crystek	1600	-109	-165	-20...+70	14.2×9.14×5.33
RSV1850A/Geyer	1850	-	-140	-40...+85	8×6×1.8
RSV925A/Geyer	925	-80	-145	-40...+85	12.7×12.7×2.8
OCVCSO-1/IQD	800	-137	-167	-20...+60	25.4×22.0×13.2
MN725-0400.0000/API	400	-109	-160	-55...+85	25.4×22.0×5.08
MN725-2500.0000/API	2500	-97	-148	-55...+100	25.4×22.0×5.08
QT625S/Q-TECH	1000	-105	-168	-40...+85	15.9×15.9×3.8
VCSL7-800/Raltron	800	-98	-155	-40...+85	7.4×5.4×2.5
M692SDM/Renesas Electronics	1747.623	-	-	-10...+85	20×13×6.6
MSO-1000/Микран	1000	-114	-172	-40...+85	12.6×12.6×4
M630/Micro Networks	10 066	-65	-130	0...+70	41×46.5×12
M600/Micro Networks	900	-104	-145	-40...+85	18.5×10.5×9.4
CSA21-622.08M/Connor Winfield	622.08	-105	-155	0...+70	14.22×11.68×3.56
VCS571/CTS Electronic Components	622.08	-110	-143	-40...+85	7.52×5.18×2.68
NX72175001/ Diodes Incorporated	-	-	-	-	-
BT-700.000MBB-T/TXC Corporation	700	-	-	-10...+70	7×5×1.6
HO1081-3/RFM	1090	-90	-110	-55...+105	25.02×12.83×6.35
M675-02-CAT/IDT	500	-75	-142	-40...+85	7.49×5.08×3.05
VCSO2488.32/Sawtek	2488.32	-90	-165	-40...+85	19.05×19.05×3.81
852175/Triquint Semiconductor	800	-103	-168	-55...+85	25.4×12.7×3.6
KC7050S-L2/Кюссера	700	-	-	0...+70	7×5×2
101662.103/Microsemi	600	-123	-173	-40...+85	25.4×25.4×5.7

Табл. 3. Основные параметры некоторых выпускаемых в настоящее время виброзащищенных АГ на ПАВ
 Tab. 3. Main parameters of some currently produced vibration-proof SAW generators

Модель/ производитель	Номинальная частота, МГц	Спектральная плотность мощности частотных флуктуаций, дБн/Гц, на отстройках		Диапазон рабочих температур, °С	Габаритные размеры, мм ³
		1 кГц	1 МГц		
LNO320D1/Rakon	320	-152	-178	-40...+80	70×70×35
LNO480D1/Rakon	480	-145	-180	-35...+71	70×70×35
LNO500D1/Rakon	500	-142	-178	-40...+70	70×70×35
LNO640D1/Rakon	640	-146	-172	-40...+70	70×70×35
LNO1000D1/Rakon	1000	-135	-172	-40...+70	70×70×35
E2V/Teledyne	600, 1200	-	-	-	-
АГ на ПАВ/АФ	896	-140	-172	-60...+70	142×142×57

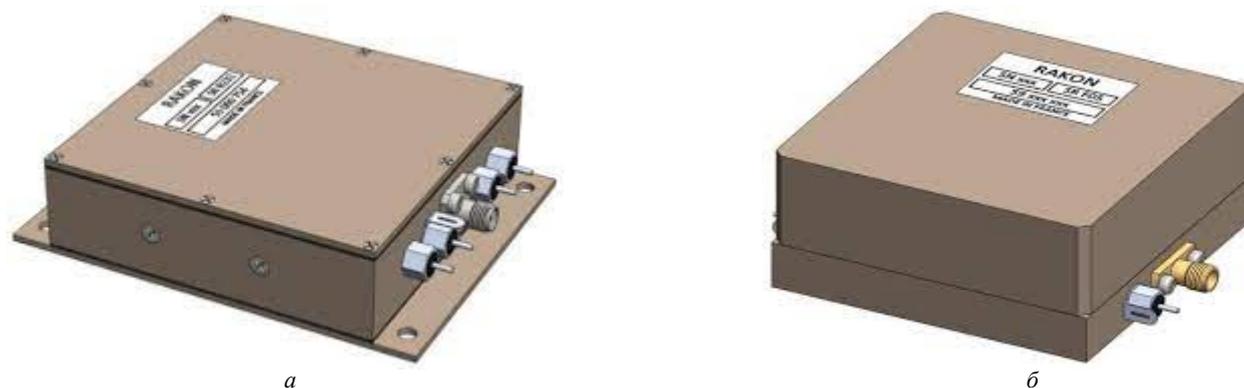


Рис. 1. Внешний вид OCSO LNO320B1 (а) и LNO320D1 (б)

Fig. 1. Appearance of OCSO LNO320B1 (a) and LNO320D1 (b)

параметров: спектральной плотности мощности частотных флуктуаций, стабильности частоты формируемых сигналов, чувствительности к вибрации. Генераторы LNO320B1 и LNO320D1, управляемые напряжением (здесь и далее окончание "D1" в обозначении модели генератора Rakon означает виброзащищенное исполнение), представляют собой термостатированные ПАВ-генераторы с номинальной частотой 320 МГц (рис. 1). Модификация LNO320B1 имеет более узкий диапазон рабочих температур (0...+50 °С) и температурную стабильность не хуже ± 1 ppm, а модель LNO320D1 имеет диапазон рабочих температур $-40...+80$ °С и температурную стабильность не хуже ± 2.5 ppm. Последняя модель, благодаря наличию системы виброзащиты, имеет стойкость к воздействию внешних ударов и вибраций и обладает G-чувствительностью не более 1 ppb/g на частоте внешнего воздействия 10 Гц (g – ускорение свободного падения) и не более 0.14 ppb/g на частоте внешнего воздействия 100 Гц. Указанная модель также снабжена системой фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ) (внешней синхронизации), предназначенной для повышения температурной и долговременной стабильности частоты формируемого сигнала, которая может быть использована при наличии внешнего опорного сигнала частотой 10 МГц. Рассмотренные модели обладают весьма достойными значениями спектральной плотности мощности частотных флуктуаций формируемых сигналов по сравнению с лучшими мировыми аналогами (рис. 2).

Для виброзащищенного исполнения LNO320D1 нормирована чувствительность к внешней вибрации (рис. 3).

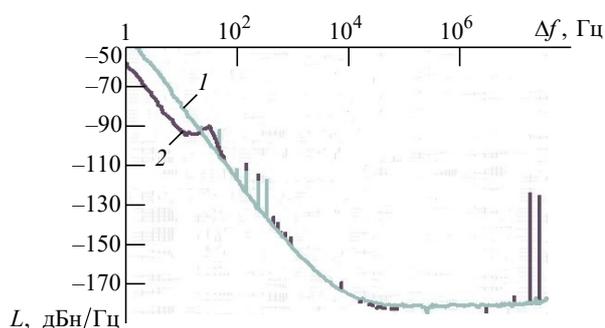


Рис. 2. Спектральная плотность мощности частотных флуктуаций моделей LNO320B1 и LNO320D1 фирмы Rakon: 1 – без внешней синхронизации; 2 – с внешней синхронизацией

Fig. 2. Phase noise spectral density of the Rakon LNO320B1 and LNO320D1 models: 1 – without external synchronization; 2 – with external synchronization

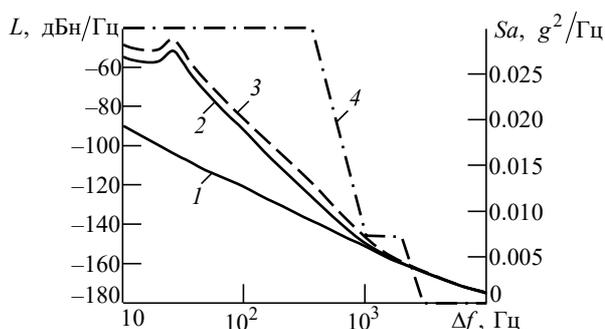


Рис. 3. Спектральная плотность мощности частотных флуктуаций модели LNO320D1 фирмы Rakon без воздействия и под воздействием внешней вибрации: 1 – без вибрации; 2 – при наличии внешней вибрации (типичные значения); 3 – при наличии внешней вибрации (гарантированные значения); 4 – спектральная плотность ускорения

Fig. 3. Phase power spectral density of the Rakon model LNO320D1 without and under the influence of external vibration: 1 – without vibration; 2 – under the influence of external vibration (typical values); 3 – under the influence of external vibration (guaranteed values); 4 – acceleration spectral density plot

Компания Rakon предлагает еще несколько АГ на ПАВ, управляемых напряжением, в виброзащищенном исполнении, аналогичных модели LNO320D1: LNO480D1, LNO500D1, LNO640D1, LNO1000D1, отличающихся друг от друга диапазоном рабочих температур и номинальной выходной частотой.

Еще одной интересной моделью компании является АГ LNO10000B3 без виброзащиты, но с термостатом и встроенной системой синхронизации с внешним сигналом. Номинальная частота данного АГ составляет 10 ГГц благодаря встроенному умножителю частоты высокой кратности (кратность равна 20). Наряду с этим указанная модификация имеет достаточно узкий диапазон рабочих температур (0...+50 °С) и температурную стабильность не хуже ± 2 ppm.

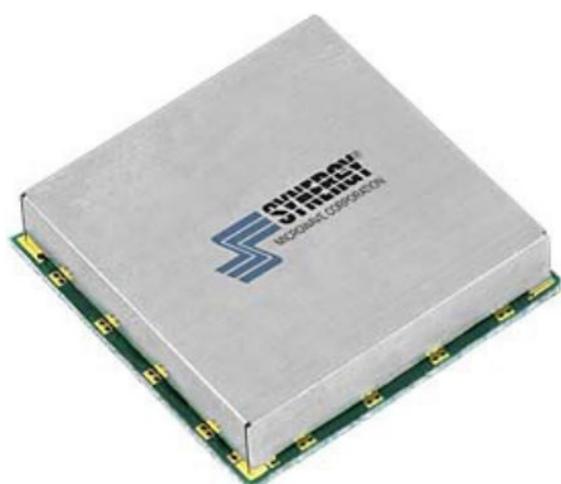
Еще одним зарубежным производителем АГ на ПАВ является компания E2V (Великобритания), представленная на мировом рынке единственным образцом (рис. 4), информации о котором в открытом доступе практически нет, так как компания позиционирует его как источник опорных колебаний военного назначения. Этот АГ работоспособен в широком диапазоне температур окружающей среды. Типичный диапазон формируемых частот составляет 600...1200 МГц. Он снабжен уникальной запатентованной системой виброзащиты, выходным усилителем, умножителем частоты и системой переключения выходной частоты [28].



Рис. 4. Внешний вид АГ на ПАВ компании E2V
Fig. 4. Appearance of the SAW oscillator from E2V

На момент подготовки настоящей статьи в открытом доступе отсутствует информация о других зарубежных производителях термостатированных /виброзащищенных АГ на ПАВ.

С другой стороны, на мировом рынке имеются еще несколько десятков компаний, выпускающих миниатюрные нетермостатированные ПАВ-генераторы, управляемые напряжением, в корпусе для поверхностного монтажа (рис. 5), что объясняется их относительной простотой, технологичностью и, как следствие, дешевизной. Так, например, американская фирма Synergy Microwave Corporation выпускает линейку таких АГ на частоты 800, 1000, 1200, 1500, 1600, 2000 МГц [29, 30], которые



а



б

Рис. 5. Внешний вид миниатюрных АГ на ПАВ для SMD-монтажа фирм Synergy Microwave Corporation (а) и Nihon Dempa Kogyo (б)

Fig. 5. Appearance of a miniature SAW oscillator for SMD mounting by Synergy Microwave Corporation (a) and Nihon Dempa Kogyo (b)

также обладают рекордно низким энергопотреблением. При этом по сравнению с аналогами от Rakon эти АГ имеют спектральную плотность мощности частотных флуктуаций хуже приблизительно на 5...10 дБ. Другой, не менее известной, фирмой – производителем АГ на ПАВ является Vectron International, чья линейка насчитывает несколько десятков различных моделей в диапазоне частот от 120 МГц до 7 ГГц, опционально обладающих низкой чувствительностью к внешним вибрациям (не более 0.6 ppb/g), стойкостью к ударным воздействиям (до 20 000 g) и низким энергопотреблением [31].

АГ, аналогичные выпускаемым Synergy Microwave Corporation и Rakon, производит японская фирма Nihon Dempa Kogyo. Генераторы этой фирмы выпускаются в корпусе для поверхностного монтажа с возможностью выбора номинальной частоты из диапазона 1680...2200 МГц [32]. Однако спектральная плотность мощности частотных флуктуаций АГ японского производителя приблизительно на 20 дБ хуже аналогов от Rakon. Необходимо отметить ПАВ-генераторы на частоту 628.1737 МГц в корпусе для поверхностного монтажа, выпускаемые тайваньской фирмой TAI-SAW Technology Co. Ltd [33], показывающие относительно неплохие значения спектральной плотности мощности частотных флуктуаций (не хуже –170 дБн/Гц при отстройке от несущей более 1 МГц), что несколько уступает аналогам от Rakon и японской фирмы EPSON TOYOCOM, производящей АГ на двухпортовых ПАВ-резонаторах собственного производства (NS-34R), способных работать вплоть до частот 2.5 ГГц. При этом помимо малых габаритов и низкого энергопотребления в последних упомянутых генераторах удалось достичь спектральной плотности мощности частотных флуктуаций не хуже –165 дБн/Гц при отстройке от несущей более 1 МГц на частоте 2.4 ГГц [34].

Отдельное место среди АГ на ПАВ зарубежного производства занимает продукция американской фирмы Pasternack Enterprises, выпускающей линейку АГ на ПАВ с фиксированной выходной частотой из ряда 0.5, 1, 2, 4, 6 ГГц в унифицированном прочном алюминиевом корпусе (рис. 6) со встроенной системой синхро-



Рис. 6. Внешний вид АГ на ПАВ фирмы Pasternack Enterprises

Fig. 6. Appearance of the oscillator on the SAW company Pasternack Enterprises

низации по внешнему эталонному сигналу частоты 10 или 100 МГц, не имеющих встроенной системы виброзащиты и термостатирования, однако способных функционировать в диапазоне рабочих температур от –30 до +70 °С и под воздействием внешних вибраций и ударов в соответствии с IAW MIL-STD-202 [35] (метод 213 (многократное ударное воздействие, амплитуда воздействия не более 50 g, длительность удара 11 мс ± 10 %) и метод 204, условия "А" (широкополосная случайная вибрация, со среднеквадратическим значением ускорения 0.06 g²/Гц в диапазоне 10...55 Гц, с последующим спадом 6 дБ/октаву)).

Достижения отечественной промышленности в области разработок АГ на ПАВ, по сравнению с общемировыми, на сегодняшний день выглядят довольно скромно, но при этом являются весьма достойными. Производством и изготовлением фильтров, резонаторов и линий задержки на ПАВ, в том числе с военной приемкой (ВП), занимаются такие отечественные предприятия, как ООО "АЭК Дизайн" (Санкт-Петербург), АО «НПП "Эталон"» (Омск), АО «НИТИ "Авангард"» (Санкт-Петербург), АО «НИИ "Элпа"» (Зеленоград). Однако по информации, имеющейся в открытом доступе, изготовлением АГ на ПАВ из указанного списка предприятий занимается только АО «НИИ "Элпа"».

Модельный ряд АГ, выпускаемых АО «НИИ "Элпа"», включает в себя несколько



Рис. 7. Внешний вид отечественных АГ на ПАВ ГК261-С-ПВ3 (а) и ГПВ-2 (б), выпускаемых АО «НИИ "Элма"»

Fig. 7. Appearance of the domestic oscillator on the SAW GK261-S-PV3 (a) and GPV-2 (b), manufactured by Elpa Research Institute JSC

различных модификаций, отличающихся друг от друга выходной номинальной частотой формируемого сигнала, возможностью электронной регулировки выходной мощности, дополнительной встроенной системой ФАПЧ при наличии внешнего эталонного сигнала, видом приемки (ОТК или ВП), конструктивным исполнением и массогабаритными показателями [36]. Рассмотрим модельный ряд этой фирмы более подробно.

Генераторы серии ГК261-С-ПВ (рис. 7, а) выпускаются на одну выходную номинальную частоту из фиксированного ряда частот 1500, 1750, 2000 МГц, имеют выходную мощность 0.1...3.2 мВт при температуре окружающей среды 25 ± 5 °С, диапазон рабочих температур $-50...+65$ °С, спектральную плотность мощности частотных флуктуаций на частоте 1500 МГц не хуже -75 дБн/Гц при отстройке от несущей более 100 Гц и не хуже -130 дБн/Гц при отстройке от несущей более 10 кГц. Возможна ВП. Производитель позиционирует данные АГ как элементы стабилизации в системах радиолокации, радионавигации и связи.

Генератор ГПВ-2 (рис. 7, б) имеет выходную номинальную частоту 616 МГц, выходную мощность 1...5 мВт, диапазон рабочих температур $-60...+70$ °С, спектральную плотность мощности частотных флуктуаций не хуже -100 дБн/Гц при отстройке от несущей более 1000 Гц. Возможна ВП. Производитель позиционирует данный АГ как элемент стабилизации в аппаратуре специального назначения.

Генераторы ГК141-С-ПВ (1...10) могут иметь одну выходную номинальную частоту из ряда 1.08, 1.10, 1.12, 1.14, 1.16, 1.18, 1.20, 1.22, 1.24, 1.26 ГГц, выходную мощность 4.5...9 мВт, диапазон рабочих температур $-40...+65$ °С, спектральную плотность мощности частотных флук-

туаций не хуже -90 дБн/Гц при отстройке от несущей более 1000 Гц и не хуже -125 дБн/Гц при отстройке от несущей более 10 кГц. Кроме того, указанная модель снабжена внутренней системой ФАПЧ от внешнего опорного генератора частотой 5 МГц. Ввиду того что данный АГ выполнен на импортной элементной базе, возможна поставка только с приемкой ОТК.

Несмотря на такие достоинства перечисленных моделей АГ, как широкий диапазон рабочих температур, герметичное исполнение, выполнение на отечественной элементной базе, относительно небольшие массогабаритные показатели, ВП, они сильно уступают зарубежным образцам по одному из важнейших параметров – спектральной плотности мощности частотных флуктуаций.

Наиболее перспективным АГ с точки зрения электрических характеристик и стойкости к внешним климатическим и механическим воздействиям как на отечественном, так и на мировом рынке, информация о котором имеется в открытом доступе, является АГ на ПАВ СВЧ-диапазона, разработанный в АО «НПП "Алмаз-Фазотрон"» (Саратов) (рис. 8) [20].

Указанная модель АГ имеет двойной термостат, что позволяет обеспечить малое время выхода на рабочий режим (не более 180 с) в диапазоне рабочих температур от -60 до $+70$ °С, и при необходимости может иметь встроенный умножитель частоты. Применение в этой модели буферного усилителя и малошумящего стабилизатора напряжения повышает качество формируемого СВЧ-сигнала. Номинальная частота формируемого сигнала 896 МГц, пределы электронной перестройки частоты не менее ± 25 ppm, выходная мощность не менее 18 дБм, габаритные размеры $\varnothing 142 \times 57$ мм² [20].



Рис. 8. Внешний вид отечественного АГ на ПАВ от АО «НПЦ "Алмаз-Фазотрон"» (верхняя крышка не показана)

Fig. 8. Appearance of the domestic oscillator on the SAW from JSC "NPC "Almaz-Fazotron" (top cover not shown)

На рис. 9 представлены достигнутые значения спектральной плотности мощности частотных флуктуаций. Неоспоримыми преимуществами указанной модели являются, во-первых, выполнение полностью на отечественной элементной базе, что делает возможным ее поставку с ВП, и, во-вторых, наличие системы пассивной виброзащиты, которая совместно с особой технологией крепления ПАВ-резонатора позволяет сохранять виброустойчивость при воздействии внешних вибраций с распределением, характерным для авиационной техники [20].

Рассмотренный образец по заявленным электрическим характеристикам не уступает лучшим образцам АГ на ПАВ от Rakon. Также в публикации [20] упоминается о проработке методов электронной компенсации деградации спектральной плотности мощности частотных флуктуаций под воздействием внешней вибра-

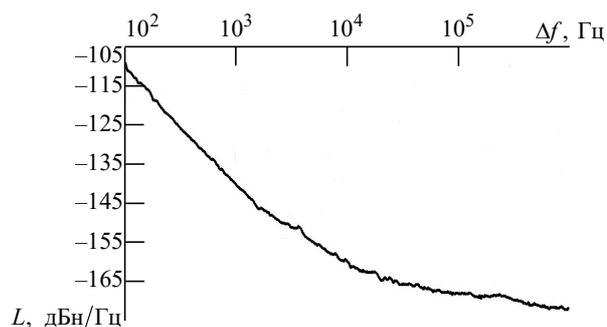


Рис. 9. Спектральная плотность мощности частотных флуктуаций АГ на ПАВ АО «НПЦ "Алмаз-Фазотрон"» (выходная частота 896 МГц)

Fig. 9. Power spectral density of the phase noise of a SAW oscillator from JSC "NPC "Almaz-Fazotron" (output frequency 896 MHz)

ции, что, бесспорно, является перспективным направлением совершенствования АГ на ПАВ.

Закключение. В заключение отметим, что, несмотря на многообразие производителей акустоэлектронных устройств (в частности, ПАВ-резонаторов) на мировом рынке, подавляющее большинство АГ на ПАВ являются весьма простыми и дешевыми источниками опорных сигналов исключительно гражданского назначения, неспособных функционировать в жестких условиях эксплуатации. Мировой рынок АГ на ПАВ, способных сохранять свои рабочие характеристики, в первую очередь низкий уровень спектральной плотности мощности частотных флуктуаций, в широком диапазоне рабочих температур, при воздействии внешних вибраций и акустических шумов, а также обладающих относительно малым временем готовности, представлен на данный момент всего двумя производителями.

Авторский вклад

Лойко Виталий Анатольевич – подготовка текста статьи и рисунков.

Добровольский Александр Александрович – подготовка текста статьи.

Кочемасов Виктор Неофидович – подготовка текста статьи.

Сафин Ансар Ризаевич – подготовка текста статьи.

Author's contribution

Vitaliy A. Loiko, preparation of the text and figures for the paper.

Alexander A. Dobrovolsky, preparation of the text for the paper.

Victor N. Kochemasov, preparation of the text for the paper.

Ansar R. Safin, preparation of the text for the paper.

Список литературы

1. Характеристики долговременной нестабильности водородных стандартов частоты и времени нового поколения / С. И. Донченко, И. Ю. Блинов, И. Б. Норец, Ю. Ф. Смирнов, А. А. Беляев, Н. А. Демидов, Б. А. Сахаров, В. Г. Воронцов // Измерительная техника. 2020. № 1. С. 35–38. doi: 10.32446/0368-1025it.2020-1-35-38
2. Рубидиевый стандарт частоты с импульсной лазерной накачкой: состояние и перспективы / С. А. Волков, Г. В. Герасимов, Н. О. Майкапар, Д. С. Сидоренков // Тр. Ин-та прикладной астрономии РАН. 2019. № 49. С. 17–22. doi: 10.32876/AplAstron.49.17-22
3. Васильев В. И. Повышение точности, стабильности и надежности квантового дискриминатора пассивного водородного стандарта частоты: автореф. дис. ... канд. техн. наук / НИИПИ "Кварц". Н. Новгород, 2011. 26 с. URL: https://viewer.rusneb.ru/ru/000199_000009_004852758?page=1&rotate=0&theme=white (дата обращения 13.05.2022)
4. Столяров И. И. Направления развития устройств синтеза сигнала резонатора в квантовых стандартах частоты с лазерной накачкой и детектированием // Радионавигация и время: тр. СЗРЦ концерна ВКО "Алмаз-Антей". 2021. № 7(15). С. 98–104.
5. Петров А. А. Методы улучшения метрологических характеристик квантовых стандартов частоты: дис. ... канд. физ.-мат. наук / АО РИПВ. СПб., 2021. 145 с. URL: http://iairas.ru/synopsises/petrovaa_disser.pdf (дата обращения 06.05.2022)
6. Ferrite-Based Microwave Oscillators / V. M. Gevorkyan, V. N. Kochemasov, A. R. Safin, A. V. Chenakin / 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecom-munications (SYNCHROINFO). Kaliningrad, 30 June–2 July 2021. Piscataway: IEEE, 2021. doi: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488394
7. Горевой А. В. Маломощные источники непрерывных сигналов СВЧ для измерительной техники: дис. ... канд. техн. наук / ТУСУР. Томск, 2017. 118 с. URL: https://postgraduate.tusur.ru/system/file_copies/files/000/000/384/original/Диссертация.pdf (дата обращения 13.05.2022)
8. Геворкян В. М., Кочемасов В. Н. Объемные диэлектрические резонаторы – основные типы, характеристики, производители. Ч. 1 // Электроника: наука, технология, бизнес. 2016. № 4. С. 62–76.
9. Борцов А. А. Лазерные оптоэлектронные генераторы с накачкой кванторазмерными лазерными диодами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / НИУ МЭИ. Москва, 2022. 40 с. URL: <https://mpei.ru/diss/Lists/Files/Abstracts/538-Автореферат.pdf> (дата обращения 13.05.2022)
10. Перестраиваемый спин-волновой оптоэлектронный СВЧ-генератор монохроматического сигнала / А. Б. Устинов, А. А. Никитин, В. В. Витько, Б. А. Калиникос // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2016. Т. 1, № 1. С. 338–342.
11. Improving thermal stability of optoelectronic oscillators / M. Kaba, H.-W. Li, A. S. Daryoush, J.-P. Vilcot, D. Decoster, J. Chazelas, G. Bouwmans, Y. Quiquempois, F. Deborgies // IEEE Microwave Magazine. 2006. Vol. 7, iss. 4. P. 38–47. doi: 10.1109/MMW.2006.1663988
12. An Ultra-Low Phase-Noise 20-GHz PLL Utilizing an Optoelectronic Voltage-Controlled Oscillator / A. Bluestone, D. T. Spencer, S. Srinivasan, D. Guerra, J. E. Bowers, L. S. Theogarajan // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2015. Vol. MTT-63, iss. 3. P. 1046–1052. doi: 10.1109/TMTT.2015.2397890
13. OEwaves, Inc. URL: <https://www.oewaves.com/ultra-wideband> (дата обращения 13.05.2022)
14. Белкин М., Лопарев А. Оптоэлектронный генератор – первое практическое устройство СВЧ-оптоэлектроники // Электроника: наука, технология, бизнес. 2010. № 6. С. 62–70.
15. Ultra low noise VHF crystal oscillators / Pascall Electronics. URL: <http://pascall.ru/pdfs/OCXOF.pdf> (дата обращения 30.01.2022)
16. Montress G. K., Parker T. E., Andres D. Review of SAW Oscillator Performance // 1994 Proc. of IEEE Ultrasonics Symp., Cannes, France, 31 Oct.–3 Nov. 1994. Piscataway: IEEE, 1994. P. 43–54. doi: 10.1109/ULTSYM.1994.401550
17. Bernardo R. P. SAW Voltage-controlled Oscillators // Microwave J. 2002. Vol. 45, iss. 9. P. 166–177.
18. Tatopoulos X. Compact Ultra-low Noise SAW Oscillator with reduced g-sensitivity for Radar applications // 2014 Intern. Radar Conf. Lille, France, 13–17 Oct. 2014. Piscataway: IEEE, 2014. P. 1–3. doi: 10.1109/RADAR.2014.7060383
19. Chomiki M. SAW Oscillators fly on Airborne Radars // Microwaves and RF. 2010. Vol. 49, № 6. P. 23–25.
20. Добровольский А. А., Лойко В. А. Сверхмалощный ПАВ-генератор СВЧ-диапазона на отечественной элементной базе для жестких условий эксплуатации // СВЧ-электроника. 2019. № 3. С. 14–18.
21. Lam C. S. Integration of SAW and BAW Technologies for Oscillator Applications // Intern. Workshop on SiP/Soc Integration of MEMS and Passive Components with RF ICs. Chiba, Japan, 2 March 2004. 39 p. URL: http://www.txccorp.com/download/tech_paper/2004-IWSIMPCRFC-1-English.pdf (дата обращения 06.05.2022)
22. Дворников А. А., Огурцов В. И., Уткин Г. М. Стабильные генераторы с фильтрами на поверхностных акустических волнах. М.: Радио и связь, 1983. 136 с.
23. Кочемасов В. Н. Генерация и синтез частот с применением приборов на поверхностных акустических волнах // Зарубежная радиоэлектроника. 1979, № 1. С. 96–132.
24. Montress G. K., Parker T. E. Design Techniques for Achieving State-of-the-art Oscillator Per-

formance // 44th Annual Symp. on Frequency Control. Baltimore, USA, 23–25 May 1990. Piscataway: IEEE, 1990. P. 522–535. doi: 10.1109/FREQ.1990.177540

25. Кревский М. А., Коробков Г. М., Свешников Б. В. Анализ фазовых шумов опорных источников высокостабильных сигналов на основе ПАВ-резонаторов // Материалы XVII координационного семинара по СВЧ-технике, Н. Новгород, 6–8 сент. 2011. С. 72. URL: <https://docplayer.com/26272166-Materialy-xvii-koordinacionnogo-nauchno-tehnicheskogo-seminara-po-svch-tehnike.html> (дата обращения 13.05.2022)

26. Малогабаритные малошумящие СВЧ-генераторы на основе резонаторов на поверхностных акустических волнах / И. Г. Анцев, Г. А. Сапожников, А. П. Алексеенко, Д. Н. Кербников // Электронная техника. Сер. 1: СВЧ-техника. 2013. № 3. С. 98–100.

27. Rakon. URL: <https://www.rakon.com> (дата обращения 30.01.2022)

28. Teledyne e2v. URL: <https://www.teledyne-e2v.com> (дата обращения 30.01.2022)

29. Synergy Microwave Corporation. URL: <https://www.synergymwave.com> (дата обращения 30.01.2022)

30. Poddar A. K., Rohde U. L. Adaptive mode-coupled harmonically tuned ultra low phase noise VCISO circuits // 2011 Joint Conf. of the IEEE Intern. Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS). San Francisco, USA, 2–5 May 2011. Proc. Piscataway: IEEE, 2011. doi: 10.1109/FCS.2011.5977780

31. Vectron International. URL: <https://www.vectron.com/products/vciso.aspx> (дата обращения 17.02.2022)

32. Nihon Dempa Kogyo. URL: <https://www.ndk.com/en/products/index.html> (дата обращения 30.01.2022)

33. TAI-SAW Technology Co. Ltd. URL: <https://www.taisaw.com/en/product.php> (дата обращения 30.01.2022)

34. EPSON TOYOCOM. URL: https://www5.epsondevice.com/en/information/technical_info/pdfsawres_sawosc.pdf (дата обращения 30.01.2022)

35. MIL-STD-202G URL: <https://nepp.nasa.gov/DocUploads/1F6AB74B-4517-4AD0-A34813268E75B8EB/MIL-STD-202.pdf> (дата обращения 13.05.2022)

36. НИИ "ЭЛПА". URL: <https://www.elpapiezo.ru/Datasheets/GK261-C-PV.pdf> (дата обращения 30.01.2022)

Информация об авторах

Лойко Виталий Анатольевич – инженер по специальности "Радиотехника" (Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., 2013), аспирант кафедры формирования и обработки радиосигналов Национального исследовательского университета (НИУ) "МЭИ", начальник отдела в ООО "Радиокомп". Автор 19 научных работ. Сфера научных интересов – стабилизация частоты колебаний, генераторы на поверхностных акустических волнах, виброзащита.

Адрес: ООО "Радиокомп", пр. Волгоградский, д. 42, Москва, 109316, Россия
E-mail: Lvitalika@yandex.ru

Добровольский Александр Александрович – инженер по специальности "Полупроводники и диэлектрики" (Ленинградский ордена Ленина политехнический институт им. М. И. Калинина, 1976), инженер-разработчик ООО "Радиокомп". Автор более 40 научных работ. Сфера научных интересов – кварцевые генераторы, генераторы на поверхностных акустических волнах, виброзащита.

Адрес: ООО "Радиокомп", пр. Волгоградский, д. 42, Москва, 109316, Россия
E-mail: dobr.burdin@gmail.com

Кочемасов Виктор Неофидович – кандидат технических наук по специальности "Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения" (Московский энергетический институт, 1976), генеральный директор ООО "Радиокомп". Автор более 150 научных работ, включая четыре монографии и более сорока авторских свидетельств на изобретения. Сфера научных интересов – радиотехника, устройства формирования и обработки радиосигналов, фильтры СВЧ, синтезаторы частот и сигналов.

Адрес: ООО "Радиокомп", пр. Волгоградский, д. 42, Москва, 109316, Россия
E-mail: kochemasovdv@gmail.com

Сафин Ансар Ризаевич – кандидат технических наук по специальности "Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения" (2014), доцент, заведующий кафедрой формирования и обработки радиосигналов НИУ "МЭИ", старший научный сотрудник ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, начальник отдела в ООО "Радиокомп". Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – радиофизика и электроника, физика магнитных явлений, спинтроника.

Адрес: ООО "Радиокомп", пр. Волгоградский, д. 42, Москва, 109316, Россия
E-mail: arsafin@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6507-6573>

References

1. Donchenko S. I., Blinov I. Y., Norets I. B., Smirnov Y. F., Belyaev A. A., Demidov N. A., Sakharov B. A., Vorontsov V. G. The Long-Term Instability of the New Generation Hydrogen Masers. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques]. 2020, no. 1, pp. 35–38. doi: 10.32446/0368-1025it.2020-1-35-38 (In Russ.)
2. Volkov S. A., Gerasimov G. V., Maikapar N. O., Sidorenkov D. S. Rubidium Clock with Pulsed Laser Pumping: State and Prospects. *Transactions of the Institute of Applied Astronomy RAS*. 2019, no. 49, pp. 17–22. doi: 10.32876/ ApplAstron.49.17-22 (In Russ.)
3. Vasil'ev V. I. Improving the Accuracy, Stability and Reliability of the Quantum Discriminator of the Passive Hydrogen Frequency Standard. Available at: https://viewer.rusneb.ru/ru/000199_000009_004852758?page=1&rotate=0&theme=white (accessed 13.05.2022)
4. Stolyarov I. I. The Development Ways of Resonator Signal Synthesis Devices in Quantum Frequency Standards with Laser Pumping and Detecting. *Radio Navigation and Time*. 2021, no. 7(15), pp. 98–104. (In Russ.)
5. Petrov A. A. Methods for Improving the Metrological Characteristics of Quantum Frequency Standards. Available at: http://iairas.ru/synopsises/petrovaa_disser.pdf (accessed 06.05.2022)
6. Gevorkyan V. M., Kochemasov V. N., Safin A. R., Chenakin A. V. Ferrite-Based Microwave Oscillators. 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). 30 June–2 July 2021, Kaliningrad. Piscataway, IEEE, 2021. doi: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488394
7. Gorevoy A. V. Low-Power Sources of Continuous Microwave Signals for Measuring Equipment. Available at: https://postgraduate.tusur.ru/system/file_copies/files/000/000/384/original/Диссертация.pdf (accessed 13.05.2022)
8. Gevorkyan V., Kochemasov V. Cavity Dielectric Resonators – Basic Types, Characteristics, Manufacturers. Part 1. *Electronics: STB*. 2016, no. 4, pp. 62–76. (In Russ.)
9. Bortsov A. A. Laser Optoelectronic Oscillators Pumped by Quantum-Well Laser Diodes. Available at: <https://mpei.ru/diss/Lists/Files/Abstracts/538-Автореферат.pdf> (accessed 13.05.2022)
10. Ustinov A. B., Nikitin A. A., Vit'ko B. B., Kalinikos B. A. Tunable Spin-Wave Optoelectronic SHF Monochromatic Signal Generator. *Electronics and Microelectronics SHF*. 2016, vol. 1, no. 1, pp. 338–342. (In Russ.)
11. Kaba M., Li H-W., Daryoush A. S., Vilcot J-P., Decoster D., Chazelas J., Bouwmans G., Quiquempois Y., Deborgies F. Improving Thermal Stability of Optoelectronic Oscillators. *IEEE Microwave Magazine*. 2006, vol. 7, iss. 4, pp. 38–47. doi: 10.1109/MMW.2006.1663988
12. Bluestone A., Spencer D. T., Srinivasan S., Guerra D., Bowers J. E., Theogarajan L. S. An Ultra-Low Phase-Noise 20-GHz PLL Utilizing an Optoelectronic Voltage-Controlled Oscillator. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. 2015, vol. MTT-63, iss. 3, pp. 1046–1052. doi: 10.1109/TMTT.2015.2397890
13. OEwaves, Inc. Available at: <https://www.oewaves.com/ultra-wideband> (accessed 13.05.2022)
14. Belkin M., Loparev A. Optoelectronic Generator. Practically the First Microwave Optoelectronic Device. *Electronics: STB*. 2010, no. 6, pp. 62–70. (In Russ.)
15. Ultra low noise VHF crystal oscillators. Pascall Electronics. Available at: <http://pascall.ru/pdfs/OCXOF.pdf> (accessed 30.01.2022)
16. Montress G. K., Parker T. E., Andres D. Review of SAW Oscillator Performance. 1994 Proc. of IEEE Ultrasonics Symp., 31 Oct.–3 Nov. 1994, Cannes, France. Piscataway, IEEE, 1994, pp. 43–54. doi: 10.1109/ULTSYM.1994.401550
17. Bernardo R. P. SAW Voltage-controlled Oscillators. *Microwave Journal*. 2002, vol. 45, iss. 9, pp. 166–177.
18. Tatopoulos X. Compact Ultra-low Noise SAW Oscillator with reduced g-sensitivity for Radar applications. 2014 Intern. Radar Conf. 13–17 Oct. 2014, Lille, France. Piscataway, IEEE, 2014, 3 p. doi: 10.1109/RADAR.2014.7060383
19. Chomiki M. SAW Oscillators fly on Airborne Radars. *Microwaves and RF*. 2010, vol. 49, no. 6, pp. 23–25.
20. Dobrovol'skii A. A., Loiko V. A. Ultra-Low-Noise Microwave SAW Generator Based On Domestic Element Base For Harsh Operating Conditions. *Microwave Electronics*. 2019, no. 3, pp. 14–18. (In Russ.)
21. Lam C. S. Integration of SAW and BAW Technologies for Oscillator Applications. Available at: http://www.txccorp.com/download/tech_paper/2004-IWSIMPCRFC-1-English.pdf (accessed 06.05.2022)
22. Dvornikov A. A., Ogurtsov V. I., Utkin G. M. *Stabil'nye generatory s fil'trami na poverkh-nostnykh akusticheskikh volnakh* [Stable Generators with Filters on Surface Acoustic Waves]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1983, 136 p. (In Russ.)
23. Kochemasov V. N. Generation and Synthesis of Frequencies Using Devices Based on Surface Acoustic Waves. *Foreign Radio Electronics*. 1979, no. 1, pp. 96–132. (In Russ.)
24. Montress G. K., Parker T. E. Design Techniques for Achieving State-of-the-art Oscillator Performance. 44th Annual Symp. on Frequency Control. 23–25 May 1990, Baltimore, USA. Piscataway, IEEE, 1990, pp. 522–535. doi: 10.1109/FREQ.1990.177540
25. Krevskiy M. A., Korobkov G. M., Sveshnikov B. V. Phase Noise Analysis of Reference Sources of Highly Stable Signals Based on SAW Resonators. Available at: <https://docplayer.com/26272166-Materialy-xvii-koordinacionnogo-nauchno-tehnicheskogo-seminara-po-svch-tehnikе.html> (accessed 13.05.2022)
26. Antsev I. G., Sapozhnikov G. A., Alekseenko A. P., Kerbnikov D. N. Small-sized Low-Noise Microwave Generators Based on Surface Acoustic Wave Resonators. *Electronic Equipment. Series 1: Microwave Technology*. 2013, no. 3, pp. 98–100. (In Russ.)

27. Rakon. Available at: <https://www.rakon.com> (accessed 30.01.2022)
28. Teledyne e2v. Available at: <https://www.teledyne-e2v.com> (accessed 30.01.2022)
29. Synergy Microwave Corporation. Available at: <https://www.synergymwave.com> (accessed 30.01.2022)
30. Poddar A. K., Rohde U. L. Adaptive mode-coupled harmonically tuned ultra low phase noise VCISO circuits. 2011 Joint Conf. of the IEEE Intern. Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS). 2–5 May 2011, San Francisco, USA. Proc. Piscataway, IEEE, 2011. doi: 10.1109/FCS.2011.5977780
31. Vectron International. Available at: <https://www.vectron.com/products/vciso.aspx> (accessed 17.02.2022)
32. Nihon Dempa Kogyo. Available at: <https://www.ndk.com/en/products/index.html> (accessed 30.01.2022)
33. TAI-SAW Technology Co. Ltd. Available at: <https://www.taisaw.com/en/product.php> (accessed 30.01.2022)
34. EPSON TOYOCOM. Available at: https://www5.epsondevice.com/en/information/technical_info/pdfsawres_sawosc.pdf (accessed 30.01.2022)
35. MIL-STD-202G Available at: <https://npp.nasa.gov/DocUploads/1F6AB74B-4517-4AD0-A34813268E75B8EB/MIL-STD-202.pdf> (accessed 13.05.2022)
36. ELPA. Available at: <https://www.elapiezo.ru/Datasheets/GK261-C-PV.pdf> (accessed 30.01.2022)

Information about the authors

Vitaliy A. Loiko, engineer, specialty "Radio Engineering" (Saratov State Technical University n. a. Yu. A. Gagarin, 2013), postgraduate student of the Department of Formation and Processing of Radio Signals (FORS) of the National Research University (NRU) MPEI, head of the department of Radiocomp LLC. The author of 19 scientific papers. Area of expertise: vibration frequency stabilization, surface acoustic wave generators, vibration protection. Address: Radiocomp LLC, 42, Volgogradsky Ave., Moscow 109548, Russia
E-mail: Lvitalika@yandex.ru

Alexander A. Dobrovolsky, engineer, specialty "Semiconductors and dielectrics" (Leningrad Polytechnic Institute n. a. M. I. Kalinin, 1976), development engineer of LLC "Radiocomp". The author of more than 40 scientific papers. Area of expertise: quartz generators, generators on surface acoustic waves, vibration protection. Address: Radiocomp LLC, 42, Volgogradsky Ave., Moscow 109548, Russia
E-mail: dobr.burdin@gmail.com

Victor N. Kochemasov, Cand. Sci. (Eng.) in the specialty "Radio engineering including television systems and devices" (1976), General Director of Radiocomp LLC. Author of over 150 scientific papers, including four monographs and over forty copyright certificates for inventions. Area of expertise: radio engineering, devices for the generation and processing of radio signals, microwave filters, synthesizers of frequencies and signals. Address: Radiocomp LLC, 42, Volgogradsky Ave., Moscow 109548, Russia
E-mail: kochemasovdv@gmail.com

Ansar R. Safin, Cand. Sci. (Eng.) in the specialty "Radio engineering including television systems and devices" (2014), head of the department of radio signal generation and processing, NRU "MPEI", senior researcher at the Institute of Radio Technologies and Electronics of the Russian Academy of Science Named after V. A. Kotelnikov, head of the department of Radiocomp LLC. The author of more than 50 scientific papers. Area of expertise: radio-physics and electronics, physics of magnetic phenomena, spintronics. Address: Radiocomp LLC, 42, Volgogradsky Ave., Moscow 109548, Russia
E-mail: arsafin@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6507-6573>